Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Hydrogeochemistry and water quality study of Gonabad's Salaseh Qanat

Atefeh Jafarzadeh[1], Yousef Ramezani[2,3]✉, Hojat Mirani Moghadam[4]

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: y.ramezani@birjand.ac.ir
3. Member of the Unconventional Water Resources Research Group, University of Birjand, Birjand, Iran.
4. Khorasan Razavi Regional Water Authority, Mashhad, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 03 July 2026
Accepted 14 September 2026

Keywords:
Qanat, water quality, combination diagrams, cation exchange.

ABSTRACT

One of the most unique qanats inGonabad Plain is the Salaseh Qanat. A qanat that has a single mother well and is divided downstream into three branches: Mend, Deluei, and Khaibari.Given the importance of this Qanat in supplying water to the three villages mentioned, it is essential to conduct a study on the quality and origin of its water. In this study, sampling and chemical analysis were conducted fromoutlet of itsthree branches in March 2025.Also, data on the analysis of the Deluei branch from 2021 to the present were received from the KhorasanRazavi Regional Water Company. Based on the results of the chemical analysis of March 2025, the amount of dissolved solids in the water of the Qanat branches varies from 1231 to 1529 mg/liter. The type and facies of the water in the Mend and Khaibari branches are sodium sulfate, and in the Deluei branch is sodium bicarbonate. According to the Piper diagram, the Qanat water samples are in the category of salty water. According to the composition diagrams, the Qanat water samples have excess sodium relative to chloride and less calcium and magnesium relative to sulfate and bicarbonate, which is due to the dissolution of sodiumand calcium sulfate, as well as normal cation exchange reactions between water and clay minerals in the aquifer. Hydrogeochemical results indicate that the water quality of the qanat is good to acceptable for drinking. The water of all three qanat branches is hard and the hardness of the qanat water is temporary hardness caused by magnesium and calcium bicarbonates. In terms of agricultural use, the qanat water is suitable for agriculture in lands with high permeability. For industrial uses, the water of all three qanat branches has sedimentation properties.

Introduction

The world's most amazing technical achievement for groundwater extraction, invented by Iranians almost 3000 years ago, is the Qanat (Beaumont, 1971). Qanat is an environmentally friendly method of groundwater extraction in arid and semi-arid regions with minimal rainfall, such as Iran, Egypt, and Syria. Through the Qanat, renewable water from the aquifer is extracted and the natural balance of the aquifer is maintained, thus contributing to sustainable development (MiraniMoghadam et al., 2020). The Gonabad Salaseh Qanat is one of the most important qanats in the Gonabad Plain. It has a main branch and a main mother well, and is divided downstream into three branches: Khaibari, Deluie, and Mend. The total length of the qanat is 36 kilometers and the depth of its mother well is 135 meters. The current water flow of the qanat in the Khaibari, Deluie, and Mend branches is about 10, 11, and 20 liters per second, respectively. The chemical composition of water in the hydrological cycle changes due to many processes such as evaporation and transpiration, plant uptake, oxidation and reduction reactions, surface adsorption, cation exchange, dissolution and precipitation of minerals, mixing with other waters, pollution from fertilizers and pesticides, and biological reactions (Appelo and Postma, 2005). In order to identify such processes, it is necessary to study the chemical composition of groundwater. Preservation and maintenance of qanats to preserve the Karizi civilization requires conducting studies on them. In this study, the qualitative characteristics and chemical composition of the Gonabad Salaseh Qanat water are investigated to identify the dominant geochemical reactions and the origin of the main elements of the qanat water to identify the hydrogeochemical processes affecting the composition of the qanat water and the ability to use the qanat water for various purposes.

Materials and Methods

Description of the area

The Gonabad watershed is located in the east of the country and south of Khorasan Razavi Province. The total area of the Gonabad watershed is 1872 km2, of which 939 km2 are highlands and 933 km2 are plains. The highest point of this watershed is 2770 m and its lowest point is less than 990 m above sea level. The east, south and west of the Gonabad plain are surrounded by highlands. The channels that conduct runoff include several parallel channels from the

Cite this article: Jafarzadeh, A., Ramezani, Y., Mirani Moghadam, H. (2026). Hydrogeochemistry and water quality study of Gonabad's Salaseh Qanat. Journal of Engineering Geology, 20 (2), 193-218. https//doi.org/10.22034/jeg.2026.137459.0

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/jeg.2026.137459.0

south to the north that start from the southern highlands of the watershed, enter the Gonabad plain and exit from the outlet of the watershed in the north. The climate of the studied watershed is arid to semi-arid. The rainy season is from December to May and the dry season is from June to November.

Geology and hydrogeology of the study area

The oldest rock units of the area are limestones and dolomites belonging to the Permo-Triass, which formed the eastern heights of the Gonabad Plain. The geological formations of the Mesozoic era are the Shemshak Formation (Jurassic), which consists of sandstone, black shales, and calcareous shales and has a wide spread in the south and southeast of the range. This formation is faulted, and therefore many fractures have occurred in it. The Badamo Limestone is another Mesozoic formation belonging to the Late Jurassic that lies on the Shemshak Formation. This formation is exposed to a small extent in the southwest of the region. The Cretaceous formations that are exposed to a limited extent in the northeast, east, and south of the region consist of thick-bedded limestones. These formations are located in the northeast and east of the plain with an angular unconformity on Permian limestones and dolomites.

Intense volcanic activity occurred in the Paleogene period in the area. As a result of this activity, acidic igneous formations have been formed in the area. A significant spread of these rocks is exposed in the west and northwest of the Gonabad Plain. Neogene rock units include Pliocene conglomerates and younger sediments, including clay and marl formations that are exposed on the southern margin of the plain. These units form the bedrock of the plain's alluvial aquifer. Quaternary alluvial fans have been exposed on the plain surface, forming the Gonabad Plain alluvial zone, and the alluvial aquifer of this plain is located within them.

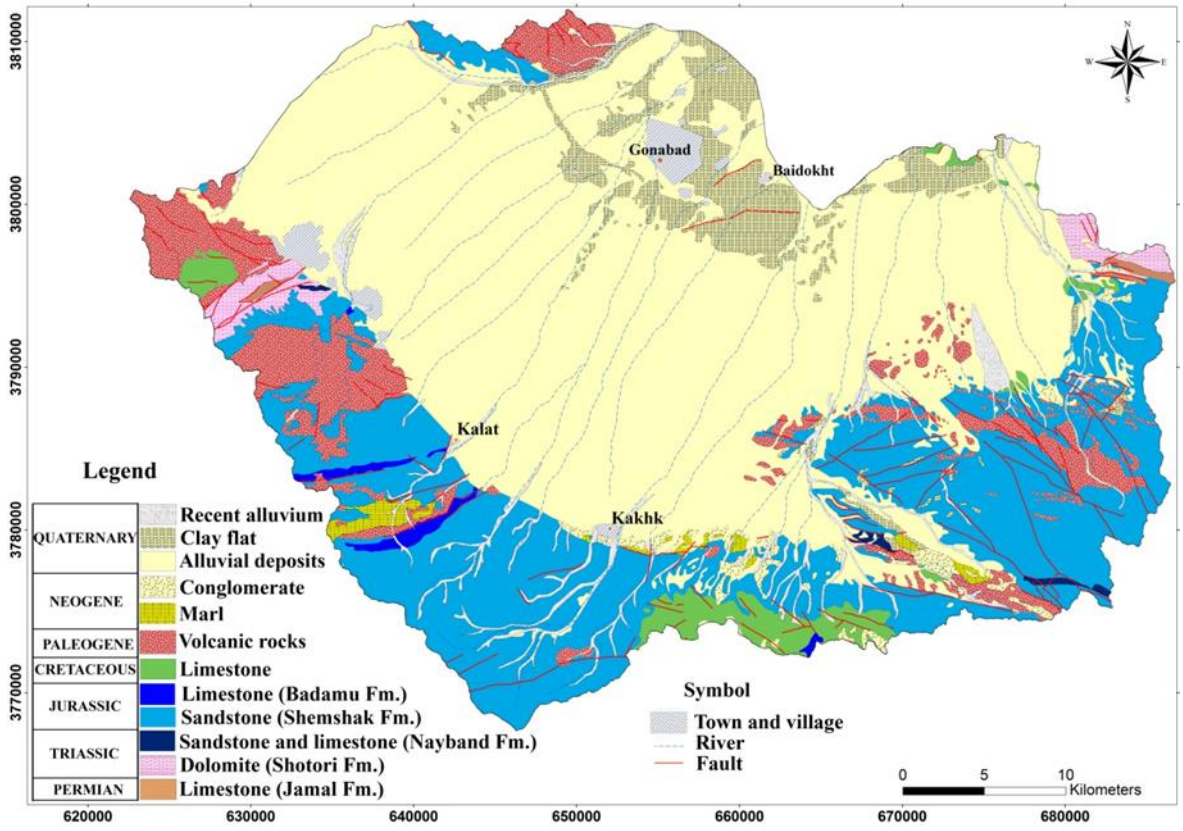


Fig. 1. Gological map of Gonabad Catchment

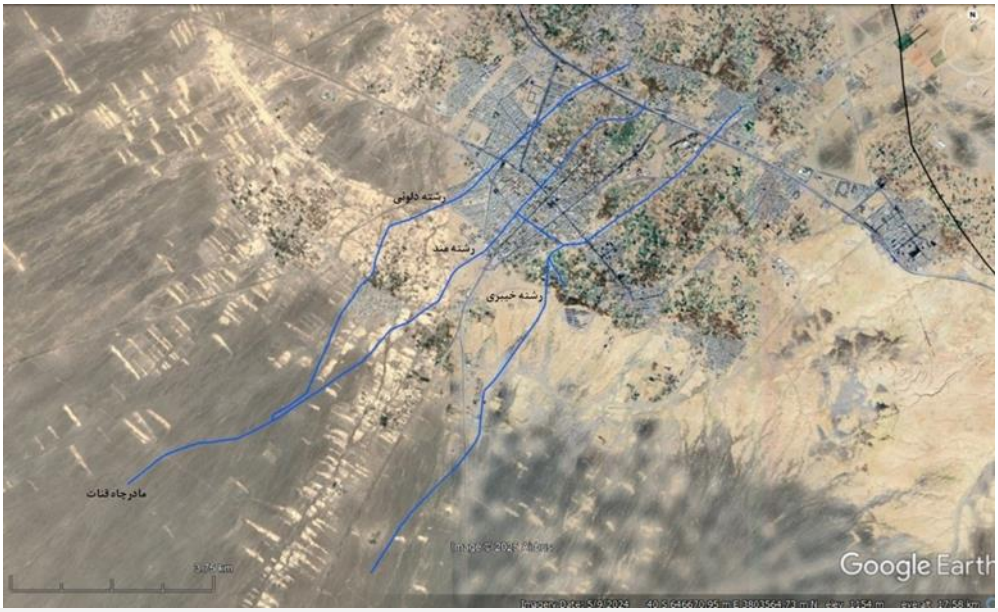


Fig.2. Salaseh Qanat in Gonabad Plain

To determine the concentration of the main anions and cations in the groundwater of the three main branches of the Gonabad Salaseh Qanat, including the Mend, Deluie, and Khaibari branches, three water samples were taken from the outlet branches in March 2025. The samples were analyzed in the laboratory of the Khorasan Razavi Regional Water Company. Also, the analysis data of the Deluie branch samples from 2021 to the present were received from the Regional Water Company. Before using the chemical data obtained from the analysis of water samples, it is necessary to check the accuracy of the laboratory analysis results. For this purpose, the error of the laboratory data was calculated using the Reaction Error relationship (concentrations in milliequivalents per liter).

Results and Discussion

Hydrogeochemical characteristics

The Stiff diagram of water samples from the Qanat three branches was prepared using AqQa software for samples from March 2025. As can be seen in the diagrams, the dominant cation in all samples is sodium, and there is no significant difference in the anion values of the samples. To determine the hydrogeochemical type and facies of the water samples, the Piper diagram (Piper, 1953) is used. According to this diagram, the water of all three qanat streams is in the brackish water type.

Chemical evolution and origin of groundwater

Combination or bivariate diagrams between dissolved elements are used in hydrogeochemical studies to identify geochemical processes affecting the composition of groundwater and determine the origin of its dissolved elements. By identifying the chemical composition of groundwater and determining the possible origin of its chemical components, based on the relationships between ions and combination diagrams, it is possible to comment more accurately on the water flow environment. Based on the sodium versus chloride diagram, water samples from the qanat have a higher sodium content than chloride, which is likely due to the dissolution of sodium sulfate (mirabilite) or the normal cation exchange of calcium in the water with sodium in clay minerals. According to the graph of $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ vs. $HCO_3^- + SO_4^{2-}$, the samples have higher sulfate and bicarbonate contents than calcium and magnesium.

The low amount of Ca^{2+} and Mg^{2+} in the samples, accompanied by a high amount of Na^+, indicates the intensity of the ion exchange reaction. The dissolution of gypsum increases the concentration of calcium and sulfate ions in water. As a result, the solubility of calcite in water will decrease under the influence of gypsum dissolution and the effect of the common ion Ca^{2+}, causing more calcite to precipitate. The dissolution of gypsum under the influence of H_2CO_3 or alkaline waters causes calcite to precipitate. As the amount of sodium in the waters of the region increases, the amounts of calcium and magnesium decrease and the amounts of sulfate and bicarbonate increase. There is a linear relationship between these

two parameters with a slope of -0.7, which indicates that the occurrence of cation exchange reactions in the waters of the Qanat catchment basin has a major role in controlling its chemical composition.

The quality of qanat water for drinking

To investigate the potability of the groundwater of the studied qanat, the semi-logarithmic Schoeller diagram (Schoeller, 1956) was used. Based on the Schuller diagram of the Gonabad Salaseh Qanat water samples, the water quality of the qanat branches is good to acceptable for drinking. The water in all three qanat branches is hard. The hardness of the Deluie qanat is the lowest and the Khaibari qanat is the highest. The hardness of the qanat water is temporary and disappears when the water is boiled.

Water quality of qanat for agricultural use

The electrical conductivity of water indicates the risk of salinity and the sodium absorption ratio (SAR) indicates the risk of sodium, which are two important criteria in classifying water for irrigation use. High concentrations of salts in water cause soil salinity, and high levels of sodium cause alkaline soil with a lack of calcium in the soil, ultimately leading to soil impermeability and reduced yields. To classify the water of the Salaseh qanat for agricultural use, the Wilcox diagram (Wilcox, 1955) and Chemistry software were used, which are based on the electrical conductivity (EC) and sodium absorption ratio (SAR).

The Wilcox diagram shows that all samples are in the C3S2 class. These waters, which are slightly saline to saline, are in the good to moderate category in terms of agriculture. Therefore, the groundwater of this qanat is suitable for agriculture with the necessary measures such as moderate soil leaching and the establishment of drainage networks.

Water quality for industrial purposes

The Langelier and Reisner saturation indices are used to classify water consumption in industry. Water with a negative Langelier coefficient is corrosive. A Langelier coefficient of zero is balanced water, and a Langelier coefficient greater than zero is sedimentary water. If the Reisner index is less than 6, it is scale-forming water, and if it is more than 7.5, it is corrosive water. The water of Qanat has sedimentation properties.

Conclusion

By examining the hydrogeochemical characteristics of the Gonabad Salaseh Qanat, it was determined that the water type of the Qanat is sulfate, carbonate, and chlorite, and the water facies of all three Qanat branches is sodium. The lowest electrical conductivity of the water was measured in the Deluie branch and the highest electrical conductivity was measured in the Khaibari branch. Weathering of silicates such as sodium and magnesium plagioclases, dissolution of carbonates, dissolution of evaporites, and normal cation exchange are the dominant hydrochemical processes in the groundwater of the Salaseh Qanat. In terms of drinking water, the water quality is good to acceptable. In terms of hardness, the water of the qanat is hard. The hardness of the qanat water is temporary hardness caused by magnesium and calcium bicarbonates, which precipitate when the water boils, and the water of the qanat becomes soft. In terms of agricultural use, the qanat water is suitable for agriculture in lands with high permeability. For industrial use, the qanat water has sedimentation properties.

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰
دانشگاه خوارزمی

بررسی هیدروژئوشیمی و کیفیت آب قنات ثلاثه گناباد

عاطفه جعفرزاده[۱]، یوسف رمضانی[۲و۳]✉، حجت میرانی مقدم[۴]

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: y.ramezani@birjanad.ac.ir
۳. عضو گروه پژوهشی آب های نامتعارف، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۴. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

کلیدواژه‌ها:
قنات، کیفیت آب، نمودارهای ترکیبی، تبادل کاتیونی.

چکیده

یکی از منحصر به فردترین قنات‌های دشت گناباد، قنات ثلاثه است. قناتی که دارای یک مادرچاه بوده و در پایین‌دست به ۳ رشته شامل مند، دلوئی و خیبری تقسیم می‌شود. با توجه به اهمیت این قنات در تامین آب ۳ روستای مذکور، انجام مطالعه در خصوص کیفیت و منشأ آب آن ضروری است. در این تحقیق از مظهر سه رشته در فروردین ماه ۱۴۰۴ نمونه برداری و آنالیز شیمیایی انجام گرفت. همچنین داده‌های آنالیز رشته دلوئی از سال ۱۴۰۰ تاکنون از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شد. براساس نتایج آنالیز شیمیایی فروردین ۱۴۰۴، میزان مواد جامد محلول آب رشته‌های قنات از ۱۲۳۱ تا ۱۵۲۹ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. تیپ و رخساره آب در رشته‌های مند و خیبری سولفاته سدیک و در رشته دلوئی بیکربناته سدیک است. براساس دیاگرام پایپر نمونه‌های آب قنات در رده آب‌های شور مزه قرار دارد. با توجه به دیاگرام‌های ترکیبی نمونه‌های آب قنات دارای سدیم اضافه نسبت به کلر و کلسیم و منیزیم کمتر نسبت به سولفات و بیکربنات است که این موضوع به دلیل انحلال سولفات سدیم و کلسیم و نیز واکنش‌های تبادل کاتیونی عادی بین آب و کانی‌های رسی داخل آبخوان است. نتایج هیدروژئوشیمیایی نشانگر این است که کیفیت آب رشته‌های قنات برای مصرف شرب خوب تا قابل قبول است. آب هر سه رشته قنات سخت و سختی آب قنات‌ها سختی موقت بوده که ناشی از بیکربنات‌های منیزیم و کلسیم است. از نظر مصرف کشارزی آب قنات برای کشاورزی در زمین‌های با نفوذپذیری بالا مناسب است. جهت مصارف صنعتی آب هر سه رشته قنات دارای خاصیت رسوب‌گذاری می‌باشند.

مقدمه

شگفت انگیزترین دستاورد فنی دنیا برای استخراج آب‌های زیرزمینی که تقریباً ۳۰۰۰ سال پیش توسط ایرانیان اختراع شده، قنات است (Beaumont, 1971). قنات روشی طرفدار محیط زیست برای استخراج آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک با کمترین بارش مانند ایران، مصر و سوریه است. از طریق قنات آب تجدیدپذیرآبخوان استخراج گردیده و بیلان طبیعی آبخوان حفظ می‌شود، بنابراین باعث توسعه پایدار می‌گردد (MiraniMoghadam et al., 2020). در مناطق خشک و نیمه خشک ایران از حدود ۳۰۰۰ سال پیش با حفر قنات تمدن کاریزی به وجود آمده و تاکنون ادامه دارد ولی در چند دهه گذشته با حفر چاه‌های عمیق و بهره برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی، قنات‌ها خشک گردیده و توسعه پایدار از بین رفته لذا تمدن کاریزی در خطر نابودی قرار گرفته است (MiraniMoghadam et al., 2021).

در هیدروژئوشیمی واکنش‌های بین آب و فاز سنگ را مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. با شناسایی واکنش‌های ژئوشیمیایی رخ داده در آبخوان یک محدوده، می‌توان تخمینی در خصوص تغییرات غلظت عناصر محلول در آب در طول مسیر جریان ارائه و روند تغییرات زمانی و مکانی آن ها را شناسایی نمود. ترکیب شیمیایی آب‌ها در چرخه هیدرولوژیکی به دلیل وقوع فرآیندهای زیادی مانند تبخیر و تعرق، جذب گیاهان، واکنش‌های اکسایش و احیا، جذب سطحی، تبادل کاتیونی، انحلال و ته‌نشست کانی‌ها، اختلاط با آب‌های دیگر، آلودگی ناشی از کودها و آفت کش‌ها و واکنش‌های زیستی تغییر می‌نماید (Appelo and Postma,

استناد: جعفرزاده، ع.، رمضانی، ی.، میرانی مقدم ح. (۱۴۰۵). بررسی هیدروژئوشیمی و کیفیت آب قنات ثلاثه گناباد. مجله زمین شناسی مهندسی، ۲۰ (۲)، ۲۱۸-۱۹۳.
https://doi.org/ 10.22034/jeg.2026.137459.0

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.

(2005). به منظور شناسایی چنین فرایندهایی بررسی ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی ضروری است.

درجه تکامل هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی به زمان ماندگاری آب درون آبخوان بستگی دارد (Moral et al., 2008).

واکنش‌های تبادل کاتیونی تعیین کننده غلظت نهایی عناصر اصلی محلول در آب زیرزمینی بوده که به دو صورت عادی (رابطه ۱) و معکوس (رابطه ۲) درون آبخوان مطابق معادله‌های زیر اتفاق می‌افتد (X نشان دهنده ترکیبات مبادله کننده مثلا کانی‌های رسی است):

$$2NaX + Ca^{2+} \rightarrow CaX + 2Na^{+} \quad (۱)$$

$$CaX + 2Na^{+} \rightarrow 2Na\,X + Ca^{2+} \quad (۲)$$

ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی در یک آبخوان تحت تاثیر ترکیب رسوبات و مواد آبخوان، تبخیر و تعریق، توپوگرافی، ترکیب شیمیایی آب تغذیه شده و شرایط ترسالی و خشکسالی است (Anderson et al., 1988).

میزان حلالیت مواد مختلف در آب، بستگی به جنس، مدت زمان تماس با آب و عوامل دیگری از قبیل وجود دی اکسید کربن و اکسیژن دارد. همچنین پارامترهای دیگری مانند اقلیم، پراکندگی زمانی و مکانی بارش و اثر عوامل مذکور بر پدیده هوازدگی و نیز میزان هوازدگی سنگ‌های مختلف نیز می‌توانند کیفیت آب‌ها را تحت تاثیر قرار دهند (Feth, 1981).

طبقه بندی رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی بر اساس مقادیر کاتیون ها و آنیون های عمده (برحسب meq/l) آب زیرزمینی صورت می‌گیرد (Sikdar et al., 2001). تیپ آب بر اساس غلظت غالب یکی از آنیون ها و رخساره بر اساس غلظت غالب یکی از کاتیون‌ها تعیین می شود. آب‌ها از نظر ترکیب شیمیایی به سه تیپ اصلی بی کربناته، سولفاته و کلروره تقسیم می‌شوند که هر کدام دارای سه رخساره کلسیک، منیزیک و سدیک است.

اکثر ویژگی‌های آبخوان و تاثیر عواملی که به نوعی با آب‌های زیرزمینی مرتبطند با بررسی تغییرات مقدار و نوع عناصر محلول در آب‌های زیرزمینی در طول مسیر جریان شناسایی می‌گردند. موارد مذکور که در مطالعات هیدروژئولوژی مهم هستند شامل شناسایی تشکیلات سنگی محدوده، مسیر جریان آب زیرزمینی، نحوه ارتباط آب‌های سطحی و زیرزمینی و شناسایی مناطق تخلیه و تغذیه سفره آب زیرزمینی می‌باشند. بنابراین بررسی‌های هیدروژئوشیمی راهکاری مناسب جهت شناسایی تاثیر عوامل مذکور بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی بوده و اطلاعات ارزشمندی در مورد تاثیر رسوبات و سنگ‌های تشکیل دهنده آبخوان و محدوده، سنگ کف آبخوان، اثرآب‌های سطحی بر آب‌های زیرزمینی، مسیر جریان آب زیرزمینی، مناطق تغذیه و تخلیه آبخوان و مناطق تبخیر از آب زیرزمینی ارائه می‌دهد.

نوع و مقدار عناصر محلول در آب زیرزمینی در نتیجه فرایندها و واکنش‌هایی است که خود تحت تاثیر عوامل بیرونی و درونی قرار می‌گیرند. شکل، وسعت و ضخامت آبخوان، میزان و نوع تخلخل، جنس سنگ‌ها و رسوبات همچنین خصوصیات ناحیه اشباع عوامل درونی می‌باشند. عوامل خارجی نیز شامل نوع و پراکندگی زمانی و مکانی بارش، میزان تغذیه آبخوان، عمق پوشش خاک، جنس واحدهای سنگی مجاور، میزان آب ورودی به آبخوان، پوشش گیاهی و مورفولوژی محدوده است (Raeisi and Karami, 1996).

ترکیب سنگ‌شناسی مسیر عبور آب و انحلال کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها یکی از عوامل اصلی تمرکز مقادیر بالای عناصر در آب است (Yuce et al., 2009).

در بین سنگ‌های مختلف، سازندهای تبخیری بیشتر مخرب کیفیت آب زیرزمینی هستند. در این سازندها به دلیل بالا بودن میزان سولفات، منیزیم و ترکیبات کلریدی و انحلال‌پذیری بالای این ترکیبات مذکور، مقدار مواد محلول آب زیرزمینی بسیار بالاست چنانکه در مقایسه با آب‌های زیرزمینی مناطق کربناتی مقدار محلول تا ۲۰۰۰ میلیگرم بر لیتر نیز می‌رسد (Davis and Dewist, 1966).

جیانگ و گو (Jiang and Guo, 2010) ضمن مطالعه هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی لینگسوی و با فرض اینکه آلاینده‌های انسان‌زاد از قبیل سولفات، کلراید، سدیم و نیترات در آبخوان‌های کم عمق بیشتر از آبخوان‌های عمیق می‌باشد به این نتیجه رسیدند که آب این چشمه از بخش عمیق آبخوان منشا می‌گیرد.

بریان و همکاران (Bryan et al., 2016) جهت نفوذ آب دریا به لنزهای آب شیرین در جزیره روتنست استرالیا از روش‌های هیدروشیمی استفاده کرده‌اند.

آکشیتا و همکاران (Akshitha et al., 2021) عوامل کنترل کننده غالب کیفیت و نفوذ آب دریا در آبخوان ساحلی کارناتا هند را بررسی کردند.

چن و همکاران (Chen et al., 2023) هیدروژئوشیمی آبخوان چند لایه جزیره دونگهای چین را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی یون‌های اصلی و کل مواد جامد محلول در آب‌های زیرزمینی کم عمق بیشتر از آب‌های زیرزمینی محصور بوده و آبخوان‌های مذکور تحت تاثیر نفوذ آب دریا قرار نگرفته‌اند.

کیفیت آب قنات‌های منطقه خور توسط هنری و همکاران (Honari et al., 2014) مورد مطالعه قرار گرفته است. آب قنات-های مذکور با وجود قرارداشتن مادرچاه آنها در دامنه تشکیلات آهکی، دارای تیپ بی‌کربناته نبوده است. وجود رسوبات تبخیری، مارنی و رسی در مسیر قنات باعث افزایش غلظت یون‌های سدیم و کلر در آب قنات‌ها گردیده و این افزایش شوری باعث رسوب کلسیم و کاهش غلظت آن در آب شده است.

با بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب قنات بیارجمند در طول یک سال مشخص شده که خواص مذکور تغییرات چندانی نداشته است. دلایل عمده یکنواختی خصوصیات آب این قنات دشتی بودن آن، چند رشته‌ای بودن و همگن بودن رسوبات آبرفتی آبخوان تأمین کننده آب قنات است (Kiani and Karami, 2011).

کیفیت آب قنات‌های میامی مورد مطالعه قرار گرفته است. مقادیر هدایت الکتریکی و میزان یون‌های محلول در آب به‌طور چشمگیری تحت تأثیر جنس سنگ‌ها و رسوبات موجود در محدوده است. حداقل مقدار هدایت الکتریکی در قناتی بود که منشأ آب آن از سازندهای آهکی است. حداکثر هدایت الکتریکی نیز مربوط به قناتی بود که حوضه آبگیر آن عمدتاً شامل شیل، مارن و ماسه‌سنگ است. تیپ آب‌های قنات‌های واقع شده در واحدهای سنگی مختلف متفاوت بوده است (Abasi and Karami, 2009).

دو قنات عنایت‌آباد و فاضلیه در بافق یزد توسط صالحی و همکاران (Salehi et al., 2004) بررسی شد، نتایج نشان داد که کوره این قنات‌ها از رسوبات نئوژن (ماسه، سیلت و رس و مقدار زیادی گچ و نمک) بوده و در طی مسافت حدود ۵ تا ۶ کیلومتر، آب باعث انحلال این املاح و کاهش کیفیت آب شده است.

لامبان و همکاران (Lambán et al., 2015) با آنالیز نمونه‌های آب ۲۹ چشمه در طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ در منطقه پنومپ اسپانیا رخساره‌های شیمیایی آب منطقه را کلسیم، منیزیم بیکربنات تشخیص دادند و این نتیجه رسیدند که اختلاف بین منطقه تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی نقش مهمی در تغییرات رخساره آب دارد.

لوپز چیکاکو و همکاران (López -chicaco et al., 2001) طی ۱۹ ماه از شش چشمه در آبخوان کربرا-الکید در اسپانیا نمونه‌برداری و خواص فیزیکوشیمیایی آنها را اندازه‌گیری نمودند. سپس اقدام به تعیین نسبت یونی و آنالیز چند متغیره داده‌ها نموده‌اند. نتایج نشان داد جریان آب در چشمه‌ها جریان افشان با یک جریان پیستونی بوده که همبستگی خوبی با بارش داشت. در طی مسیر جریان آب از کانی‌های تبخیری غنی می‌شده است.

آب‌های زیرزمینی به میزان کم یا زیاد حاوی املاح محلول هستند. نوع و میزان املاح به سنگ‌هایی که آب از آنها عبور نموده، سرعت جریان آب زیرزمینی، مسافت جریان آب و منشأ آب اولیه بستگی دارد. اکثر عناصر محلول در آب از انحلال سنگ‌ها و کانی‌ها می-باشد. با توجه به مدت زمان ماندگاری آب در زیر زمین و طول مسیر طی شده توسط آب ترکیب شیمیایی آن، از نظر مقدار و نوع عناصر محلول متغیر است.

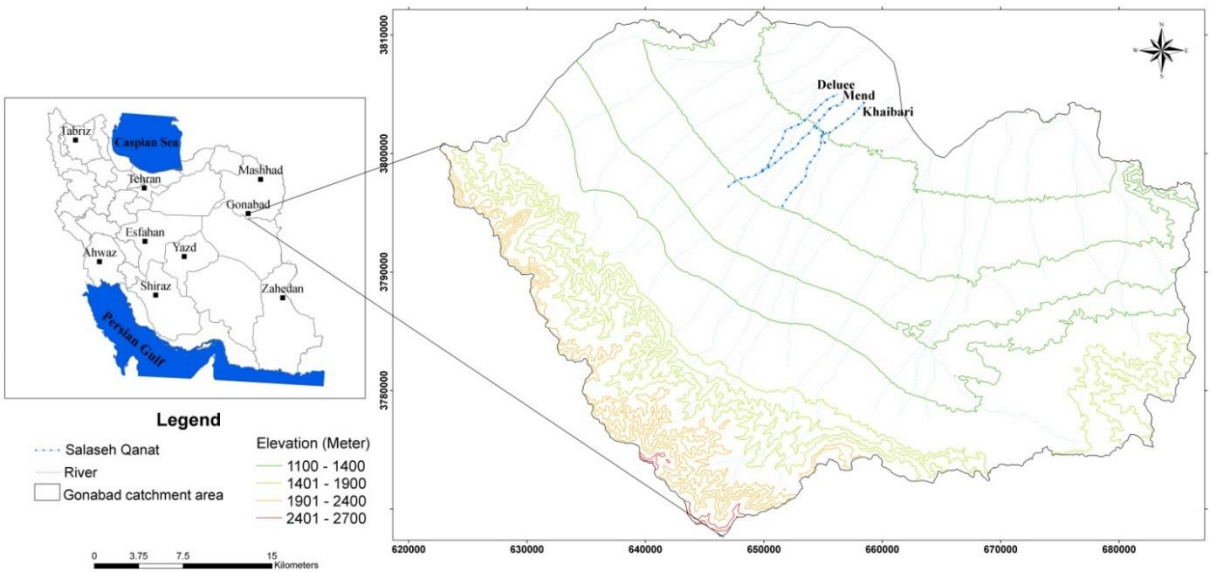
قنات ثلاثه گناباد یکی از مهمترین قنات‌های موجود در دشت گناباد است. قناتی که دارای یک رشته اصلی و یک مادرچاه بوده و در پایین‌دست به سه رشته خیبری، دلوئی و مند تقسیم می‌شود. طول کل قنات ۳۶ کیلومتر و عمق مادرچاه آن ۱۳۵ متر است. آبدهی قنات به ترتیب در رشته‌های خیبری، مند و دلوئی در حال حاضر حدود ۱۰، ۱۱ و ۲۰ لیتر در ثانیه است. حفظ و نگهداری قنات‌ها جهت حفظ تمدن کاریزی مستلزم انجام مطالعات در خصوص آن‌ها است. در این مطالعه، بررسی خصوصیات کیفی و ترکیب شیمیایی آب قنات ثلاثه گناباد جهت شناخت واکنش‌های

ژئوشیمیایی غالب و منشأ عناصر اصلی آب قنات جهت شناخت فرایندهای هیدروژئوشیمیایی موثر در ترکیب آب قنات و قابلیت مصرف آب قنات در مصارف مختلف مد نظر است.

مواد و روش‌ها

توصیف محدوده

حوضه آبریز گناباد در شرق کشور و جنوب استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱). کل حوضه آبریز گناباد ۱۸۷۲ کیلومترمربع وسعت داشته که ۹۳۹ کیلومترمربع آن ارتفاعات و ۹۳۳ کیلومترمربع دشت است. مرتفع‌ترین نقطه این حوضه ۲۷۷۰ متر و پست‌ترین نقطه آن کمتر از ۹۹۰ متر از سطح دریاست. شرق، جنوب و غرب دشت گناباد توسط ارتفاعات احاطه شده است. مسیل‌های هدایت کننده رواناب شامل چندین مسیل موازی از سمت جنوب به شمال است که از ارتفاعات جنوبی حوضه شروع شده، وارد دشت گناباد شده و از قسمت خروجی حوضه در شمال آن خارج می‌شوند. اقلیم حوضه مورد مطالعه خشک تا نیمه خشک است. دوره بارش از آذر تا اردیبهشت ماه و دوره خشک از خرداد تا آبان ماه می‌باشد. میانگین بارش در دشت ۱۴۵ میلیمتر و در ارتفاعات حوضه ۲۶۴ میلیمتر در سال است. پتانسیل تبخیر حوضه زیاد بوده چنانکه در دشت ۲۷۵۴ میلیمتر در سال و در ارتفاعات حوضه ۲۳۳۹ میلیمتر در سال است. متوسط دما در ارتفاعات حوضه ۱۸ درجه سانتیگراد و در دشت ۲۴ درجه سانتیگراد است. سردترین ماه سال دی ماه (متوسط دمای حداکثر ماهانه، ۹ درجه سانتیگراد) و گرمترین ماه سال تیر (متوسط دمای حداکثر ماهانه، ۳۶ درجه سانتیگراد) است (آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی محدوده گناباد، آب منطقه‌ای خراسان رضوی). قنات ثلاثه گناباد در در دشت محدوده قرار گرفته به طوریکه مادرچاه آن در جنوب دشت و به سمت شمال به ۳ رشته تقسیم و مظهر ۳ رشته در شمال شهر گناباد در ۳ روستای خیبری، مند و دلوئی قرار دارد (شکل ۲).



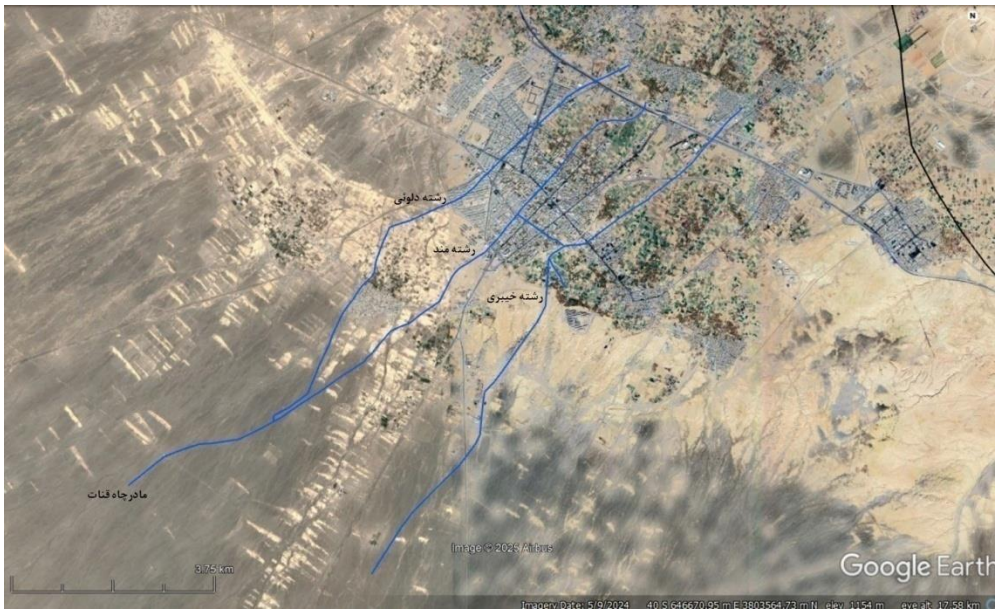
شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز گناباد در کشور به همراه موقعیت قنات ثلاثه در دشت گناباد

Fig.1. Location of the Gonabad catchment within the country, along with the location of SalasehQanat in Gonabad plain

زمین شناسی و هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

قدیمی‌ترین واحدهای سنگی محدوده، آهک و دولومیت‌های توده‌ای متعلق به پرموتریاس هستند که ارتفاعات شرق دشت گناباد را تشکیل داده‌اند (شکل ۳). سازندهای زمین شناسی دوران مزوزوئیک، سازند شمشک (ژوراسیک) است که از ماسه سنگ، شیل‌های سیاه رنگ و شیل‌های آهکی تشکیل شده و گسترش وسیعی در جنوب و جنوب شرقی محدوده دارد. این سازند گسل خورده بوده و به همین دلیل شکستگی‌های زیادی در آن به وجود آمده است. آهک بادامو از سازندهای دیگر مزوزوئیک متعلق به

ژوراسیک پایانی است که بر روی سازند شمشک قرار دارد. این سازند به میزان کم در جنوب‌غربی محدوده رخنمون دارد. سازندهای کرتاسه که در شمال‌شرق، شرق و جنوب محدوده به‌صورت محدود رخنمون دارند شامل سنگ آهک‌های ضخیم لایه است. این تشکیلات در شمال‌شرق و شرق دشت با دگرشیبی زاویه‌دار بر روی آهک‌ها و دولومیت‌های پرمین قرار دارند.



شکل۲. قنات ثلاثه گناباد در دشت گناباد

Fig. 2.Gonabad Salaseh Qanat in Gonabad Plain

فعالیت‌های آتشفشانی شدید در دوره پالئوژن در سطح محدوده رخ داده است. در نتیجه این فعالیت‌ها تشکیلات آذرین اسیدی در محدوده بوجود آمده‌اند. گسترش قابل توجهی از این سنگ‌ها در غرب و شمال‌غرب دشت گناباد رخنمون دارد.

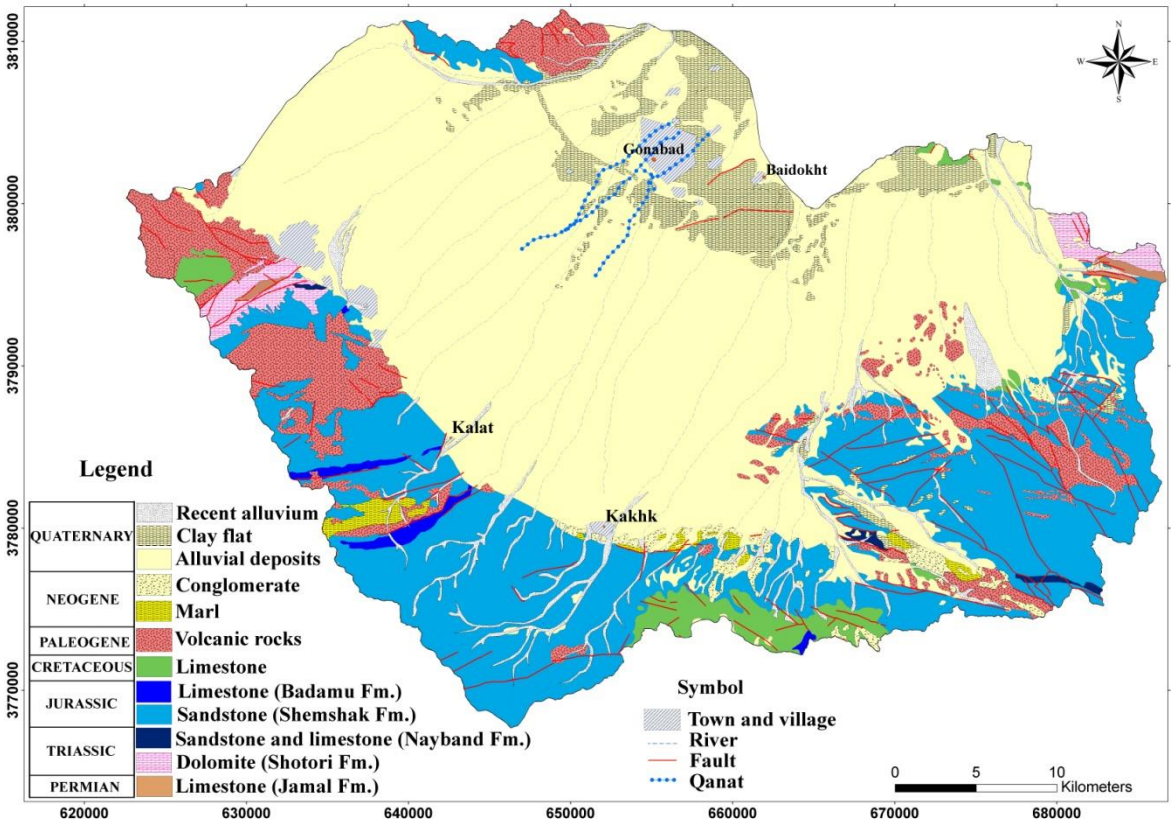
واحدهای سنگی نئوژن شامل کنگلومراهای پلیوسن و رسوبات جوان‌تر که شامل تشکیلات رس و مارنی است که در حاشیه جنوبی دشت رخنمون دارند. این واحدها سنگ کف آبخوان آبرفتی دشت را تشکیل می‌دهند. مخروط‌افکنه‌های آبرفتی دوره کواترنری در سطح دشت رخنمون داشته، پهنه آبرفتی دشت گناباد را تشکیل و آبخوان آبرفتی این دشت درون آنها جای گرفته است. رسوبات مذکور در حاشیه ارتفاعات دانه‌درشت بوده و به تدریج با فاصله گرفتن از ارتفاعات، تشکیلات ریزدانه شده و نفوذپذیری آنها کم می‌شود، چنانکه در حوالی شهر گناباد و خروجی دشت تبدیل به پهنه‌های رسی می‌گردند. کمترین ضخامت آبرفت در دشت در بخش شرقی به میزان ۲۰ متر و بیشترین مقدار آن ۳۰۰ متر در شمال شهر کاخک است. آب زیرزمینی نیز همانند جریانات سطحی دشت از ارتفاعات جنوب و جنوب غرب به سمت شمال شرق دشت جریان می‌یابد. بیشترین میزان عمق سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۲۰ متر در جنوب آبخوان اندازه‌گیری گردیده است. با دور شدن از ارتفاعات جنوب غربی به سمت شمال و شرق آبخوان عمق سطح آب نیز کاسته شده و به حدود ۵۰ تا ۶۰ متر در شمال و شمال غرب آبحوان می‌رسد. (اطلاعات پیزومتری دشت گناباد، آب منطقه‌ای خراسان رضوی).

نفوذ مستقیم بارش در واحدهای سنگی ارتفاعات و آبرفت‌های درشت دانه حاشیه ارتفاعات نقش مهمی در تغذیه قنات‌ها دارد. چنانکه رواناب سطحی ناشی از بارش در ارتفاعات، در طی مسیر جریان در مخروط‌های آبرفتی حاشیه ارتفاعات و نیز در بستر مسیل‌ها نفوذ می‌کند.

برای تعیین غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی در آب زیرزمینی ۳ رشته اصلی قنات ثلاثه گناباد شامل رشته‌های مند، دلوئی و خیبری در فروردین ماه ۱۴۰۴ تعداد ۳ نمونه آب از مظهر رشته‌ها برداشته شد. نمونه‌ها در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی آنالیز گردیدند. در آزمایشگاه مذکور سدیم و پتاسیم به

روش فلیم فوتومتری، کلسیم، منیزیم، کلر، بیکربنات به روش تیتراسیون و سولفات به روش اسپکتوفتومتری اندازه‌گیری شده است. همچنین داده‌های آنالیز نمونه‌های رشته دلوئی از سال ۱۴۰۰ تاکنون نیز از شرکت آب منطقه‌ای دریافت گردید (جدول شماره ۱). قبل از استفاده داده‌های شیمیایی حاصل از تجزیه نمونه‌های آب، بررسی صحت نتایج آنالیزهای آزمایشگاهی ضروری است. بدین منظور با استفاده از رابطه خطای واکنش (Reaction Error) (غلظت‌ها بر حسب میلی اکی والان در لیتر)، مقدار خطای داده‌های آزمایشگاهی را محاسبه نمود.

$$\text{Reaction Error (‰)} = \frac{\sum_{\text{cation}} - \sum_{\text{anion}}}{\sum_{\text{all ion}}} \times 100 \qquad (۳)$$



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده گناباد (MiraniMoghadam et al., 2020)

Fig. 3.Geological map of the Gonabad area (MiraniMoghadam et al., 2020)

مقدار خطای قابل قبول طبق نظر هانسلو (Hounslow, 2018) و شوارتز و ژنگ (Schwartz and Zhang, 2004) به میزان ۵ درصد است اما میزر (Mazor, 1990) مقدار ۱۰ درصد را نیز پذیرفته است.

با استفاده از نتایج آنالیز شیمیایی آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی نمونه‌های آب قنات، تیپ و رخساره آب تعیین و با استفاده از دیاگرام و نمودارهای ترکیبی واکنش‌های موثر بر غلظت عناصر اصلی در آب قنات شناسایی شدند. در نهایت کیفیت آب قنات برای مصرف شرب، کشاورزی و صنعت بررسی گردید.

جدول ۱. نتایج آنالیز هیدروشیمی آبرشته‌های قنات ثلاثه گناباد

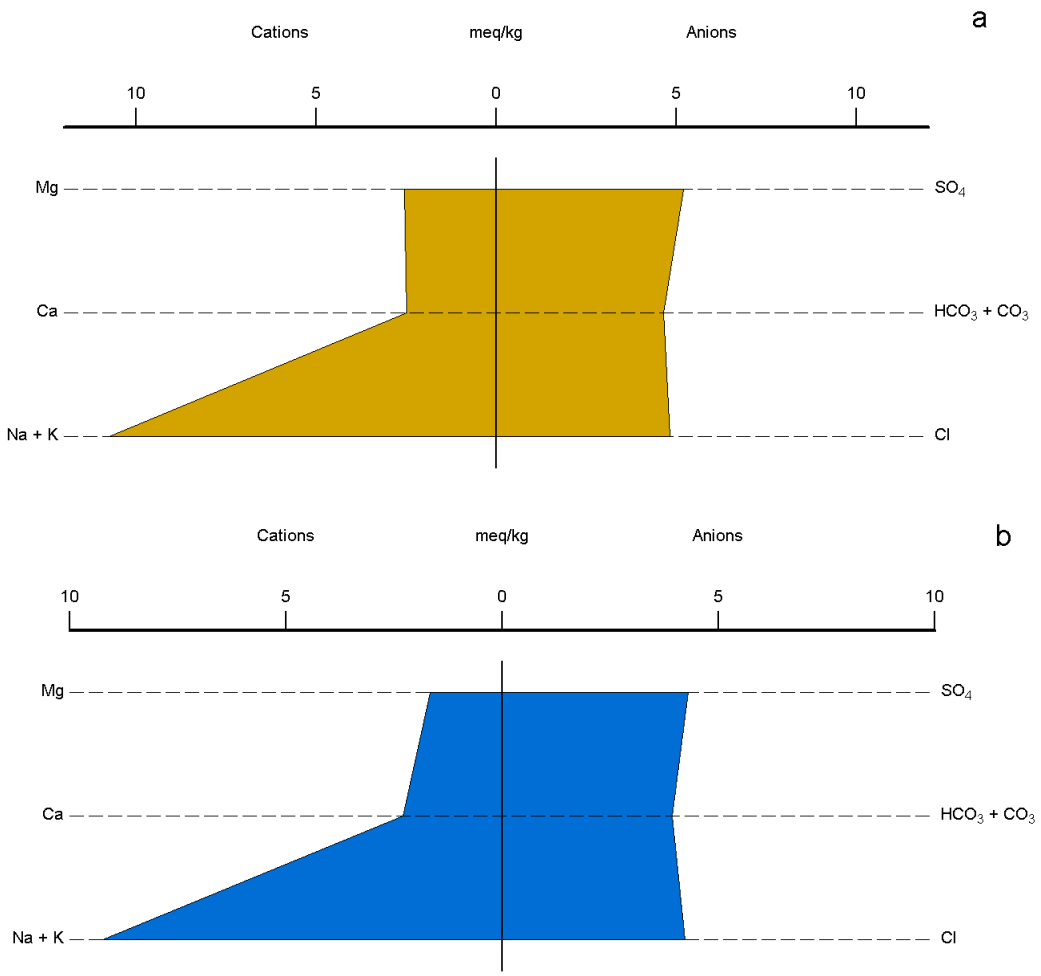
Table 1.Results of hydrochemical analysis of water from SalasehQanat of Gonabad

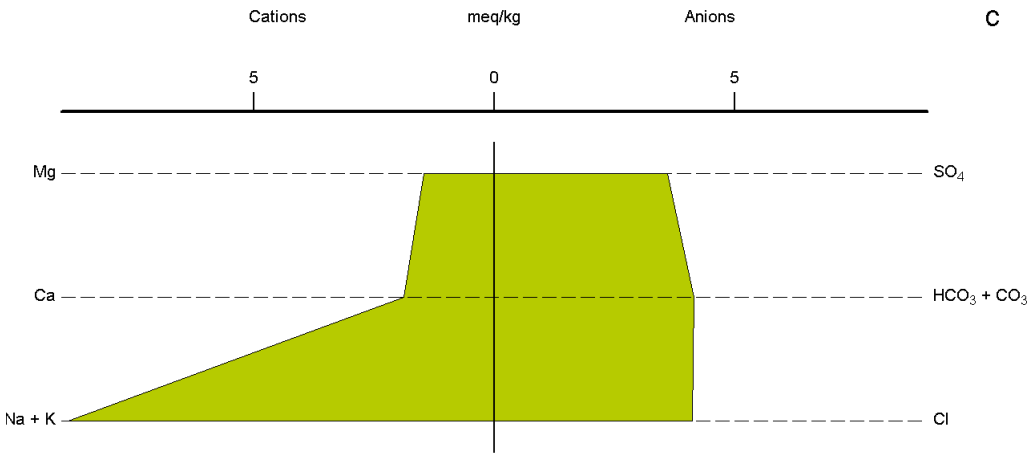
Sampling point	Symbol	Date	EC (µS/cm)	TDS (mg/l)	PH	Ca^{+2} (meq/l)	Mg^{+2} (meq/l)	Na^{+} (meq/l)	K^{+} (meq/l)	$HCO3^{-}$ (meq/l)	$CO3^{2-}$ (meq/l)	Cl^{-} (meq/l)	SO_4^{-2} (meq/l)	Reaction Error (%)
Mend	M	1404/01/25	1298	844	7.89	2.3	1.7	9.2	0.05	4	0	4.2	4.3	2.91
Deluee	D	1404/01/25	1231	800	8.03	1.9	1.5	8.8	0.06	4.2	0	4.1	3.6	1.49
Khaibari	Kh	1404/01/25	1529	994	8.02	2.5	2.6	10.7	0.05	4.7	0	4.8	5.2	3.76
Deluee	D1	1403/03/01	1203	782	7.68	1.7	1.9	8.8	0.045	4.2	0	4.2	3.3	3.09
Deluee	D2	1402/12/14	1185	770	7.66	1.4	1.9	8.8	0.035	3.6	0	3.9	3.8	3.56
Deluee	D3	1402/03/09	1200	780	8.25	1.7	2.1	8.6	0.04	3.6	0	4.2	3.8	3.49
Deluee	D4	1401/09/02	1165	733.95	7.95	1.9	1.7	8.3	0.05	4	0	3.8	3.4	3.24
Deluee	D5	1401/08/22	1180	743.4	7.3	1.6	1.9	8.7	0.04	4.6	0	3.9	3	3.12
Deluee	D6	1400/11/19	1157	728.91	7.77	2.1	1.7	8.16	0.03	3.7	0	4.12	3.38	3.41
Deluee	D7	1400/08/12	1175	740.25	8.09	1.8	1.7	8.5	0.04	3.6	0	4	3.74	2.99
Deluee	D8	1400/06/16	1139	717.57	7.6	2.1	1.4	8	0.03	4.1	0	4	3	1.9
Deluee	D9	1400/03/10	1184	745.92	7.71	1.8	2.1	8.34	0.05	4.2	0	3.4	3.82	3.67

نتایج و بحث

مشخصات هیدروژئوشیمیایی

نمودار استیف یکی از روش‌های نمایش گرافیکی آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب است. در این روش یک چند ضلعی در امتداد سه محور افقی و در دو طرف یک محور قائم شکل می‌گیرد. در این نمودار کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب میلی اکی والان بر لیتر به ترتیب در سمت چپ و راست محور قائم قرار می‌گیرند. به منظور قیاس سریع نمونه‌های آب با رخساره‌های مختلف از نمودار استیف استفاده شده است. در شکل شماره ۴ به ترتیب نمودار استیف نمونه‌های آب رشته‌های خیبری، مند و دلوئی با استفاده از نرم افزار AqQa برای نمونه‌های فروردین ۱۴۰۴ تهیه شده است. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌گردد کاتیون غالب در همه نمونه‌ها سدیم و اختلاف زیادی در مقادیر آنیون‌های نمونه‌ها مشاهده نمی‌گردد.

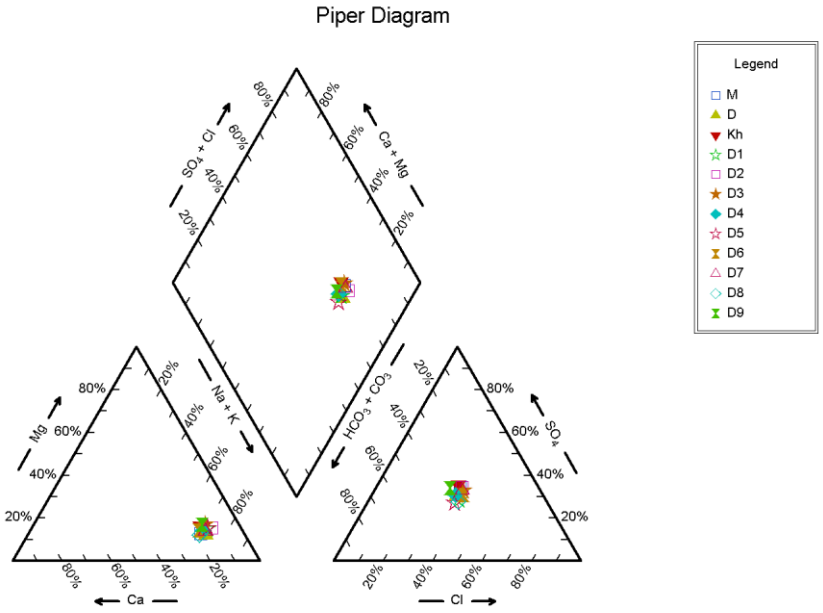




شکل ۴. نمودار استیف نمونه‌های آب قنات ثلاثه. a) رشته خیبری، b) رشته مند، c) رشته دلوئی.

Fig. 4. Stiff diagrams of water samples from the SalasehQanat.a) Khaibari branch, b) Mend branch, c) Deluei branch

برای مشخص نمودن تیپ و رخساره هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های آب نمودار پایپر (Piper, 1953) استفاده می‌شود. برای بررسی تیپ آب و نحوه تغییر آن، نمودار پایپر نمونه‌های آب رشته‌های قنات با استفاده از نرم افزار AqQa ترسیم شده است (شکل ۵). براساس این نمودار آب هر سه رشته قنات در تیپ آب‌های شورمزه قرار دارد.



شکل ۵. نمودار پایپر نمونه‌های آب قنات

Fig. 5. Piper diagram of qanat water samples

تکامل شیمیایی و منشأ آب زیرزمینی

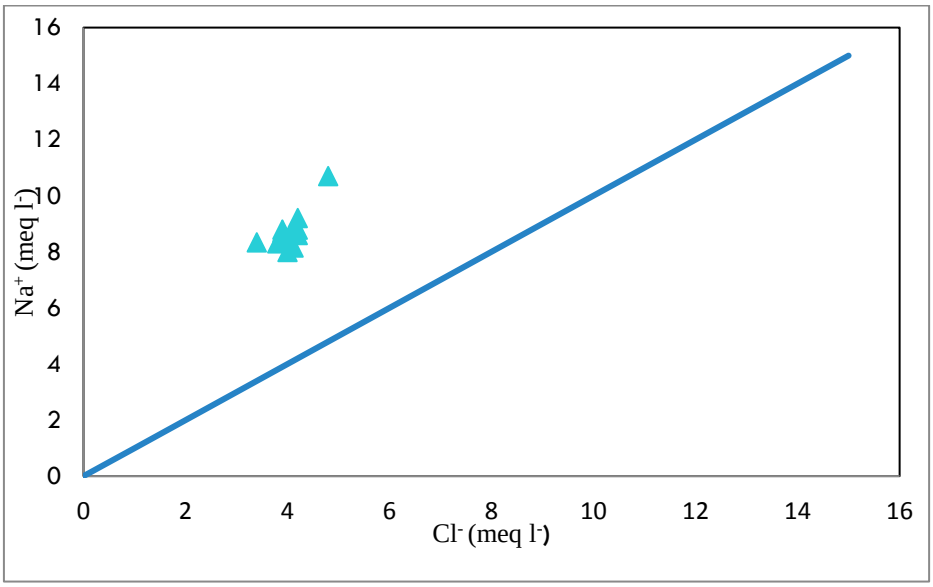
ترکیب آب‌های زیرزمینی در اثر فرایندهای ژئوشیمیایی مختلف تغییر می‌نماید. مهمترین فرایند کنترل کننده شیمی آب در سفره‌های آب زیرزمینی واکنش‌های متقابل آب و سنگ میزبان است. هوازدگی شیمیایی سنگ ها، انحلال و ته‌نشست کانی‌های ثانویه و تبادل یونی آب با کانی‌های رسی فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان هستند (Njitchoua et al., 1997). کربناته ها و

تبخیری‌ها به علت قابلیت انحلال نسبتا بالا، ترکیب آب را تا مقدار زیادی تغییر می‌دهند ولی سیلیکات‌ها به دلیل قابلیت انحلال کم، اثر کمتری بر ترکیب شیمیایی آب دارند (Appelo and Postma, 2005).

نمودارهای ترکیبی یا دو متغیره بین عناصر محلول به منظورشناخت فرآیندهای ژئوشیمیایی موثر بر ترکیب آب زیرزمینی و تعیین منشأ عناصر محلول آن در مطالعات هیدروژئوشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با شناسایی ترکیب شیمیایی آب و تعیین منشأ احتمالی اجزای شیمیایی آن‌ها، از روی روابط بین یون‌ها و نمودارهای ترکیبی، دقیق‌تر می‌توان درباره محیط جریان آب اظهار نظر کرد. این نمودارها و الگوهای مختلف آن‌ها توسط محققینی همچون (Mazor, 1990; Richter and Kreitler, 1993; Kim et al., 2004; Jalali, 2005; Kumar et al., 2006; Subra Rao, 1993) مورد استفاده قرار گرفته است.

برای تشخیص منشأ شوری و پدیده هجوم آب‌های شور در مناطق نیمه خشک اغلب از رابطه بین سدیم و کلر استفاده می‌شود (Sami, 1992). انحلال هالیت سبب وجود مقادیر مساوی یون‌های سدیم و کلر در آب می‌گردد. انحراف از نسبت ۱:۱ در نمودار سدیم در مقابل کلر، نشان می‌دهد یون سدیم با آنیون‌های دیگر ارتباط دارد. به جز انحلال هالیت، سدیم از طریق انحلال پلاژیوکلازهای سدیم دار و نیز تبادل کاتیونی با کلسیم وارد آب می‌گردد (Iwatsuki and yoshida, 1999).

براساس نمودار سدیم در مقابل کلر (شکل ۶) نمونه‌های آب رشته‌های قنات، سدیم اضافه‌تری نسبت به کلر دارند که احتمالاً به دلیل انحلال سولفات سدیم (میرابیلیت) یا تبادل کاتیونی عادی کلسیم آب با سدیم کانی‌های رسی است.



شکل ۶. نمودار کلر در مقابل سدیم نمونه‌های آب قنات ثلاثه

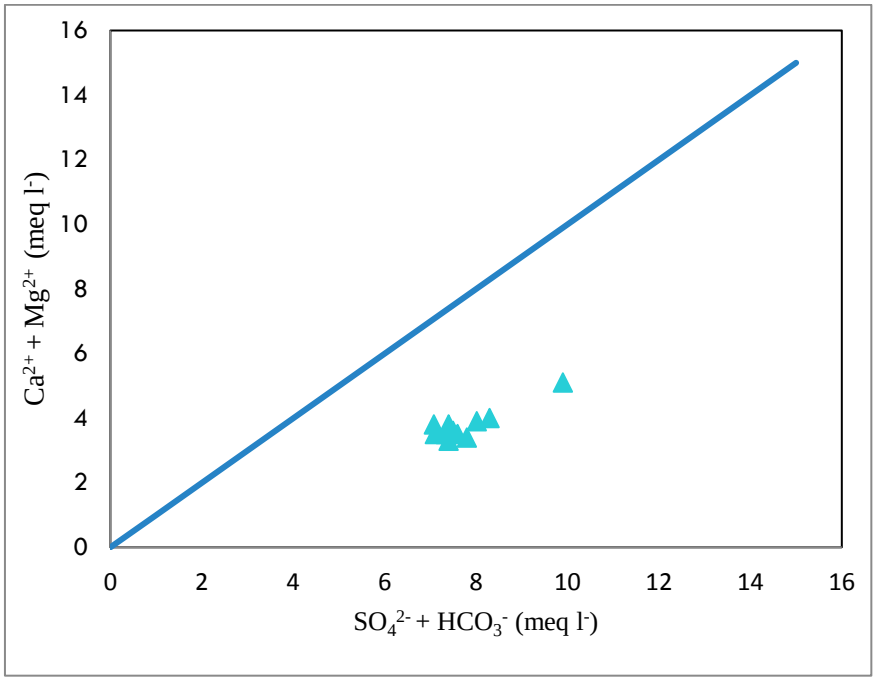
Fig. 6. Chloride versus sodium plot for the SalasehQanat water samples

با توجه به نمودار $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ در مقابل $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ نمونه‌ها در شکل ۷، نمونه‌ها مقدار سولفات و بی‌کربنات بیشتری نسبت به کلسیم و منیزیم دارند. انحلال ژیپس سبب وجود مقداری از یون‌های کلسیم و سولفات در آب‌های زیرزمینی می‌گردد. اگر انحلال ساده کلسیت، دولومیت و ژیپس منشأ Ca^{2+}، Mg^{2+}، HCO_3^- و SO_4^{2-} در آب باشد یک تعادل بار یونی بین آنیون‌ها و کاتیون‌های مذکور برقرار خواهد شد (Jalali, 2005).

مقدار پایین Ca^{2+} و Mg^{2+} درنمونه‌ها که با مقدار بالای از Na^+ همراه می باشد نشان دهنده شدت واکنش تبادل یونی است. نمونه‌هایی که زیر خط ۱:۱ قرار دارند بیانگر این واقعیت هستند که بخشی از $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ با Na^++K^+ به تعادل رسیده است.

معمولا غلظت زیاد سولفات در آب‌های زیرزمینی ناشی از هوازدگی سولفات‌ها و سولفیدها است (Drever, 1982). انحلال ژیپس سبب افزایش غلظت یون‌های کلسیم و سولفات در آب گردیده و آب زیرزمینی نسبت به ژیپس به حالت تعادل نزدیک‌تر می‌گردد. در نتیجه، قابلیت انحلال کلسیت در آب، تحت تاثیر انحلال ژیپس و اثر یون مشترک Ca^{2+} کاهش و موجب ته نشینی بیشتر کلسیت خواهد گردید. انحلال ژیپس تحت تاثیر H_2CO_3 یا آب های قلیایی موجب ته‌نشست کلسیت می‌گردد. زیرا قابلیت انحلال ژیپس بیشتر از کلسیت است.

$$HCO_3^- + CaSO_4.2H_2O \longrightarrow CaCO_3 + SO_4^{2-} + H^+ + 2H_2O \quad (۴)$$



شکل ۷. نمودار $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ در مقابل $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ در نمونه‌های آب قنات ثلاثه

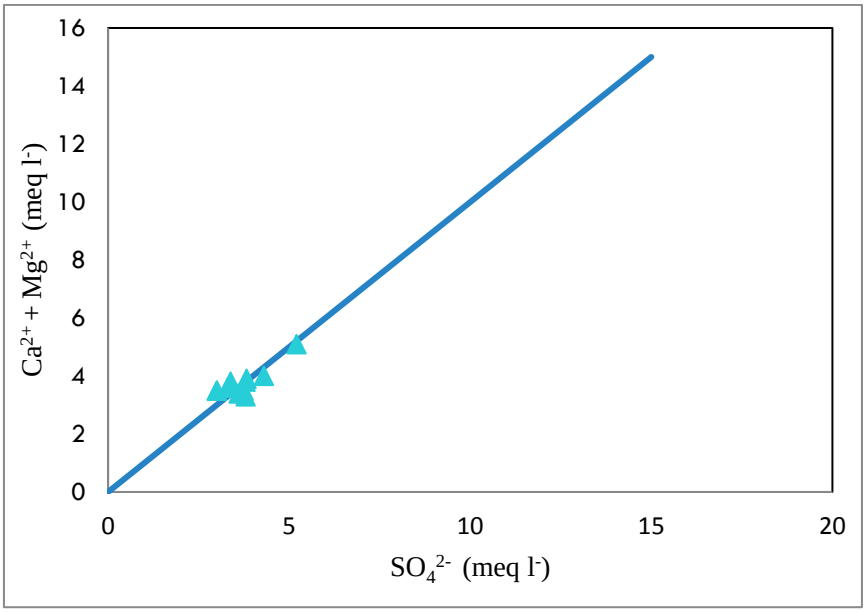
Fig. 7. Plot of $Ca^2 + Mg^{2+}$ versus $HCO_3^-+ SO_4^{2-}$in water samples from Salaseh Qanat

همبستگی Ca^{2+} و Mg^{2+} با SO_4^{2-} در نمونه‌های آب قنات، زیاد بوده (شکل ۸) که نشان می‌دهد کاتیون‌های مذکور توانند از انحلال سولفات های کلسیم و منیزیم دار نیز حاصل شده‌اند.

تنظیم تغییرات ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی توسط تبادل کاتیونی انجام می‌گیرد و تبادل کاتیونی نقش یک بافر موقت را در زمان وضعیت غیر تعادلی یونی ایفا می‌کند (Gimenez and Morell, 1997).

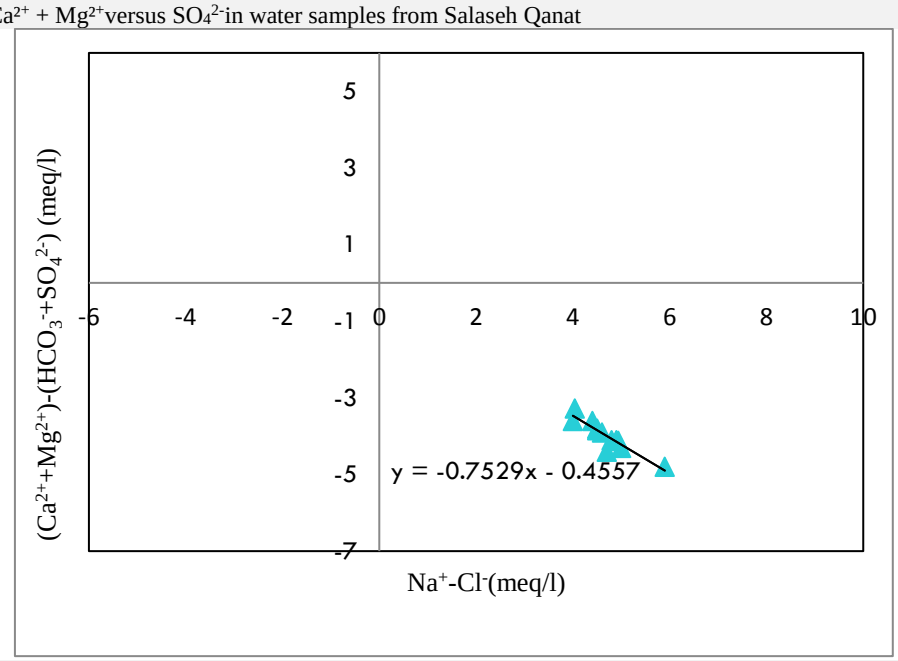
نمودار $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$-$(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ در مقابل $(Na^+ - Cl^-)$ نشان دهنده تاثیر تبادل کاتیونی بر ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی است. مقدار$(Na^+ - Cl^-)$ بیانگر مقادیر سدیم است که مرتبط با انحلال نمک‌های کلروره (اکثرا هالیت) است. در حالی که $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$-$(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ بیانگرکاتیون‌های کلسیم و منیزیم در ارتباط با واکنش‌های انحلال کلسیت، دولومیت و ژیپس است. در نبود این واکنش‌ها تمامی عناصر باید در حدود ترکیب شیمیایی منشأ باشند. در صورتی که این واکنش‌ها نقش زیادی در کنترل ترکیب شیمیایی آب‌ها داشته باشند، این دو پارامتر ارتباط خطی با شیبی برابر۱- خواهد داشت (García et al., 2001). در شکل ۹ مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار سدیم در آب‌های منطقه، مقادیرکلسیم و منیزیم کاهش یافته و مقدار سولفات و بیکربنات افزایش می‌یابد. بین این دو پارامتر ارتباط خطی و با شیب ۰/۷- برقرار است که نشان دهنده آن است که

وقوع واکنش‌های تبادل کاتیونی در آب‌های حوضه آبگیر قنات نقش زیادی در کنترل ترکیب شیمیایی آن دارد.



شکل ۸. نمودار $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ در مقابل SO_4^{2-} در نمونه‌های آب قنات ثلاثه

Fig. 8. Plot of $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ versus SO_4^{2-} in water samples from Salaseh Qanat

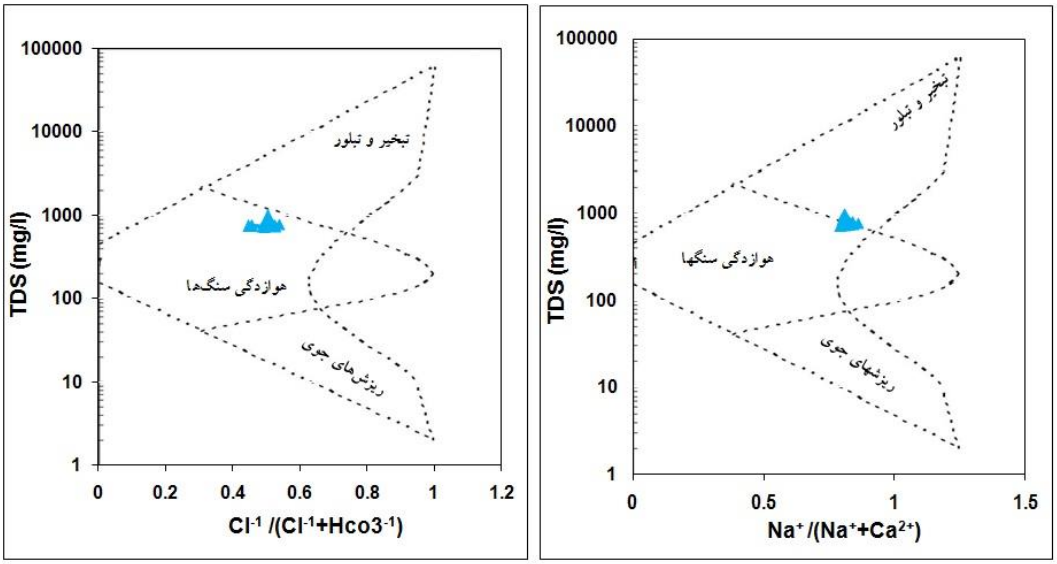


شکل ۹. نمودار $Na^{+}-Cl^{-}$ در مقابل $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^{-}+SO_4^{2-})$ نمونه‌های آب قنات ثلاثه

Fig. 9. Plot of $Na^{+}–Cl^{-}$ versus $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) – (HCO_3^{-} + SO_4^{2-})$ for water samples from SalasehQanat

فرآیندهای شیمیایی متنوعی در حین برهم‌کنش آب و سنگ اتفاق می‌افتد. انحلال، رسوب‌گذاری، تبادل یونی و اکسیداسیون و احیا از این موارد است. کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها بطور جزئی یا کامل در آب حل شده که بستگی به مقاومت هوازدگی شیمیایی کانی‌ها دارد. ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی بیانگر واکنش‌های آب و سنگ و فرایندهای شیمیایی است. نمودار گیبس اطلاعات مفیدی در مورد فرآیندهای طبیعی موثر بر ترکیب آب‌های زیرزمینی را ارائه می‌نماید (Gibbs, 1970). در این نمودارها نمونه‌هایی که در مرکز منحنی قرار می‌گیرند در

نتیجه واکنش‌های آب و سنگ است. همانطور که در نمودار گیبس نمونه‌های آب قنات ثلاثه (شکل ۱۰) مشاهده می‌گردد ترکیب شیمیایی آب قنات متاثر از واکنش‌های آب و سنگ و تبخیر و ته نشینی است.



شکل ۱۰. نمودار گیبس نمونه‌های آب قنات ثلاثه گناباد

Fig. 10. Gibbs plot of water samples from Gonabad Salaseh Qanat

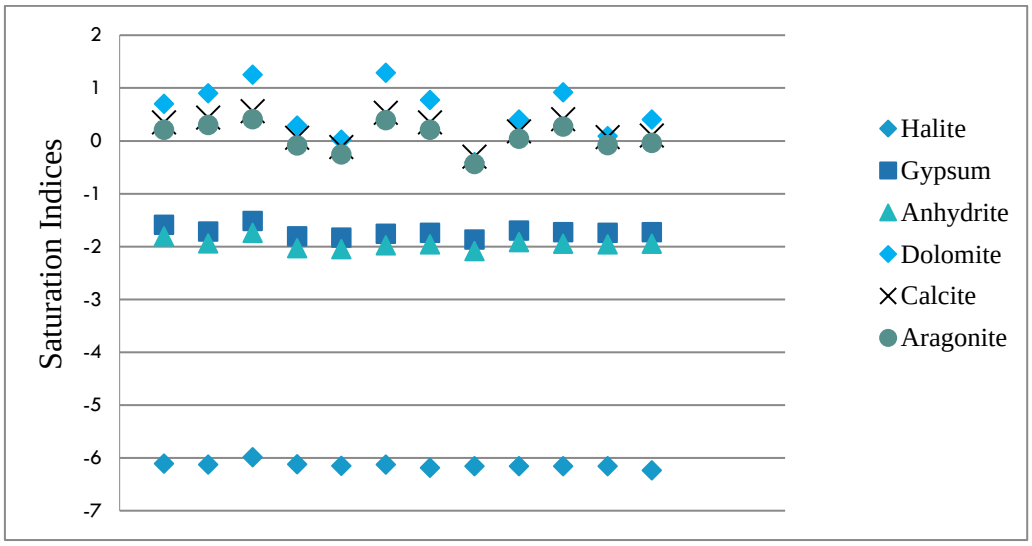
شاخص‌های اشباع

شاخص اشباع توصیف کمی تعادل آب با کانی‌های محلول را نشان می‌دهد. تغییرات شاخص‌های اشباع مورد استفاده قرار می‌گیرند تا مراحل مختلف تکامل هیدروژئوشیمیایی همچنین واکنش‌های شیمیایی تعیین کننده شیمی آب شناسایی و مشخص گردند. تقریبا تمامی نمونه‌ها نسبت به کانی‌های کربناته اشباع و فوق اشباع و نسبت به تبخیری‌ها (هالیت و ژیپس) تحت اشباع می‌باشند. (شکل ۱۱) که این روند بیانگر این است که فرایندهای غالب در نمونه‌ها انحلال کربنات‌هاست. به دلیل خروج دی اکسیدکربن از آب به دلیل کاهش فشار و افزایش سرعت آن در کوره قنات، آب نسبت به کانی‌های کربناته به حالت اشباع و فوق اشباع بوده و کانی‌های مذکور در کوره قنات در حال رسوب‌گذاری است. همچنین آب قنات توانایی انحلال کانی‌های تبخیری را دارد.

جدول ۲. شاخص اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب قنات

Table 2. Saturation indices of various minerals in qanat water samples

	M	D	KH	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Anhydrite	-1.81	-1.94	-1.74	-2.03	-2.05	-1.98	-1.96	-2.09	-1.92	-1.95	-1.96	-1.95
Aragonite	0.21	0.3	0.41	-0.09	-0.26	0.39	0.21	-0.44	0.04	0.27	-0.08	-0.04
Calcite	0.35	0.44	0.56	0.06	-0.12	0.53	0.35	-0.3	0.18	0.41	0.07	0.1
Dolomite	0.7	0.9	1.25	0.29	0.02	1.29	0.77	-0.4	0.4	0.92	0.09	0.4
Gypsum	-1.59	-1.72	-1.52	-1.81	-1.83	-1.76	-1.74	-1.87	-1.7	-1.73	-1.74	-1.73
Halite	-6.11	-6.13	-5.99	-6.12	-6.15	-6.13	-6.19	-6.16	-6.16	-6.16	-6.16	-6.24



شکل ۱۱. نمودار شاخص اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب قنات

Fig. 11. Plot of saturation indices of various minerals in Salaseh Qanat water samples.

کیفیت آب قنات برای مصرف شرب

استانداردهای آب شرب در کشورهای مختلف، بسته به شرایط اقتصادی، اقلیمی، غذایی و جغرافیایی متفاوتند. استاندارد آب شرب موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سازمان بهداشت جهانی (WHO) به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آمده است. مقادیر حداکثر غلظت مجاز عناصر در آب بوده و غلظت‌های بیشتر، نشان دهنده آلوده بودن آب است. معیارهای کیفی آب شرب معمولا بر اساس مصرف دو لیتر آب در روز برای هر نفر است. جهت بررسی قابلیت شرب آب زیرزمینی قنات مورد مطالعه از جداول ۳ و ۴ و نمودار نیمه لگاریتمی شولر (Schoeller, 1956) استفاده شده است.

جدول ۳. استاندارد آب شرب در ایران (مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران)

Table 3. Drinking water standards in Iran (Institute of Standards and Industrial Research of Iran)

ردیف	نوع ترکیب	حداکثر مقدار مطلوب(mg/l)	حداکثر مقدار مجاز(mg/l)
۱	باقیمانده تبخیر در $^{\circ}C180$	500	1500
۲	سختی کل بر حسب $CaCo_3$	150	500
۳	کلسیم	75	200
۴	منیزیم	50	150
۵	منگنز	0.05	0.5
۶	آهن	0.3	1
۷	روی	5	15
۸	مس	0.05	1.5
۹	سولفات	200	400
۱۰	کلرور	200	600
۱۱	آمونیاک	0.002	0.05
۱۲	پاک کننده‌ها	0.1	0.2
۱۳	فسفات	0.1	0.2

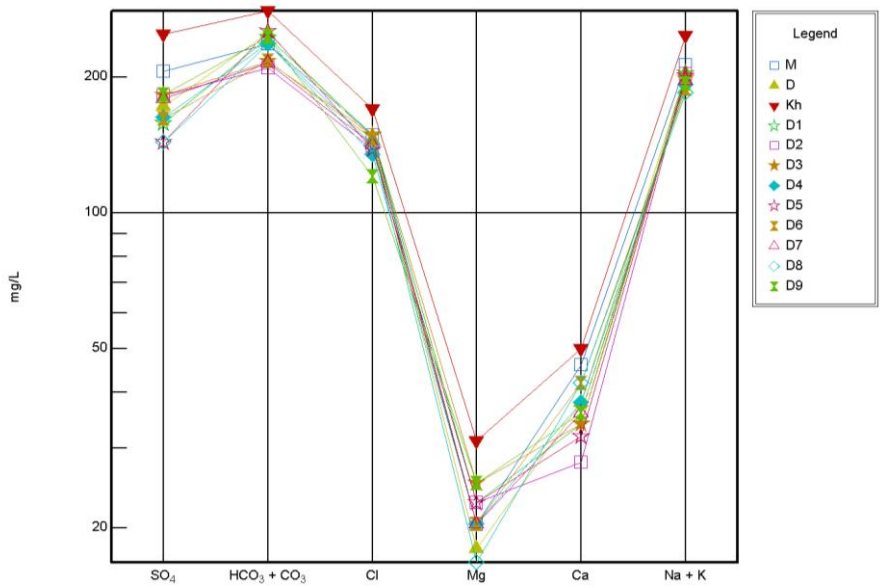
جدول ۴. استاندارد کیفی آب شرب سازمان جهانی بهداشت (WHO, 2008)

Table 4. World Health Organization drinking water quality standards (WHO, 2008)

Parameter	Desirable limit (DL)	Maximum permissible limit (PL)	Health implications
pH	7-8.5	9.2	Taste
EC (µs/cm)	500	1400	Gastro-intestinal irritation
TH (mg/l)	100	500	Scale formation
Na^{+} (mg/l)		200	Scale formation
Ca^{2+} (mg/l)	75	200	Scale formation
Mg^{2+} (mg/l)	50	150	Encrustations in water supply structure
Cl^{-} (mg/l)	200	600	Salty taste
SO_4^{2-} (mg/l)	200	400	Laxative effect
NO_3^{-} (mg/l)		45	Methaemoglobinemia
F^{-} (mg/l)		1.5	Fluorosis
Zn (mg/l)		5	Cause astringent taste uses an opalescence in water
Cu (mg/l)		1	Discoloration and corrosion of pips, fitting and utensils
Fe (mg/l)		0.3	Permutes bacterial growth
Mn (mg/l)		0.1	Adverse affect on domestic uses and water supply structure

نمودار شولر، نموداری نیمه لگاریتمی و دارای ۶ ستون عمودی می‌باشد. مقادیر پارامترهای مختلف شیمیایی نمونه‌های آب بر حسب میلیگرم بر لیتر به صورت نقاط بر روی ستون‌های عمودی مشخص و از اتصال این نقاط خطوطی ممتد برای هر نمونه به دست می‌آید. نمودار شولر برای نمونه‌های آب مربوط به قنات - ثلاثه در شکل ۱۳ آمده است. خط متصل کننده غلظت یون‌های نمونه‌ها موازی با یکدیگر بوده و به نوعی توجیه کننده منشا یکسان برای همه نمونه‌های قنات است.

براساس نمودار شولر و جدول ۴، کیفیت آب رشته‌های قنات برای شرب خوب تا قابل قبول است.



شکل ۱۳. نمودار شولر نمونه آب قنات ثلاثه

Fig. 13. Schoeller diagram for the SalasehQanat water sample

سختی آب

سختی آب یکی از دیگر معیارها برای مصرف شرب است. سختی آب در حقیقت میزان تمایل آن به پوسته گذاری بوده و تقریباً تمام سختی آب ناشی از یون‌های کلسیم و منیزیم محلول در آب است. سختی آب به سه حالت سختی کل، دائم و موقت بیان می شود. محاسبه انواع سختی آب رشته‌های قنات، به کمک نرم افزار Chemistry انجام گرفته و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

میزان سختی موقت برابر با میزان قلیائیت می‌باشد. قلیائیت بیانگر غلظت کربن غیر آلی محلول در آب بوده که در اثر جوشیدن ته‌نشین می‌شود. آب‌های سبک (سختی کمتر از ۷۵ میلیگرم در لیتر کربنات کلسیم) برای شرب مضر است. مقادیر بالای سختی آب نیز سبب افزایش نقطه جوش آب گردیده و مصرف دراز مدت آب‌های سخت باعث وقوع بیماری‌هایی مانند سنگ کلیه، مرگ و میر مادرزادی، بیمارهای قلبی عروقی، سرطان یا بیماری آنسفالی (anencephaly) می‌شود (Agrawal and Jagetia, 1997). از این‌رو نتایج سختی کل آب‌های زیرزمینی قنات، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، آب هر سه رشته قنات سخت است. سختی رشته دلوئی کمترین مقدار و رشته خیبری بیشترین مقدار سختی دارد. سختی آب قنات از نوع موقت بوده و با جوشاندن آب ته نشست و از بین می‌رود. از نظر استاندارد توصیه شده سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2008) مقادیر سختی به میزان ۵۰۰ میلیگرم بر لیتر، حداکثر غلظت مجاز برای آب شرب است.

جدول ۵. سختی آب رشته‌های قنات ثلاثه گناباد

Table 5.Water hardness of SalasehQanat of Gonabad

علامت اختصاری	سختی کل	سختی موقت	سختی دائم	کیفیت آب براساس سختی کل
M	198.81	198.81	0	سخت
D	168.96	168.96	0	سخت
Kh	253.24	253.24	0	سخت
D1	178.72	178.72	0	سخت
D2	163.74	163.74	0	سخت
D3	188.6	188.6	0	سخت
D4	178.83	178.83	0	سخت
D5	173.73	173.73	0	سخت
D6	188.82	188.82	0	سخت
D7	173.84	173.84	0	سخت
D8	174.01	174.01	0	سخت
D9	193.59	193.59	0	سخت

کیفیت آب قنات‌ها برای مصرف کشاورزی

استانداردهای کیفی آب آبیاری براساس سه پارامتر تهیه شده است.

۱- غلظت کل نمک‌های محلول در آب، که این غلظت از طریق اثر اسمزی بر محصولات کشاورزی تاثیر دارد.

۲- غلظت عناصر خاصی (مثل بور) که ممکن است برای گیاهان سمی بوده و یا اینکه اثر نامطلوبی بر کیفیت محصول داشته باشند.

۳- غلظت کاتیون‌هایی مانند سدیم که با پراکندگی رس خاک، ساختمان خاک را تخریب و از مقدار نفوذ آب را کاهش می‌دهند.

برای طبقه بندی آب قنات ثلاثه برای مصرف کشاورزی از نمودار ویلکوکس (Wilcox , 1955) و با نرم افزار Chemistry استفاده شده است که اساس آن میزان هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) می باشد:

$$SAR=\frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{+2}+Mg^{+2}}{2}}} \quad (۵)$$

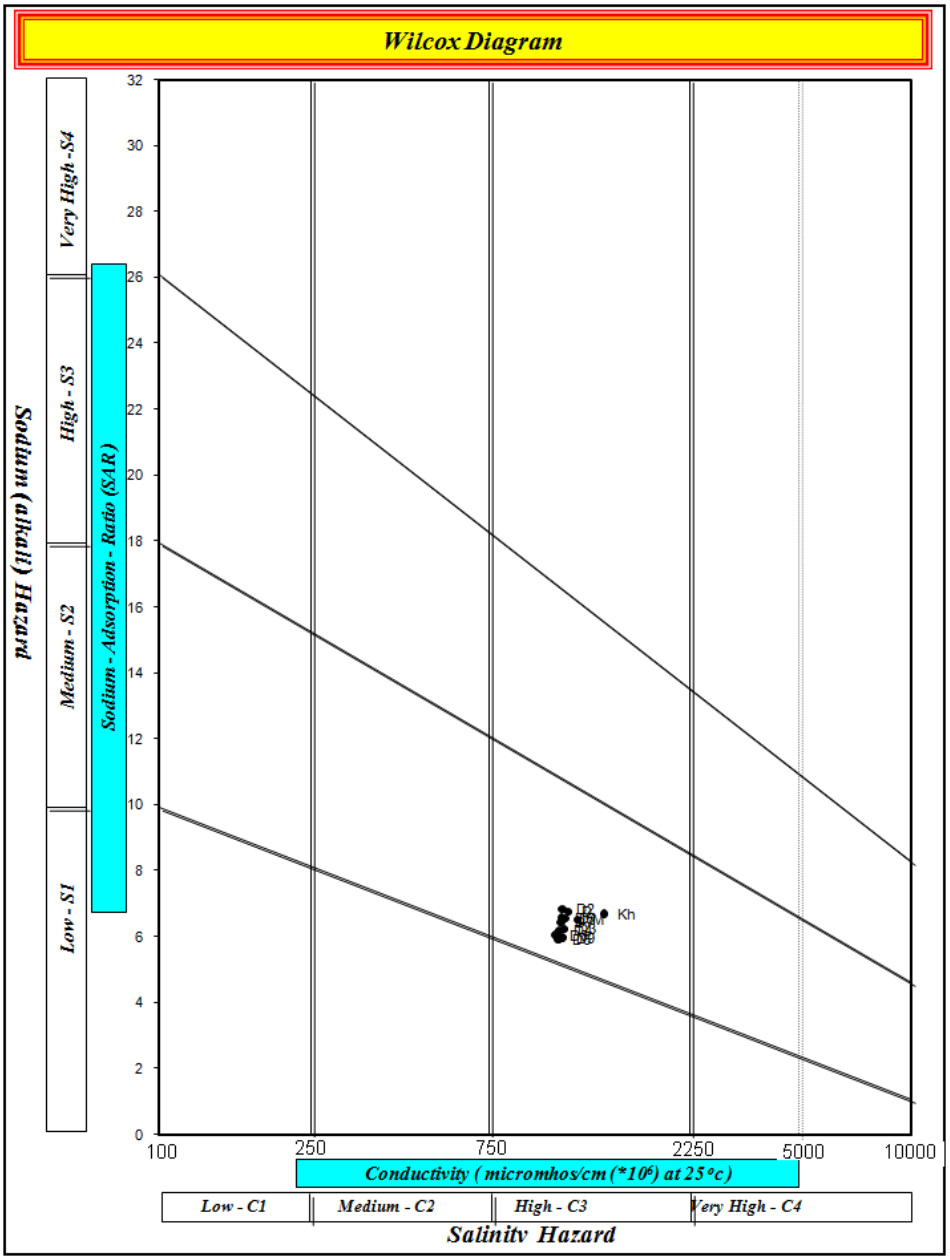
در رابطه فوق غلظت کاتیون‌ها برحسب میلی اکی والان در لیتر است. میزان هدایت الکتریکی آب نشان دهنده خطر شوری و نسبت جذب سدیم (SAR) نشان دهنده خطر سدیم می باشد که دو معیار مهم در طبقه بندی آب برای مصرف آبیاری می باشند. غلظت زیاد نمک‌ها در آب باعث شوری خاک و میزان بالای سدیم سبب ایجاد خاک قلیایی با کمبود کلسیم خاک، و در نهایت نفوذناپذیری خاک و کاهش محصولات خواهد شد. لذا در مصرف کشاورزی آب با SAR کم توصیه می‌گردد. به ازای مقدار معینی از کاتیون سدیم، افزایش کاتیون‌های کلسیم و منیزیم آب منجر به کاهش قابلیت جذب سدیم توسط خاک شده و در نتیجه ضرر آن برای گیاه کمتر می‌گردد.

خطر بی‌کربنات از دیگر پارامترهای آب آبیاری است که با شاخص کربنات سدیم باقیمانده (RSC) تعریف می‌گردد. غلظت زیاد بی کربنات در آب باعث رسوب کلسیت، کاهش نفوذپذیری خاک و نرخ نفوذ آب، افزایش فرسایش خاک و اختلال در رشد گیاهان می‌گردد. خطر RSC به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود (Fine et al.,1959).

$$RSC=(HCO_3^{-} + CO_3^{-2}) - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) \quad (۶)$$

غلظت یون‌ها برحسب میلی اکی والان بر لیتر (epm) است. آب‌های دارای مقادیر RSC کمتر از ۱/۲۵ epm برای آبیاری مناسب و آب‌های دارای مقادیر RSC بیش از ۲/۵ epm برای آبیاری نامناسب می باشند.

نتایج حاصل از بررسی‌های کیفیت آب قنات‌ها برای مصارف کشاورزی در جدول ۶ ارائه شده است. نمودار ویلکاکس آب قنات-ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. نمودار ویلکوکس نشان می‌دهد همه نمونه‌ها در کلاس C3S2 قرار دارند این آب‌ها که کمی شور تا شور هستند از لحاظ کشاورزی در رده خوب تا متوسط می‌باشند. بنابراین آب‌های زیرزمینی این قنات برای کشاورزی با انجام تمهیدات لازم نظیر آبشوئی متوسط خاک‌ها و ایجاد شبکه‌های زهکشی مناسب می‌باشند.



شکل ۱۴. دیاگرام ویلکاکس آب قنات ثلاثه

Fig. 14. Wilcox diagram for the water of SalasehQanat

جدول ۶.کیفیت آب قنات ثلاثه برای مصارف کشاورزی

Table 6. Water quality of Salaseh Qanat for agricultural use

علامت اختصاری	SAR	EC	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی	%Na	کیفیت بر اساس %Na	RSC	کیفیت بر اساس RSC
M	6.51	1298	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	69.81	مشکوک	0	مناسب
D	6.75	1231	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	72.27	مشکوک	0.8	مناسب
Kh	6.7	1529	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	67.82	مشکوک	-0.4	مناسب
D1	6.56	1203	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	71.07	مشکوک	0.6	مناسب
D2	6.85	1185	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	72.81	مشکوک	0.3	مناسب
D3	6.24	1200	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	69.45	مشکوک	-0.2	مناسب
D4	6.19	1165	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	69.87	مشکوک	0.4	مناسب
D5	6.58	1180	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	71.41	مشکوک	1.1	مناسب
D6	5.92	1157	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	68.31	مشکوک	-0.1	مناسب
D7	6.43	1175	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	70.93	مشکوک	0.1	مناسب
D8	6.05	1139	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	69.64	مشکوک	0.6	مناسب
D9	5.97	1184	C3-S2	شور، قابل استفاده برای کشاورزی	68.27	مشکوک	0.3	مناسب

کیفیت آب برای مصارف صنعتی

جهت بررسی خصوصیات آب مصرفی در صنایع شاخص های گوناگونی وجود دارد که مهمترین آن خاصیت خورندگی آب است. یکی از روش‌های بررسی میزان خورندگی آب شاخص خورندگی (Aggressive Index) می‌باشد. مقدار این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$AI=pH + \log [(Alk)(H)] \quad (۷)$$

در این رابطه Alk مقدار قلیاییت کل بر حسب میلیگرم در لیتر کربنات کلسیم و H سختی ناشی از کلسیم بر حسب میلی گرم در لیتر کربنات کلسیم است.

خورندگی آب بر اساس مقدار شاخص خورندگی بشرح زیر می‌باشد:

-آب دارای خورندگی شدید $AI < 10$

-آب نسبتاً خورنده $12< AI < 10$

-آب فاقد خورندگی $AI > 12$

همچنین شاخص اشباع لانژلیه (Langelier Saturation Index (LSI)) و شاخص پایداری رایزنر (Ryznar Stability Index (RSI)) از دیگر شاخص‌هایی هستند که به منظور ارزیابی پتانسیل خورندگی آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شاخص اشباعی لانژلیه (LSI)، نمایانگر درجه اشباع آب نسبت به کربنات کلسیم است (Langelier, 1946). شاخص لانژلیه به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$LSI=PH-PHs \quad (۸)$$

از شاخص‌های دیگری که در بررسی پتانسیل خورندگی آب استفاده می‌گردد شاخص پایداری رایزنر (RSI) است. مشابه با ضریب اشباعیت لانژلیه، اساس کار این شاخص نیز سطح اشباع آب است. شاخص پایداری رایزنر، رابطه بین حالت اشباع کربنات کلسیم با تشکیل پوسته رسوب را به صورت کمی بیان می نماید (Roberge, 2000). مقدار این شاخص از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$RSI=2pH_S - pH \quad (۹)$$

pH، مقدار اندازه‌گیری شده اسیدیته آب در صحرا (واقعی) و pH_S، میزان pH آب در حالت اشباع است.

آب با ضریب لانژلیه منفی خاصیت خورندگی دارد. ضریب لانژلیه برابر صفر آب متعادل و ضریب لانژلیه بزرگتر از صفر، آب رسوب‌گذار است. شاخص رایزنر، اگر کمتر از ۶ باشد آب پوسته-

گذار و در بیشتر از ۷/۵ آب خورنده است. در جدول ۷ کیفیت آب قنات ثلاثه برای مصارف صنعتی مورد بررسی قرار گرفته است. آب قنات مذکور خاصیت رسوب‌گذاری دارد.

جدول ۷. کیفیت آب قنات ثلاثه جهت مصرف صنعتی

Table 7. Water quality of Salaseh Qanat for industrial use

علامت اختصاری	قلیائیت بر حسب CaO	Ca (mg/l)	ضریبC	PHs	PH	PHs-PH	کیفیت آب برای مصارف صنعتی
M	213.55	46	11.3	7.3	7.89	-0.59	رسوبگذار
D	204.74	38	11.3	7.4	8.03	-0.63	رسوبگذار
Kh	248.05	50	11.31	7.2	8.02	-0.82	رسوبگذار
D1	204.155	34	11.3	7.5	7.68	-0.18	رسوبگذار
D2	203.765	28	11.3	7.5	7.66	-0.16	رسوبگذار
D3	199.36	34	11.3	7.5	8.25	-0.75	رسوبگذار
D4	192.85	38	11.3	7.4	7.95	-0.55	رسوبگذار
D5	201.66	32	11.3	7.5	7.3	0.2	خورنده
D6	188.85	42	11.3	7.4	7.77	-0.37	رسوبگذار
D7	197.06	36	11.3	7.4	8.09	-0.69	رسوبگذار
D8	185.17	42	11.3	7.4	7.6	-0.2	رسوبگذار
D9	193.77	36	11.3	7.5	7.71	-0.21	رسوبگذار

نتیجه‌گیری

با بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی رشته‌های قنات ثلاثه گناباد مشخص گردید تیپ آب رشته‌ها سولفاته، کربناته و کلروره و رخساره آب هر سه رشته سدیک است. آب قنات در رده آب‌های شورمزه قرار دارد. کمترین میزان هدایت الکتریکی آب در رشته دلوئی (غربی‌ترین رشته) و بیشترین میزان هدایت الکتریکی در رشته خیبری (شرقی‌ترین رشته) اندازه‌گیری شده است. ترکیب شیمیایی آب قنات تحت تاثیر واکنش‌های آب و سنگ و تبخیر و ته‌نشینی است. نمونه‌های آب قنات دارای سدیم بیشتری نسبت به کلراید و کلسیم و منیزیم کمتری نسبت به بیکربنات و سولفات هستند که به دلیل ورود سدیم از منابع دیگری مانند انحلال پلاژیوکلازهای سدیم‌دار، انحلال سولفات سدیم یا واکنش‌های تبادل کاتیونی عادی است. هوازدگی سیلیکات‌ها مانند پلاژیوکلازهای سدیم و منیزیم‌دار، انحلال کربنات‌ها، انحلال تبخیری‌ها و تبادل کاتیونی عادی، انحلال ژیپس و ته‌نشست کلسیت فرایندهای هیدروشیمیایی غالب در سفره آب زیرزمینی قنات ثلاثه می‌باشد. آب قنات نسبت به کانی‌های کربناته اشباع و نسبت به کانی‌های تبخیری تحت اشباع است که نشان دهنده این موضوع است که انحلال کربنات‌ها در حوضه آبگیر قنات‌ها اتفاق افتاده و با ورود آب به کوره قنات و خروج گاز کربنیک در اثر کاهش فشار و افزایش سرعت آب، آب قنات نسبت به کانی‌های کربناته اشباع گردیده است. از نظر مصارف شرب، کیفیت آب خوب تا قابل قبول است. از نظر سختی آب قنات سخت است. سختی آب قنات سختی موقت و ناشی از بیکربنات‌های منیزیم و کلسیم است که در اثر جوشاندن آب ترکیبات مذکور ته‌نشین و آب قنات‌ها نرم می‌شود. از نظر مصارف کشاورزی آب قنات برای کشاورزی در زمین‌های با نفوذپذیری بالا مناسب است. جهت مصارف صنعتی آب قنات دارای خاصیت رسوب‌گذاری می‌باشد.

References

Abasi, F., Karami, Gh. (2009). Evaluation of hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of Qanats in the Miami region, Master's thesis. (In Persian). https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/b59d1150965a8ec197ea7722db2c0f1b

Agrawal, V., & Jagetia, M. (1997). Hydrogeochemical assessment of groundwater quality in Udaipur city, Rajasthan, India. In Proceedings of National Conference on Dimension of Environmental Stress in India. Dept. of Geology, MS University, Baroda (pp. 151-154).

Akshitha, V., Balakrishna, K. & Udayashankar, H.N. (2021). Assessment of hydrogeochemical characteristics and saltwater intrusion in selected coastal aquifers of southwestern India. Marine Pollution Bulletin. 173, 112989. 10.1016/j.marpolbul.2021.112989.

Anderson, T. W., Welder, G. E., Lesser, G., & Trujillo, A. (1988). Region 7, Central alluvial basins. https://doi.org/10.1130/dnag-gna-o2.81 .

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution: Leiden, the Netherlands. https://doi.org/10.1201/9781439833544

Beaumont, P. (1971). Qanat systems in Iran. Hydrological Sciences Journal, 16(1), 39-50. https://doi.org/10.1080/02626667109493031

Bryan, E., Meredith, K. T., Baker, A., Post, V. E., & Andersen, M. S. (2016). Island groundwater resources, impacts of abstraction and a drying climate: Rottnest Island, Western Australia. Journal of Hydrology, 542, 704-718. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.043

Chen, Z., Zhou, P., Wang, G., Mao, H., Feng, X., & Huang, H. (2023). Groundwater chemistry and isotope for interpreting the hydrogeological conditions and hydrochemical evolution of multilayer aquifer system of Donghai island, China. Applied Geochemistry, 159, 105833. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105833

Davis, S., & Dewist, J. (1966). Hydrology New York. https://books.google.com/books/about/Hydrogeology.html?id=CQszAAAAMAAJ

Drever, J. I. (1982). The geochemistry of natural waters (Vol. 437). Englewood Cliffs: Prentice hall. https://doi.org/10.4319/lo.1983.28.3.0600a

Feth, J. H. (1981). Chloride in natural continental water: a review. https://doi.org/10.3133/wsp2176

Fine, L. O., Williamson, E. J., Wiersma, F., & Umback, C. R. (1959). A study of the sodium adsorption ratio and residual sodium carbonate concepts of irrigation waters as they affect exchangeable sodium of soil under semiarid conditions. Soil Science Society of America Journal, 23(4), 263-266. https://doi.org/10.2136/sssaj1959.03615995002300040011x

García, G. M., del V. Hidalgo, M., & Blesa, M. A. (2001). Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina. Hydrogeology Journal, 9(6), 597-610. https://doi.org/10.1007/s10040-001-0166-4

Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170(3962), 1088-1090. https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088

Gimenez, E., & Morell, I. (1997). Hydrogeochemical analysis of salinization processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellon, Spain). Environmental geology, 29(1), 118-131. https://doi.org/10.1007/s002540050110

Honari, F., Karami, Gh. & Kazemi, Gh. (2014). Evaluation of hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of Qanats in the Khor region. Master's thesis. (In Persian). https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/a725e10c7400c08aeea52572bf376091

Hounslow, A. (2018). Water quality data: analysis and interpretation. CRC press. https://doi.org/10.1201/9780203734117

Iwatsuki, T., & Yoshida, H. (1999). Groundwater chemistry and fracture mineralogy in the basement granitic rock in the Tono uranium mine area, Gifu Prefecture, Japan Groundwater composition, Eh evolution analysis by fracture filling mineral. Geochemical Journal, 33(1), 19-32. https://doi.org/10.2343/geochemj.33.19

Jalali, M. (2005). Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran. Environmental Geology, 47(6), 763-772. https://doi.org/10.1007/s00254-004-1200-3

Jiang, G., & Guo, F. (2010). Interpreting Source of Lingshui Spring by Hydrogeological, Chemical and Isotopic Methods. In Advances in Research in Karst Media (pp. 177-181). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12486-0_27

Kiani, M. & Karami, Gh. (2011). Study of the quantitative and qualitative characteristics of the water of the Great Qanat of Biarjomand. In Proceedings of the 7 st Conference on Engineering and Environmental Geology, Iran. (In Persian) https://elmnet.ir/doc/20195760-35238

Kim, K., Rajmohan, N., Kim, H. J., Hwang, G. S., & Cho, M. J. (2004). Assessment of groundwater chemistry in a coastal region (Kunsan, Korea) having complex contaminant sources: a stoichiometric approach. Environmental Geology, 46(6), 763-774. https://doi.org/10.1007/s00254-004-1109-x.

Kumar, M., Ramanathan, A. L., Rao, M. S., & Kumar, B. (2006). Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. Environmental geology, 50(7), 1025-1039. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0275-4.

Lambán, L. J., Jódar, J., Custodio, E., Soler, A., Sapriza, G., & Soto, R. (2015). Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study. Science of the Total Environment, 506, 466-479. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.030.

Langelier, W. F. (1946). Chemical equilibria in water treatment. Journal (American Water Works Association), 38(2), 169-178. https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1946.tb17557.x.

López-Chicano, M., Bouamama, M., Vallejos, A., & Pulido-Bosch, A. (2001). Factors which determine the hydrogeochemical behaviour of karstic springs. A case study from the Betic Cordilleras, Spain. Applied Geochemistry, 16(9-10), 1179-1192. https://doi.org/10.1016/s0883-2927(01)00012-9.

Mazor, E. (1990). Applied chemical and isotopic groundwater hydrology. https://doi.org/10.1201/9780203912959.

MiraniMoghadam, H. M., Bagheri, R., Karami, G. H., & Jafari, H. (2020). Groundwater Origin in Qanats,

Chemo- Isotopic, and Hydrogeological Evidence. Groundwater, 58(5), 771-776. https://doi.org/10.1111/gwat.12975.

MiraniMoghadam, H., Karami, G. H., Bagheri, R., & Barati, R. (2021). Death time estimation of water heritages in Gonabad Plain, Iran. Environmental Earth Sciences, 80(4), 127. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09424-w

Moral, F., Cruz-Sanjulián, J. J., & Olías, M. (2008). Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain). Journal of hydrology, 360(1-4), 281-296. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.012.

Njitchoua, R., Dever, L., Fontes, J. C., & Naah, E. (1997). Geochemistry, origin and recharge mechanisms of groundwaters from the Garoua Sandstone aquifer, northen Cameroon. Journal of Hydrology, 190(1-2), 123-140. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(96)03049-1.

Piper, A. M. (1953). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses: US Geological Survey Ground Water Notes. Geochemistry, 12(5). https://doi.org/10.1029/tr025i006p00914

Raeisi, E., & Karami, G. (1996). The governing factors of the physicochemical characteristics of Sheshpeer karst springs, Iran. Carbonates and Evaporites, 11(2), 162-168. https://doi.org/10.1007/bf03175634.

Richter, B. C., & Kreitler, C. W. (1993). Geochemical Techniques for Identifying Source of Ground-Water Salinization, CK Smokey., bearing on the water crisis in the country. Journal of Hydrology, (156), p389-430. https://doi.org/10.1201/9780203753668-3.

Roberge, P. R. (2000). Handbook of corrosion engineering. Mcgraw-hill. https://doi.org/10.5006/c2000-00478

Salehi, S.M., Ataee, M.R. & Semsareyazdi, A.A. (2004). Investigation of Factors Affecting Qanat Water Quality: A Case Study on the Role of Geological Bedrock in the Water Quality of Fazeliyeh and Enayat-Abad Qanats. National Conference on Qanats. Gonabad, Iran. (In persain). https://elmnet.ir/doc/20423525-64284?elm_num=2

Sami, K. (1992). Recharge mechanisms and geochemical processes in a semi-arid sedimentary basin, Eastern Cape, South Africa. Journal of Hydrology, 139(1-4), 27-48. https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90193-y.

Schwartz, F. W., & Zhang, H. (2004). Fundamentals of ground water. Environ. Geol, 45, 1037-1038. https://www.amazon.com/Fundamentals-Ground-Water-Franklin-Schwartz/dp/1119820138

Schoeller, H. (1956). Géochimie des eaux souterraines. Societe Technip. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3469721

Sikdar, P. K., Sarkar, S. S., & Palchoudhury, S. (2001). Geochemical evolution of groundwater in the Quaternary aquifer of Calcutta and Howrah, India. Journal of Asian Earth Sciences, 19(5), 579-594. https://doi.org/10.1016/s1367-9120(00)00056-0.

Subra Rao, N. (1993). Environmental impact of industrial effluents in groundwater regime of Visakhapatnam industrial complex. http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6376508

World Health Organization (WHO). (2008). Guidelines for drinking water quality, 3rd edn. WHO, Geneva.

Wilcox, L. (1955). Classification and use of irrigation waters (No. 969). US Department of Agriculture.

Yuce, G., Ugurluoglu, D., Dilaver, A. T., Eser, T., Sayin, M., Donmez, M., Sakir, O., & Aydin, F. (2009). The effects of lithology on water pollution: Natural radioactivity and trace elements in water resources of Eskisehir Region (Turkey). Water, air, and soil pollution, 202(1), 69-89. https://doi.org/10.1007/s11270-008-9959-6.