



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

## The effect of karstification on water resource hazards management based on physicochemical factors of water (case study: Valiabad – Hezarcham), Iran

Mehrnoosh Ghadimi<sup>1\*</sup> | Anahita Keynezhad<sup>2</sup> | Rahim Narouei<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [ghadimi@ut.ac.ir](mailto:ghadimi@ut.ac.ir)

2. Department of Earth Sciences, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Chalos branch, Chalos, Iran. Email: [anahita.keynezhad@iauc.ac.ir](mailto:anahita.keynezhad@iauc.ac.ir)

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [rahim.narouie@ut.ac.ir](mailto:rahim.narouie@ut.ac.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article type:

Research Article

#### Article History:

Received 26 January 2024

Revised 09 March 2024

Accepted 10 March 2024

Published 15 March 2024

#### Keywords:

Karst,  
Karst springs,  
Valiabad-Hezarcham,  
Kandovan,  
Karst development  
Vulnerability.

### ABSTRACT

Karstic water sources, in addition to their importance in providing water supplies, are highly vulnerable to contamination. Since the pollution in the karst water resources is transferred quickly and considering the tourism situation of this area, the physicochemical factors and the effect of the karst structure on the spread of pollution were investigated and an attempt was made to study the possibility of this area being karst and the factors of the spread of karst pollution. During the field visit, we investigated the type of formations, the structural features of the area, the extent of layering, the stratigraphic sequence at the location where the springs appear, as well as the geometrical and geological components that cause the structural obstacles. Samples from the springs were collected to study the hydrogeochemical characteristics. AqQA and Phreeqc materials were used to examine the spring water results. We also utilized ArcGIS software and Excel to create the maps and carry out statistical analysis, respectively. The results show that except for S1, all springs have very hard water, indicating that calcium and magnesium are highly dissolved in the Mobarak limestone and Soltanieh dolomite formations. According to Piper's chart, all of the springs are in the classical bicarbonate range, indicating a carbonate source. Stiff diagrams also show that samples S3, S4, S6, and S7 are calcium bicarbonate, while samples S1, S2, S5, and S8 are magnesium bicarbonate. Except for the S6 spring, the region's springs have a low calcium to magnesium ratio, indicating that they are supplied by a dolomite karst aquifer. The Mann-Kendall and Tau-Kendall statistic values derived for most of the springs are negative, indicating a decreasing trend in spring water supply and rainfall in the region. Additional results include a high dissolution of calcium and magnesium in the aquifer's rock, a high relationship between underground water and formation. The region has dolomitic karst aquifers but lacks karst development and diffusion, as revealed by the water's prolonged residence time. However, the interaction between karst and fractures indicates fractures and faults play an important role in groundwater flow. Water outflow through low-discharge fissures indicates the presence of diffusion flow, either turbulent or linear, in the studied area.

**Cite this article:** Ghadimi, M.; Keynezhad, A. & Narouei, R. (2024). The effect of karstification on water resource hazards management based on physicochemical factors of water (case study: Valiabad – Hezarcham), Iran. *Environmental Hazards Management*, 10 (4), 335-354. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.373119.819>



© Mehrnoosh Ghadimi, Anahita Keynezhad, Rahim Narouei.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.373119.819>

**Publisher:** University of Tehran Press.

## Introduction

Karst is a specialized term that refers to the corrosion and dissolution of soluble rocks, particularly carbonate (limestone and dolomite) and evaporite rocks. Karst evolution and development are impacted by a variety of parameters, the most significant of which are rock composition and features, as well as structural factors such as faults and joints. Another essential karst related study is the assessment of chemical and physical characteristics and changes of water, which may be used to determine the form of flow system and hazard management. On the other hand, the interaction between karst and fractures in the region was explored, indicating the importance of fractures and faults in directing groundwater, spreading pollutants, and causing hazards in groundwater sources.

## Study area

The study area was located in the Central Alborz mountain, 40 km south of Marzanabad and near the Valiabad village. The average elevation of the region is ~ 2480 m above the sea level.

## Methodology

The type of uncovered formations, structural properties of the region, layering extent, and stratigraphic sequence were analyzed at the springs' location during field observations. The essential data acquired during field research were analyzed using Tectonics FP and Dips software. Additionally, the excel software was utilized to statistically analyze the acquired data. The hydrogeochemical properties of the karst formations in the research region were then investigated by sampling 8 springs. The results of spring water analysis were examined using AqQA and Phreeqc software.

## Result and discussion

The results show that except for S1, all springs contain very hard water, indicating that calcium and magnesium are highly dissolved in the Mobarak limestone and Soltanieh dolomite formations. According to Piper's chart, all of the springs are in the classical bicarbonate range, indicating a carbonate source. Stiff diagrams also show that samples S3, S4, S6, and S7 are calcium bicarbonate, while samples S1, S2, S5, and S8 are magnesium bicarbonate. Other than the S6 spring, the region's springs have a low calcium to magnesium ratio, indicating that they are supplied by a dolomite karst aquifer.

The Mann-Kendall and Tau-Kendall statistic values derived for most of the springs are negative, indicating a decreasing trend in spring water supply and rainfall in the region. Additional results include a high dissolution of calcium and magnesium in the aquifer's rock, a high relationship between underground water and formation. The region has dolomitic karst aquifers but lacks karst development and diffusion, as revealed by the water's prolonged residence time.

## Conclusion

According to the current study, the interaction between karst and fractures indicates that fractures and faults play an important role in groundwater flow. Water outflow through low-discharge fissures indicates the presence of diffusion flow, either turbulent or linear, in the studied area.

Calcium-to-magnesium ratios close to one indicate dolomite dissolution in the reservoir rock, a high connection of underground water with the formation, and a long residence time of the water, all of which confirm the lack of karst development and karstic system diffusion. In all springs, the saturation index of dolomite is greater than that of calcite, indicating that subsurface water has a longer retention time and that a dolomite karst aquifer exists in the region. Furthermore, supersaturation of the springs with dolomite minerals shows that the subterranean water is more closely linked to the aquifer's lithology, impurities in lime, and the growth of the karst system in the region.



## تأثیر کارستزایی در مدیریت مخاطرات منابع آب براساس فاکتورهای فیزیکوشیمیایی آب (منطقه پژوهش: ولی آباد - هزارچم)

مهرنوش قدیمی<sup>۱\*</sup> | آناهیتا کی نژاد<sup>۲</sup> | رحیم نارویی<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [ghadimi@ut.ac.ir](mailto:ghadimi@ut.ac.ir)
۲. گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس، چالوس، ایران. رایانامه: [anahita.keynezhad@iauc.ac.ir](mailto:anahita.keynezhad@iauc.ac.ir)
۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [rahim.narouie@ut.ac.ir](mailto:rahim.narouie@ut.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### نوع مقاله:

مقاله علمی-مروری

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

#### کلیدواژه:

آسیب‌پذیری،

توسعه کارست،

چشمه‌های کارستی،

کارست،

کندوان،

ولی‌آباد- هزارچم .

منابع آب کارستیک در کنار اهمیت و اثر مهم در تأمین منابع آبی، بسیار آسیب‌پذیرند؛ این موضوع سبب شده است که این منابع همیشه در معرض آلودگی باشند. از آنجا که آلودگی در منابع آبی کارست سریع انتقال پیدا می‌کند و با توجه موقعیت گردشگری این ناحیه، فاکتورهای فیزیکوشیمیایی و عوامل تأثیرگذار در انتشار آلودگی بررسی شد و سعی شد که افزون‌بر مطالعه احتمال کارستی بودن این منطقه، عوامل انتشار آلودگی از این مسیر نیز بررسی شود. این تحقیق روی هشت چشمه در منطقه ولی‌آباد تا هزارچم محور کندوان انجام گرفت. در بررسی‌های میدانی جنس سازندهای رخنمون‌یافته، ویژگی‌های ساختاری منطقه، امتداد لایه‌بندی و توالی چینه‌شناسی در محل مظهر چشمه‌ها، خصوصیات هندسی و زمین‌شناسی عوارض ساختاری ارزیابی شد. برای بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی از چشمه‌ها نمونه‌برداری شده و نتایج آنالیز آب چشمه‌ها از طریق نرم‌افزارهای AqQA و Phreeqc تجزیه و تحلیل شد. برای ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزار ArcGIS و برای مطالعات آماری داده‌های برداشت‌شده از محیط نرم‌افزار اکسل استفاده شد. مقدار آماره من-کندال و تاو-کندال محاسبه شده برای بیشتر چشمه‌ها منفی است که نشان‌دهنده روند کاهشی در آبدی چشمه‌ها و بارش منطقه است. دیگر نتایج، نشان‌دهنده انحلال زیاد کلسیم و منیزیم در سنگ مخزن آبخوان هستند و ارتباط زیاد آب زیرزمینی با سازند و زمان ماندگاری طولانی آب است که تأییدکننده توسعه‌نیافتگی کارست، انتشاری بودن سیستم کارست و وجود آبخوان کارستی دولومیتی در منطقه است. از سوی دیگر، ارتباط کارست با شکستگی‌های منطقه بررسی شد که بیانگر اثر بسزای شکستگی‌ها و گسل‌ها در هدایت آب‌های زیرزمینی است. خروج آب از طریق درز و شکاف‌ها با دبی کم بیانگر وجود جریان انتشاری (آشفته یا خطی) در سیستم کارستی منطقه است.

**استناد:** قدیمی، مهرنوش؛ کی‌نژاد، آناهیتا و نارویی، رحیم (۱۴۰۲). تأثیر کارستزایی در مدیریت منابع آبی فاکتورهای فیزیکوشیمیایی آب (منطقه پژوهش: ولی‌آباد - هزارچم). مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۰ (۴)، ۳۳۵-۳۵۴.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.373119.819>

© مهرنوش قدیمی، آناهیتا کی‌نژاد، رحیم نارویی. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.373119.819>



## ۱. مقدمه

واژه کارست در اصطلاح فنی به پدیده خوردگی و انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر، به‌ویژه سنگ‌های کربناته (آهکی و دولومیتی) و تبخیری اطلاق می‌شود. این پدیده موجب افزایش تخلخل در سنگ می‌شود و شرایط هیدرولوژی و شیمیایی متمایزی را برای سرزمین‌های کارستی در بر دارد [۲۰]. رخنمون سازندهای کارستیک ۲۰ درصد از سطح قاره‌ها را فرا گرفته است [۲۰]. ۱۱ درصد از مساحت ایران را نیز سازندهای کارستی پوشانده است [۲، ۳]. حدود ۱۰/۵ درصد از مساحت کشور توسط سازندهای سنگ کربناته پوشیده شده و بررسی‌های ژئومورفولوژیکی تفاوت‌های واضحی را بین میزان و شدت توسعه لندفرم سطحی کارست پیدا کرده‌اند؛ به‌طوری که کارست در مناطق مرطوب‌تر مانند زاگرس فراوان‌تر و در مناطق خشک مانند ایران مرکزی بسیار محدود است [۲۶]. در البرز توسعه کارست‌ها بیشتر در نواحی شمال شرقی صورت گرفته است که علت آن محدود بودن حضور سنگ‌های کربناته نسبت به سنگ‌های آذرین است [۱۵]. تحول و توسعه کارست تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط آب‌وهوایی، ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی، نیروهای تکتونیک و فرسایش قرار دارد. در این میان تأثیر ترکیب سنگی و عوامل ساختاری همچون گسل‌ها و درزه‌ها اهمیت زیادی دارد که در مدت زمان طولانی، پدیده‌ها و مناظر کارستی را با ویژگی‌های خاص و منحصربه‌فرد ایجاد کرده است [۲۷].

عوامل مؤثر و لازم برای ایجاد و توسعه کارست به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و وضعیت هیدروژئولوژیکی تقسیم می‌شوند [۳۹]. اولین مراحل کارستی شدن از انحلال آهک‌ها در امتداد ناپیوستگی‌های خطی مانند مرز لایه‌ها یا شکستگی‌ها شکل می‌گیرد [۱۲]. ناپیوستگی‌ها، موجب نفوذ بارش به درون سنگ‌ها می‌شوند و وجود آب موجب باز شدن شکاف‌ها و در نهایت گسترش کارست می‌شود [۹]. عوامل تکتونیک تأثیر زیادی بر هیدروژئولوژی سنگ‌های کربناته و آهکی دارد، زیرا بستر را برای انحلال آهک و ایجاد شبکه‌های کارستی فراهم می‌کنند. این تأثیر به‌طور مستقیم توسط شرایط جریان آب اعمال می‌شود که به توزیع منافذ وابسته است و در اثر تکتونیک، درون سنگ آهک به وجود آمده است [۲۴]. ونی<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) عنوان کرد که سنگ‌های کربناته به‌خصوص در صورتی که ضخیم و توده‌ای باشند، بسیار شکننده‌اند [۳۸]. خرد شدن این طبقات در اثر شکستگی‌های ثانویه موجب افزایش تخلخل و نفوذپذیری و گسترش شبکه‌های کارستی به‌صورت افقی و عمودی در منطقه می‌شود [۸].

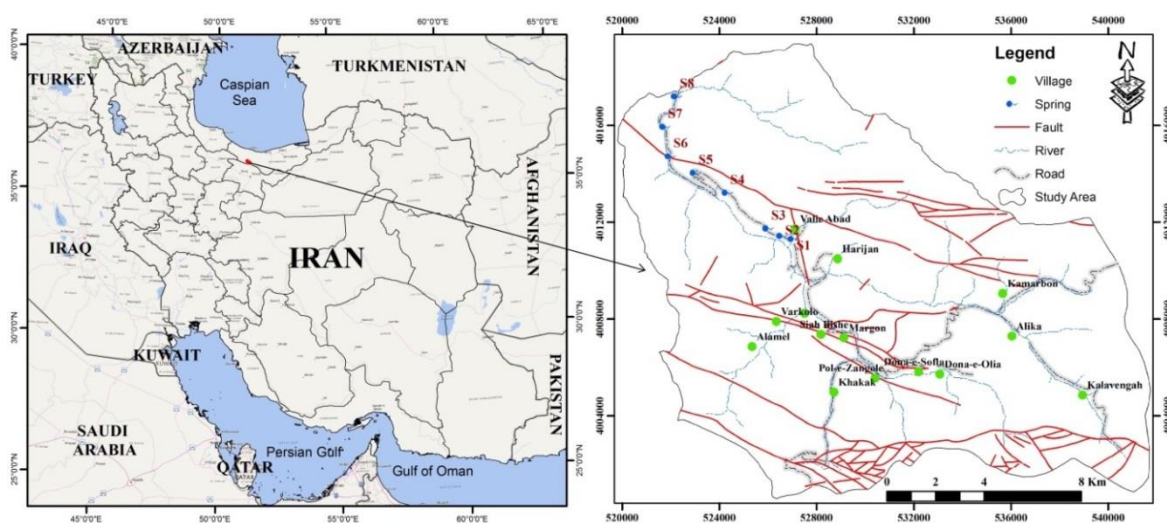
یکی دیگر از مهم‌ترین پژوهش‌ها در سفره‌های کارستی، ارزیابی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و روند تغییرات آنهاست که با استفاده از آنها می‌توان نوع سیستم جریان را مشخص کرد. برای ارزیابی خصوصیات فیزیکوشیمیایی جریان آب زیرزمینی از اطلاعاتی استفاده می‌شود که این اطلاعات به عوامل مختلفی از قبیل زمین‌شناسی محل، میزان و نوع هوازدگی سنگ‌ها، کیفیت آب تغذیه‌ای به داخل سفره و همچنین واکنش‌های هیدروژئوشیمی وابسته است [۱۸]. بسیاری از اطلاعات از جمله محل تغذیه، نوع مخزن، زمان ماندگاری و ... را می‌توان با استفاده از خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب با دقت بیشتری ارزیابی کرد. بنابراین از ترکیبات شیمیایی موجود در آب می‌توان به‌عنوان ردیاب‌های طبیعی برای تجزیه و تحلیل ساختار و دینامیک آبخوان‌های کارستی استفاده کرد [۴۰]. چشمه‌های کارستی تنها محلی هستند که می‌توان با کمک مدل‌های هیدروژئوشیمیایی و هیدروگراف جریان چشمه‌ها، اطلاعاتی از عملکرد کل سیستم کارست در یک ناحیه به‌دست آورد [۱۶]. همچنین چشمه‌های کارستی می‌توانند اطلاعات مهم و باارزشی را درباره فرایندهای هیدروژئولوژیکی و ساختار درونی آبخوان‌ها، به‌ویژه درباره سیستم جریان‌های پیچیده آب زیرزمینی که در آنها اندازه‌گیری نقطه‌ای از چاه‌ها امکان‌پذیر نیست، در اختیار بگذارند و منعکس‌کننده فرایندهایی باشند که در مقیاسی بزرگ اتفاق می‌افتند [۳۰]. با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی می‌توان برخی از خصوصیات مسیر حرکت آب و نوع سیستم جریان غالب را تشخیص داد. یک روش رایج و کم‌هزینه برای بررسی سفره‌های کارستی، بررسی تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی است [۳۵].

هدف این تحقیق، بررسی توسعه کارست با استفاده از داده‌های فیزیکوشیمیایی به‌منظور مدیریت منابع آبی در منطقه ولی‌آباد- هزارچم است. جامعه نمونه، هشت چشمه کارستی است. از آنجا که آلودگی در منابع آبی کارست سریع انتقال پیدا می‌کند، این تحقیق با بررسی فاکتورهای فیزیکوشیمیایی و عوامل تأثیرگذار در آلودگی انجام گرفت. بررسی سیستم کارست‌زایی

منطقه ولی‌آباد - هزارچم برای اولین بار انجام گرفته و بررسی‌های گذشته تنها منوط به کیفیت آب چشمه‌ها برای شرب توسط بخش خصوصی بوده است.

## ۲. منطقه پژوهش

محدوده تحقیق در دامنه شمالی البرز مرکزی، در ۴۰ کیلومتری جنوب مرزن‌آباد و حوالی روستای ولی‌آباد قرار دارد (شکل ۱). مسیر ارتباطی منطقه محور کرج-چالوس است. در منطقه البرز مرکزی به‌لحاظ توپوگرافی و زمین‌ریخت‌شناسی بیشترین ناهمواری‌ها و بلندترین ارتفاعات، گسل‌های مهم نظیر راندگی‌ها و گسل‌های معکوس کمربند چین‌خورده- رانده البرز وجود دارد [۵]. متوسط ارتفاع حوضه آبخیز حدود ۲۴۸۰ متر از سطح آب‌های آزاد است.

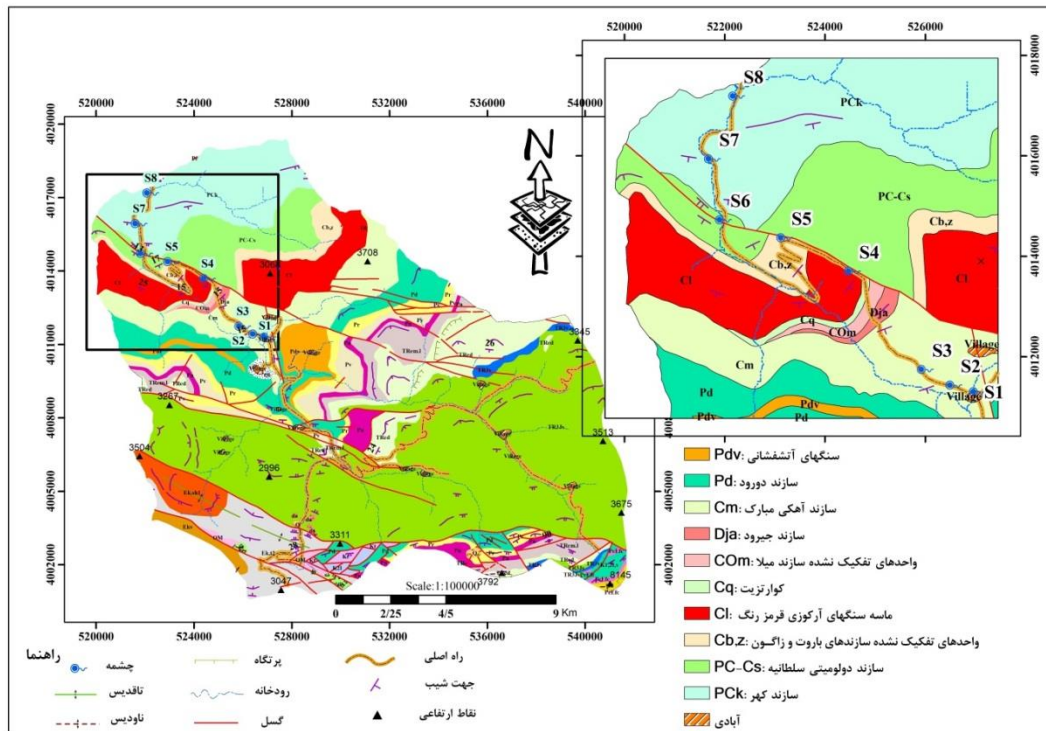


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده پژوهش

## ۳. زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی منطقه

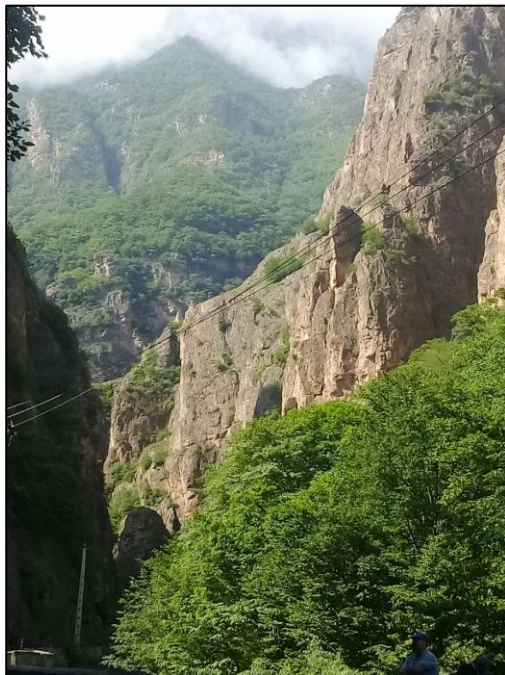
منطقه ولی‌آباد- هزارچم در نیمه شمالی گستره البرز مرکزی قرار دارد. این بخش از البرز مرکزی در سراسر گستره البرز دارای بیشترین ارتفاع است و نامتقارن‌ترین بخش را بین دامنه‌های شمالی و جنوبی به‌سبب عملکرد شدید فرسایش و حفرشدگی دره به خود اختصاص داده است. شیب توپوگرافی دامنه‌های شمالی بسیار بیشتر از دامنه‌های جنوبی آن است. منطقه پژوهش دارای بلندی‌های پرشماری تا ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر است. در برخی نقاط و به پیروی از ساختار زمین‌شناسی کم‌و‌بیش خاوری-باختری البرز، در اثر گسله‌ها و راندگی‌ها، الگوی کوه دره در چند نوبت تکرار شده است [۵].

کهن‌ترین سنگ‌های منطقه به دو سازند کهر (PE<sub>K</sub>) و سلطانیه (PE-C<sub>S</sub>) محدود می‌شود که مربوط به دوره پرکامبرین هستند (شکل ۲). سازند کهر، اغلب شامل ماسه‌سنگ، لای‌سنگ، کوارتزیت و میان لایه‌هایی از شیل و دولومیت است. سازند سلطانیه در منطقه، اغلب شامل سنگ‌های دولومیتی با لایه‌بندی منظم، ضخیم تا نازک لایه است (شکل ۳). مهم‌ترین سازندهای دوره پالئوزوئیک که در منطقه رخمون دارند، شامل سازندهای باروت (E<sub>br</sub>)، زاگون (E<sub>Z</sub>)، لالون (E<sub>L</sub>)، میلا (E<sub>m</sub>)، جبرود (D<sub>j</sub>)، مبارک (C<sub>m</sub>) و دورود (P<sub>d</sub>) هستند. سنگ آهک‌های مبارک نیز گسترش زیادی در منطقه دارد. این سنگ‌ها دارای دامنه‌هایی با شیب تند و میان لایه‌های شیل مارنی هستند (شکل ۳). سازند دورود، در مقطع تیپ، در شمال شرقی روستای دورود با ضخامت ۱۸۲ متر رخمون دارد. نهشته‌های این سازند شامل ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ و شیل‌های سرخ‌رنگ، گاهی با تناوبی از سنگ آهک‌های مارنی است [۱۴].



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه پژوهش [۱۴].

همانگ با میزان مقاومت سازندها در برابر فرسایش و جایگاه ساختاری مربوط، ریخت‌هایی بسیار متنوع پدید آمده‌اند. نهشته‌های به نسبت نرم‌تر سازند شمشک و نیز رسوبات ماری آهکی کرتاسه بالا، نقاط پست و دامنه‌هایی کم‌ارتفاع‌تر را ساخته‌اند. دولومیت‌های مقاوم سازند سلطانیه، سنگ آهک‌های صخره‌ساز سازند مبارک، برجستگی‌ها و دیواره‌هایی پرشیب تا نزدیک به قائم پدید آورده‌اند [۵]. چشمه‌های کارستی این منطقه از سه سازند آهک مبارک، بخش دولومیتی سازند سلطانیه و بخش دولومیتی سازند کهر تغذیه می‌شوند.



شکل ۳. مظهر چشمه S1 سازند آهکی مبارک (تصویر سمت راست)، بخش دولومیتی سازند سلطانیه (تصویر سمت چپ). [نگارنگان، بهار ۱۴۰۱]

#### ۴. مواد و روش‌ها

در بررسی‌های میدانی جنس سازندهای رخنمون‌یافته، ویژگی‌های ساختاری منطقه، امتداد لایه‌بندی و توالی چینه‌شناسی در محل مظهر چشمه‌ها ارزیابی شد. در این پژوهش با توجه به ابعاد و توزیع شکستگی‌ها (بیشتر شکستگی‌ها طولی‌اند)، مسیرهای پیمایش در تمام مسیر جاده در نظر گرفته شده است. در هنگام برداشت داده‌های میدانی، خصوصیات هندسی و زمین‌شناسی عوارض ساختاری اندازه‌گیری و برداشت شد. این ویژگی‌ها شامل امتداد شکستگی‌ها، مقدار شیب و جهت آن، مقدار بازشدگی دهانه چشمه، وجود پرشدگی دهانه چشمه و جنس آن، جنس سنگ‌هایی که شکستگی در آن ظهور پیدا کرده است، فاصله بین درزه‌های متعلق به سیستم درزه‌های مختلف و اندازه‌گیری طول شکستگی‌هاست. برای بررسی‌های هندسی و تعیین نوع درزه‌ها در ارتباط با لایه‌بندی و نیز در ارتباط با روند کلی چین‌خوردگی البرز، همچنین ترسیم نمودارهای استریوگرافیک در نیمکره پایین تصویر، گل سرخی، نمودار قطب درزه‌ها و دیگر گراف‌های مربوط، داده‌های برداشت‌شده در مطالعات صحرایی، از نرم‌افزارهایی مانند TectonicsFP و Dips استفاده شد. همچنین برای مطالعات آماری از داده‌های برداشت‌شده از نرم‌افزار ارتقایافته اکسل استفاده شد.

در مرحله بعد هشت چشمه به‌منظور بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی سازندهای کارستی منطقه برای نمونه‌برداری انتخاب شد (شکل ۱، جدول ۱). از هر چشمه یک نمونه برای بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی برداشت شد (جدول ۳). نتایج آنالیز آب چشمه‌ها از طریق نرم‌افزارهای AqQA و Phreeqc تجزیه و تحلیل شد. برای ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزار ArcGIS و برای مطالعات آماری داده‌های برداشت‌شده، از محیط نرم‌افزار اکسل استفاده شد. سپس با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از مراحل قبلی وضعیت کارستی شدن منطقه ارزیابی شد.

جدول ۱. مشخصات هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی چشمه‌ها براساس داده‌های صحرایی (نگارندگان، ۱۴۰۱)

کد چشمه	سازند	جنس سنگ مظهر چشمه	فاصله از نزدیک‌ترین گسل (m)	نوع دهانه چشمه	رنگ آب
S1	مبارک (C <sub>m</sub> )	سنگ آهک	۲۰۲	نقطه‌ای	شفاف
S2	مبارک (C <sub>m</sub> )	سنگ آهک	۶۱۵	خطی	نیمه کدر
S3	مبارک (C <sub>m</sub> )	سنگ آهک	۱۰۳۱	نقطه‌ای	شفاف
S4	سلطانیه (PE-E <sub>s</sub> )	دولومیت روشن	۵۷۶	نقطه‌ای	شفاف
S5	سلطانیه (PE-E <sub>s</sub> )	واریزه پای کوهی با سیمان تراورتن	۳۷۷	نقطه‌ای	شفاف
S6	سلطانیه (PE-E <sub>s</sub> )	دولومیت روشن	۵۶	خطی	شفاف
S7	کهر (PE <sub>K</sub> )	دولومیت	۹۲۸	خطی	شفاف
S8	کهر (PE <sub>K</sub> )	دولومیت	۲۲۱۵	خطی	شفاف

#### ۴.۱.۴. سختی کل

سختی آب به غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم در آب وابسته است و به‌طور معمول واحد آن میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم است. سختی آب به دو گروه تقسیم می‌شود: سختی کربناته؛ سختی غیرکربناته. سختی کربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم است که با آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات ترکیب می‌شوند. سختی غیرکربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم است که با آنیون‌های غیر از کربنات و بی‌کربنات ترکیب می‌شوند (مانند سولفات). در بررسی سختی آب به‌طور معمول این دو نوع سختی (سختی کربناته و غیرکربناته) از هم تفکیک نمی‌شوند و مجموع آنها محاسبه می‌شود که به آن سختی کل گفته می‌شود. برای محاسبه سختی کل نمونه‌های آب از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۱۰].

$$H = 2.5[Ca] + 4.1[Mg] \quad (1)$$

که در آن H مقدار سختی برحسب میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم و Ca و Mg به‌ترتیب غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم برحسب میلی‌گرم در لیتر است. برای تعیین نوع آب براساس سختی، از رابطه رایج تاد ۱۹۸۰ استفاده شد. در این طبقه‌بندی آب‌ها به چهار گروه براساس سختی کل تقسیم می‌شوند (جدول ۲).

جدول ۲. طبقه‌بندی آب‌ها براساس سختی کل [۳۷، ۱۰]

گروه	۱	۲	۳	۴
میزان سختی	کمتر از ۷۵	۷۵-۱۵۰	۱۵۰-۳۰۰	بیشتر از ۳۰۰
نوع آب	نرم	به نسبت سخت	سخت	خیلی سخت

## ۲.۴. شاخص اشباع‌شدگی

دو روش برای محاسبه شاخص اشباع وجود دارد. روش اول محاسبه شاخص اشباع به کمک رابطه ۲ است [۱۳].

$$SI = \text{Log} \left( \frac{IAP}{KS} \right) \quad (2)$$

در این رابطه SI شاخص اشباع، IAP محصول یونی و KS ثابت انحلال‌پذیری کانی مورد نظر در حالت تعادل است. روش دوم استفاده از نرم‌افزار PhreeQC است [۱۳].

## ۵. نتایج و بحث

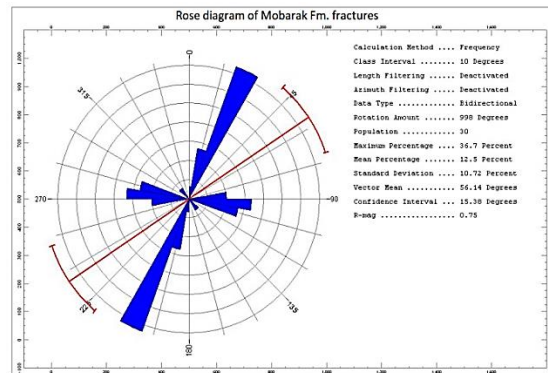
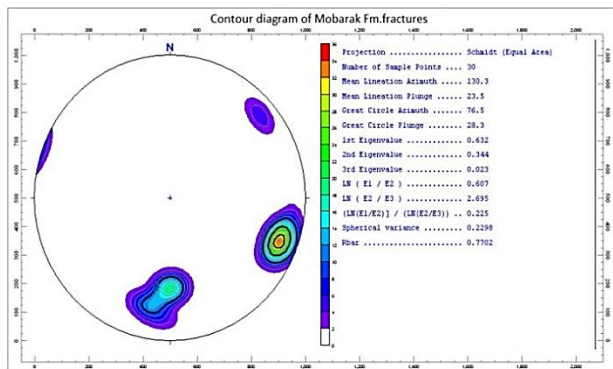
### ۵.۱. ارتباط کارست با شکستگی‌های منطقه

نگاه کلی به ساختار البرز نشان می‌دهد که در البرز جنوبی گسل‌های رورانده با شیب تند به سوی جنوب و در البرز شمالی، شیب روراندگی‌ها به سوی شمال است و میل گسله‌ها به طرف شمال، نشانگر حرکت کلی به سوی شمال است [۴]. در منطقه پژوهش، مجموعه‌ای از سیستم راندگی و گسله‌های معکوس اغلب بزرگ‌زاویه دیده می‌شود [۱۴].

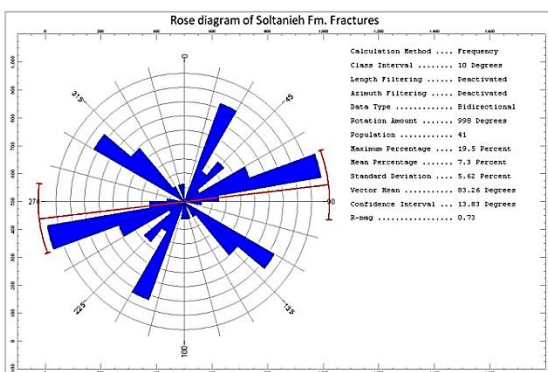
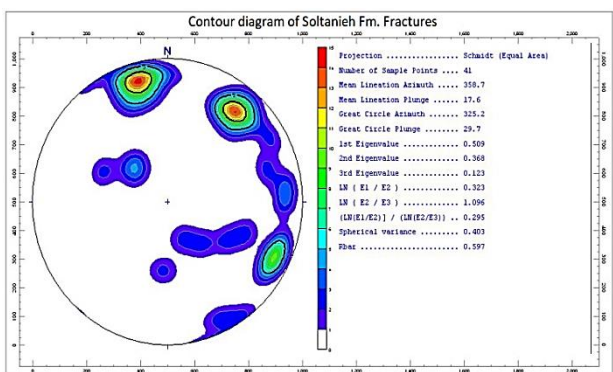
مهم‌ترین گسله منطقه ولی‌آباد - هزارچم، شامل گسله امتدادلغز راستگرد معکوس بزرگ زاویه ولی‌آباد با درازای بیش از ۱۹ کیلومتر در راستای عمومی جنوب خاوری - شمال باختری است. سازوکار این گسله در بخش جنوب خاوری، تلفیقی از حرکت‌های معکوس بزرگ‌زاویه و مایل‌لغز بوده و در بخش شمال باختری از نوع امتدادلغز راستگرد است که سبب شده در امتداد این گسله، سازند سلطانیه در دره ژرف مشهود باشد. عملکرد این گسله در محدوده پژوهش به صورت امتدادلغز راستگرد، سبب جابه‌جایی بخش فوقانی سازند سلطانیه، سازندهای باروت، زاگون، لالون و مبارک شده است که به طور پراکنده در مجاورت جاده در محدوده هزارچم دیده می‌شوند. از طرف دیگر مجموعه گسله‌های ولی‌آباد - هزارچم که بیشتر آنها شیب‌های تند تا قائم دارند، سیستم شکستگی‌های شایان توجهی را ایجاد کرده‌اند که با وجود دره‌های ژرف با دیواره عمودی و درازای چشمگیر، چشم‌اندازهای بسیار زیبایی ایجاد کرده‌اند. وجود چشمه‌های کارستی، ایجاد کانال‌های کارستی در امتداد آنها، مرطوب بودن سطح این شکستگی‌ها، بازشدگی‌های انحلالی در امتداد این شکستگی‌ها، وجود اشکال کارستی در سطح سازندها، ما را بر آن داشت تا به بررسی این شکستگی‌ها و ارتباط آنها با کارست‌زایی منطقه پرداخته شود. به منظور بررسی کلی نقش تکتونیک و این شکستگی‌ها در تشکیل کارست منطقه، امتداد همه گسل‌ها و شکستگی‌های اصلی، فرعی و حتی لایه‌بندی موجود در سازندهای آهکی - دولومیتی مبارک و سلطانیه به صورت صحرایی برداشت شد و امتداد و جهت شیب آنها روی نمودارهای گلسرخی و منحنی هم‌ارزی قطب منتقل و مقایسه شد (شکل‌های ۴ و ۵). افزون بر آن به بررسی مشخصات درزه‌ها و شکستگی‌ها پرداخته شد تا به درک بهتری از شرایط کارست‌زایی، نحوه عملکرد آن و سرعت حرکت آب‌های جاری در بین شکستگی‌ها به لحاظ مهندسی برسیم.

نتیجه تحقیق نشان داد که امتداد شیب شکستگی‌های سنگ آهک‌های سازند مبارک اغلب به طرف شمال غربی و جنوب شرقی است و آزیموت بیشتر آنها در دامنه N025-N035 دیده می‌شود؛ اما تعداد کمتری از آنها نیز امتداد شرقی - غربی دارند (شکل ۶) که در دیاگرام‌های قطبی تجمع نقاط قطبی در نیمکره جنوبی بیانگر تجمع دوقطبی آنها، شیب زیاد این شکستگی‌ها و آزیموت جهت شیب این شکستگی‌هاست. لایه‌بندی این سازند دارای مشخصه (Dip/Dip direction: 26/145) است.

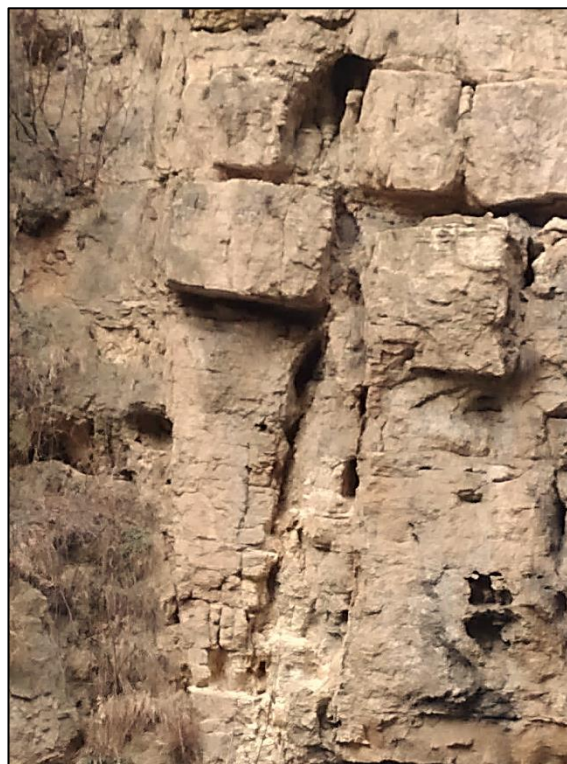
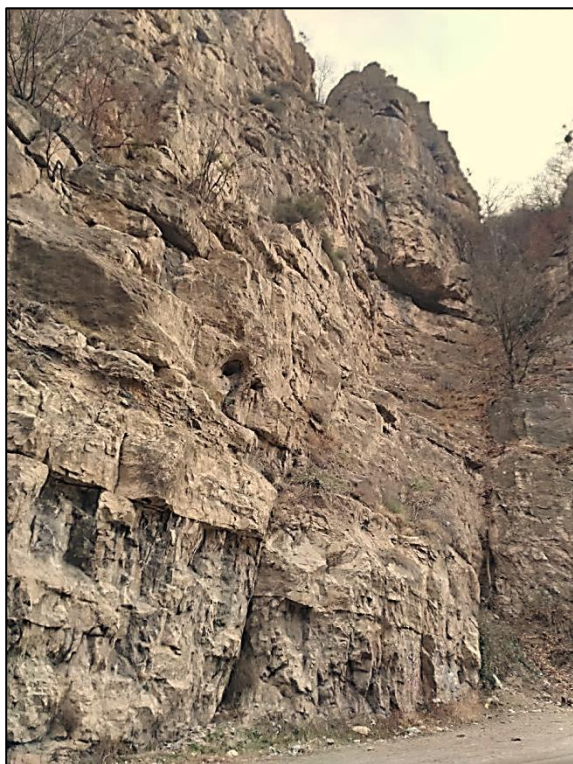




شکل ۴. نمودار منحنی هم‌ارزی قطب (شکل چپ) و نمودار گل‌سرخ (شکل راست) درزه‌های برداشت‌شده در سنگ آهک مبارک



شکل ۵. نمودار منحنی هم‌ارزی قطب (شکل چپ) و نمودار گل‌سرخ (شکل راست) درزه‌های برداشت‌شده در دولومیت سلطانیه



شکل ۶. وضعیت لایه‌بندی و شکستگی‌ها در سنگ آهک سازند مبارک (شکل سمت چپ- دید به شمال شرق) و دولومیت‌های سازند سلطانیه (شکل سمت راست- دید به شمال)

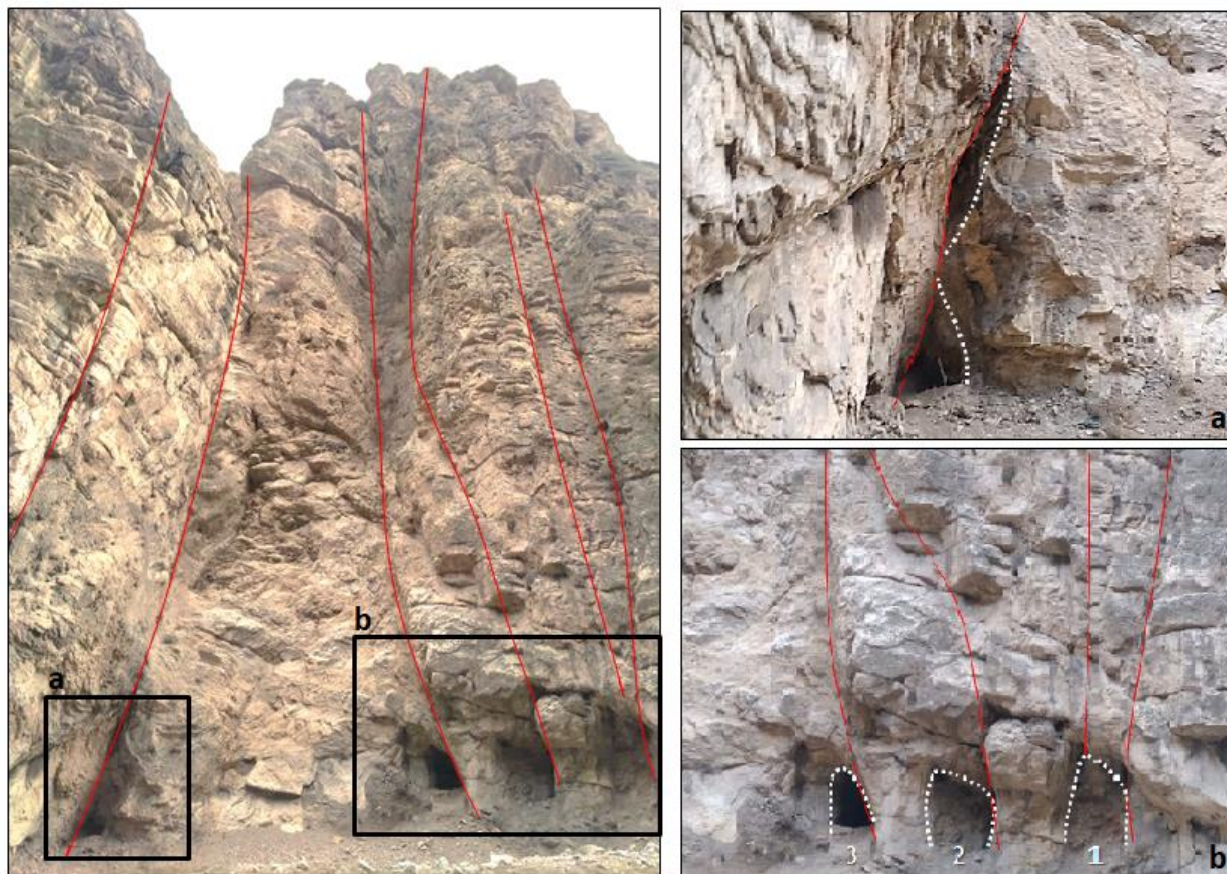
امتداد شکستگی‌های سنگ آهک‌های دولومیتی سازند سلطانیه نشان‌دهنده اکثر اندازه‌گیری‌ها در سه جهت اصلی تقریباً شرقی-غربی با آژیموت (N070 - N080)، شمال شرقی-جنوب غربی با آژیموت (N025 - N035) و شمال غربی-جنوب شرقی با آژیموت (N300-N320) است. تجمع نقاط قطبی در نیمکره جنوبی نشان می‌دهد که دیاگرام قطبی تمرکز ۳ قطبی است که نشان‌دهنده شیب زیاد این شکستگی‌ها و آژیموت جهت شیب این شکستگی‌هاست. لایه‌بندی در این سازند دارای مشخصه (Dip/Dip direction: 05/192) است.

سطح بیشتر شکستگی‌ها دارای هوازگی نوع W2-W3 (در سیستم ISRM) و زبری ۸-۱۲ (در سیستم JRC) و بازشدگی تا ۲/۵ متر است و در صورت پرشدگی با انواع loam، برش و خرده‌سنگ‌های سیمان‌شده دیده می‌شوند. برخی از آنها مرطوب و برخی خشک هستند. آثار انحلالی و کانالی شدن در بیشتر شکستگی‌ها و مرتبط با آنها دیده می‌شود. حتی در امتداد لایه‌بندی‌ها نیز این آثار با گستردگی زیاد و ایجاد غارهای انحلالی مشاهده می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷. ایجاد اشکال و غارهای انحلالی در امتداد لایه‌بندی سنگ آهک‌های سازند مبارک در منطقه هزارچم

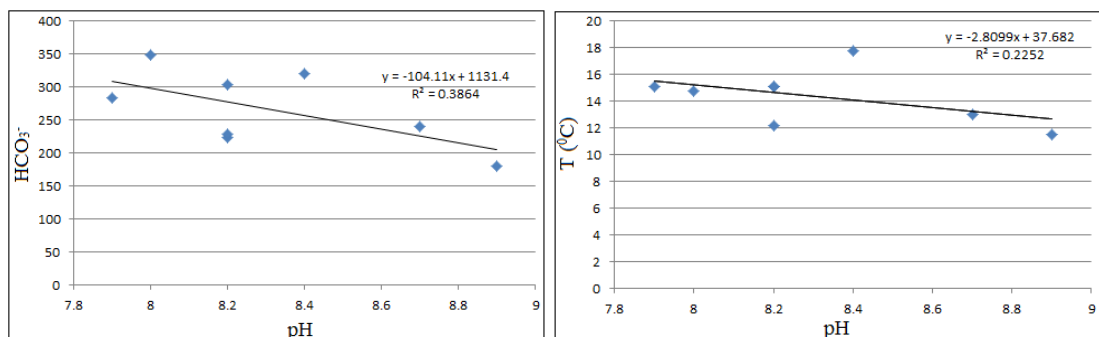
آنچه در بررسی کانال‌های انحلالی در امتداد این شکستگی‌های موازی دیده می‌شود، استفاده آب‌های کارستی از این شکستگی‌ها و ایجاد کانال در آنهاست و به نظر می‌رسد که این کانال‌زایی به صورت متناوب و در چند دوره صورت گرفته است. به‌صورتی که به مرور زمان با ایجاد کانال در یک شکستگی و انحلال آن جریان ادامه دارد، اما به‌علت فعال بودن تکتونیک منطقه و حرکات گسله‌ها، گاهی با حرکت گسل، کانال‌های فعال توسط برش‌های گسلی و خاک مسدود می‌شود و آب‌های کارستی برای ادامه جاری شدن، شروع به حفر کانال‌های جدید در شکستگی‌های مجاور و در نهایت تغییر مسیر می‌دادند. این توالی در برخی نواحی تا چهار دوره مشاهده شده است (شکل ۸). آنچه از این بحث دریافت می‌شود تأثیر گسترده شکستگی‌ها و گسل‌ها در هدایت آب‌های زیرزمینی و توسعه کارست‌زایی منطقه است. حتی چشمه‌های نقطه‌ای همگی در امتداد گسل‌ها برونزد دارند و چشمه‌های خطی در امتداد لایه‌بندی‌ها نمود یافته‌اند.



شکل ۸. کانال‌های انحلالی در امتداد گسل‌های موازی. در شکل b کانال‌های انحلالی متناوب را نشان می‌دهد. کانال ۱ قدیمی‌تر بوده و توسط برش‌های گسلی ناشی از حرکت گسل پر شده است. کانال ۲ پس از تغییر مسیر جریان آب ایجاد شده و به‌صورت نیمه مسدود است و در نهایت کانال ۳ جدیدترین کانال انحلالی و کاملاً باز است. در شکل a نیز یک کانال انحلالی باز با گستردگی زیاد در امتداد گسل دیده می‌شود.

## ۲.۵. اسیدیت (pH) و درجه حرارت آب (T)

مقدار pH آب به عوامل مختلفی مانند مقدار کربن دی‌اکسید محلول در آب، مقدار آنیون‌های بی‌کربنات و کربنات و همچنین درجه حرارت آب وابسته است [۶] مقدار pH همه نمونه‌ها در محدوده قلیایی قرار دارد. با افزایش pH، مقادیر بی‌کربنات و درجه حرارت کاهش می‌یابد (جدول ۳، شکل ۹).



شکل ۹. روند تغییرات اسیدیت با درجه حرارت و بی‌کربنات. (نگارنگان، ۱۴۰۱)

با توجه به جدول ۳ و با مقایسه داده‌ها، کمترین درجه حرارت (۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد) مربوط به چشمه S1 است که در بین چشمه‌های نمونه‌برداری شده کمترین مقدار منیزیم (۲۷/۳ mg/l) را نیز دارد. کم بودن درجه حرارت نشان‌دهنده زمان ماندگاری کمتر

[۱] و انحلال کمتر منیزیم و همچنین سرعت بیشتر عبور آب از منطقه تغذیه به محل خروج آب در چشمه است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مسیر جریان آب از محل تغذیه تا چشمه S1 کوتاه تر یا جریان از نوع مجرای با شیب هیدرولیکی زیاد است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکوشیمیایی چشمه ها

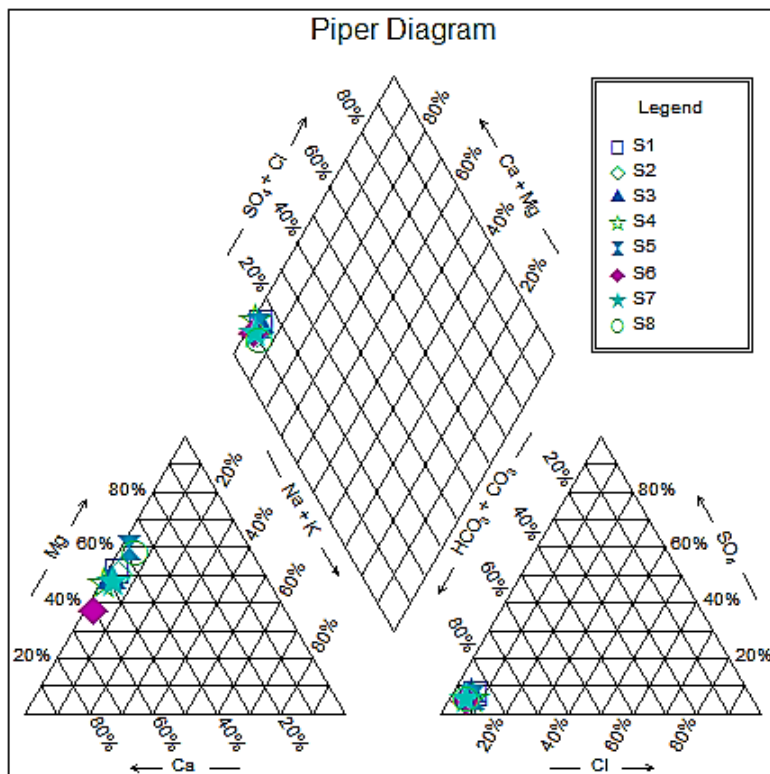
Springcode	X	Y	pH	T (°C)	سختی آب mg/l	Ca/mg	Alkalinity	شاخص اشباع کلسیت SI <sub>c</sub>	شاخص اشباع دولومیت SI <sub>D</sub>	شاخص اشباع آراگونیت SI <sub>A</sub>
S1	۵۲۷۰۳۵	۴۰۱۱۳۰۸	۸/۹	۱۱/۵	۲۱۱/۹	۱/۴۷	۱۵۳	۱/۰۶	۲/۱۲	۰/۹۱
S2	۵۲۶۵۶۲	۴۰۱۱۴۳۷	۸/۷	۱۳	۳۰۸/۲	۱/۵۲	۱۵۷	۱/۰۸	۲/۴۶	-۰/۵۹
S3	۵۲۶۰۰۱	۴۰۱۱۷۵۱	۸/۲	۱۵/۱	۳۰۰/۳	۱/۶۹	۱۷۴	۱/۳۱	۲/۶۲	۱/۱۶
S4	۵۲۴۳۱۷	۴۰۱۳۲۲۰	۸/۲	۱۲/۲	۴۸۰/۵	۱/۸۲	۱۸۸	۱/۴۷	۲/۸۶	۱/۳۲
S5	۵۲۳۰۰۶	۴۰۱۴۰۴۷	۷/۹	۱۵/۱	۴۶۰/۰	۱/۰۲	۱۸۴	۱/۳۵	۲/۹۲	۱/۲
S6	۵۲۱۹۷۴	۴۰۱۴۷۲۹	۸/۰	۱۴/۸	۶۱۶/۵	۲/۶۵	۱۹۳	۱/۶۵	۳/۱	۱/۵
S7	۵۲۱۷۵۵	۴۰۱۵۹۴۴	۸/۲	۱۵/۱	۳۶۴/۲	۱/۶۸	۱۹۰	۱/۴۱	۲/۸۱	۱/۲۶
S8	۵۲۲۳۳۷	۴۰۱۷۱۹۶	۸/۴	۱۷/۸	۳۴۰/۱	۱/۰۴	۱۹۵	۱/۳۱	۲/۸۷	۱/۱۶

### ۳.۵. سختی آب (H)

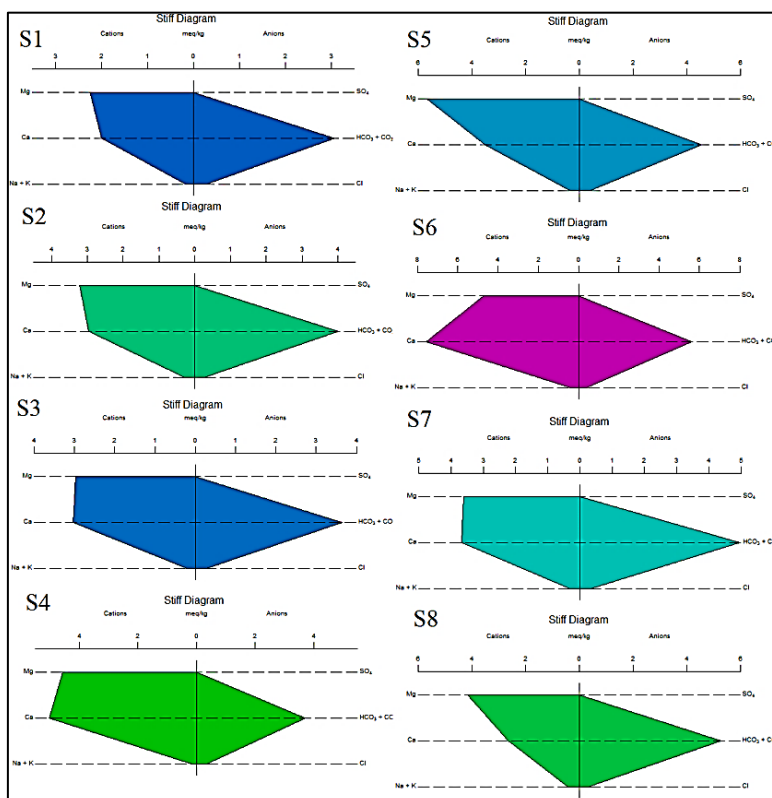
سختی آب چشمه ها براساس طبقه بندی تاد (۱۹۸۰) به جز چشمه S1 که در رده سخت قرار می گیرد، بقیه چشمه ها در طبقه خیلی سخت قرار می گیرند (جدول ۳). کمترین سختی آب مربوط به چشمه S1 (۲۱۱/۹ mg/l) و بیشترین سختی مربوط به چشمه S6 (۶۱۶/۵ mg/l) است. سختی زیاد آب نشان دهنده انحلال زیاد کلسیم و منیزیم در سنگ مخزن آبخوان چشمه هاست.

### ۳.۵.۴. تیپ و رخساره آب

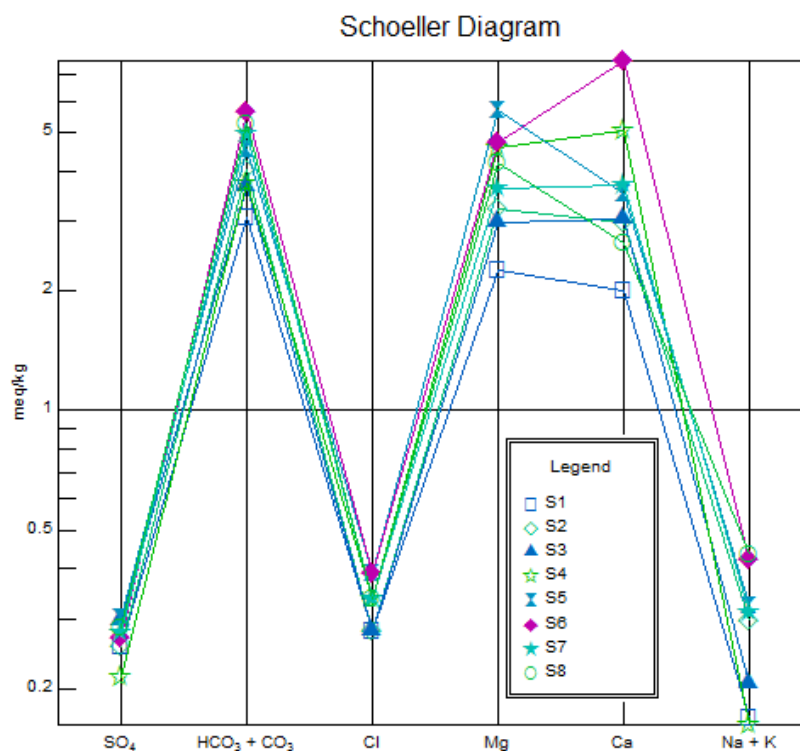
به منظور اثبات کارستی بودن منشأ چشمه ها، رخساره و تیپ آب، نمودارهای پایپر، استیف و شولر ترسیم شد. با توجه به نمودار پایپر کل چشمه های تحت بررسی در رخساره بی کربناته کلسیک قرار دارند (شکل ۱۰). قرار گرفتن کل چشمه ها در محدوده بی کربناته کلسیک نشان دهنده کارستی بودن منشأ این چشمه هاست. زیرا بی کربنات کلسیک خاص نواحی کارستی است. با توجه به اینکه با دور شدن از مناطق تغذیه، تیپ آب زیرزمینی از بی کربناته و کربناته به سولفات و در نهایت کلروره تغییر می یابد [۱۱]، چشمه های نمونه برداری شده به منشأ بسیار نزدیک اند، زیرا تیپ بی کربناته دارند. استفاده از دیاگرام استیف یکی از بهترین روش ها برای تعیین تیپ نمونه های آب است. شکل ۱۱ نمودار استیف ترسیم شده برای نمونه های آب چشمه ها را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است همه نمونه ها دارای آنیون غالب بی کربنات و کاتیون غالب در نمونه های S3، S4، S6 و S7 کلسیم و کاتیون غالب در نمونه های S1، S2، S5 و S8 منیزیم است. به عبارت دیگر نمونه های S3، S4، S6 و S7 دارای تیپ بی کربنات کلسیم و نمونه های S1، S2، S5 و S8 دارای تیپ بی کربنات منیزیم هستند. به منظور بررسی منشأ چشمه ها، نمودار شولر برای همه نمونه ها ترسیم شد (شکل ۱۲). خطی که غلظت یون های نمونه S2 را به هم متصل می کند موازی با خط مشابه با نمونه S3، همچنین نمونه S7 با نمونه S8 بوده و به نوعی توجه کننده منشأ یکسان برای نمونه های برداشت شده از چشمه هاست. همان طور در شکل ۳ نیز مشخص است، مظهر چشمه های S2 و S3 روی سازند آهکی مبارک و چشمه های S7 و S8 روی بخش دولومیتی سازند کهر قرار دارند که تأیید کننده منشأ یکسان چشمه های یاد شده است.



شکل ۱۰. نمودار پایپر چشمه‌های منطقه



شکل ۱۱. نمودار استیف چشمه‌های منطقه



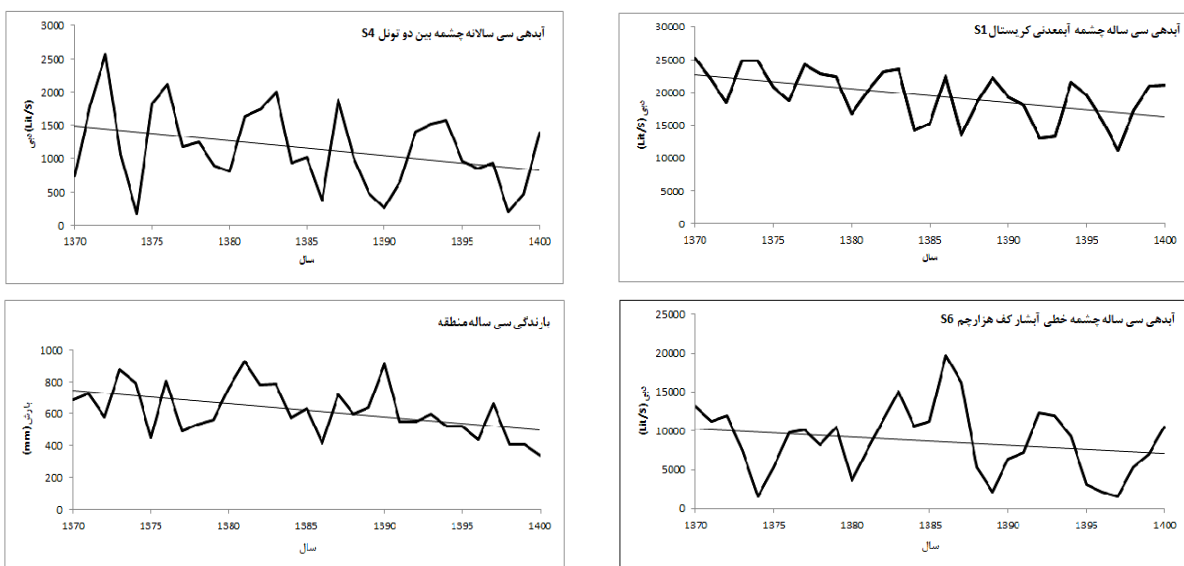
## ۵.۵. تغییرات آبدهی

برای بررسی تغییرات آبدهی چشمه‌های کارستی منطقه، از بین چشمه‌های موجود، سه چشمه S4، S1 و S6 به‌واسطه داشتن آمار مناسب انتخاب شدند و به‌منظور بررسی وضعیت آبدهی و تغییرات دبی، یک دوره آماری سی‌ساله به‌عنوان دوره آماری مشترک از سال ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ گزینش شد. طبق مراحل کار رحمتی (۱۳۹۲) [۷]، بعد از بازسازی کاستی‌های آماری، نمودار تغییرات آبدهی چشمه‌ها در طول دوره آماری ترسیم شد. همچنین برای بررسی تأثیر فاکتورهای اقلیمی بر مقدار آبدهی هر یک از چشمه‌های تحت بررسی، تغییرات مهم‌ترین فاکتور یعنی بارش، براساس داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به منطقه ترسیم شد. به‌منظور تشخیص هر گونه روند احتمالی در سری آماری بارندگی و آبدهی چشمه‌ها در طول دوره آماری، از آزمون غیرپارامتری من-کندال (۱۹۴۵) و سپس کندال (۱۹۴۸) استفاده شد.

از سوی دیگر، برای بررسی تغییرات آبدهی چشمه‌ها و بارش منطقه از میانگین متحرک استفاده شد؛ به این صورت که برای بهتر نشان دادن تغییرات در طول دوره آماری، میانگین متحرک سی‌ساله برای آبدهی هر یک از چشمه‌ها و همچنین بارش منطقه محاسبه و نمودار ترسیم شد که نتایج آن در شکل ۱۳ ارائه شده است. برای تعیین وجود یا نبود روند در تغییرات آبدهی و بارش منطقه از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده شد. همچنین از مدل‌های رگرسیونی برای تعیین مقادیر آبدهی چشمه‌ها و بارش در منطقه استفاده شد که براساس معیار همبستگی بهترین رابطه برازش داده‌شده در بین داده‌ها رابطه خطی انتخاب شد که نتایج حاصل از داده‌های آبدهی چشمه‌ها و برازش مدل رگرسیونی خطی در شکل ۱۴ ارائه شده است. آماره‌های مربوط به روند آبدهی چشمه‌ها و بارش منطقه شامل سطح معنی‌داری، آماره من-کندال، تاو کندال، میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱۳. میانگین متحرک آبدی سی‌ساله چشمه‌های S1، S4 و S5 و مقدار بارش سی‌ساله منطقه



شکل ۱۴. روند تغییرات آبدی سی‌ساله چشمه‌های S1، S4 و S5 و مقدار بارش سی‌ساله منطقه

جدول ۴. آماره‌های مربوط به آبدی چشمه‌ها و بارش منطقه

متغیر	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	سطح معنی‌داری	آماره من-کندال	آماره تاو-کندال
بارش	۶۴۰/۰۴۶۳	۳۳۳/۷	۹۳۰	۱۵۳/۰۱۱	۰/۰۰۲	-۰/۲۶۵	-۰/۳۶۱
آبدی S1	۲۰۱۶۴/۱	۲۱۱۰۰	۲۰۱۸۰	۴۷۴۱/۰۲۵	۰/۰۰۱	-۱۱۱۱۳	-۱/۰۰۸
آبدی S4	۱۱۸۷/۶۳۳	۱۳۸۲	۱۶۲۲	۲۸۳/۷۵	۰/۰۰۷	-۲۳۸	-۰/۲۹۹
آبدی S6	۲۱۳۵۱/۷۳	۱۰۵۷۰	۷۶۵۴	۵۱۰۳/۹۳	۰/۰۰۱	-۱۱۷۵	-۱/۰۷۵

نتایج بررسی روند با استفاده از آماره من-کندال در چشمه و بارش منطقه نشان داد که سطح معنی‌داری روند تغییرات آنها به ترتیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲ است؛ در حالی که روند تغییرات آبدی چشمه S4 معنی‌دار نبوده است و سطح معنی‌داری آن ۰/۰۰۷ است. همچنین مقدار آماره من-کندال محاسبه شده منفی است که نشان‌دهنده روند کاهشی در آبدی چشمه‌ها و بارش

منطقه است. علت معنی‌دار نبودن سطح چشمه S4 را می‌توان سطح زیاد حوضه آبرگی، حجم زیاد مخزن و نوع درز و شکاف‌های کارستی منطقه دانست [۷].

## ۶. ارزیابی توسعه کارست و آسیب‌پذیری

برای ارزیابی توسعه کارست از روش نسبت یونی Ca/Mg، شاخص‌های اشباع و نمودارهای ترکیبی یون-یون استفاده شد.

### الف) نسبت Ca/Mg

نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم در سفره‌های کارستی کربناته شاخص بسیار مناسبی برای تشخیص سفره‌های کارستی آهکی از سفره‌های کارستی دولومیتی، خالص بودن یا خالص نبودن آهک و پتانسیل بیشتر یا کمتر سنگ مخزن برای کارستی شدن و تشخیص مجرای یا انتشاری بودن سیستم کارستی است. به‌طور کلی، نسبت‌های نزدیک به ۱ مربوط به سفره‌های کارستی دولومیتی و نسبت‌های بین ۲ تا ۱۰ مربوط به سفره‌های کارستی آهکی است. مشاهده نسبت‌های بیشتر از ۱۰ در آب‌های کارستی نشان‌دهنده درصد خلوص بیشتر آهک یا وجود کانی‌های ژپس یا انیدریت در سازندهای آهکی است [۲۳]. نسبت کم و نزدیک به ۱ کلسیم به منیزیم در چشمه‌های منطقه به‌جز چشمه S6 به‌روشنی گویای آبخوان کارستی دولومیتی تغذیه‌کننده چشمه‌هاست (جدول ۳). همچنین مقادیر نسبت کلسیم به منیزیم نزدیک به ۱ نشان‌دهنده انحلال دولومیت در سنگ مخزن، ارتباط زیاد آب زیرزمینی با سازند و زمان ماندگاری طولانی آب است که تأییدکننده توسعه‌نیافتگی کارست و انتشاری بودن سیستم کارست است.

### ب) شاخص‌های اشباع

شاخص‌های اشباع کلسیت و دولومیت برای همه چشمه‌ها بیشتر از ۱ است که بیانگر فوق اشباع بودن آب زیرزمینی نسبت به این دو عنصر است (جدول ۳). علت فوق اشباع بودن چشمه‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت وجود سازندهای آهکی و دولومیتی در منطقه است. نتایج آنالیز XRF روی سازند مبارک نشان می‌دهد که مقدار CaO در هر دو نمونه به‌ترتیب ۵۵/۱۸ و ۵۴/۶۸ درصد و مقدار MgO به‌ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۲۳ درصد است (جدول ۵). درصد زیاد CaO نشان‌دهنده وجود سازند آهکی است. بنابراین سازند مبارک به‌دلیل دارا بودن بیش از ۵۰ درصد CaO و درصد کم MgO، سازند آهکی شناخته می‌شود. شاخص اشباع آراگونیت در همه چشمه‌ها به‌جز چشمه S2 مثبت است و در محدوده فوق اشباع قرار دارد. مقدار شاخص اشباع آراگونیت چشمه S2 برابر ۵/۵۹- است که نسبت به آراگونیت تحت اشباع است. با توجه به اینکه چشمه‌های S1 و S2 از سازند آهکی مبارک تغذیه می‌شوند و مقدار شاخص اشباع آراگونیت در چشمه S1 مثبت و فوق اشباع است، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار رسوب آراگونیت در مخزن و مجاری عبور آب چشمه S2 زیاد است. مقادیر شاخص اشباع دولومیت نسبت به شاخص اشباع کلسیت در همه چشمه‌ها بیشتر است که بیانگر زمان ماندگاری طولانی آب زیرزمینی و همچنین وجود آبخوان کارستی دولومیتی در منطقه است. همچنین فوق اشباع بودن چشمه‌ها از کانی دولومیت بیانگر ارتباط بیشتر آب زیرزمینی با لیتولوژی آبخوان، ناخالصی در آهک و انتشاری بودن سیستم کارست منطقه است.

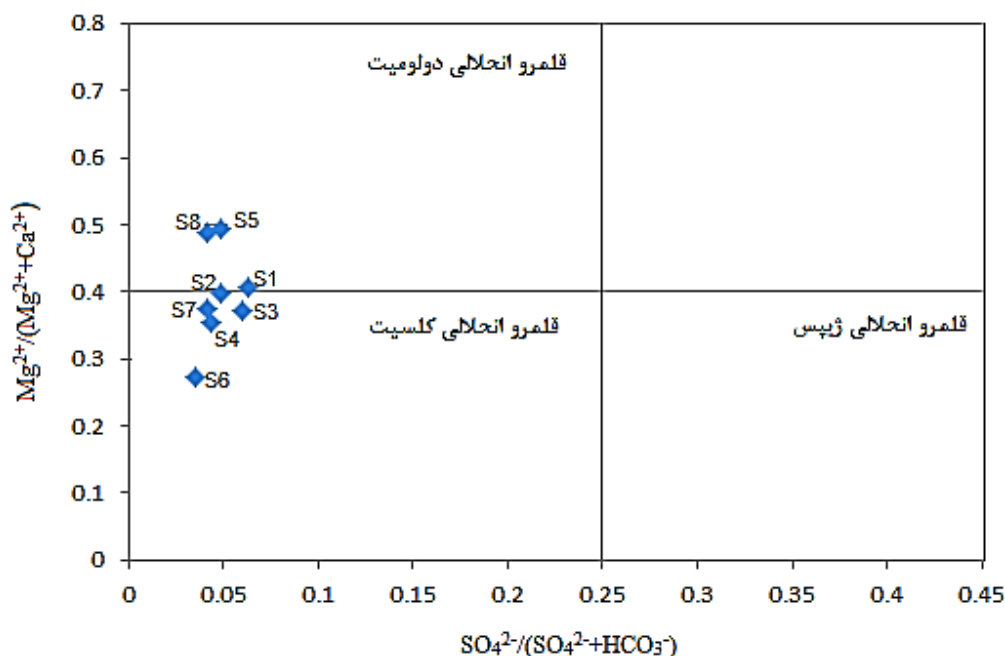
جدول ۵. آنالیز شیمیایی XRF بر روی سازند آهکی مبارک

Sample	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	Na2O	K2O	MgO	TiO2	MnO	P2O5	L.O.I
S1	۰/۶۸	۰/۳۹	۰/۱۷	۵۵/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۷۸	۴۲/۱۴
S2	۱/۰۶	۰/۶۹	۰/۳۶	۵۴/۶۸	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۰۷۲	۰/۰۰۳	۰/۵۸	۴۱/۷۳



## ج) نمودار ترکیبی دو متغیره

از نمودار  $\text{SO}_4^{2-}/(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-)$  در مقابل  $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})$  برای تعیین قلمرو انحلالی چشمه‌ها (کلسیت و دولومیت) استفاده شد. شکل ۱۵ موقعیت چشمه‌ها روی نمودار ترکیبی دو متغیره را نشان می‌دهد. براساس این نمودار چشمه‌های S1، S5 و S8 در محدوده قلمرو انحلالی دولومیت و بقیه چشمه‌ها در محدوده قلمرو انحلالی کلسیت قرار دارند.



شکل ۱۵. موقعیت چشمه‌ها بر روی نمودار ترکیبی دو متغیره.

## ۷. نتیجه‌گیری

بررسی میزان توسعه و تحول کارست مستلزم مطالعات هیدروژئوشیمیایی یا هیدروژئولوژیکی است. براساس نتایج این پژوهش میزان سختی آب در تمامی چشمه‌ها به جز چشمه S1 در رده خیلی سخت قرار دارد که نشان‌دهنده انحلال زیاد کلسیم و منیزیم در سنگ مخزن آبخوان (سازندهای آهکی مبارک و دولومیتی سلطانیه) چشمه‌هاست. با توجه به نمودار پایپر کل چشمه‌ها در محدوده بی‌کربناته کلسیک قرار دارند که نشان‌دهنده کارستی بودن و نزدیکی آنها به منشأ است. نمودار استیف نیز نشان می‌دهد که نمونه‌های S3، S4، S6 و S7 دارای تیپ بی‌کربنات کلسیم و نمونه‌های S1، S2، S5 و S8 دارای تیپ بی‌کربنات منیزیم هستند. نسبت کم و نزدیک به ۱ کلسیم به منیزیم در چشمه‌های منطقه به جز چشمه S6 به روشنی گویای آبخوان کارستی دولومیتی تغذیه‌کننده چشمه‌هاست. همچنین مقادیر نسبت کلسیم به منیزیم نزدیک به ۱ نشان‌دهنده انحلال دولومیت در سنگ مخزن، ارتباط زیاد آب زیرزمینی با سازند و زمان ماندگاری طولانی آب است که تأییدکننده توسعه‌نیافتگی کارست و انتشاری بودن سیستم کارست است. مقادیر شاخص اشباع دولومیت نسبت به شاخص اشباع کلسیت در تمامی چشمه‌ها بیشتر است که بیانگر زمان ماندگاری طولانی آب زیرزمینی و همچنین وجود آبخوان کارستی دولومیتی در منطقه است. همچنین فوق‌اشباع بودن چشمه‌ها از کانی دولومیت بیانگر ارتباط بیشتر آب زیرزمینی با لیتولوژی آبخوان، ناخالصی در آهک و انتشاری بودن سیستم کارست منطقه است. شرایط زمین‌شناسی و ساختاری منطقه و همچنین تراکم به نسبت زیاد شکستگی‌ها و خروج آب از طریق درز و شکاف‌ها با دبی کم بیانگر وجود جریان انتشاری (آشفته یا خطی) در سیستم کارستی منطقه است. تأثیر گسترده شکستگی‌ها و گسل‌ها در هدایت آب‌های زیرزمینی به‌وضوح مشهود است. حتی همه چشمه‌های نقطه‌ای در امتداد گسل‌ها برونزد دارند و چشمه‌های خطی در امتداد لایه‌بندی‌ها نمود یافته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که این سفره کارستی به سبب دارا بودن خلل و فرج و درزها و شکاف‌های فراوان، وجود شکستگی‌های سیستماتیک هدایت‌گر آب کارست در این حوضه، نازک بودن خاک‌های سطحی و قرارگیری آن در مجاورت رستوران‌ها در محور کندوان بسیار آسیب‌پذیر است. با توجه به حساسیت زیاد سیستم‌های

زهکشی کارست به انتقال یا ورود هر گونه ماده آلاینده، وجود هر گونه مواد آلاینده مانند زباله، فضولات دامها، جریان یافتن پسابهای کشاورزی و مسکونی و فاضلابهای خانگی به رودخانهها و نیز رهاسازی زباله توسط گردشگران که از عوامل بالقوه در آسیبپذیری منابع آب کارست این حوضه است، بهراحتی آب، خاک و حتی انسان را آلوده می کند و نیازمند مدیریت منابع آلوده کننده این ناحیه است.

## منابع

- [۱] آقائی، زینب (۱۳۸۹). بررسی هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی پالنگان کردستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی غلامحسین کرمی، شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود، گروه علوم زمین.
- [۲] احمدی. حسن (۱۳۸۲). ژئومورفولوژی کاربردی، چاپ سوم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [۳] افراسیابان، احمد (۱۳۷۲). مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی: کرمانشاه- تهران.
- [۴] اشتوکلین، یوان؛ و افتخارنژاد، جمشید (۱۹۶۹). نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ زنگان، تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۵] بلورچی، محمدجواد؛ انتظام، ایمان؛ محمودپور، محی‌الدین؛ کریم‌نژاد طاری، سوزان؛ و شمشکی، امیر (۱۳۸۵)، گزارش بررسی خطر سنگ ریزش در جاده چالوس، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شماره ۸۵-۱-۱-En Geo.
- [۶] حاجی‌زاده ذاکر، ناصر؛ و اقتصادی عراقی، پیمان (۱۳۸۸). خصوصیات و تغییرات فصلی pH در فلات قاره جنوبی دریای خزر. *محیط‌شناسی*، ۳۵(۵۱)، ۱۹-۲۶.
- [۷] رحمتی، محمد؛ مرادی، حمیدرضا؛ و کریمی، حاجی (۱۳۹۲). مطالعه چشمه‌های کارستی و روند تغییرات آبدهی آنها در بلندمدت، مجموعه مقالات اولین همایش ملی مدیریت منابع طبیعی: گرگان، دانشگاه گنبد کاووس.
- [۸] عزیززاده، مهران (۱۳۷۵). تحلیل شکستگی‌های گسل قطر- کازرون و تأثیر آن در گسترش منابع آب کارستی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد تکنیک به راهنمایی محسن پورکرمانی، تهران: دانشگاه شهید بهشتی تهران، دانشکده علوم زمین.
- [۹] قبادی، محمدحسین؛ و امیری، مهرداد (۱۳۹۷). ارزیابی توسعه کارست براساس ویژگی‌های لیتولوژیکی، مورفولوژیکی و ساختاری در منطقه حسن‌آباد قلعه بزی مبارکه اصفهان، بیست‌ویکمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، قم.
- [۱۰] قدیمی، مهرنوش؛ احمدی، حسن؛ مقیمی، ابراهیم؛ و جعفریگللو، منصور (۱۳۹۲). بررسی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی اشترانکوه در ارتباط با سازندهای زمین‌شناسی منطقه. *منابع طبیعی ایران*، ۲(۶۷)، ۲۶۳-۲۷۸.
- [۱۱] محمدزاده، حسین (۱۳۹۵). تهیه نقشه پهنه‌بندی و خط ایزوتویی نزولات جوی استان کرمانشاه و بررسی منشأ آب‌های سطحی و زیرزمینی و تعیین سن نسبی و زمان ماندگاری آب‌های کارستی با استفاده از ردیاب‌های هیدروشمیایی و ایزوتویی، مرکز تحقیقات آب‌های زیرزمینی (متاب)، مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۱۲] محمدزاده، حسین؛ نصری حصار، وحید؛ و رحیمی، بهنام (۱۴۰۲). پتانسیل توسعه کارست و مدل مفهومی کارست ساختگاه سد ایبورد با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی ساختاری و ژئوتکنیک و روش سلسله‌مراتبی AHP. *مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، ۱۶(۲)، ۸۹-۱۰۴.
- [۱۳] محمدی، سارا (۱۳۹۷). طبقه‌بندی ژئومورفولوژیک آبخوان‌های کارستی استان کرمانشاه براساس تجزیه و تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی، رساله دکتری، کرمانشاه: دانشگاه رازی.
- [۱۴] وحدتی دانشمند، فرهاد (۱۳۷۹). نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مرزن‌آباد، تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [15] Alimoradi, S., Nassery, H., Alijani, F., & Karimi, H. (2022). Comparison of physical, chemical and hydrogeological characteristics of karst springs in the western and eastern regions of Ilam province, Iran, *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 8(1), 1-27.
- [16] Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: A challenge for new resources. *Hydrogeology*, 13: 148–160. doi: 10.1007/s10040-004-0402-9.
- [17] Chitsazan, M., Vardanjani, H.K., Karimi, H. & Charchi, A. (2015). A comparison between karst development in two main zones of Iran: case study—Keyno anticline (Zagros Range) and Shotori anticline (Central Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 8(12), 10833-10844. doi:10.1007/s12517-015-1961-x.
- [18] Coetsiers, M., & Walraevens, K. (2006). Chemical characterization of the Neogene Aquifer, Belgium; *Hydrogeology*, 14: 1556–1568. Doi: 10.1007/s10040-006-0053-0.
- [19] Demiroglu, M., Orgun, Y., & Yaltirak, C. (2011). Hydrogeology and hydrogeochemistry of Gunyuzu semi-arid basin (Eskisehir, Central Anatolia). *Environment Earth Science*, 64:1433–1443. doi:10. 1007/s12665-011-0967-2.
- [20] Ford D.C, Williams PW (2007). *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman, London. doi:10.1007/978-94-011-7778-8.
- [21] Gams, I. (1966). Factor and dynamics of corrosion of the carbonate rocks in the Dinaric and Alpine karst of Slovenia (Yugoslavia). *Geografski Vestnik*, 38: 11-68.

- [22] Garrels R.M., & Christ C.L. (1965). *Solutions, minerals, and equilibria*. Harper and Row, New York, 9: 450. doi: 10.1180/minmag.1966.035.275.21.
- [23] Hounslow, A.W. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC Press LLC, Lewis Publishers, Boca Raton .doi: 10.1201/9780203734117.
- [24] Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A. S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., & Veni, G. (2020). Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal*. 28: 1661-1677. doi: 10.1007/s10040-020-02139-5.
- [25] Karami, Gh. (2002). Assessing the heterogeneity and flow system types in karstic aquifers using pumping test data, ph.D. Thesis, University of Newcastle, Newcastle Upon Tyne, 180 pp.
- [26] Karami, H., & Bahadorinia, Sh. (2017). An introduction to hypogene Karst regions and caves of Iran. *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. doi: 10.1007/978-3-319-53348-3\_29.
- [27] Karimi, H. (2012). Hydrogeology of karstic area, Hydrogeology- a global perspective, www.intechopen.com/books/ Hydrogeology- a global perspective/ Hydrogeology of karstic area.
- [28] Kresic, N., & Stevanovic, Z. (2010). *Groundwater Hydrology Of Springs*, Butterworth-Heinemann Is An Imprint Of Elsevier. doi: 10.3986/ac.v39i2.238.
- [29] Lakey, B.L., & Krothe, N.C. (1996). Stable isotopic variation of starm discharge from a perennial karst spring. *Indiana, Water Resources Research*, 32: 721-731. doi: 10.1029/95WR01951.
- [30] Manga, M. (2001). Using springs to study groundwater flow and active geologic processes. *Annu. Rev. Earth Planet*. 29:201–28.
- [31] Marfiaa, A.M., Krishnamurthya, R.V., Atekwanab, E.A., & Pantonc, W.F. (2004). Isotopic and Geochemical Evolution of Ground and Surface Waters in A Karst Dominated Geological Setting: A Case Study From Belize, Central America. *Applied Geochemistry*, 19: 937–946. doi: 10.1016/j.apgeochem.2003.10.013.
- [32] Moral, F., Cruz-Sanjulia'n, J.J., & Oli'as, M. (2008). Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain), *Journal of Hydrology* 360: 281–296. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.012.
- [33] Peiyue, L., Jianhua W., & Hui Q. (2012). Assessment of Groundwater Quality for Irrigation Purposes and Identification of Hydro geochemical Evolution Mechanisms In Pengyang County, China. *Environment Earth Science*, 69:2211–2225. doi: 10.1007/s12665-012-2049-5.
- [34] Raeisi, E., Pezeshkpoor, P., & More, F. (1993). Characteristics of karst aquifer as indicated by temporal changes of the springs physico-chemical parameters. *Iranian Journal of Science and Technology*, 17: 17–28.
- [35] Raeisi, A., Ringwald, P., Safa, O., Shahbazi, A., Ranjbar, M., Keshavarz, H., Nateghpour, M., & Faraji, L. (2006). Monitoring of the therapeutic efficacy of chloroquine for the treatment of uncomplicated, Plasmodium falciparum malaria in Iran. *Annals Trop Med Parasitol*. 100(1): 11–16. doi: 10.1179/136485906X86220.
- [36] Shuster, E.T., & White W.B. (1971). Seasonal fluctuations in the Chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 111-128 pp. doi: 10.1016/0022-1694(71)90001-1.
- [37] Todd, D.K. (1980). *Ground water hydrology*, John Wiley and Sons. New York, pp 539.
- [38] Veni, G. (1987). Fracture permeability: Implications on cave and sinkhole development and their environmental assessments. In: F.B. Beck and W.L. Williams(eds.), *Karst Hydrogeology: Engineering environmental applications*, Blakeman.
- [39] White, W. B. (1988). *Geomorphology and Hydrology of karst*, oxford university press.
- [40] White, W. B. (2010). Springwater geochemistry. In: Kresic, N., Stevanovic, Z., *Groundwater Hydrogeology of Springs*, Elsevier Inc, USA: 231–268.
- [41] Zölt, J. (1960). Die Hydrographic des nordost Alpinen Karsts. *Steirsche Beitrage Hydrogeology*, 2: 53-183.