



Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>



Hydrogeochemical evolution and water-rock interaction of the Allah Akbar karstic hot springs in Dargaz, Khorasan Razavi Province

Hossein Mohammadzadeh^{1,2*}, Banafsheh Asadi Chahar Borj²

1. Groundwater and Geothermal Research Center (GRC), Water and Environment Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2. Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Article info

Article type

Research Article

Article history

Received: 24 June 2026

Accepted: 15 August 2026

Keywords:

Hydrogeochemistry, Kopet-Dagh Basin, Tirgan Formation, Travertine, Karst aquifer.



Abstract

Investigating the hydrogeochemical evolution of hot springs through the analysis of water-rock interaction enables the identification of flow paths, dissolution processes, ion exchange, and water quality. In this study, the chemical behavior of the hot and cold karstic springs of the Allah Akbar heights in Dargaz, Khorasan Razavi Province, was investigated to explain their origin and geochemical evolution. During field operations, rock samples were collected from the Tirgan carbonate formation and the travertines of the area, and facies and diagenetic history were determined through thin-section studies. Additionally, ten water samples were collected from hot and cold karstic springs during the wet and dry seasons (2023), and physicochemical parameters (T, pH, EC, Eh, TDS, and DO) were measured. Thin-section studies of the Tirgan Formation indicate a dual porosity system in this formation, which increases the water-rock contact surface and plays a direct role in enriching the water with calcium and bicarbonate ions, ultimately leading to the formation of travertine deposits around the hot springs. The presence of Quaternary travertines along active faults indicates the continuation of these processes up to the present day. The water temperature in cold springs ranges from 15.6 to 19.4 °C, while it increases up to 32.2 °C in hot springs. Furthermore, the EC of the water samples varies in the range of 256 to 1022 µS/cm. Major ion concentrations were measured in the laboratory. The data were processed using various hydrogeochemical techniques, including Piper, Gibbs, Schoeller, and Wilcox diagrams, saturation index (SI), and Eh-pH diagram. The results indicate that the hydrogeochemical evolution of the hot springs results from the interaction of three main factors: primary lithology (Tirgan Formation), diagenetic history (dissolution and creation of dual porosity), and tectonic structures. The water of the hot springs is of the calcium-bicarbonate type with a common origin, whereas the Chelmir spring exhibits a sulfate type. Based on the Gibbs diagram, weathering of carbonate rocks is the main factor controlling water chemistry, and the saturation index confirms the supersaturation of the water with respect to calcite and dolomite. The water quality of most springs falls within the "good to acceptable" range for drinking and in class C3-S1 for irrigation. This research clarifies the role of diagenesis and dual porosity in the hydrogeochemical evolution of the Tirgan aquifer and reveals the geotourism potential of the hot springs.

Introduction

The quality of groundwater is as important as its quantity, and water-rock interaction plays a key role in their hydrogeochemical evolution (Hem, 1985; Walton, 1970). Hot springs, due to deep circulation and long-term contact with rocks, are natural laboratories for studying these processes (Fouke, 2011). Despite numerous studies in Iran and worldwide (Nohegar, 2011; Mao et al., 2015; Shakeri et al., 2025), no comprehensive research has simultaneously investigated the petrography of the Tirgan Formation, the hydrogeochemical evolution, and water quality of the hot and cold springs of Allah Akbar in Dargaz for drinking, agricultural, industrial, and

geotourism purposes. The main goal of this research is to determine the chemical type and facies of karst hot springs, identify the role of the Tirgan Formation and carbonate-evaporation units in providing water ions and forming travertine, determine the water-rock interaction processes (dissolution, cation exchange, oxidation-reduction), evaluate water quality for drinking, agriculture, and industry, and investigate the geotourism potential of the hot springs of the Allah Akbar heights of Dargaz.

Materials and Methods

DOI 10.22034/kjes.2026.11718

*Corresponding author: Hossein Mohammadzadeh; E-mail: mohammadzadeh@um.ac.ir

How to cite this article: Mohammadzadeh, H., Asadi Chahar Borj, B., 2026. Hydrogeochemical evolution and water rock interaction of the Allah Akbar karstic hot springs in Dargaz, Khorasan Razavi Province. Kharazmi Journal of Earth Sciences 12(1), 209- 233. <http://doi.org/10.22034/kjes.2026.11718>



Spring locations were mapped on 1:100,000 geological maps using ArcGIS. Rock samples from the Tirgan Formation and travertines were collected, and several thin sections were prepared for petrographic analysis following Dunham (1962), Flügel (2010), and Moore and Wade (2013). Ten water samples were collected during wet (June) and dry (November) seasons in 2023. Field parameters (T, pH, EC, Eh, TDS, DO) were measured in situ using a TROLL 9500 meter. Major cations (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) were analyzed by atomic absorption spectroscopy (AAS) and anions (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}) by ion chromatography (IC). Calibration used multi-level standards ($R^2 > 0.995$). Quality control included CRMs and duplicates ($\text{RSD} < 5\%$, recovery 98–102%). Charge balance error (CBE) was within $\pm 5\%$. Data were processed using Excel, Grapher, Chemistry, and PhreeQC. Water types, governing mechanisms, saturation indices, and water quality for drinking, agriculture, and industry were determined using Piper, Gibbs, Eh-pH, Schoeller (Wilcox, 1955), and LSI diagrams, respectively. A schematic flow model was constructed by integrating all the data.

Results and Discussion

Petrographic analysis of the Tirgan Formation reveals that this formation consists of gray to pinkish limestones with mudstone and calci-mudstone textures, showing a gradual transition to the Shurijeh Formation (Behzadfar, 2011; Javanbakht et al., 2018). Thin-section studies of four representative samples (AK-F-1, AK-F-2, AK-M-U3, AK-C-1) indicate facies diversity, including calm lagoon (AK-F-2 with Orbitolina), oxidized platform margin (AK-F-1 with iron sulfide veins), and high-energy environments (AK-M-U3 with oncoids), which created initial rock heterogeneity. Evidence of preferential dissolution and hydrothermal cementation (drusy texture and sparry calcite) records two diagenetic stages that generated a dual fissure-vuggy porosity system in the Tirgan Formation. This system, by increasing the water-rock contact surface, has directly enriched groundwater with Ca^{2+} and HCO_3^- ions and promoted travertine formation. Field parameters show that the Chehelmir spring, with a temperature of 18°C , has the highest EC ($1022 \mu\text{S}/\text{cm}$), resulting from water circulation through the Shurijeh Formation (containing gypsum and anhydrite). The fault-controlled hot springs (Imam Qanbar, Qoljeq, Aghdash) exhibit temperatures of $25\text{--}32^\circ\text{C}$ with moderate EC. Gorni Waterfall, with $\text{EC}=256 \mu\text{S}/\text{cm}$, represents freshwater, while Meyab spring ($\text{EC}=565 \mu\text{S}/\text{cm}$) is affected by sewage contamination. The pH ranges from 7.2 to 8.2, and oxidizing to moderately oxidizing conditions ($\text{Eh}=0.34\text{--}0.65 \text{ V}$) stabilizes HCO_3^- , SO_4^{2-} , and NO_3^- , while preventing H_2S and CH_4 formation. Chemical reactions indicate that calcite and dolomite dissolution accompanied by cation exchange in hot springs produces Ca-HCO_3 water type, whereas gypsum dissolution and sulfide oxidation in Chehelmir yield sulfate-type water with $\text{SO}_4^{2-} = 9.9 \text{ meq/L}$. The Piper

diagram distinguishes two main groups: the carbonate group (hot springs + GzSp) derived from the Tirgan Formation, and the sulfate group (Chehelmir and Meyab) influenced by the Shurijeh Formation and anthropogenic pollutants. The Gibbs diagram indicates carbonate weathering (not evaporation) as the dominant process controlling water chemistry, with Gorni Waterfall as the only exception (direct rainfall recharge). The Na/Cl ratio > 1 in all samples suggests cation exchange and silicate weathering. Saturation indices confirm supersaturation with respect to calcite, aragonite, and dolomite, and undersaturation with respect to gypsum and halite. Water quality assessment shows that most springs have "good to acceptable" drinking water quality and fall into class C3- S1 for irrigation; however, the Schoeller diagram only evaluates chemical quality, and for sewage-affected springs (e.g., Meyab), management must address both chemical and microbiological aspects. Despite negative LSI values for some hot springs under laboratory conditions, field evidence of travertine deposits confirms their strong carbonate precipitation in the past. The hot springs, with their high temperatures ($25\text{--}32^\circ\text{C}$) and travertine landscapes, have high potential for scientific geotourism and nature-based tourism; however, sewage and agricultural pollution pose serious threats to their sustainability. Management priorities include: immediate action for Meyab (sewage pollution), high priority for fault-controlled hot springs (geotourism development), moderate priority for Chehelmir, and low priority for the remaining springs.

Conclusions

The dual porosity system in the Tirgan Formation, by increasing the water-rock contact surface, has played a direct role in enriching the water with calcium and bicarbonate ions and in forming travertine deposits. The hydrogeochemical evolution of the springs results from the interaction of three main factors: lithology (Tirgan Formation), diagenetic history, and tectonic structures (faults). The hot spring waters are of Ca-HCO_3 type with a common origin, whereas the Chelmir spring is of sulfate type. Carbonate weathering is the main factor controlling water chemistry, and saturation indices confirm supersaturation with respect to calcite and dolomite. The water quality of most springs is "good to acceptable" for drinking and falls into class C3- S1 for irrigation. The hot springs have high potential for scientific geotourism and nature-based tourism, but sewage and agricultural pollution pose serious threats to their sustainability. Complementary isotopic studies, geophysical surveys, and exploratory drilling are recommended for more accurate validation of flow paths and deep structures.

References

- Behzadfar, L., 2011. Microfacies and micropaleontology of Lower Cretaceous sediments (Urgonian facies) in Ghaleh Kamar section, northeast of Quchan. (Master's thesis). Islamic Azad University (in Persian).

- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (Ed.), Classification of Carbonate Rocks. AAPG Memoir 1, 108-121. <https://doi.org/10.1306/M1357>
- Flügel, E., 2010. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>
- Fouke, B.W., 2011. Hot-spring Systems Geobiology: Abiotic and biotic influences on travertine formation at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA. Sedimentology, 58(1), 170-219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2010.01209>
- Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (US Geological Survey Water Supply Paper, 2254). U.S. Geological Survey.
- Javanbakht, M., Tayeban, S.A., Poursoltani, M.R., 2018. Geochemistry, diagenetic processes and sedimentary environment of the Tirgan Formation in the eastern Kopet-Dagh Basin, NE Iran. Applied Sedimentology 6(12), 122-134. <https://doi.org/10.22084/PSJ.2019.15632.1165> (in Persian)
- Nohegar, A., 2011. Investigation of physical and chemical quality of surface waters in Minab River Journal of Researches in Earth Science 2 (7), 1-17. <https://sid.ir/paper/207363/fa> (in Persian)
- Mao, X., Wang, Y., Zhan, H., Feng, L., 2015. Geochemical and isotopic characteristics of geothermal springs hosted by deep-seated faults in Dongguan Basin, Southern China. Journal of Geochemical Exploration 158, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.07.008>
- Moore, C.H., Wade, W.J., 2013. Carbonate Reservoirs: Porosity and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. Developments in Sedimentology, Vol. 67. Elsevier, Amsterdam. URL: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-sedimentology/vol/67/suppl/C>
- Shakeri, A., Sharafi, N., Rastegari Mehr, S., Abdollah Beiglou, L., 2025. Assessment of water quality and hydrogeochemical processes in proximity to a municipal landfill site: case study of the Mohammadabad Landfill, Qazvin, Iran. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11 (1), 103-130. <https://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.107782> (in Persian)
- Walton, W.C., 1970. Groundwater Resource Evaluation. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering (USA) eng.
- Wilcox, L.V., 1955. Classification and use of irrigation waters. US Department of Agriculture 969.

CRediT authorship contribution statement

 Hossein Mohammadzadeh	Validation, Investigation, Writing - Review &Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition
 Banafsheh Asadi Chahar Borj	Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Writing -Original Draft, Investigation,



دسترسی آزاد

نشریه علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

تکامل هیدروژئوشیمی و برهمکنش آب - سنگ چشمه های کارستی آبگرم الله اکبر درگز، استان خراسان رضوی

حسین محمدزاده^{۱*}، بنفشه اسدی چهاربرج^۲

۱. گروه پژوهشی تحقیقات آب های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب)، پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

واژه های کلیدی:

هیدروژئوشیمی، الله اکبر درگز، سازند تیرگان، تراورتن، آبخوان کارستی.



بررسی تکامل هیدروژئوشیمیایی چشمه های آبگرم با تحلیل برهم کنش آب و سنگ میزبان، امکان شناسایی مسیرهای جریان، فرآیندهای انحلال، تبادل یونی و کیفیت آب را فراهم می کند. در این پژوهش، رفتار شیمیایی چشمه های کارستی آبگرم و سرد ارتفاعات الله اکبر درگز، استان خراسان رضوی، با هدف تبیین منشأ و تحولات ژئوشیمیایی آن ها بررسی شده است. طی عملیات صحرایی، نمونه های سنگی از سازند کربناته تیرگان و تراورتن های منطقه برداشت و با مطالعه مقاطع نازک، رخساره ها و تاریخچه دیاژنز تعیین گردید. همچنین در دو فصل تر و خشک (سال ۱۴۰۲)، ده نمونه آب از چشمه های کارستی آبگرم و آب سرد منطقه جمع آوری و پارامترهای فیزیکی شیمیایی (TDS، Eh، EC، pH، T، DO) اندازه گیری شدند. مطالعه مقاطع نازک سازند تیرگان نشان دهنده یک سیستم تخلخل دوگانه در این سازند است. که منجر به افزایش سطح تماس آب و سنگ شده است و نقش مستقیمی در غنی شدن آب از یون های کلسیم و بیکربنات و در نهایت تشکیل نهشته های تراورتن در پیرامون چشمه های آبگرم داشته است. وجود تراورتن های کواترنری در امتداد گسل های فعال، نشان دهنده تداوم این فرایندها تا عصر حاضر است. دمای آب در چشمه های آب سرد بین ۱۵/۶ تا ۱۹/۴ درجه سانتی گراد و در چشمه های آبگرم تا ۳۲/۲ درجه سانتی گراد افزایش می یابد. همچنین EC نمونه های آب در محدوده ۲۵۶ تا ۱۰۲۲ میکروزیمنس بر سانتی متر متغیر است. غلظت یون های اصلی در آزمایشگاه اندازه گیری شد. داده ها با استفاده از تکنیک های مختلف هیدروژئوشیمیایی (نمودارهای پایپر، گیبس، شولر، ویلکوکس، شاخص اشباع (SI) و نمودار Eh-pH) پردازش شدند. نتایج نشان می دهد تکامل هیدروژئوشیمیایی چشمه های آبگرم حاصل تعامل سه عامل اصلی سنگ شناسی اولیه (سازند تیرگان)، تاریخچه دیاژنتیکی (انحلال و ایجاد تخلخل دوگانه) و ساختارهای تکنیکی است. آب چشمه های آبگرم از تیپ کربناته-کلسیم دار با منشأ مشترک است، در حالی که چشمه چهل میر تیپ سولفات دارد. بر اساس نمودار گیبس، هوازگی سنگ های کربناته عامل اصلی کنترل شیمی آب است و شاخص اشباع، فوق اشباع بودن آب نسبت به کلسیت و دولومیت را تأیید می کند. کیفیت آب اکثر چشمه ها برای شرب در محدوده «خوب تا قابل قبول» و برای کشاورزی در کلاس C3-S1 قرار می گیرد. این پژوهش نقش دیاژنز و تخلخل دوگانه را در تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان تیرگان روشن ساخته و پتانسیل ژئوتورسمی چشمه های آبگرم را آشکار می سازد.

مقدمه

(1985; Back et al., 1986). بنابراین، شیمی آب زیرزمینی منعکس کننده

تاریخچه واکنش های آب-سنگ در محیط زمین شناسی است.

چشمه های آبگرم (Hot Springs) به دلیل گردش عمیق تر، دمای بالاتر و زمان تماس طولانی تر با سنگ های عمقی، آزمایشگاه های طبیعی ممتازی برای مطالعه تأثیر متقابل آب-سنگ محسوب می شوند (Fouke, 2011). عبور این سیالات گرم از سازندهای کربناته، فرآیند انحلال کربنات ها و به دنبال آن خروج CO₂ در نزدیکی سطح، منجر به رسوب تراورتن می گردد که خود ثبت کننده تاریخچه هیدروترمال و زمین ساختی منطقه است (Pentecost and Viles, 1994; Brogi and Capezzuoli, 2009). بررسی هیدروژئوشیمی چشمه های آبگرم و فرایندهای برهم کنش آب-سنگ، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در سطح جهانی، مطالعات متعددی به

بررسی و تعیین کیفیت آب های زیرزمینی برای تأمین نیازهای انسانی و زیست بوم ها بسیار حائز اهمیت است (Walton, 1970). آب در طبیعت همواره حاوی املاح، مواد معلق و گازهای محلول است که ویژگی های آن را از مکانی به مکان دیگر متفاوت می سازد. بررسی کیفیت و فرآیندهای کنترل کننده آب برای مصارف گوناگون (شرب، کشاورزی، صنعت و گردشگری) ضروری است (Abbasnia et al., 2018; Subba Rao et al., 2020). در این میان، برهم کنش آب و سنگ به عنوان مهم ترین فرآیند طبیعی در تکامل هیدروژئوشیمیایی آب های زیرزمینی، ترکیب شیمیایی آب را تحت تأثیر عواملی مانند انحلال کانی ها، تبادل کاتیونی، هوازگی سیلیکات ها و کربنات ها، اختلاط با سیالات دیگر و واکنش های اکسایش-کاهش قرار می دهد (Hem,

DOI 10.22034/kjes.2026.11718

*نویسنده مسئول: حسین محمدزاده mohammadzadeh@um.ac.ir

استناد به این مقاله: محمدزاده، ح.، اسدی چهاربرج، ب. (۱۴۰۵). تکامل هیدروژئوشیمی و برهمکنش آب - سنگ چشمه های کارستی آبگرم الله اکبر درگز، استان خراسان رضوی. مجله علوم زمین

خوارزمی. جلد ۱۲، شماره ۱، صفحه ۲۰۹ تا ۲۳۳. <http://doi.org/10.22034/kjes.2026.11718>

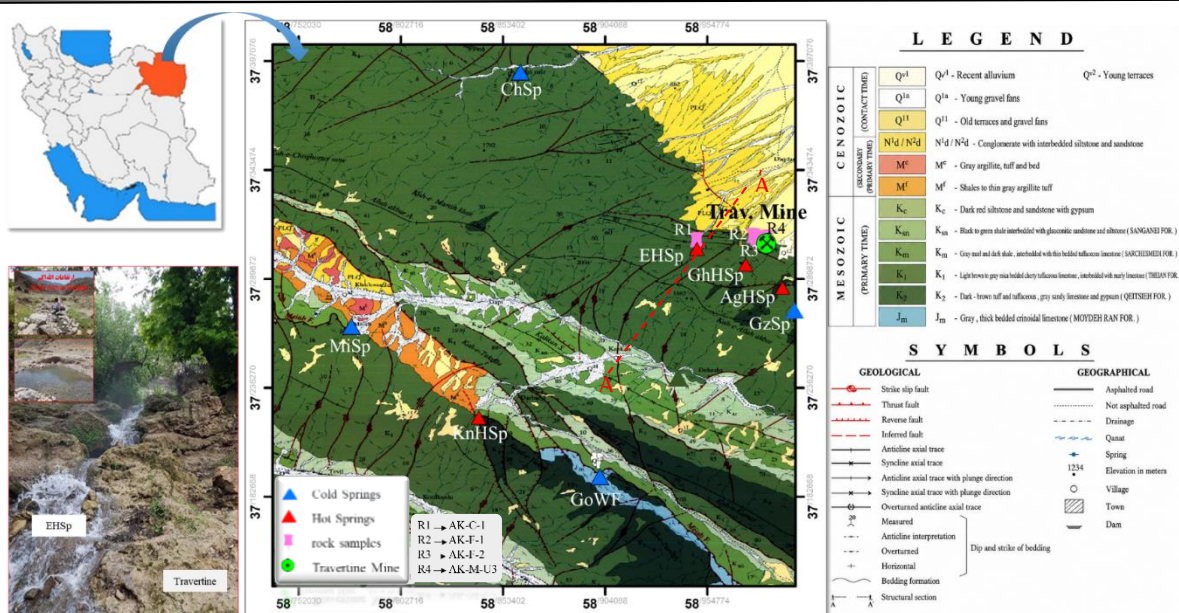
را به سازندهای تبخیری و آلاینده‌های انسانی نسبت دادند و شاکری و همکاران (Shakeri et al., 2025) تأثیر فعالیت‌های انسانی را بر فرایندهای هیدروژئوشیمیایی نشان دادند.

تاکنون مطالعه جامعی که به طور همزمان به پتروگرافی سازند کربناته تیرگان، نقش آن در تکامل هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی آبگرم و سرد ارتفاعات الله‌اکبر درگز بپردازد، انجام نشده است. علاوه بر این، کیفیت آب این چشمه‌ها برای مصارف شرب، کشاورزی، صنعت و ژئوتوریسم نیز در پژوهش‌های پیشین به صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همچنین، ارتباط بین رخساره‌های اولیه کرتاسه، تاریخچه دیاژنز (انحلال ترجیحی و سیمان‌شدگی هیدروترمال) و کیفیت فعلی آب چشمه‌ها به عنوان یک چرخه کامل آب-سنگ، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ تحقیقاتی ضرورت انجام پژوهش حاضر را آشکار می‌سازد. هدف اصلی این پژوهش، تعیین تیپ و رخساره‌ی شیمیایی چشمه‌های کارستی آبگرم، شناسایی نقش سازند تیرگان و واحدهای کربناته-تبخیری در تأمین یون‌های آب و تشکیل تراورتن، تعیین فرایندهای برهم‌کنش آب-سنگ (انحلال، تبادل کاتیونی، اکسایش-کاهش)، ارزیابی کیفیت آب برای شرب، کشاورزی و صنعت، و در نهایت بررسی پتانسیل ژئوتوریسمی چشمه‌های آبگرم ارتفاعات الله‌اکبر درگز با تأکید بر ارزش‌های زمین‌شناختی آن‌ها به منظور مدیریت حفاظتی و بهره‌برداری پایدار می‌باشد.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در شمال‌شرق ایران و در شمال‌غرب شهرستان درگز، استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه بخشی از ارتفاعات الله‌اکبر به شمار می‌رود که با ارتفاع تقریبی ۳۱۰۰ تا ۳۱۵۰ متر از سطح دریا، یکی از بلندترین نقاط سلسله‌کوه‌های هزارمسجد محسوب می‌شود. از نظر مختصات جغرافیایی، منطقه بین طول‌های جغرافیایی (۵۹° ۰۰' و ۳۰' و ۵۸°) و عرض‌های جغرافیایی (۳۷° ۰۰' و ۳۷° ۳۰') واقع است.

شناسایی منشأ و تکامل آب‌های گرم در سیستم‌های گسلی و کارستی پرداخته‌اند. مائو و همکاران (Mao et al., 2015) با داده‌های ایزوتوپی، منشأ آب‌های گرم حوضه‌ی دونگ‌گوان چین را ناشی از گردش عمیق آب‌های جوی در امتداد گسل‌های فعال معرفی کردند. لی و همکاران (Li et al., 2022) تأثیر انحلال کربنات‌ها و تبادل یونی را بر کیفیت آب‌های کارستی چونگ‌چینگ نشان دادند. سیتزینی و همکاران (Citirini et al., 2024) در شمال ایتالیا، نقش سنگ‌های کربناته را در تأمین یون‌های غالب آب تأیید کردند. کیگان و همکاران (Keegan et al., 2022) نقش کلیدی گسل‌ها را در صعود آب‌های گرم و تشکیل تراورتن برجسته ساختند. فوک (Fouke, 2011) فرایندهای زیستی و غیرزیستی مؤثر بر تشکیل تراورتن در آشفشان‌های یلوستون را تشریح نمود. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی انجام شده است. قاسمی و همکاران (Ghasemi et al., 2013) نقش سازندهای کربناته و تبخیری را در کیفیت آب چشمه‌های سرخس نشان دادند. در منطقه‌ی آتشفشانی بزمان، بهادری و همکاران (Bahadori et al., 2019) با ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن، منشأ آب‌های گرم و سرد را تفکیک کردند و عسکری ملک‌آباد و همکاران (Askari et al., 2020) میدان زمین‌گرمایی بزمان را مشخصه‌یابی نمودند. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2023) هوازدگی کربنات‌ها را عامل اصلی شیمی آب چشمه ورسخواران معرفی کردند. فرهادی و همکاران (Farhadi et al., 2022) نقش سنگ‌شناسی را در تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌های آسماری و سروک بررسی نمودند. در منطقه کپه‌داغ، مطالعات ایزوتوپی و هیدروژئوشیمیایی ارزشمندی انجام شده است؛ از جمله بررسی منشأ چشمه‌های آبگرم ایوب و شفا با رویکرد ایزوتوپی (Mohammadzadeh and Kazemi, 2017)، مقایسه چشمه‌های تراورتن‌ساز گراب و پاموکاله (Mohammadzadeh and Mansouri Daneshvar, 2020)، و اخیراً ارزیابی تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان مرزی درگز (Mohammadzadeh and Fanoodi, 2025) که چارچوب مناسبی برای پژوهش حاضر فراهم می‌سازد. تفضلی و همکاران (Tafazoli, 2025) منشأ شوری آب دشت سبزو



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه با موقعیت چشمه‌ها، معدن تراورتن و جایگاه نمونه‌برداری سنگ (from Ghaemi, 2004).
Fig. 1. Geological map of the study area, scale 1:100000, showing the locations of springs, travertine mine, and rock sampling sites (from Ghaemi, 2004).

امداد یک گسل فعال دیده می‌شوند (شکل ۱). در همان راستا و با فاصله بیشتر، چشمه‌های آب سرد چهل‌میر (ChSp) و قزلق (GzSp) در طرفین جریان دارند. اما در جنوب ارتفاعات الله‌اکبر یک چشمه آبگرم (چشمه آبگرم کناره (KnHSp)) و دو دهنه چشمه آب سرد شامل چشمه آب سرد میاب (MiSp) و آبشار گرنی (GoWF) به‌طور موازی وجود دارند. تمامی این خروجی‌های آبی (چه آبگرم و چه آب سرد) از سازند تیرگان تخلیه می‌شوند و دمای آب چشمه‌های آبگرم معمولاً ۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای محیط است. وجود گسل‌های متعدد با روندهای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، شمالی-جنوبی و شمال‌شرقی-جنوب‌غربی نقش اصلی را در تخلیه چشمه‌های آبگرم و سرد ایفا می‌کنند. این چشمه‌ها (مخصوصاً چشمه‌های آبگرم) در راستای زون خردشده ناشی از عملکرد گسل بزرگ الله‌اکبر ظاهر شده‌اند. رسوبات گسترده تراورتن در پیرامون چشمه‌های آبگرم و وجود یک معدن تراورتن فعال در نزدیکی منطقه گواهی بر فعالیت زمین‌ساختی و هیدروترمال در عصر حاضر است و این چشمه‌ها نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و توسعه گردشگری منطقه دارند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا موقعیت چشمه‌ها بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ منطقه درگز (Ghaemi, 2004)، با استفاده از ArcGIS مشخص گردید. سپس در طی مطالعات صحرایی، وضعیت زمین‌شناسی منطقه (شامل

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری، این ناحیه در زیرپهنه رسوبی - ساختاری حوضه کپه‌داغ شرقی، در شمال شرق ایران، واقع شده است (Aghanabati, 2004) و نتیجه جنبش‌های کوهزایی از لیا س میانی تا اواخر سنوزوئیک است (Velayati, 1983). قدیمی‌ترین واحدهای زمین‌شناسی منطقه به کرتاسه تعلق دارند و فرایند رسوب‌گذاری در مرز ژوراسیک و کرتاسه به‌صورت پیوسته ادامه داشته، به‌طوری که بخش شرقی کپه‌داغ کامل‌ترین توالی رسوبات کرتاسه ایران را داراست (Foroughi-Garo, 2012). در این میان، سازند تیرگان (کرتاسه زیرین) که بیشتر از سنگ‌آهک‌های خاکستری تا کرم، سستریلایه تا توده‌ای، ائولیتی و زیست‌آواری همراه با میان‌لایه‌هایی از سنگ‌آهک مارنی، مارن، شیل آهکی و دولومیت تشکیل شده، نقش کلیدی در تشکیل آبخوان‌های عمقی و تخلیه آب‌های گرم و سرد منطقه ایفا می‌کند. شاخص‌ترین فسیل آن اوربیتولین است که محیط رسوبی کم‌عمق دریایی را نشان می‌دهد. سازند تیرگان از لحاظ چینه‌شناسی بین سازند شورجه (ماسه‌سنگ و شیل سرخ‌رنگ) در زیر و سازند سرچشمه (شیلی-مارنی همراه با آهک و دولومیت) در بالا قرار گرفته و به دلیل سستبری زیاد، تراکم و سختی سنگ‌آهک‌ها، یکی از واحدهای چهره‌ساز و فیزیوگرافیک اصلی کپه‌داغ به شمار می‌رود (Aghanabati, 2004).

در دامنه شمالی ارتفاعات الله‌اکبر، سه دهنه چشمه آبگرم (امام قنبر (EHSp)، قولجق (GhHSp) و آقداش (AgHSp) تقریباً در یک راستا و در

و صحت نتایج می‌باشد (Freeze and Cherry, 1979; Appelo and Postma, 2005).

پارامترهای صحرایی شامل هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh)، کل مواد جامد محلول (TDS) و دمای آب بلافاصله در محل خروجی هر چشمه با استفاده از دستگاه مولتی پارامتر پرتابل TROLL (مدل ۹۵۰۰، ساخت شرکت In-Situ، آمریکا) اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین دقت دستگاه با استفاده از محلول‌های استاندارد پیش از هر سری اندازه‌گیری کنترل شد. برای پردازش داده‌ها، از تکنیک‌های هیدروژئوشیمیایی و نرم‌افزارهای متعدد (Chemistry, Grapher, Excel و PhreeQC) استفاده شد. با بهره‌گیری از دیاگرام پایپر، تیپ و رخساره هیدروژئوشیمیایی نمونه‌ها تعیین گردید. دیاگرام گیبس برای شناسایی مکانیسم‌های حاکم بر ترکیب شیمیایی آب (هوازدهی، تبخیر یا بارندگی) به کار رفت. شاخص اشباع (SI) نسبت به کانی‌های کلسیت، آراگونیت، دولومیت، ژپس، انهدریت و هالیت با نرم‌افزار PhreeQC محاسبه شد. همچنین نمودار Eh-pH برای تعیین شرایط پایدار گونه‌های شیمیایی در آب‌های منطقه ترسیم گردید. ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت به ترتیب با استفاده از نمودارهای شولر، ویلکوکس و شاخص اشباع لائزلیه (LSI) انجام شد. در نهایت، تمامی نتایج با یکدیگر مقایسه و تفسیر گردیدند تا مسیر تکامل هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها و رابطه آب-سنگ در منطقه مشخص شود.

نتایج و بحث

بررسی سنگ شناسی سازند تیرگان و تراورتن‌های منطقه

بررسی تغییرات سنگ‌شناسی و میکروفاسیس، نشان می‌دهد سازند تیرگان در منطقه مطالعاتی دارای واحدهای مختلفی است. لایه‌های آهکی خاکستری تا صورتی مایل به قرمز با ضخامت متوسط تا نازک توسعه یافته‌اند و این آهک‌ها از نظر بافتی در رده مادستون و کلسی‌مادستون قرار می‌گیرند و ارتباطی تدریجی با سازند شوربجه دارند (Behzadfar, 2011; Javanbakht et al., 2018). کمبود نشانه‌های فسیلی، نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در محیطی با انرژی پایین است.

سازندها، سنگ شناسی آن‌ها و گسل‌های موجود در محل ظهور چشمه‌ها بررسی شد. طی عملیات صحرایی، ابتدا نمونه‌های سنگی از سازند تیرگان (به عنوان سنگ میزبان اصلی) و از تراورتن‌های منطقه برداشت شد. نمونه‌های دستی سنگ به کارگاه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شده و با استفاده از دستگاه برش و سایش، مقاطع نازک تهیه گردید. شناسایی ریزرخساره‌ها بر اساس رده‌بندی دانهام و همکاران (Dunham et al., 1962) و تفسیر محیط رسوبی با بهره‌گیری از مدل رمپ کریناته فلوگل (Flügel, 2010) انجام شد. فرایندهای دیژنتیکی (انحلال و سیمان‌شدگی) بر اساس معیارهای پتروگرافی (Moore and Wade, 2013) شناسایی و تفکیک گردیدند. برای تأیید و مقایسه منطقه‌ای، از نتایج مطالعه جوانبخت و همکاران (Javanbakht et al., 2018) که به‌طور مشابه به بررسی پتروگرافی و دیژنز سازند تیرگان در برش‌های مجاور پرداخته است، بهره گرفته شد. سپس از هر دو نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی برای بررسی رخساره‌ها، بافت و تاریخچه دیژنز، عکس‌برداری میکروسکوپی انجام شد.

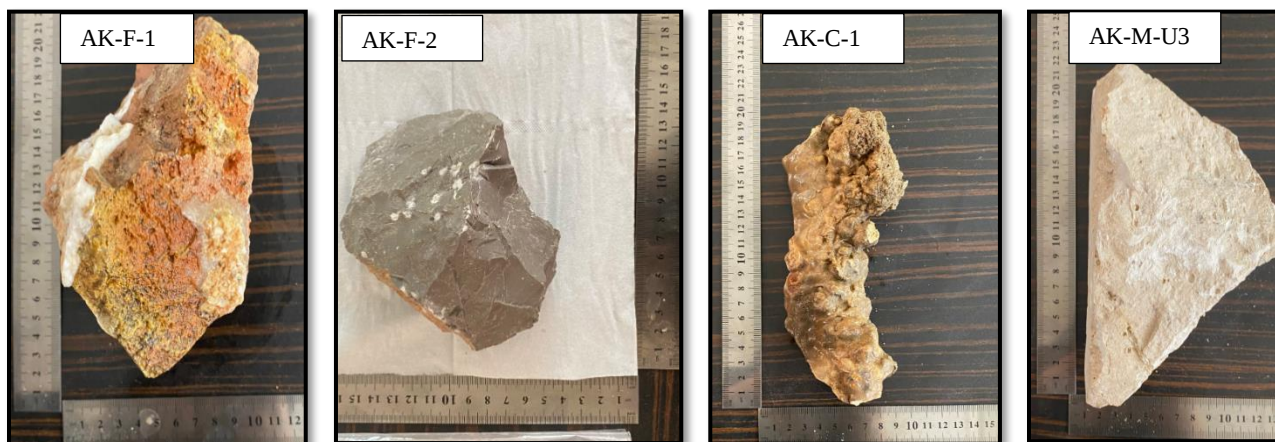
به منظور ارزیابی کیفیت شیمیایی آب چشمه‌ها، بر اساس دستورالعمل محمدزاده (Mohammadzadeh, 2023) و با هماهنگی آزمایشگاه آب منطقه‌ای خراسان رضوی، نمونه‌برداری آب در دو نوبت مجزا شامل فصل تر (خرداد ماه) و فصل خشک (آبان ماه) سال ۱۴۰۲ انجام گردید. در مجموع، تعداد ۱۰ نمونه آب از چشمه‌های آبگرم و سرد و نیز آبشار منطقه برداشت شد. نمونه‌های آب در بطری‌های پلی‌اتیلن ۵۰۰ میلی لیتری که قبلاً با آب مقطر شسته شده و با آب نمونه نیز سه بار شستشو داده شده بودند، انجام و تمامی نمونه‌ها در دمای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد و دور از نور مستقیم به آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی منتقل شدند. در آزمایشگاه پارامترهای کیفی آنیون‌های آب با دستگاه‌های DR6000 و DR3900 ساخت کمپانی HACH، و قلیائیت نمونه‌های آب از طریق تیتراسیون محلول با یک اسید قوی و از روش رنگ‌سنجی با استفاده از شاخص‌های فنول فتالین و متیل اورانژ اندازه‌گیری شد. غلظت کاتیون‌های کلسیم و منیزیم با روش تیتراسنجی سختی (EDTA) و غلظت کاتیون‌های سدیم و پتاسیم (Na^+ , K^+) با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر ۴۱۰ ساخت کمپانی Sherwood انگلستان اندازه‌گیری شد. دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ ppm می‌باشد. برای اطمینان از صحت و دقت آنالیزهای شیمیایی، خطای تعادل بار یونی (CBE: Charge Balance Error) برای تمامی نمونه‌ها بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید:

$$\text{CBE} = \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن: مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/L) می‌باشد. مقادیر CBE برای تمامی نمونه‌ها در محدوده قابل قبول کمتر از ۵٪ قرار دارد (جدول ۳) که نشان‌دهنده دقت بالای آنالیزها

ادامه دو نمونه آهک (AK-F-1, AK-F-2) و دو نمونه تراورتن کواترنری (AK-M-U3, AK-C-1) به عنوان مستندات این تکامل مورد تحلیل قرار گرفته است (شکل ۲).

مطالعه مقاطع نازک سازند کربناته تیرگان در منطقه چشمه های آبگرم الله اکبر درگز، شواهد پتروگرافی ارزشمندی ارائه می دهد که تاریخچه تکامل هیدروژئوشیمی و رابطه آب-سنگ را از کرتاسه تا امروز روشن می سازد. در



شکل ۲- نمونه های دستی سنگ های برداشت شده از منطقه مطالعاتی (موقعیت نمونه ها در شکل ۱ آمده است).

Fig. 2. Hand specimens of rocks collected from the study area (sample locations are shown in Figure 1).

تاریخچه دیاژنتیکی و نقش سیالات هیدروترمال: تکامل اولیه سیستم آب-سنگ

شواهد انحلال ترجیحی (به ویژه در آنکوئیدها) و سیمان شدگی توسط کلسیت اسپاریتی در نمونه ها، دو مرحله مجزا در تکامل ژئوشیمیایی سیستم آب-سنگ را ثبت کرده است که با طبقه بندی فرایندهای دیاژنتیکی مور و ود (Moore and Wade, 2013) و همچنین یافته های جوانبخت و همکاران (Javanbakht et al., 2018) در برش های مجاور سازند تیرگان همخوانی دارد. مرحله انحلال: گردش سیالات گرم (هیدروترمال) در امتداد گسل ها، با ایجاد شرایط اسیدی (احتمالاً به دلیل حضور CO_2)، منجر به انحلال انتخابی کربنات ها و ایجاد تخلخل ثانویه و شکستگی ها شده است. این فرآیند، آماده سازی سنگ میزبان برای تبدیل شدن به یک آبخوان مؤثر را رقم زده است.

مرحله سیمان شدگی: با افت فشار و خروج گاز، همان سیالات، کلسیت اسپاریتی را در حفره ها نهشته اند. وجود بافت دروزه ای (Druse aggregate) که در آن بلورهای خودشکل کلسیت که از دیواره حفره به سمت داخل رشد کرده اند و نشانه سیمان شدگی در سیستم هیدروترمال است (شکل ۳-ا) و تناوب کلسیت میکریتی با آراگونیت سوزنی شکل در نمونه AK-C-1، نشان از نوسانات دما، فشار و میزان CO_2 طی این فرآیندها دارد. حضور ژپس در مراحل پایانی نیز شرایط تبخیری و تغییر شیمی سیال را آشکار می سازد. این تاریخچه دیاژنتیکی، یک سیستم تخلخل دوگانه (شکافی-حفره ای) در سازند

محیط رسوبی اولیه (کرتاسه پایین): بستر اولیه برای تعامل آب-سنگ

تشکیل سازند تیرگان در یک پلتفرم کربناته کم عمق دریایی، زمینه ساز ماهیت شیمیایی آبخوان های عمقی امروزی شده است. نمونه AK-F-2 با فسیل های جلبک آهکی و ریزمرجان ها، معرف یک لاگون آرام و نورگیر است که مواد آلی و کربنات کلسیم را تأمین کرده است (Javanbakht et al., 2018) (شکل ۳-د). نمونه AK-F-1 با رنگ قرمز و رگچه های سولفید آهن، نشان از نفوذ سیالات اکسیدان در حاشیه پلتفرم دارد (شکل ۳-ج). نمونه AK-M-U3 با غلبه آنکوئیدها بر اوئیدها، حاکی از نوسان انرژی در پلتفرم است (شکل ۳-ب). این تنوع رخساره ای، ناهمگنی اولیه سنگ میزبان را ایجاد کرده که امروزه نقش کلیدی در کنترل مسیرهای ترجیحی جریان آب و واکنش های آب-سنگ ایفا می کند (Mohammadzadeh and Fanoodi, 2025). رخساره های لاگونی (مانند نمونه AK-F-2) با دارا بودن مواد آلی بیشتر و شرایط احیایی، می توانند بر pH و شرایط اکسایش-کاهش آب های در حال گردش تأثیر بگذارند. حضور مواد آلی در این رخساره ها، با مصرف اکسیژن در فرایندهای تجزیه، به ایجاد شرایط نیمه احیایی کمک کرده و بر پایداری گونه های شیمیایی مانند HCO_3^- و SO_4^{2-} تأثیرگذار است. این موضوع در نمودار Eh-pH (شکل ۴) نیز قابل مشاهده است؛ جایی که نمونه های مرتبط با این رخساره ها در محدوده اکسیدی تا متوسط قرار دارند (Freeze and Cherry, 1979).

تیرگان ایجاد کرده است که امروزه به عنوان مجرا و مخزن آب های گرم عمل می کند و رابطه آب-سنگ را کنترل می نماید (Javanbakht et al., 2018).

ارتباط سیستم تخلخل دوگانه سازند تیرگان با شیمی آب چشمه ها

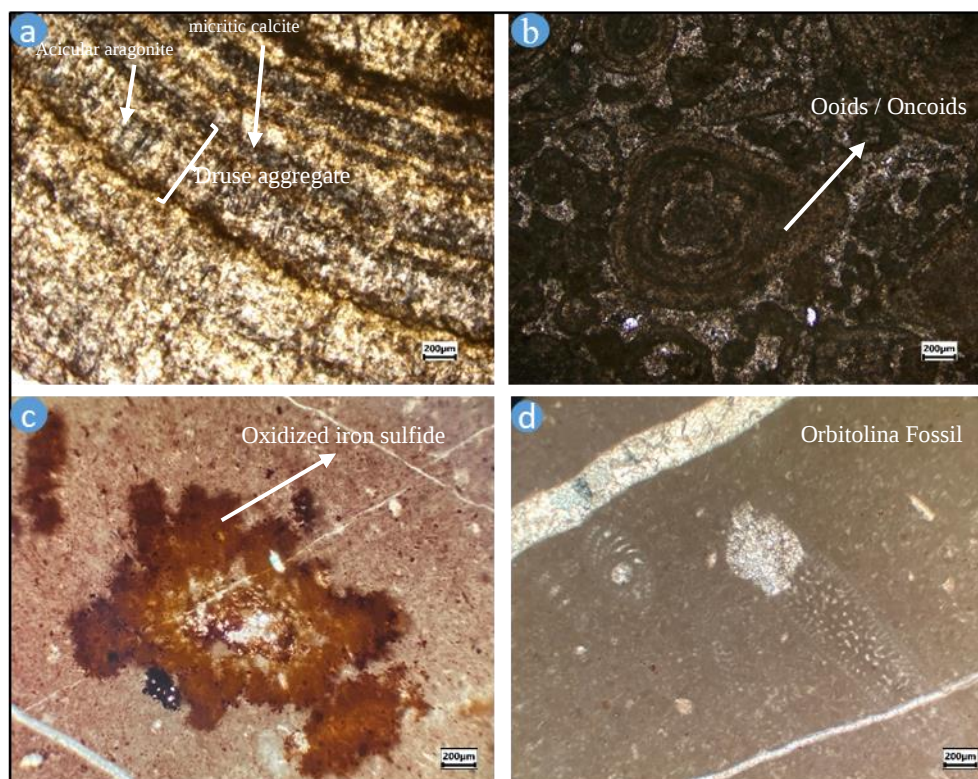
همان طور که پیش تر اشاره شد، تاریخچه دیاژنتیکی سازند تیرگان منجر به ایجاد یک سیستم تخلخل دوگانه (شکافی-حفره ای) در این سنگ میزبان شده است. این سیستم تخلخل، نقش بنیادینی در تعیین شیمی آب چشمه های منطقه ایفا می کند. انحلال ترجیحی که بیشتر در آنکوئیدها و مناطق با ناهمگنی رخساره ای (ناشی از محیط رسوبی اولیه) رخ داده، باعث ایجاد حفره های انحلالی ریز و درشت (محلول) در سنگ شده است. همزمان، فعالیت گسل ها و شکستگی های تکتونیکی، شبکه ای از درز و شکاف را در سنگ ایجاد کرده است. ترکیب این دو، یعنی حفره های انحلالی به همراه شکستگی ها، سطح تماس مؤثر آب با سنگ میزبان را به شدت افزایش داده است.

نتیجه مستقیم این افزایش سطح تماس، انحلال بیشتر کربنات کلسیم توسط آب های در حال گردش در عمق است. به طوری که آب های گرمی که از این سیستم تخلخل عبور می کنند، غلظت بالایی از یون های Ca^{2+} و HCO_3^- پیدا می کنند (جدول ۳ و شکل ۵). این موضوع در دیگرام پایپر (شکل ۶) نیز به وضوح قابل مشاهده است؛ جایی که تمام چشمه های آبگرم در ناحیه کربناته-کلسیم دار قرار می گیرند. در مقابل، در چشمه های آب سردی که مسیر جریان آن ها با سازند شوربچه (با لیتولوژی ماسه سنگ و تبخیری ها) در تماس است، سیستم تخلخل دوگانه توسعه نیافته و در نتیجه شیمی آب به سمت تیپ سولفات گرایش پیدا می کند (چشمه چهل میر). بنابراین، نه تنها

گسل ها، بلکه خود ویژگی های دیاژنتیکی و سیستم تخلخل ثانویه سازند تیرگان، عامل اصلی کنترل کننده شیمی آب چشمه های آبگرم منطقه هستند.

تداوم تکامل هیدروژئوشیمی در عصر حاضر

نمونه تراورتن کواترنری AK-M-U3 که در محدوده زون گسلی فعال نهشته شده، شاهد مستقیم تداوم همان فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی تا امروز است. ترکیب کانی شناسی تراورتن (کلسیت غالب، آراگونیت و ژپس به مقدار کمتر) نشان می دهد که آب های چشمه های الله اکبر، پس از گردش در درون آبخوان عمقی سازند تیرگان (با تخلخل ثانویه ناشی از انحلال قبلی) و انحلال کربنات کلسیم، با صعود سریع به سطح و خروج CO_2 ، شرایط فوق اشباع نسب به کلسیت و آراگونیت پیدا کرده و این کانی ها را نهشته می کنند. فعالیت گسل ها باعث صعود سریع آب و تشدید خروج گاز می گردد. بنابراین، تکامل هیدروژئوشیمیایی چشمه های آبگرم الله اکبر در گز را نمی توان جدا از تاریخچه زمین شناسی منطقه در نظر گرفت. محیط رسوبی اولیه (کرتاسه پایین) با ایجاد ناهمگنی رخساره ای، مسیرهای نفوذ سیالات را تعیین کرده است (Javanbakht et al., 2018). دیاژنز هیدروترمال با ایجاد تخلخل ثانویه و شکستگی ها، سنگ میزبان را به یک آبخوان کارآمد تبدیل نموده است. در نهایت، فعالیت گسل ها در کواترنر تا امروز، این آبخوان را به سطح متصل کرده و با صعود آب های گرم، فرایندهای رسوب گذاری تراورتن را تداوم بخشیده است. بنابراین، آب های گرم امروزی، نه فقط یک پدیده هیدروژئولوژیکی محلی، بلکه ادامه طبیعی یک زنجیره تکاملی ۱۰۰ میلیون ساله هستند که از رسوب گذاری دریایی کرتاسه آغاز شده و تا به امروز، با میانجی گری فرایندهای دیاژنتیکی و تکتونیکی، به ظهور چشمه های آبگرم منجر شده اند (شکل ۳ و جدول ۱).



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی ریز رخساره‌های سازند تیرگان در منطقه مطالعاتی (در اطراف چشمه‌ها و معدن تراورتن)، بافت دروزه‌ای و تناوب کلسیت میکریتی با آراگونیت سوزنی در شکل نمونه AK-C-1، (b) اووئید و آنکوئید (با غلبه آنکوئیدها) در نمونه AK-M-U3، (c) رگچه‌های سولفید آهن اکسید شده در نمونه AK-F-1، و (d) فسیل اوربیتولین در نمونه AK-F-2.

Fig. 3. Microscopic images of microfacies of the Tirgan Formation in the study area (around the springs and the travertine mine). a) Drusy texture and alternation of micritic calcite with acicular aragonite in sample AK- C- 1. b) Ooids and oncooids (with oncooids prevailing) in sample AK- M- U3. c) Oxidized iron sulfide veins in sample AK- F- 1. d) Orbitolinid fossil in sample AK- F- 2.

جدول ۱- خلاصه و مقایسه ویژگی‌های پتروگرافی، فسیل‌شناسی و محیط‌رسوبی چهار مقطع مطالعاتی از سازند تیرگان.

Table 1. Summary and comparison of petrographic characteristics, fossil content, and sedimentary environment of four studied sections of the Tirgan Formation.

ویژگی	نمونه AK-F-2	نمونه AK-F-1	تراورتن* (AK-C-1 و AK-M-U3)
ویژگی ماکروسکوپی	رنگ تیره مایل به سیاه/خاکستری	رنگ قرمز مایل به صورتی	رنگ سفید مایل به صورتی-خاکستری
محتویات اصلی	فسیل اوربیتولین (جلبک آهکی) و ریزمرجان‌ها	رگچه‌های سولفید آهن اکسید شده (<3%)	اووئید و آنکوئید (غلبه آنکوئید)
میکروفاسیس	وکستون / پکستون فسیل‌دار	مادستون/وکستون دگرسان	گرینستون / پکستون اوئیدی-آنکوئیدی
محیط رسوبی	لاگون کم‌عمق، آرام، نورگیر و احیایی	بین جزرومدی بالا / تحت تأثیر سیالات اکسیدان	پلتفرم کربناته با نوسان انرژی (لاگون-سد)

انحلال ترجیحی دانه ها و سیمان شدگی اسپاریتی	اکسیداسیون سولفیدها و هوازدگی	دفن سریع و حفظ فسیل ها	پدیده دیاژنزی
قوی: انحلال و سیمان شدگی مرتبط با گسلش و سیالات گرم	قوی: نشانه گردش سیالات گرم اکسیدان	غیرمستقیم	تأثیر تکتونیک/هیدروترمال

* دو نمونه تراورتن (AK-M-U3) و (AK-C-1) به دلیل شباهت کامل ویژگی های ماکروسکوپی، کانی شناسی و دیاژنزی در یک ستون قرار گرفته اند.

بررسی پارامترهای صحرایی نمونه های آب چشمه های کارستی آبگرم

در محل دهانه هر چشمه، پارامترهای فیزیکی شیمیایی شامل دما (T)، پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh)، اسیدیته (pH)، اکسیژن محلول (DO)، هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد جامد محلول (TDS) در ۱۲ نوبت اندازه گیری شد. مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه این پارامترها برای هر یک از چشمه ها در جدول ۲ ارائه و در ادامه مورد بحث قرار گرفته شده است.

و سرد

جدول ۲- مقادیر آماری هریک از پارامترهای صحرایی آب برای ۱۲ بار اندازه گیری در چشمه های آبگرم و سرد.

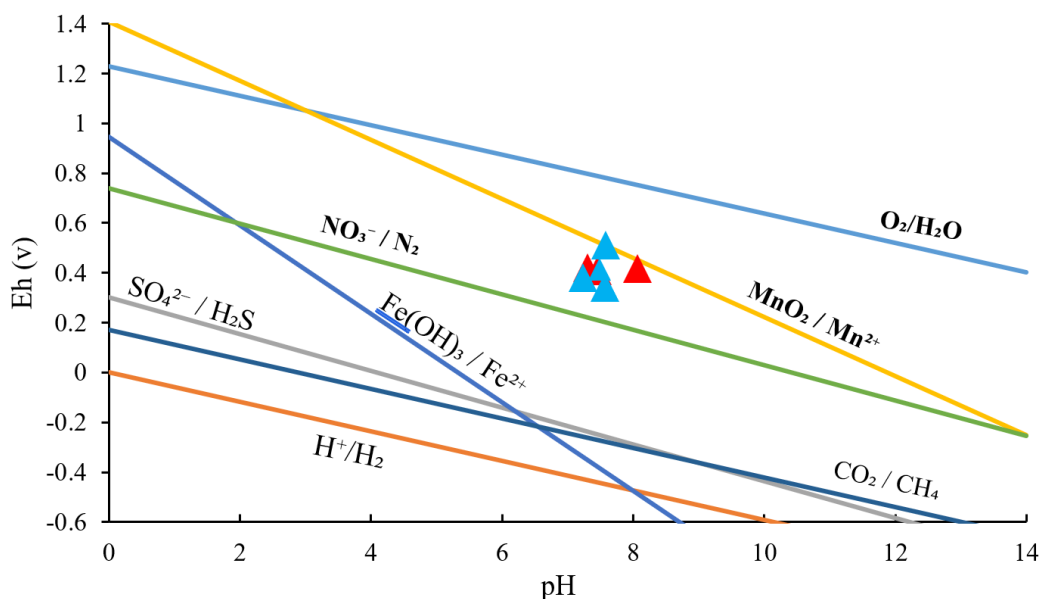
Table 2. Statistical values of each of the field water parameters for 12 measurements taken at hot and cold springs.

	T (C°)	Eh (mv)	pH	DO (mg/l)	EC (µs/cm)	TDS (ppm)
ChSp (چشمه چهل میر)						
میانگین	17.9	657	7.4	11.1	1022	562
کمینه	17.8	638	7.3	11.0	1020	561
بیشینه	17.9	671	7.6	11.5	1022	562
EHSp (چشمه آبگرم امام قنبر)						
میانگین	32.2	659	7.2	6.7	796	438
کمینه	32.2	642	7.2	6.6	795	437
بیشینه	32.2	675	7.3	6.9	796	438
GhHSp (چشمه آبگرم قلجق)						
میانگین	32.0	595	7.4	6.3	824	453
کمینه	32.0	587	7.3	6.2	823	453
بیشینه	32.1	602	7.4	6.4	824	453
AgHSp (چشمه آبگرم آقداش)						
میانگین	25.65	407	8.0	7.6	857	475
کمینه	25.62	406	7.9	7.6	815	471
بیشینه	25.67	410	8.2	7.7	864	479
GzSp (چشمه قزلق)						
میانگین	18.6	664	7.5	9.2	638	353
کمینه	18.4	641	7.5	8.4	633	348
بیشینه	19.0	678	7.6	9.5	650	357
MiSp (چشمه میاب)						

میانگین	19.3	691	7.8	11.0	565	311
کمینه	19.2	675	7.7	10.8	564	310
بیشینه	19.4	703	7.9	11.3	568	312
GoWF (آبشار گرنی)						
میانگین	15.6	663	7.9	11.9	256	141
کمینه	15.6	651	7.8	11.6	256	141
بیشینه	15.6	674	8.0	12.1	256	141
KnSp (چشمه آبگرم کناره)						
میانگین	24.7	627	7.5	6.8	388	213
کمینه	24.7	619	7.4	6.7	388	213
بیشینه	24.7	634	7.5	7.0	388	213

ولت و pH خنثی تا کمی قلیایی (۷/۲۵ تا ۸/۰۶) قرار دارند. به این معنا که در این ناحیه Eh مثبت و نسبتاً بالا (بیش از ۰/۳ ولت) بوده و نمونه‌ها در بالای مرزهای احیای نیترات و سولفات جای می‌گیرند و pH خنثی تا قلیایی حاکم است. در این محدوده، گونه‌هایی مانند NO_3^- ، SO_4^{2-} و HCO_3^- پایدار بوده و ترکیبات احیاشده‌ای چون H_2S ، CH_4 و N_2 تشکیل نمی‌شوند. آهن به صورت $\text{Fe}(\text{OH})_3$ رسوب می‌کند و منگنز در آستانه پایداری $\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}$ است؛ به طوری که در Eh بالاتر، MnO_2 جامد و در Eh پایین‌تر، Mn^{2+} محلول غالب است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که آب‌های بررسی شده عاری از بو و سمیت ناشی از سولفید و متان بوده و برای مصارف شرب و کشاورزی (با کنترل نیترات و سایر آلاینده‌ها) شرایط مطلوبی دارند.

مقدار pH در نمونه‌های برداشت‌شده از چشمه‌ها در بازه‌ای حدود ۷ تا نزدیک به ۸ قرار دارد که بیانگر شرایط خنثی تا اندکی قلیایی است. قلیایی بودن نسبی آب‌ها را می‌توان به فرایند انحلال کانی‌های کربناته در منطقه نسبت داد (Freeze and Cherry, 1979). حضور و گسترده‌ی سازند تیرگان، که بیشتر دارای ترکیبات کربناته است، نقش مؤثری در قلیایی شدن و در نتیجه بالا رفتن pH در منابع آب زیرزمینی منطقه ایفا می‌کند. به منظور بررسی تعیین شرایط پایدار گونه‌های شیمیایی در نمونه‌های آب از نمودار ترکیبی Eh-pH استفاده شد (Brookins, 1988; Takeno, 2005). موقعیت نمونه‌های چشمه‌های کارستی آبگرم و سرد بر روی نمودار Eh-pH (شکل ۴)، نشان می‌دهد همه نمونه‌ها در شرایط اکسیدی تا متوسط (Eh معادل ۰/۳۴ تا ۰/۶۵)



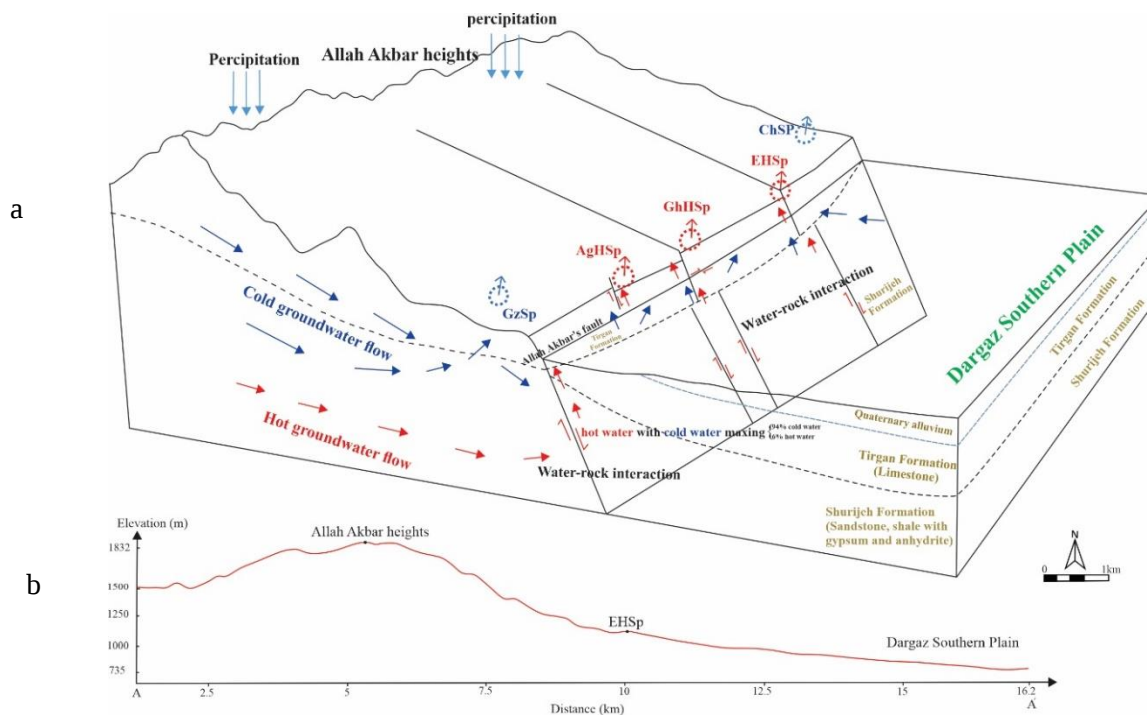
شکل ۴- نمودار Eh-pH نمونه های آب چشمه های منطقه همراه با مرزهای پایداری زوج های مختلف ریداکس (Clark, 2015). نقاط قرمز نشان دهنده موقعیت نمونه های چشمه های آبگرم و نقاط آبی موقعیت نمونه های آب سرد هستند.

Fig. 4. Eh-pH diagram of water samples from springs in the region, along with stability boundaries of various redox pairs (Clark, 2015). Red and blue symbols indicate the hot and cold spring samples, respectively.

سه چشمه آبگرم (امام قنبر، قولجق و آقداش) مقادیر دما و EC نسبتاً مشابهی دارند و همگی در امتداد گسل الله اکبر قرار گرفته اند. این امر نشان می دهد که گسل مذکور به عنوان یک مسیر هدایت کننده، ارتباط میان اعماق و سطح را ایجاد کرده و صعود آب های گرم را تسهیل می کند (شکل ۵-ا). مقدار TDS در این چشمه ها برخلاف انتظار، کمتر از چشمه چهلمیر است که نشان از منبع تغذیه متفاوت این چشمه ها است. وجود رسوبات تراورتن در پیرامون این چشمه ها نشان دهنده رسوب گذاری فعال است که می تواند باعث کاهش بخشی از مواد محلول در آب شود. چشمه آب سرد قزلق، واقع در شمال غرب منطقه، دارای پایین ترین دما، EC و TDS در میان چشمه های اصلی است. برخلاف انتظار، این چشمه رفتاری مشابه چهلمیر و چشمه های آبگرم نشان نمی دهد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تغذیه این چشمه بیشتر از آب های زیر سطحی کم عمق با املاح کمتر انجام می شود. شکل ۵-ب، مدل شماتیک دینامیکی حرکت آب و مسیرهای جریان در چشمه های آبگرم و سرد ارتفاعات الله اکبر درگز را نشان می دهد. این مدل مفهومی بر اساس تحلیل های هیدروژئوشیمیایی، پتروگرافی و ساختاری استنباط شده و صرفاً برای نمایش فرآیندهای غالب ترسیم گردیده است. داده های مستقیم حفاری یا ژئوفیزیک عمقی برای تأیید نهایی در دسترس نبوده است. نیمرخ ارتفاعی توپوگرافیک در طول مسیر جریان از ارتفاعات الله اکبر تا دشت درگز (شکل ۵-ب)، که تغییرات

بررسی تغییرات هدایت الکتریکی (EC) و مواد جامد محلول در آب (TDS)، نشان می دهد، چشمه چهلمیر، واقع در شمال غرب منطقه، علیرغم دمای پایین تر (حدود ۱۸ درجه سانتی گراد)، دارای هدایت الکتریکی بالاتری (حدود ۱۰۲۲ میکروزیمنس بر سانتی متر) نسبت به سایر چشمه ها می باشد. این ویژگی احتمالاً ناشی از ضخامت کم سازند تیرگان در این محل و تماس آب با سازند شوریه (با لیتولوژی ماسه سنگ، شیل و نهشته های تبخیری شامل ژپس و انهدریت) در زیر آن است. هرچند رخنمون سطحی شوریه دیده نمی شود، اما مدل رمپ ((Homoclinal Carbonate Ramp Model) به محیط رسوبی کم شیبی گفته می شود که در آن رخساره های کربناته آب های کم عمق (مانند سازند تیرگان) به تدریج به سمت حوضه جای خود را به نهشته های آواری و تبخیری (مانند سازند شوریه) می دهند. سازند کربناته تیرگان در حوضه کپه داغ (Aghanabati, 2004)، یعنی جانشینی تدریجی رخساره های کربناته کم عمق با نهشته های آواری-تبخیری حوضه ای، حضور سازند شوریه را در عمق کم قابل انتظار می سازد. بنابراین، وجود سازند شوریه در مسیر جریان چشمه چهلمیر، هرچند به صورت مستقیم (حفاری) بررسی نشده، اما با استناد به مدل رسوبی یادشده و شواهد هیدروژئوشیمیایی به خوبی قابل توجیه است و نشان دهنده تأثیر انحلال ژپس و انهدریت بر کیفیت آب این چشمه می باشد. در نتیجه، آب پس از انحلال مواد تبخیری، با تیپ سولفات و EC بالا به سطح باز می گردد (Appelo and Postma, 2005).

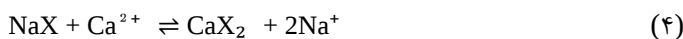
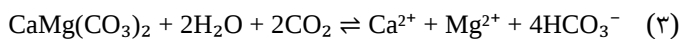
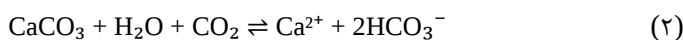
ارتفاعی (۷۳۵ تا ۱۸۳۲ متر) را نمایش داده، درک بهتر گرا دیان هیدرولیکی و شرایط مرزی حاکم بر سیستم جریان آب های زیرزمینی را فراهم می سازد.



شکل ۵- a) مدل شماتیک دینامیکی حرکت آب و مسیرهای جریان در چشمه های آبگرم و سرد ارتفاعات الله اکبر درگز، b) نیمرخ ارتفاعی توپوگرافیک در طول مسیر جریان (از ارتفاعات الله اکبر تا دشت جنوبی درگز).

Fig. 5. a) Schematic dynamic model of water movement and flow paths in the hot and cold springs of the Dargaz Allah Akbar heights. b) Topographic elevation profile along the flow path (from the Allah Akbar heights to the Dargaz southern plain).

است. در چشمه های آبگرم، انحلال کلسیت و دولومیت (واکنش های ۲ و ۳) همراه با تبادل کاتیونی (واکنش ۴) باعث غنی شدن آب از یون های Ca^{2+} ، Mg^{2+} و HCO_3^- و تشکیل تیپ کربناته-کلسیم دار می شود (Appelo and Postma, 2005).



X^* در واقع یک مکان خالی با بار منفی روی سطح رس است که می تواند یون های مثبت را به خود جذب کند.

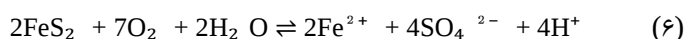
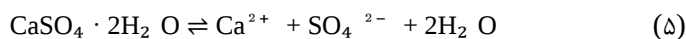
در چشمه چهلمیر، انحلال ژپس (واکنش ۵) و اکسیداسیون احتمالی کانی های سولفیدی (واکنش ۶) در شرایط اکسیدی آبخوان منجر به افزایش غلظت سولفات و تشکیل تیپ سولفات شده است (Appelo and Postma, 2005; Drever, 1997).

از سوی دیگر، چشمه آب سرد میاب دارای EC نسبتاً بالا (۵۶۵ میکروزیمنس بر سانتی متر) است که با توجه به شواهد ناشی از اختلاط با فاضلاب روستایی و انحلال سولفات است. در مقابل، آبشار گرنی (آب سرد) با پایین ترین دما (۱۵/۶ درجه سانتی گراد) و EC حدود ۲۵۶ میکروزیمنس بر سانتی متر نشان دهنده تغذیه مستقیم از آب های کارستی کم عمق با کیفیت بسیار بالای آب است. اما چشمه آبگرم کناوه با دمای نسبتاً گرم (۲۴/۷ درجه سانتی گراد) و EC پایین ترکیبی غیرمعمول دارد که می تواند ناشی از اختلاط آب گرم عمقی با آب سرد سطحی یا مسیر صعود کوتاه باشد که به سبب گسلش و تغییرات ساختمانی منطقه رخ داده است (شکل ۵).

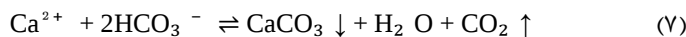
واکنش های شیمیایی آب-سنگ و نقش آن در کنترل کیفیت آب چشمه ها

به منظور تبیین علی کیفیت آب چشمه های منطقه، واکنش های اصلی برهم کنش آب و سنگ میزبان به صورت معادلات شیمیایی ۲ تا ۴ نوشته شده

برای اطمینان از صحت و دقت آنالیزهای شیمیایی، خطای تعادل بار یونی (CBE) برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید که همگی در محدوده قابل قبول کمتر از $\pm 0.5\%$ قرار دارند (جدول ۳) و نشان‌دهنده دقت بالای آنالیزهاست (Freeze and Cherry, 1979; Appelo and Postma, 2005). همچنین، کنترل کیفیت آنالیزها با استفاده از نمونه‌های استاندارد و انجام آنالیز تکراری بر روی ۲۰٪ از نمونه‌ها انجام شد. انحراف نسبی برای تمامی یون‌ها کمتر از ۵٪ و بازیابی نمونه‌های مرجع در محدوده ۹۸-۱۰۲٪ به‌دست آمد که صحت و قابلیت اعتماد نتایج را تأیید می‌کند. تغییرات ترکیب شیمیایی چشمه‌های کارستی آبگرم و سرد فصل خشک بصورت نمودارهای دایره‌ای در شکل ۶ نشان داده شده است. چشمه چهلمیر به دلیل گردش آب در سازند شورجه و انحلال ژیپس و انهدریت، TDS بیشتری نسبت به چشمه‌های دیگر نشان می‌دهد و به همین دلیل قطر بزرگتری در نقشه دارد. اختلاف TDS بین چشمه‌ها به عواملی مختلفی مانند جنس سنگ‌های دربرگیرنده و مدت زمان ماندگاری آب در سیستم بستگی دارد.



در نهایت، خروج CO_2 در هنگام صعود آب‌های گرم در امتداد گسل، با افزایش pH و ایجاد شرایط فوق‌اشباع، باعث رسوب‌گذاری کلسیت و تشکیل تراورتن می‌شود (واکنش ۷) که با شواهد صحرایی گسترده در پیرامون چشمه‌های آبگرم مطابقت کامل دارد:



بررسی برهمکنش آب-سنگ و تکامل هیدروژئوشیمیایی آب‌های

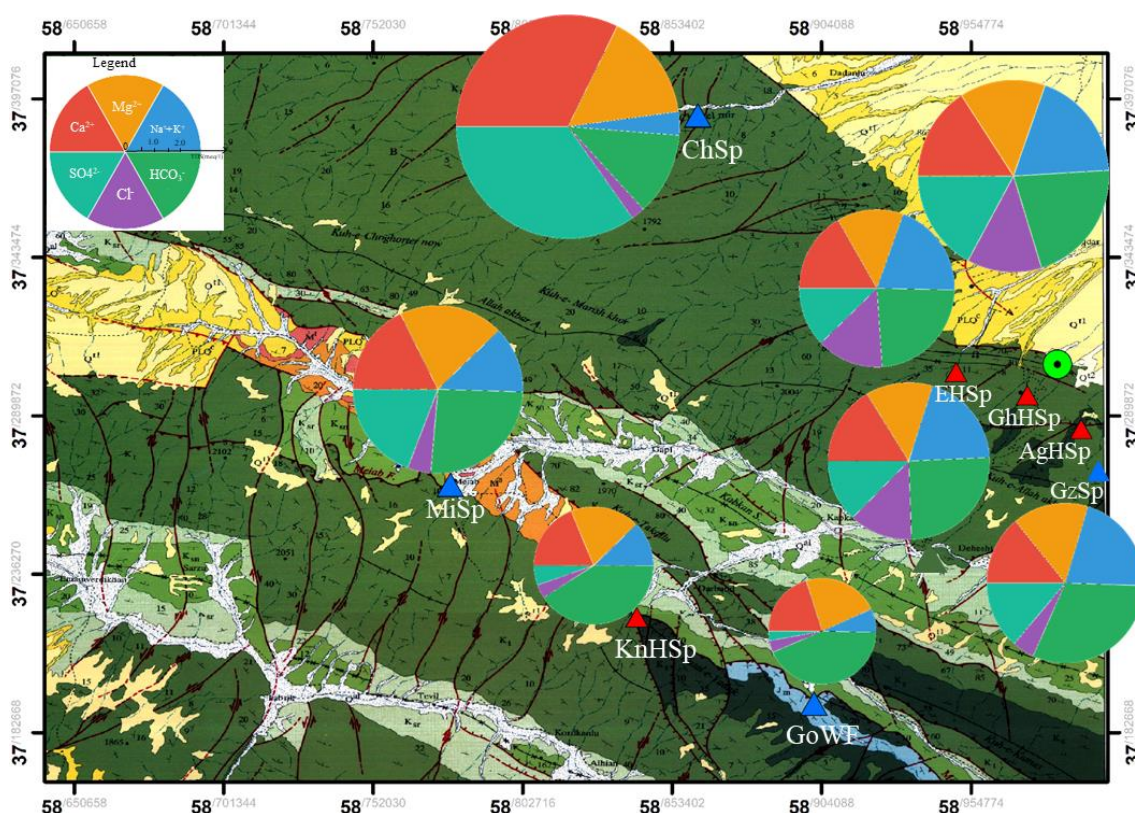
گرم با استفاده از تکنیک‌های هیدروژئوشیمیایی

نتایج اندازه‌گیری کیفیت شیمیایی آب چشمه‌های آبگرم و سرد شمال و جنوب ارتفاعات الله‌اکبر در دو نوبت فصل تر و خشک در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- آنالیز ژئوشیمیایی چشمه‌های آبگرم و سرد منطقه مورد مطالعه (مقادیر آنیون و کاتیون‌ها بر حسب میلی‌اکیوالان بر لیتر).

Table 3. Geochemical analysis of hot and cold springs in the study area (anion and cation values in meq/L).

نام چشمه	Sample No	EC (µs/cm)	TDS (ppm)	pH	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	درصد خطا (CBE)
دوره تر													
چهلمیر (آب سرد)	ChSp	1240	868	7.6	0.0	3.2	0.5	9.9	9.0	4.4	0.9	0.04	-2.65
آبگرم امام قنبر	EHSp	702	456	7.9	0.0	3.4	1.8	1.9	2.5	1.9	2.8	0.02	+0.84
آبگرم فولجق	GhHSp	732	476	7.9	0.0	3.7	2.0	1.7	2.5	1.8	2.8	0.04	-1.79
آبگرم آقداش	AgHSp	798	519	7.8	0.0	3.4	1.8	2.9	3.0	2.2	2.8	0.04	-0.37
قزلق (آب سرد)	GzSp	669	435	8.0	0.0	4.0	0.7	1.8	1.9	2.2	2.5	0.03	+0.99
میاب (آب سرد)	MiSp	667	433	7.8	0.0	3.3	0.7	2.7	2.7	2.3	1.7	0.03	+0.22
آبشار گرنی (آب سرد)	GoWF	328	213	8.0	0.0	2.9	0.2	0.2	1.6	1.2	0.5	0.01	+0.15
آبگرم کناوه	KnHSp	402	261	8.2	0.0	3.3	0.3	0.4	1.6	1.4	1.0	0.05	+0.62
دوره خشک													
چهلمیر (آب سرد)	ChSp	1231	871	7.4	0.0	3.3	0.6	9.6	8.9	4.3	0.9	0.03	-2.28
آبگرم امام قنبر	EHSp	710	425	7.6	0.0	3.6	1.8	1.8	2.3	1.9	2.7	0.04	-1.84
آبگرم فولجق	GhHSp	735	431	7.9	0.0	3.4	2.0	1.8	2.4	2.0	2.8	0.05	+0.35
آبگرم آقداش	AgHSp	772	482	8.2	0.0	3.4	2.0	2.7	2.5	2.3	2.9	0.04	-2.27
قزلق (آب سرد)	GzSp	673	418	7.9	0.0	4.1	0.6	1.8	1.9	2.1	2.7	0.03	+1.74
میاب (آب سرد)	MiSp	660	415	7.8	0.0	3.5	0.6	2.6	2.4	2.7	1.7	0.03	+0.96
آبشار گرنی (آب سرد)	GoWF	325	205	7.8	0.0	3.0	0.2	0.2	1.4	1.6	0.4	0.02	+0.29
آبگرم کناوه	KnHSp	398	234	7.8	0.0	3.2	0.3	0.4	1.5	1.5	0.9	0.02	+0.26



شکل ۶- نمودارهای دایره‌ای ترکیب شیمیایی چشمه‌های آبگرم و سرد منطقه مطالعاتی در فصل خشک (شعاع هر دایره متناسب با TDS و بخش‌های درون دایره نشان‌دهنده سهم یون‌های اصلی در ترکیب آب هستند. افزایش شعاع بیانگر افزایش املاح محلول در آب است).

Fig. 6. Pie charts illustrating the chemical composition of hot and cold springs in the study area during the dry season. The radius of each circle is proportional to TDS, and the segments within the circles represent the relative contributions of the major ions to the water chemistry. An increase in the radius indicates higher concentrations of dissolved solids.

شیمیایی سنگ‌ها، نیروی جنبشی محلول و الگوی جریان سفره آب زیرزمینی هستند (Back, 1966). موقعیت نمونه‌های آب برداشت‌شده در دیاگرام پایپر (شکل ۷) نشان می‌دهد که چشمه‌های آبگرم امام قنبر، قولجق، آقداش، کناوه و همچنین چشمه آبسرد قزلق و آبشار گرنی همگی در یک ناحیه قرار می‌گیرند و دارای تیپ کربناته و رسوبگذار هستند. این همسانی در تیپ آب، بیانگر نقش غالب سازند کربناته تیرگان در تأمین یون‌های کلسیم و بیکربنات است. چشمه‌های آبگرم منطقه (امام قنبر، قولجق و آقداش) در امتداد گسل بزرگ الله‌اکبر با روند غالب شمال غربی-جنوب شرقی و همچنین گسل‌های فرعی که به طور موازی و حتی عمود بر آن قرار گرفته‌اند، تخلیه می‌شوند. این ساختارهای گسلی به عنوان مجرای ترجیحی برای صعود سریع سیالات ژرف از اعماق به سطح عمل کرده و از اتلاف حرارت آب در مسیر صعود جلوگیری می‌نمایند. به همین دلیل، دمای خروجی این چشمه‌ها به طور قابل توجهی بالاتر از دمای محیط (بین ۲۵ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد) باقی می‌ماند و آن‌ها را در رده چشمه‌های آبگرم قرار می‌دهد. وجود رسوبات گسترده تراورتن در اطراف

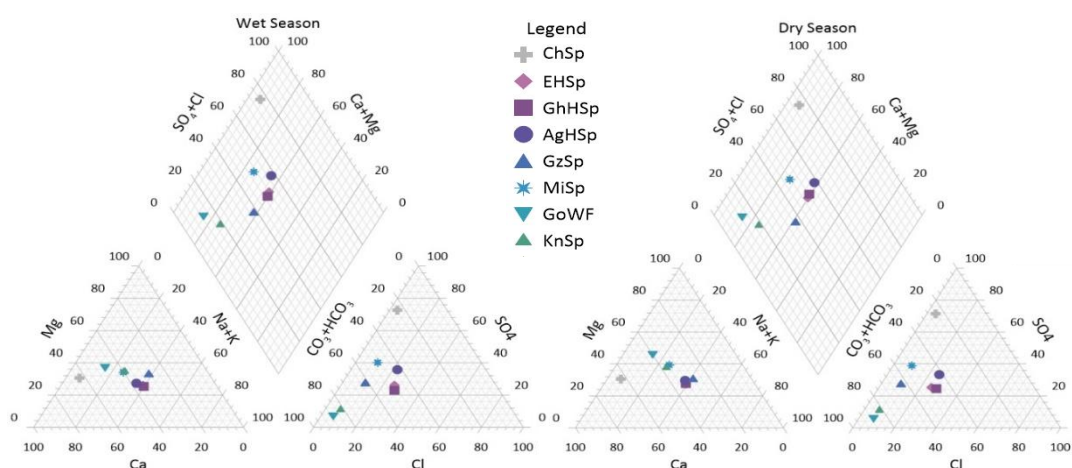
مقایسه داده‌های فصل تر و خشک (جدول ۳) نشان می‌دهد که غلظت بیکربنات و کلسیم در فصل خشک کمی افزایش می‌یابد که می‌تواند ناشی از کاهش دبی آب و افزایش زمان ماندگاری و در نتیجه انحلال بیشتر کربنات‌ها باشد. اما، غلظت یون‌های به‌ویژه نیترات (ناشی از شستشوی کودهای کشاورزی و فضولات دامی توسط جریان‌های سطحی) و سولفات (ناشی از انحلال سریع‌تر ژپس در اثر افزایش دبی آب زیرزمینی) در فصل تر نسبت به فصل خشک افزایش جزئی نشان می‌دهد. به همین دلیل، هدایت الکتریکی (EC) در اکثر چشمه‌ها در فصل تر کاهش جزئی نشان می‌دهد که ناشی از رقیق شدن آب توسط بارندگی‌ها است. این تغییرات فصلی، اگرچه قابل توجه هستند، اما الگوی کلی تیپ آب و مکانیسم‌های کنترل‌کننده (هوازدهی کربناته) را تغییر نمی‌دهند.

تیپ آب چشمه‌های کارستی آبگرم و سرد: به‌منظور تعیین رخساره‌ها، کلاسه‌بندی و تیپ آب چشمه‌ها کارستی از دیاگرام پایپر استفاده شده است (شکل ۷). رخساره‌های هیدروژئوشیمی حاصل اثر متقابل ویژگی‌های فیزیکی -

می‌شود. این ورودی انسان‌زاد می‌تواند غلظت یون‌های سولفات و کلرید را در آب افزایش دهد. در نتیجه، دیاگرام پایپر دو گروه اصلی را در منطقه متمایز می‌کند: گروه کربناته-کلسیم‌دار (چشمه‌های آبگرم گسلی + قزلق) که نشان‌دهنده تغذیه از سازند کربناته تیرگان و گروه سولفات (چهل‌میر و میاب) که نشان‌دهنده تأثیر سازند تبخیری شوریه و همچنین ورود آلاینده‌های انسانی (در چشمه میاب) می‌باشد. این تمایز، نقش لیتولوژی و ساختارهای زمین‌شناسی را در کنترل هیدروژئوشیمی چشمه‌های منطقه به‌خوبی آشکار می‌سازد.

این چشمه‌ها نیز گواه دیگری بر فعالیت پایدار گسل‌ها و صعود پیوسته آب‌های گرم در کواترنری تا عصر حاضر است.

در مقابل، چشمه کارستی آبسرد چهل‌میر احتمالاً بدلیل گردش آب تا سازند شوریه تیپ کاملاً سولفات دارد و تفاوت آشکاری با سایر چشمه‌ها نشان می‌دهد. همچنین چشمه آبسرد میاب نیز به سمت تیپ سولفات گرایش دارد. شکل‌گیری آب با تیپ سولفات می‌تواند ناشی از انحلال سنگ‌های تبخیری همچون ژپس و انهدریت باشد (Drever, 1997). افزون بر این، مشاهدات میدانی حاکی از آن است که چشمه میاب از زیر برخی منازل روستا عبور می‌کند و احتمالاً بخشی از فاضلاب واحدهای مسکونی بالادست به آن وارد



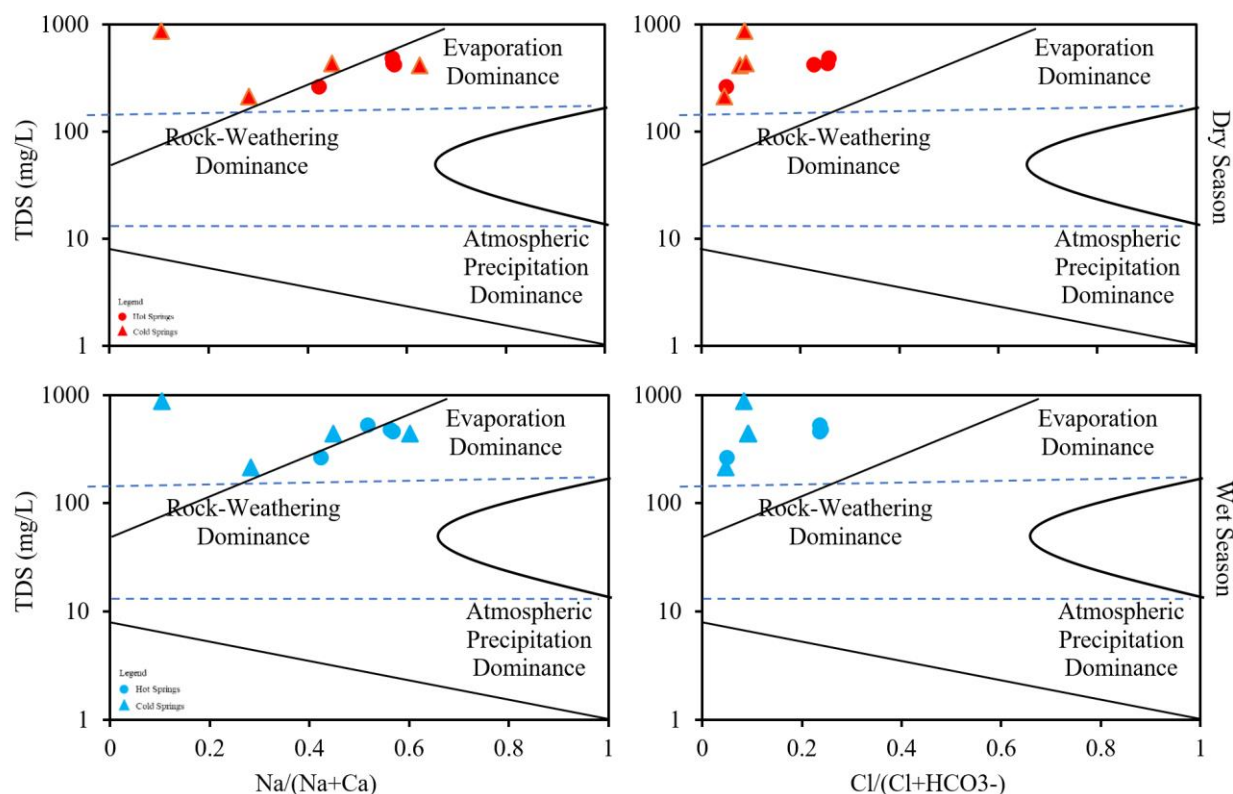
شکل ۷- موقعیت نمونه‌های آب بر روی نمودار پایپر در دو فصل خشک و مرطوب

Fig. 7. Position of water samples on the Piper diagram in dry and wet seasons

مربوطه، سهم ناچیزی در شیمی آب منطقه ایفا می‌کند. تنها نمونه آبشار گرنی (با TDS بسیار پایین و تغذیه مستقیم از بارندگی) به‌عنوان یک استثناء، اندکی از این محدوده فاصله گرفته است که نشان‌دهنده گذار از آب‌های تحت تأثیر انحلال کربنات‌ها (با کلسیم بالا و سدیم پایین) به سمت آب‌های با منشأ جوی (با سدیم نسبتاً بالاتر و املاح کل بسیار پایین) است؛ به‌عبارتی تغذیه مستقیم از حوضه آبگیر با حداقل تماس آب با سنگ‌های آهکی. همچنین یکسان بودن الگوی نمونه‌ها در فصول تر و خشک نشان می‌دهد که تغییرات فصلی تأثیر چندانی بر مکانیسم اصلی کنترل‌کننده شیمی آب (هوازدگی) ندارد. در مجموع، بر اساس تحلیل همه نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که هوازدگی سنگ‌های کربناته سازند تیرگان، فرآیند غالب در تعیین ترکیب یونی آب چشمه‌های منطقه است و تبخیر نقش فرعی دارد (Gibbs, 1970) (شکل ۸).

مکانیسم‌های حاکم بر ترکیب شیمیایی آب چشمه‌ها: برای شناسایی فرآیندهای اصلی کنترل‌کننده شیمی آب‌های زیرزمینی (هوازدگی، تبخیر، یا بارندگی)، از نمودار گیبس (Gibbs, 1970) که شامل دو بخش مجزا: (۱) $Na/(Na+Ca)$ در برابر TDS، و (۲) $Cl/(Cl+HCO_3)$ در برابر TDS است، استفاده شده است.

موقعیت نمونه‌های آب چشمه‌ها در نمودار گیبس (شکل ۸) نشان می‌دهد که اکثریت قریب به اتفاق نقاط در محدوده هوازدگی سنگ‌ها قرار می‌گیرند. غلظت پایین TDS (کمتر از ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در بیشتر نمونه‌ها) و نسبت‌های متوسط $Na/(Na+Ca)$ حاکی از آن است که انحلال کانی‌های کربناته (کلسیت، دولومیت) و تا حدی سیلیکاته، نقش اصلی در تأمین یون‌های محلول دارد. فرآیند تبخیر به دلیل پایین بودن TDS و نبود نمونه‌ها در ناحیه



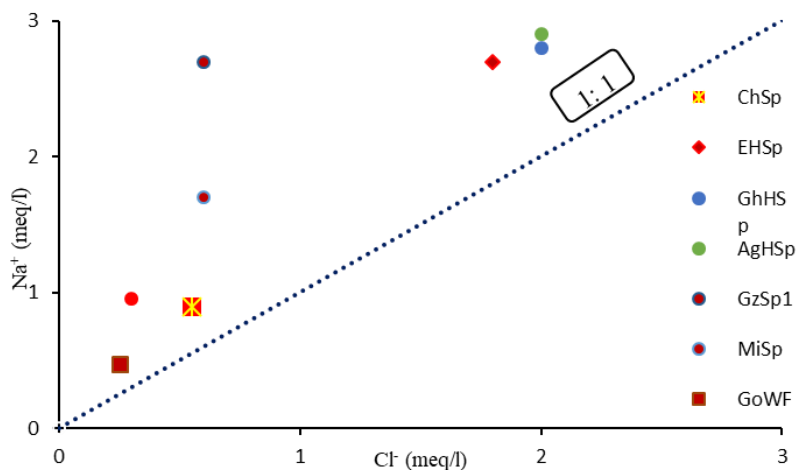
شکل ۸- نمایش نمونه‌های آب چشمه‌ها آبگرم و سرد منطقه بر روی نمودار گیبس، در دو فصل خشک (بالا) و مرطوب (پایین)

Fig. 8. Gibbs diagram representation of hot and cold spring water samples in the study area during the dry (top) and wet (bottom) seasons

کربناته-سیلیکاته قرار می‌گیرد. بیشترین نسبت‌ها (بیش از ۳) مربوط به چشمه‌های قزلق، کناوه و میاب است. چنین مقادیر بالایی فراتر از توان تبادل کاتیونی معمولی بوده و بیشتر ناشی از هوازگی سنگ‌های سیلیکاته (مانند فلدسپارهای سدیم‌دار) در منطقه تغذیه این چشمه‌ها است؛ در چشمه میاب، آلودگی فاضلاب نیز سدیم اضافی را تشدید می‌کند. در مورد آبشار گرنی، با وجود نسبت محاسباتی ۲/۵، غلظت مطلق سدیم و کلر بسیار ناچیز است در چنین محدوده غلظتی نسبت Na/Cl حساسیت بالایی به خطای اندازه‌گیری و آلودگی‌های جوی دارد و نمی‌توان آن را دال بر فرآیند غالب هوازگی سیلیکاته تفسیر کرد. آبشار گرنی در واقع نماینده آب شیرین با منشأ بارندگی است که حداقل تماس با سنگ میزبان داشته و غلظت املاح آن بیشتر توسط انحلال جزئی کربنات‌ها کنترل می‌شود (شکل ۸). عدم وجود هرگونه نمونه با $Na/Cl < 1$ تأیید می‌کند که فرآیند تبادل کاتیونی معکوس در آبخوان منطقه رخ نمی‌دهد. علاوه بر فرآیندهای طبیعی، تأثیر فعالیتهای کشاورزی و دامپروری نیز به عنوان عاملی ثانویه، سهم بسزایی در کیفیت آب زیرزمینی ایفا می‌کند (Tafazoli et al., 2025)؛ به‌گونه‌ای که افزایش میزان نیترات در نمونه‌های آب قابل توجه است. این امر به ویژه در چشمه میاب که آلودگی فاضلاب مشاهداتی دارد، آشکار است.

تعیین منشأ شوری آب چشمه‌ها با استفاده از دیاگرام‌های ترکیبی: برای شناسایی فرآیندهای کنترل‌کننده شوری و منشأ یون‌های اصلی، از دو دسته نمودار ترکیبی استفاده شد: (۱) نمودار سدیم در برابر کلر و (۲) نمودارهای هدایت الکتریکی (EC) در برابر غلظت یون‌های اصلی.

همان‌طور که در نمودار سدیم در مقابل کلر (شکل ۹) مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌های آب چشمه‌های گرم و سرد در بالای خط ۱:۱ که نشان‌دهنده تأثیر غالب انحلال هالیت ($NaCl$) بر شیمی آب و نسبت مولی $Na/Cl > 1$ است، قرار می‌گیرند. انحراف از این خط می‌تواند گویای فرآیندهای ثانویه نظیر تبادل کاتیونی و یا سایر برهم‌کنش‌های آب-سنگ در آبخوان باشد (Freeze and Cherry, 1979; Hem, 1985; Appelo and Postma, 2005). Na/Cl از حداقل ۱/۴ در چشمه قولجق تا حداکثر ۳/۶۳ در چشمه قزلق متغیر است. این الگو نشان می‌دهد که انحلال ساده هالیت ($NaCl$) نمی‌تواند تنها منشأ سدیم و کلر باشد؛ بلکه همواره سدیم اضافی نسبت به کلر وجود دارد. چشمه‌های آبگرم امام قنبر، قولجق و آقداش همراه با چشمه سرد چهل‌میر نسبت‌های Na/Cl بین ۱/۴ تا ۱/۸ دارند که در محدوده تبادل کاتیونی (جذب کلسیم و منیزیم آب توسط رس‌ها و آزادسازی سدیم) و هوازگی مختلط



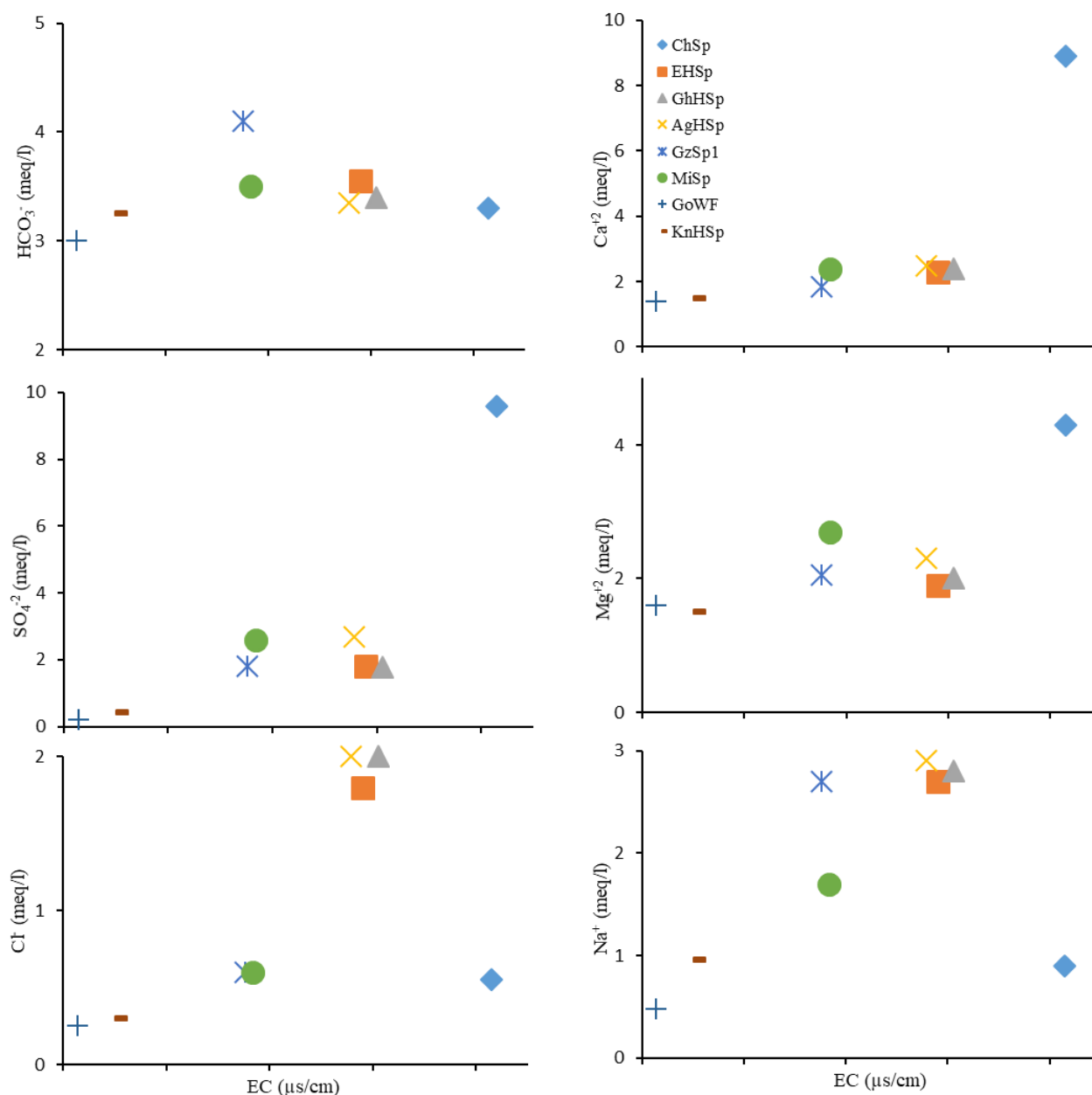
شکل ۹- موقعیت نمونه‌های چشمه‌های آبگرم و سرد بر روی دیاگرام ترکیبی سدیم در مقابل کلر
Fig. 9. Position of hot and cold spring samples on the sodium versus chloride bivariate diagram

غلظت بالای یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} در اکثر نمونه‌ها، به ویژه در نقاط EC بالاتر، مؤید تماس مداوم آب‌های زیرزمینی با سازند کربناته تیرگان است. این سازند، که غنی از کلسیم و منیزیم است، منبع اصلی این یون‌ها در آب‌های منطقه محسوب می‌شود. غلظت یون سولفات (SO_4^{2-}) در اکثر نمونه‌ها پایین است، اما چشمه چهلمیر با EC بالاتر ($1240-1022 \mu\text{S/cm}$) دارای غلظت قابل توجهی سولفات (حدود $9/9 \text{ meq/l}$) می‌باشد. نسبت مولی Ca/SO_4 نزدیک به ۱ در این چشمه نشان‌دهنده انحلال ژئوپس و انهیدریت (سازند شورجه) است. همچنین شرایط اکسیدی حاکم بر آبخوان می‌تواند با اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی (مانند پیریت) به افزایش سولفات در آب کمک کرده باشد (Appelo and Postma, 2005).

با در نظر گرفتن نقش احتمالی گسل به عنوان مسیر صعود آب‌های گرم، می‌توان نتیجه گرفت که این آب‌ها در اعماق با مجموعه‌ای از سنگ‌ها (شامل کربناته، سیلیکاتی و احتمالاً منابع شور) در تماس بوده‌اند که منجر به افزایش غلظت یون‌های Na^+ ، Cl^- ، Ca^{2+} شده است. در مجموع، نمودارهای ترکیبی نه تنها نقش سازند کربناته و تمایز بین چشمه‌های گرم و سرد را به خوبی نشان می‌دهند، بلکه پتانسیل تأثیر عوامل دیگر مانند گسل‌ها و ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص در نقاط مختلف را نیز برجسته می‌سازند (شکل ۱۰).

با بررسی نمودارهای ترکیبی هدایت الکتریکی، به عنوان شاخص کلی از میزان املاح محلول که ارتباط مستقیمی با شوری آب دارد (Freeze and Cherry, 1979; Rusydi, 2018)، در مقابل غلظت یون‌های اصلی (Na^+ ، Cl^- ، K^+ ، Ca^{2+} ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، Mg^{2+}) تصویر کامل‌تری از وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه به دست آمد.

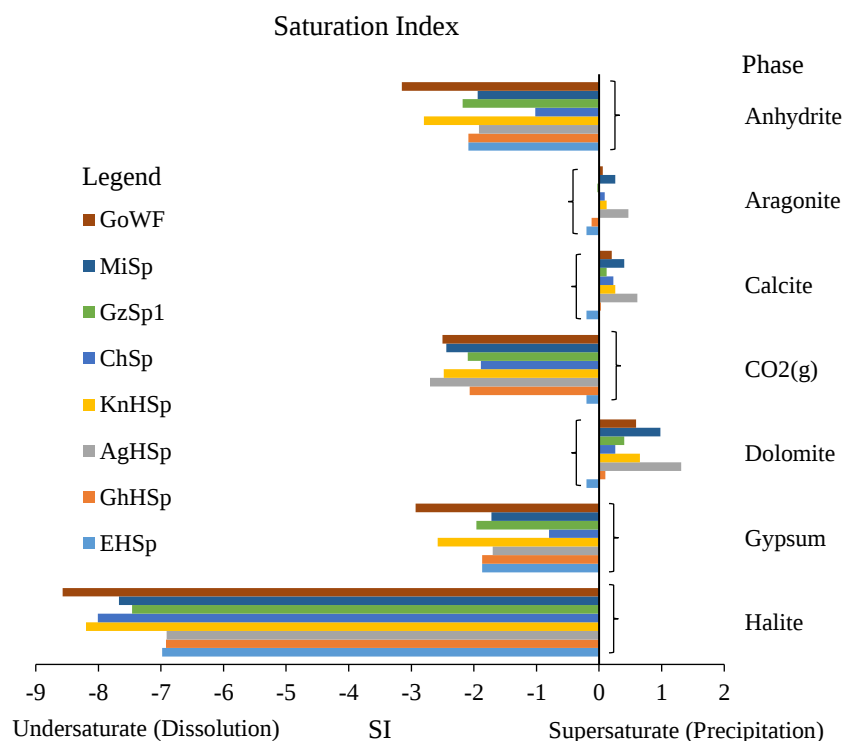
چشمه‌های آبگرم منطقه (امام قنبر، قولجق، آقداش) در مقایسه با بیشتر چشمه‌های آب سرد (به جز چشمه چهلمیر) دارای EC نسبتاً بالاتری هستند. در این چشمه‌ها، غلظت کلسیم و بیکربنات (ناشی از انحلال سازند کربناته تیرگان) نقش اصلی در کنترل شوری دارد. با این حال، این چشمه‌ها همچنین غلظت بالاتری از یون‌های Na^+ و Cl^- نسبت به چشمه‌های آب سرد (به جز چهلمیر) نشان می‌دهند. این افزایش نسبی سدیم و کلر، فرضیه تماس آب‌های گرم در اعماق با منابع شورتر و یا فرآیندهای انحلال عمیق‌تر (مانند انحلال هالیت یا اختلاط با آب شور) را تقویت می‌کند. در مقابل، چشمه‌های آب سرد (به جز چهلمیر و قزلق) بیشتر EC پایین‌تری دارند؛ هرچند چشمه چهلمیر با EC حدود $1200 \mu\text{S/cm}$ میکروزیمنس، شوری بیشتری نسبت به سایر چشمه‌های سرد دارد که سولفات (و نه کلرید) یون کنترل‌کننده اصلی شوری آن است. این امر بیانگر تأثیر محلی سنگ‌های سولفاته (ژئوپس و انهیدریت) در مسیر جریان این چشمه است. چشمه کناره با EC پایین (حدود $400 \mu\text{S/cm}$ میکروزیمنس) و غلظت کم Na^+ و Cl^- ، همچنان به عنوان یکی از منابع آب شیرین منطقه باقی می‌ماند.



شکل ۱۰- ارتباط بین هدایت الکتریکی و غلظت یون‌ها در نمونه‌های آب زیرزمینی
 Fig. 10. Relationship between electrical conductivity and ion concentrations in groundwater samples

از حضور کانی‌های کربناته گوناگون در آبخوان این چشمه‌ها است. تقریباً تمامی نمونه‌ها نسبت به آنهیدریت، ژپس، هالیت و دی‌اکسید کربن (CO₂) در حالت تحت اشباع هستند که نشان دهنده تمایل انحلال کانی‌های تبخیری در آب این چشمه‌ها است.

بررسی حالت تعادل آب-سنگ با استفاده از شاخص اشباع (SI): مقادیر شاخص اشباع چشمه‌های آبگرم و سرد نسبت به کانی‌های مختلف، در شکل ۱۱ ارائه گردیده است. بر اساس یافته‌ها، آب این چشمه‌ها نسبت به کانی‌های آراگونیت، کلسیت و دولومیت در حالت فوق‌اشباع قرار دارد، که احتمالاً ناشی



شکل ۱۱- شاخص های اشباع کانی های مختلف در آب چشمه های آبگرم و سرد

Fig. 11. Saturation indices of groundwater of hot and cold springs

نتایج موقعیت نمونه های آب بر روی نمودار طبقه بندی ویلکوکس (Wilcox, 1955) (جدول ۵)، نشان می دهد کلیه نمونه ها در کلاس های C2-S1 و C3-S1 (چشمه چهل میر) قرار می گیرند. این آب ها علیرغم داشتن کمی شوری، برای کشاورزی مناسب هستند. قابل ذکر است که شوری بالا در آب آبیاری موجب تشکیل خاک های شور می شود و بنابراین، به کارگیری این گونه آب ها مستلزم مدیریتی ویژه برای کنترل شوری و استفاده از گیاهانی با تحمل شوری بالا است.

اگرچه پارامترهای فیزیکوشیمیایی دیگر در کاربردهای صنعتی اهمیت دارند، اما مسئله خوردگی و رسوب گذاری بر سطوح فلزی در تماس با آب، اولویت ویژه ای دارد (Gupta et al., 2010). به این منظور، شاخص اشباع لائزلیه (LSI) به عنوان معیار تعیین تمایل آب به رسوب گذاری یا خوردگی، با استفاده از رابطه (۸) برای همه نمونه ها محاسبه شد (جدول ۵). مقادیر مثبت و منفی LSI به ترتیب نشان دهنده تمایل به رسوب گذاری کربنات کلسیم و خوردگی هستند.

$$LSI = pH - pH_s \quad (8)$$

$$pH_s = C + P(Ca) + P(alk) \quad (9)$$

بررسی آب چشمه های کارستی آبگرم از نظر مصارف مختلف

بر اساس دیاگرام شولر، کیفیت آب چشمه های آبگرم (امامقبر، قولجق، آقداش) و آب سرد قزلق در محدوده «خوب تا قابل قبول»، چشمه کناره و آبشار گرنی در محدوده «خوب» و چشمه های چهل میر و میاب در محدوده «قابل قبول تا متوسط» قرار دارند. روند یکسان غلظت یون ها در همه نمونه ها، با وجود تفاوت دما و منشأ تغذیه، نشان دهنده تأثیر غالب عوامل محیطی منطقه ای است. افزایش جزئی نیترات در فصل تر ناشی از شستشوی کودهای کشاورزی توسط جریان های سطحی است که عامل اصلی آن فعالیت های کشاورزی و استفاده از کودهای نیتروژن دار و فضولات دامی است (Shakeri et al., 2025). لازم به ذکر است که دیاگرام شولر فقط کیفیت شیمیایی آب را بر اساس یون های اصلی ارزیابی می کند و برای تأیید سلامت میکروبی نیاز به آزمایش های مجزای میکروبیولوژیکی (کلیفرم و اشیشیا کلی) است. در چشمه هایی با شواهد آلودگی انسانی (مانند میاب)، کیفیت شیمیایی مطلوب کافی نبوده و مدیریت آب باید بر اساس هر دو جنبه شیمیایی و میکروبی صورت پذیرد (جدول ۷).

این تناقض ناشی از آزادسازی CO_2 و افزایش pH در دمای بالاتر چشمه هنگام خروج آب است. رسوب گذاری گسترده بیشتر مربوط به دوره های گذشته بوده و در حال حاضر احتمالاً ادامه ندارد. بنابراین، چشمه های آبگرم (امام قنبر، قولجق، آقداش) در تشکیل ذخایر تراورتن مؤثر بوده اند، در حالی که چشمه های آب سرد خوردندگی خفیف تا متوسط دارند.

که در آن: C تابعی از درجه حرارت و TDS است؛ $P(\text{Ca})$ ، لگاریتم منفی غلظت یون های کلسیم و $P(\text{alk})$ ، لگاریتم منفی آلکالینیتی و pH_s همان pH تعادلی است (Ghasemi et al., 2013).

محاسبه شاخص LSI در شرایط آزمایشگاهی برای چشمه های آبگرم (امام قنبر و قولجق) مقدار منفی (خوردندگی) نشان می دهد، اما شواهد صحرایی (رسوبات تراورتن و معدن فعال) گویای رسوب گذاری شدید در گذشته است. جدول ۵- کیفیت آب چشمه های آبگرم از دیدگاه مصارف شرب و کشاورزی و صنعت

Table 5. Quality of hot spring water for drinking and agricultural purposes, and industrial purposes

نام چشمه	دما (C)°	pH	EC (µS/cm)	کشاورزی		شرب	صنعت	
				کلاس آب	کیفیت		LSI	وضعیت
ChSp	17.9	7.2	1240	C3-S1	شور - قابل استفاده	قابل قبول تا متوسط	-0.02	خورنده
EHSp	32.1	7.3	702	C3-S1	شور - قابل استفاده	خوب تا قابل قبول	-0.19	خورنده
GhHSp	31.7	7.4	732	C3-S1	شور - قابل استفاده	خوب تا قابل قبول	-0.01	خورنده
AgHSp	25.6	8.0	798	C3-S1	شور - قابل استفاده	خوب تا قابل قبول	+0.53	رسوب گذار قوی
GzSp	18.4	7.5	669	C2-S1	کمی شور - قابل استفاده	خوب تا قابل قبول	-0.22	خورنده
MiSp	19.9	7.8	667	C2-S1	کمی شور - قابل استفاده	خوب تا قابل قبول	+0.10	رسوب گذار خفیف
GoWF	15.5	7.8	328	C2-S1	کمی شور - قابل استفاده	خوب	-0.24	خورنده
KnHSp	24.6	7.8	402	C2-S1	کمی شور - قابل استفاده	خوب	0.00	متعادل

اولویت بندی مدیریتی چشمه ها بر اساس یافته های هیدروژئوشیمیایی

به منظور تبدیل یافته های علمی این پژوهش به راهکارهای عملی برای مدیران محلی و برنامه ریزان منابع آب، چشمه های منطقه بر اساس مجموعه نتایج حاصل از دیاگرام شولر، نمودار ویلکوکس، شاخص لانژلیه (LSI)، شاخص اشباع (SI)، تیپ آب و مشاهدات صحرایی (آلودگی، وجود تراورتن، پتانسیل ژئوتوریزم) در چهار سطح اولویت طبقه بندی شده اند (جدول ۷). این اولویت بندی به مدیران محلی امکان می دهد تا منابع مالی و اجرایی خود را ابتدا بر روی چشمه میاب (برای کنترل آلودگی)، سپس بر روی چشمه های آبگرم گسلی (برای توسعه گردشگری پایدار) متمرکز کنند و در مرحله بعد به اصلاح کیفیت آب چهلیمیر بپردازند. چشمه های با اولویت پایین نیاز به اقدام فوری نداشته و صرفاً پایش دوره ای کافی است.

پتانسیل های ژئوتوریزم چشمه های آبگرم الله اکبر درگز

چشمه های آبگرم، گنجینه هایی از طبیعت، سلامت و گردشگری هستند. چشمه های آبگرم الله اکبر درگز، علاوه بر ارزش های علمی و هیدروژئوشیمیایی، از پتانسیل بالایی برای توسعه ژئوتوریزم برخوردارند. وجود مناظر طبیعی تراورتن، چشمه های آبگرم با دمای بالا (۲۵-۳۲ درجه سانتی گراد) و موقعیت کوهستانی ارتفاعات الله اکبر، این منطقه را به یک مقصد جذاب برای گردشگری علمی و طبیعت گردی تبدیل کرده است. با این حال، علی رغم این پتانسیل قابل توجه، معرفی این چشمه ها در سطح ملی کافی نبوده و کمبود امکانات رفاهی و بهداشتی مانع بهره برداری مناسب شده است. افزون بر این، این چشمه ها در معرض آلودگی های ناشی از فاضلاب شهری و روستایی، پساب های کشاورزی و رفتار نادرست گردشگران قرار دارند که می تواند به اکوسیستم های پیرامونی آسیب بزند (Mirhosseini et al., 2015). از این رو، حفاظت، مدیریت علمی و کنترل آلودگی ها در کنار توسعه پایدار گردشگری، برای حفظ کیفیت و بهره برداری بلندمدت از این منابع ارزشمند ضروری است.

جدول ۷- اولویت بندی و اقدام پیشنهادی برای چشمه های کارستی آبگرم منطقه الله اکبر درگز برای اقدامات مدیریتی

Table 7. Prioritization and proposed management measures for the karstic hot springs in the Allah Akbar region of Dargaz

اولویت	چشمه(ها)	اقدام پیشنهادی	مبنای تصمیم
فوری	میاب	اصلاح شبکه جمع آوری فاضلاب روستای میاب؛ پایش مستمر نیترات و کلیفرم	تیپ سولفات در دیاگرام پایپر؛ آلودگی انسانی مشاهداتی (عبور فاضلاب از بستر چشمه)
بالا	امام قنبر، قولجق، آقداش	توسعه ژئوتوریسم علمی و طبیعت گردی (ایجاد سکوهای دید، مسیر دسترسی، سرویس بهداشتی)	رسوب گذاری تراورتن؛ LSI مثبت یا نزدیک به صفر؛ دمای مناسب آبگرم
متوسط	چهل میر	استفاده از بازدارنده خوردگی در کاربردهای صنعتی	تیپ سولفات؛ شاخص LSI منفی (خوردگی)؛ EC بالا
پایین	قزلق، آبشار، گرنی، کناوه	حفاظت معمول از آبخوان (ممنوعیت آلوده سازی)؛ پایش دوره ای سالانه کیفیت	کیفیت «خوب تا قابل قبول» در دیاگرام شولر؛ LSI نزدیک به تعادل یا خوردگی خفیف

نتیجه گیری

حاضر است. از نظر هیدروژئوشیمیایی، آب چشمه های آبگرم از تیپ کربناته-کلسیم دار بوده و بر اساس نمودار گیبس، هوازگی سنگ های کربناته (نه تبخیر) عامل اصلی کنترل شیمی آب است. شرایط اکسیدی تا متوسط (E_h معادل ۰/۳۴ تا ۰/۵۱ ولت) و pH خنثی تا قلیایی خفیف (۷/۲-۸/۲) سبب پایداری گونه هایی چون HCO_3^- و SO_4^{2-} و عدم تشکیل گازهای نامطبوع (H_2S , CH_4) شده است. شاخص اشباع نشان دهنده فوق اشباع بودن آب نسبت به کلسیت، آراگونیت و دولومیت و تحت اشباع بودن نسبت به ژپس و هالیت است. ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب (بر اساس دیاگرام شولر) اغلب در محدوده خوب تا قابل قبول (به جز چشمه چهل میر و میاب) و برای کشاورزی در کلاس C3-S1 (شور - قابل استفاده با مدیریت) قرار می گیرد. لازم به ذکر است که دیاگرام شولر صرفاً کیفیت شیمیایی آب را ارزیابی می کند و در چشمه هایی با آلودگی فاضلاب (مانند میاب)، مدیریت کیفیت آب باید بر اساس هر دو جنبه شیمیایی و میکروبی صورت پذیرد. همچنین، علی رغم محاسبه LSI منفی برای برخی چشمه های آبگرم، شواهد صحرایی گسترده تراورتن، خاصیت رسوب گذاری قوی آن ها را تأیید می کند. در نهایت، چشمه های آبگرم منطقه به دلیل وجود مناظر طبیعی تراورتن، چشمه های آبگرم با دمای بالا (۲۵-۳۲ درجه سانتی گراد) و موقعیت کوهستانی ارتفاعات الله اکبر، پتانسیل بالایی برای توسعه ژئوتوریسم علمی و طبیعت گردی دارند، اما آلودگی های ناشی از فاضلاب و کشاورزی و نبود امکانات حفاظتی، تهدیدی جدی برای پایداری این منابع ارزشمند محسوب می شوند که کنترل آلودگی، تعیین حریم کیفی و انجام مطالعات ایزوتوپی تکمیلی را ضروری می سازد. مدل شماتیک ارائه شده در این پژوهش بر اساس شواهد غیرمستقیم و تفسیر داده های هیدروژئوشیمیایی است. برای اعتبارسنجی دقیق تر مسیرهای جریان و ساختارهای عمقی، انجام مطالعات تکمیلی ژئوفیزیک و حفاری اکتشافی در آینده پیشنهاد می شود. همچنین، انجام اندازه گیری دقیق دبی چشمه ها و

در منطقه چشمه های آبگرم الله اکبر درگز، سیستم تخلخل دوگانه در اثر انحلال ترجیحی و شکستگی های تکتونیکی ایجاد شده است. افزایش سطح تماس آب و سنگ میزبان در اثر افزایش تخلخل، نقش مستقیمی در غنی شدن آب از یون های کلسیم و بیکربنات و در نهایت، تشکیل نهشته های تراورتن ایفا کرده است. یافته ها نشان می دهد که تکامل هیدروژئوشیمیایی چشمه های منطقه، نتیجه تعامل سه عامل اصلی شامل سنگ شناسی اولیه (سازند تیرگان)، تاریخچه دیاژنتیکی (شامل انحلال ترجیحی و سیمان شدگی هیدروترمال)، و ساختارهای تکتونیکی (گسل ها) است. بر اساس نتایج این پژوهش، سازند کربناته تیرگان (با سن کرتاسه زیرین) با ایجاد ناهمگنی اولیه در مرحله رسوب گذاری و پس از آن توسعه یک سیستم تخلخل دوگانه (شکافی-حفره ای) در اثر فرایندهای دیاژنتیکی، نقش کلیدی و تعیین کننده ای در تکامل هیدروژئوشیمیایی چشمه های آبگرم و سرد ارتفاعات الله اکبر درگز ایفا کرده است. تحلیل واکنش های شیمیایی آب-سنگ نشان داد که انحلال کلسیت و دولومیت همراه با تبادل کاتیونی در چشمه های آبگرم، باعث غنی شدن آب از یون های کلسیم، منیزیم و بیکربنات و تشکیل تیپ کربناته-کلسیم دار شده است؛ در حالی که در چشمه چهل میر، انحلال ژپس و اکسیداسیون احتمالی کانی های سولفیدی در شرایط اکسیدی آبخوان، منجر به افزایش غلظت سولفات و تشکیل تیپ سولفات گردیده است. همچنین، خروج CO_2 در هنگام صعود آب های گرم در امتداد گسل، با افزایش pH و ایجاد شرایط فوق اشباع، باعث رسوب گذاری کلسیت و تشکیل تراورتن شده است.

تخلیه چشمه های کارستی آبگرم (امام قنبر، قولجق، آقداش و کناوه) در امتداد گسل فعال منطقه و وجود تراورتن های کواترنری نشان دهنده تداوم صعود سریع آب از عمق، خروج CO_2 و رسوب گذاری کربنات کلسیم تا عصر

بدین وسیله، مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی به سبب انجام آنالیزهای هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های آب ابراز می‌نماییم. همچنین از سرکار خانم دکتر اعلمی‌نیا و جناب آقای دکتر کرمی به پاس همکاری ارزشمند ایشان در عملیات صحرایی (نمونه‌برداری) و همچنین تفسیر پتروگرافی مقاطع نازک سنگ‌ها، صمیمانه تشکر می‌شود.

محاسبه نسبت اختلاط آب گرم و سرد با استفاده از معادلات اختلاط (بر اساس دما و هدایت الکتریکی) برای درک بهتر ترکیب غیرمعمول چشمه کناره، و نیز آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن- 18 و دوتریم برای تعیین منشأ دقیق آب‌های چشمه‌ها و ایزوتوپ گوگرد برای تأیید منشأ سولفات در چشمه چهل‌میر، پیشنهاد می‌شود.

قدردانی

References

- Abbasnia, A., Alimohammadi, M., Mahvi, A.H., Nabizadeh, R., Yousefi, M., Mohammadi, A.A., Pasalari, H., Mirzabeigi, M., 2018. Assessment of groundwater quality and evaluation of scaling and corrosiveness potential of drinking water samples in villages of Chabahr city, Sistan and Baluchistan province in Iran. Data Brief 16, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.11.003>
- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran. (in Persian)
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution (2nd ed.). CRC Press.
- Askari Malekabad, F., Jahanshahi, R., Bagheri, R., 2020. Characterization of the Bazman geothermal field, the southeast of Iran. Geopersia 10(2), 405–418. <https://doi.org/10.22059/geope.2020.296150.648525>
- Back, W., 1966. Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain (No. 498). US Government Printing Office.
- Back, W., Hanshaw, B.B., Herman, J.S., Van Driel, J.N., 1986. Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico. Geology 14 (2), 137–140. [https://doi.org/10.1130/00917613\(1986\)14<137:DDOAPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/00917613(1986)14<137:DDOAPR>2.0.CO;2)
- Bahadori, D., Jahanshahi, R., Dehghani, V., Mali, S., 2019. Variations of stable oxygen and hydrogen isotope ratios in the cold and thermal springs of the Bazman volcanic area (in the southeast of Iran). Environmental Earth Sciences 78 (23). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8681-6>
- Behzadfar, L., 2011. Microfacies and micropaleontology of Lower Cretaceous sediments (Urgonian facies) in Ghaleh Kamar section, northeast of Quchan. (Master's thesis). Islamic Azad University (in Persian).
- Broggi, A., Capezzuoli, E., 2009. Travertine deposition and faulting: the fault-related travertine fissure ridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy). International Journal of Earth Sciences 98, 931–947. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0290>
- Brookins, D.G., 1988. Eh-pH Diagrams for Geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 176 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73093-1>
- Clark, I.D., 2015. Groundwater Geochemistry and Isotopes. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- Citrini, A., Mayer, A., Camera, C.A.S., Eross, A., Sultenfub, J., Pezzera, G., Pietro Beretta, G., 2024. Hydrogeochemical and isotope characterization of the main karst aquifers of the middle Valseriana (Northern Italy): Nossana and Ponte del Costone springs. Applied Geochemistry 169. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106046>
- Drever, J.I., 1997. The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments (3rd ed.). Prentice Hall.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E. (Ed.), Classification of Carbonate Rocks. AAPG Memoir 1, 108–121. <https://doi.org/10.1306/M1357>
- Ebrahimi, H., Akbari, F., Mazraeh, S., Biglari, B., 2023. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of Varskhavar karst spring. Journal of engineering geology 7 (4), 467–481. <http://dx.doi.org/10.22034/JEG.2023.17.4.1019591> (in Persian)
- Farhadi, S., Alijani, F., Nasser, H., Daneshian, H., 2022. Comparison of hydrogeochemistry and hydrogeology of Asmari and Sarvak formations as reservoirs of large Zagros karst springs in northeast Khuzestan. Hydrogeology journal 7 (2) 143–159. <https://doi.org/10.22034/hydro.2023.14136> (in Persian)
- Flügel, E., 2010. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>
- Fouke, B.W., 2011. Hot-spring Systems Geobiology: Abiotic and biotic influences on travertine formation at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA. Sedimentology 58(1), 170–219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2010.01209>
- Foroughi-Garo, F., 2012. Structural analysis of the Zharf Anticline (Kopet-Dagh Mountains) [Master's thesis]. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian).
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall.
- Ghaemi, F., 2004. Geological map of Guchan (1:100,000). Geological Survey of Iran. (in Persian).
- Ghasemi, A., Lashkaripour, G., Baniasadi, A., Hasanki, M., 2013. Evaluation of the effect of geological formations on water quality of Shoorlaq catchment, Sarakhs, Khorasan Razavi province. In: 8th Conference of Iranian engineering geology and environment. <https://en.civilica.com/doc/233020> (in Persian).
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science 170 (3962), 1088–1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- Gupta, S., Nayek, S., Saha, R.N., 2010. Temporal changes and depth wise variations in pit pond hydrochemistry contaminated with industrial effluents with special emphasis on metal distribution in water-sediment system. Journal of hazardous materials 183 (1–3), 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.125>
- Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (No. 2254). U.S. Geological Survey.
- Javanbakht, M., Tayeban, S.A., Poursoltani, M.R., 2018. Geochemistry, diagenetic processes and sedimentary environment of the Tirgan Formation in the eastern Kopet-Dagh Basin, NE Iran.

- Applied Sedimentology 6(12), 122-134. <https://doi.org/10.22084/PSJ.2019.15632.1165> (in Persian)
- Keegan-Treloar, R., Irvine, D.J., Solórzano-Rivas, S.C., Werner, A.D., Banks, E.W., Currell, M.J., 2022. Fault-controlled springs: A review. *Earth-science reviews* 230. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104058>.
- Li, J., Yang, G., Zhu, D., Xie, H., Zhao, Y., Fan, L., Zou, S., 2022. Hydrogeochemistry of karst groundwater for the environmental and health risk assessment: The case of the suburban area of Chongqing (southwest China). *Geochemistry* 82 (2). <http://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125866>.
- Mao, X., Wang, Y., Zhan, H., Feng, L., 2015. Geochemical and isotopic characteristics of geothermal springs hosted by deep-seated faults in Dongguan Basin, Southern China. *Journal of geochemical exploration* 158, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.07.008>.
- Mirhosseini, M., Abedpour, Z., Shakeri, F., 2015. Geotourism capabilities of hot and mineral springs in Iran. *Journal of Physical Geography* 8 (28), 101-116. <https://www.magiran.com/p1575699> (in Persian).
- Mohammadzadeh, H., Kazemi, M., 2017. Geofluids assessment of the Ayub and Shafa hot springs in Kopet-Dagh Zone (NE Iran): An isotopic geochemistry approach. *Geofluids* 2017 (1) 6358680. <https://doi.org/10.1155/2017/6358680>
- Mohammadzadeh, H., Mansouri Daneshvar, M.R., 2020. A comparison of hydro-geochemistry and stable isotope composition of travertine-depositing springs, Garab in NE Iran and Pamukkale in SW Turkey. *Carbonates and Evaporites* 35 (1), 23. <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00566-9> (in Persian).
- Mohammadzadeh, H., 2023. Field and laboratory guide for hydrogeochemical and isotopic studies. 2st edition, Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad, 128 pp. https://press.um.ac.ir/index.php/fa/?option=com_books&view=book&id=2074 (in Persian).
- Mohammadzadeh, H., Fanodi, F., 2025. Evaluation of hydrogeochemical evolution and water-rock interaction processes in Dargaz border aquifer. *Hydrogeology* 10 (1), 12-34. <https://doi.org/10.22034/hydro.2025.66560.1332> (in Persian).
- Moore, C.H., Wade, W.J., 2013. Carbonate Reservoirs: Porosity and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. *Developments in Sedimentology*, Vol. 67. Elsevier, Amsterdam. URL: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-sedimentology/vol/67/suppl/C>
- Nohegar, A. (2011). Investigation of the physical and chemical quality of surface waters in the Minab River. *Earth Science Researches*, 2 (7), 1-17. <https://sid.ir/paper/207363/fa> (in Persian)
- Pentecost, A., Viles, H.A., 1994. A review and reassessment of travertine classification. *Géographie Physique et Quaternaire* 48 (3), 305–314.
- Rusydi, A.F., 2018. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 118 (1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>.
- Shakeri, A., Sharafi, N., Rastegari Mehr, S., Abdollah Beiglou, L., 2025. Assessment of water quality and hydrogeochemical processes in proximity to a municipal landfill site: case study of the Mohammadabad Landfill, Qazvin, Iran. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11 (1), 103–130. <https://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.107782> (in Persian).
- Subba Rao, N., Sunitha, B., Adimalla, N., Chaudhary, M., 2020. Quality criteria for groundwater use from a rural part of Wanaparthy District, Telangana State, India, through ionic spatial distribution (ISD), entropy water quality index (EWQI) and principal component analysis (PCA). *Environmental Geochemistry and Health* 42(2), 579–599.
- Tafazoli, M., Bagheri, R., Arjmand Sharif, M., Shojaei, M., 2025. Hydrochemical tracing and salinity origin of water resources based on combined diagrams in Sabzevar Plain. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11(1), 175–200. <https://dx.doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.108001> (in Persian)
- Takeno, N., 2005. Atlas of Eh-pH diagrams – Intercomparison of thermodynamic databases. Open File Report of GSJ, No. 419, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 287 p. <https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18089A638.pdf>
- Velayati, S., 1983. Preliminary report on water resources of Dargaz plain (Darungar river catchment). Water Resources Studies Department, Khorasan Razavi Regional Water Company, Ministry of Energy, 90 p. (in Persian).
- Walton, W.C., 1970. Groundwater Resource Evaluation. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering (USA) eng.
- Wilcox, L.V., 1955. Classification and use of irrigation waters. US Department of Agriculture 969.