

# The effect of lithological units and the role of hydrothermal fluids on the concentration of elements in groundwater resources of the southeast region of Salmas

Nosrat Aghazadeh<sup>1\*</sup>, Tohid Pashaei Gharagoz<sup>2</sup>, Morteza Derakhshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

<sup>2</sup> Former M.Sc. Student, Department of Geology, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

## Extended Abstract

### Introduction

Hydrogeochemical characteristics provide a lot of information about the origin of water, the influence of host rocks, and dominant hydrochemical processes. In areas related to geothermal resources, chemical interactions between hot water (hydrothermal fluids) and surrounding rocks change the composition of water and enrich elements such as V, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Al, Ag, Cd, Sb, Cs, Ba, W, Au, Tl, and Pb are included in their composition. The presence of hydrothermal sources and different rock units (and especially metamorphism) in the southeastern region of Salmas has caused water sources, especially spring water, to have different chemical compositions. Considering that in the studied area, a major part of water consumption for agriculture and sometimes for drinking is provided through underground water sources, especially from springs in the area. Field surveys, as well as previous studies in the region, indicate the contamination of water and soil resources in the region and negative and dangerous consequences on aquatic ecology, the quality of agricultural products, and health. residents of the region. This study aims to investigate the effect of different rock units and the role of hydrothermal fluids on increasing the concentrations of elements in groundwater resources of the southeast region of Salmas. For this purpose, selected groundwater sources were sampled and the effects of lithology and hydrothermal fluids have been investigated based on the results of chemical analysis of the samples.

### Materials and Methods

The study area is located in West Azerbaijan Province, about 20 km southeast of Salmas City and 55 km north of Urmia City, it is considered a part of the catchment area of Urmia Lake. This study, to investigate the characteristics of springs in the region, as well as investigate the condition of surface water and the effect of rock units on their quality, from the number of five samples of springs (including the springs of Sharif Abad village, Isti-So hot spring, Zindasht, Kani Sefid, Shourgol), one sample from a well (Bardian village well) and two samples from surface water located in springs drainage channels (including a complete breakdown sample from the west channel of Abgarm village and a sample from the channel north of Abgarm village only for boron element), sampling was done in August 2017. The EC, T, and pH parameters were measured by a WTW portable device in the field. For chemical analysis of samples and determination of anions and cations by titration methods (to determine Ca, HCO<sub>3</sub>, Cl), film photometer (for Na, K elements), spectrophotometry (for SO<sub>4</sub>) and also calculation based on Other ions (for Mg, TDS) were carried out in the laboratory of the Municipal Water and Wastewater Company of West Azerbaijan Province. Also, the ICP-MS method has been used to determine the concentration of other elements and heavy elements, and this analysis was done in the laboratory of Zarazma Company.

### Results and Discussion

The dominant source of water in samples Q1, Q3, Q4, Q5, Q6, and Q7 were influenced by carbonate rock units. Hydrochemical studies show that groundwater resources of the study area are mainly Ca-HCO<sub>3</sub> and Na-HCO<sub>3</sub> in type. The concentration of As and B in some samples reaches 6320  $\mu\text{g l}^{-1}$  and 644  $\text{mg l}^{-1}$ , respectively. The result of the study shows that metamorphic rocks of the region due to the release of boron element from their tourmaline and mica minerals have influenced the concentration of boron in the involved water resources. Moreover, in places such as the Istisu hot spring due to the presence of hot magmatic bodies in depths, there is high potential for some elements to enter the water resources. The high concentration of some indicator elements such as As, W, B, and Cl, which have led to extensive contamination in the hot springs and surface waters of the region, can be related to their separation from the magmatic and hydrothermal systems. The results of chemical analysis of collected water samples show that the concentrations and changes of As, Cs, K, Li, Na, Nb, Rb, S, Se, Si, Sr, Ta, Th, and W elements in the water composition of the cold water samples were not high and as a result, we can consider the

role and very little potential for the entry of these elements through the rock units of the region, which are mainly metamorphic.

### Conclusion

The results showed that the predominant type of underground water in the study area is calcium bicarbonate and in the spa spring, it is sodium bicarbonate, and the concentration of some elements such as As, and B is very high compared to normal water and more than the maximum. The recommended permissible amount is in the drinking water standard. Hydrogeochemical investigations show that high HCO<sub>3</sub> and Ca are due to the interaction between water-rock and ion exchange, and due to the release of boron from the structure of tourmaline and mica minerals in the composition of schist metamorphic rocks. Amphibolite and especially gneiss, its concentration has increased in the waters of the region. In the spa springs of the region with Na-HCO<sub>3</sub> type with high sodium concentration, due to the absence of evaporite rocks, the origin of Na ions cannot be caused only by the influence of the rock units of the region. The high values of elements As, B, Cs, K, Li, Na, Nb, Rb, S, Se, Si, Sr, Ta, Th, and W and the results of investigating the correlation between these elements in the underground water resources of the region and also the concentrations Above mentioned elements in Isti-So hot spring shows that the rock units of the region alone do not have enough potential and ability to create anomalies in the amounts of these elements in underground water sources.

**Keywords:** Groundwater resources, Hydrothermal fluids, Lithological units, Salmas, Spring

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgment

This research was supported by the Water and Sewerage Company of West Azerbaijan Province, based on which, appreciation and thanks are given to the respected officials of this company, especially for the efforts of Mrs. Dr. Hajilari, the respected director of the Water and Sewerage Quality and Sanitation Control Office.

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data availability statement

We have no permission to release data and codes.

### Authors' contribution

**Nosrat Aghazadeh:** Writing-original draft preparation, manuscript editing; **Tohid Pashaei Gharagoz:** Resources, Software, Formal analysis and investigation; **Morteza Derakhshi:** Visualization, Supervision, Conceptualization, methodology.

\*Corresponding Author, E-mail: nosrataghazadeh@yahoo.com

**Citation:** Aghazadeh, N., Pashaei Gharagoz, T., & Derakhshi, M. (2024). The effect of lithological units and the role of hydrothermal fluids on the concentration of elements in groundwater resources of the southeast region of Salmas. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(4), 239-254.

DOI: 10.22098/mmws.2024.13944.1374

Received: 01 November 2023, Received in revised form: 09 December 2023, Accepted: 03 January 2024., Published online: 03 January 2024

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2024, Vol. 4, No.4, pp. 239-254

Publisher: University of Mohaghegh Ardabil

© Author(s)





## تأثیر واحدهای سنگی و نقش سیالات گرمابی بر غلظت عناصر در منابع آب زیرزمینی منطقه جنوب‌شرق سلماس

نصرت آقازاده<sup>۱\*</sup>، توحید پاشایی قراگوز<sup>۲</sup>، مرتضی درخشی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران  
<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

### چکیده

ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی اطلاعات زیادی در خصوص منشأ آب، تأثیر سنگ‌های دربرگیرنده، فرآیندهای هیدروشمیایی غالب و غیره ارائه می‌دهد. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر واحدهای سنگی مختلف و نقش سیالات گرمابی بر افزایش غلظت عناصر در منابع آب زیرزمینی منطقه جنوب‌شرق سلماس است. به این منظور از منابع آب زیرزمینی انتخابی نمونه‌برداری انجام شد و بر اساس نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌ها به بررسی تأثیر واحدهای سنگی و سیالات گرمابی پرداخته شد. مطالعات هیدروشمی نشان داد که منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه عمدتاً دارای تیپ  $\text{Ca-HCO}_3$  و  $\text{Na-HCO}_3$  بوده و غلظت برخی از عناصر در ترکیب شیمیایی آن‌ها نسبت به آب‌های معمولی بسیار بالاتر است، به طوری که غلظت آرسنیک و بور در برخی از نمونه‌ها به ترتیب به  $6330$  میکروگرم بر لیتر و  $644$  میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سنگ‌های دگرگونی رخنمون یافته در منطقه (شامل شیسست، آمفیبولیت و به خصوص گنایس‌های تورمالین دار) به دلیل رهاسازی عنصر بور (B) از کانی‌های تورمالین و میکا بر افزایش غلظت این عنصر در منابع آب درگیر تأثیرگذار بوده‌اند. علاوه بر این، در محل‌هایی نظیر چشمه آبگرم ایستی‌سو به دلیل حضور توده‌های گرم ماگمایی در اعماق، پتانسیل بسیار بالایی برای ورود برخی عناصر به منابع آبی دیده می‌شود. به طوری که بالا بودن غلظت برخی از عناصر شاخص از قبیل  $\text{Cl}$ ،  $\text{B}$ ،  $\text{W}$ ،  $\text{As}$  و  $\text{I}$  می‌تواند به جدایش آن‌ها از سامانه ماگمایی و گرمابی مرتبط باشد که این امر منجر به ایجاد آلودگی گسترده در آب‌های گرم و سطحی منطقه شده است.

واژه‌های کلیدی: چشمه، سلماس، واحدهای سنگی، سیالات گرمابی، منابع آب زیرزمینی

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nosrataghazadeh@yahoo.com

استناد: آقازاده، نصرت، پاشایی قراگوز، توحید، و درخشی، مرتضی (۱۴۰۳). تأثیر واحدهای سنگی و نقش سیالات گرمابی بر غلظت عناصر در منابع آب زیرزمینی منطقه جنوب‌شرق سلماس. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۴)، ۲۳۹-۲۵۴.

DOI: 10.22098/mmws.2024.13944.1374

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۲۳۹ تا ۲۵۴

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

در مناطق مرتبط با منابع زمین گرمایی، تداخلات شیمیایی بین آب های گرم (سیالات گرمایی) و سنگ‌های دربرگیرنده باعث تغییر ترکیب آب‌ها و غنی‌شدگی عناصری از قبیل V، Co، Ni، Cu، Zn، As، Se، Al، Ag، Cd، Sb، Cs، Ba، W، Au، Tl و Pb در ترکیب آن‌ها شده است (German and Von Damm, 2003). در خصوص هیدرو شیمی چشمه‌ها و به‌خصوص چشمه‌های آبگرم مطالعات مختلفی صورت گرفته است که در این مطالعات عمدتاً به تعیین مکانیسم حاکم بر شیمی آب‌ها، شناسایی فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی غالب، بررسی اثرات متقابل آب و سنگ و نیز به تأثیر ترکیبات یونی محلول‌هایی که در سامانه‌های زمین گرمایی یافت می‌شود پرداخته شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات (Tonani, Mahon (1970)، (Ellis and Fournier et al. (1973)، (White (1970)، (Giggenbach et al., Fournier (1979)، (Mahon (1977)، (Modabberi and Jahromi Yekta (2013)، (1983)، (Alacali, Assadpour et al. (2017)، (Yazdi et al. (2015)، (2018)، (2018)، (Rezaei et al. (2019)، (Rezaei et al. (2019)، (Wang et., Furkan Sener (2019)، (Ebrahimi et al. (2019)، (Utagi and Durrast and Ngansom (2022)، (al. (2021)، (Purandara اشاره کرد.

برهم‌کنش بین آب و سنگ<sup>۱</sup> و نیز اختلاط آب‌های زیرزمینی با محلول‌های گرمایی از عوامل مهم تأثیرگذار بر خصوصیات هیدروشیمیایی چشمه‌ها و به‌خصوص چشمه‌های آبگرم به‌شمار می‌آیند که در برخی از موارد این تأثیر باعث آلودگی و غیرقابل استفاده شدن این آب‌ها می‌شود (Pashai Karagoz et al., 2017; Hailu and Haftu, 2023). در چشمه‌های آبگرم انحلال سنگ‌های دربرگیرنده و دمای آب نقش مهمی در اشباع آب چشمه نسبت به کانی‌های مختلف دارد (Dutta and Gupta, 2022; Tang et al., 2023). وجود منابع گرمایی و نیز واحدهای سنگی مختلف (به‌خصوص دگرگونی) در منطقه جنوب‌شرق سلماس باعث شده که منابع آب و به‌خصوص آب چشمه‌ها از ترکیب شیمیایی مختلفی برخوردار شوند. نظر به این‌که در منطقه مورد مطالعه، بخش عمده‌ای از مصارف آب برای کشاورزی و گاهی شرب از طریق منابع آب زیرزمینی و به‌خصوص از آب چشمه‌های منطقه تأمین می‌شود، و از طرفی بررسی‌های صحرائی و نیز مطالعات قبلی (Assadpour et al., 2017; Yazdi et al., 2018) در منطقه حاکی از آلودگی منابع آب و خاک منطقه و پیامدهایی منفی و خطرناک بر بوم‌شناسی آبزیان، کیفیت محصولات کشاورزی و نیز سلامت ساکنان منطقه دارد؛ لذا مطالعه کیفیت

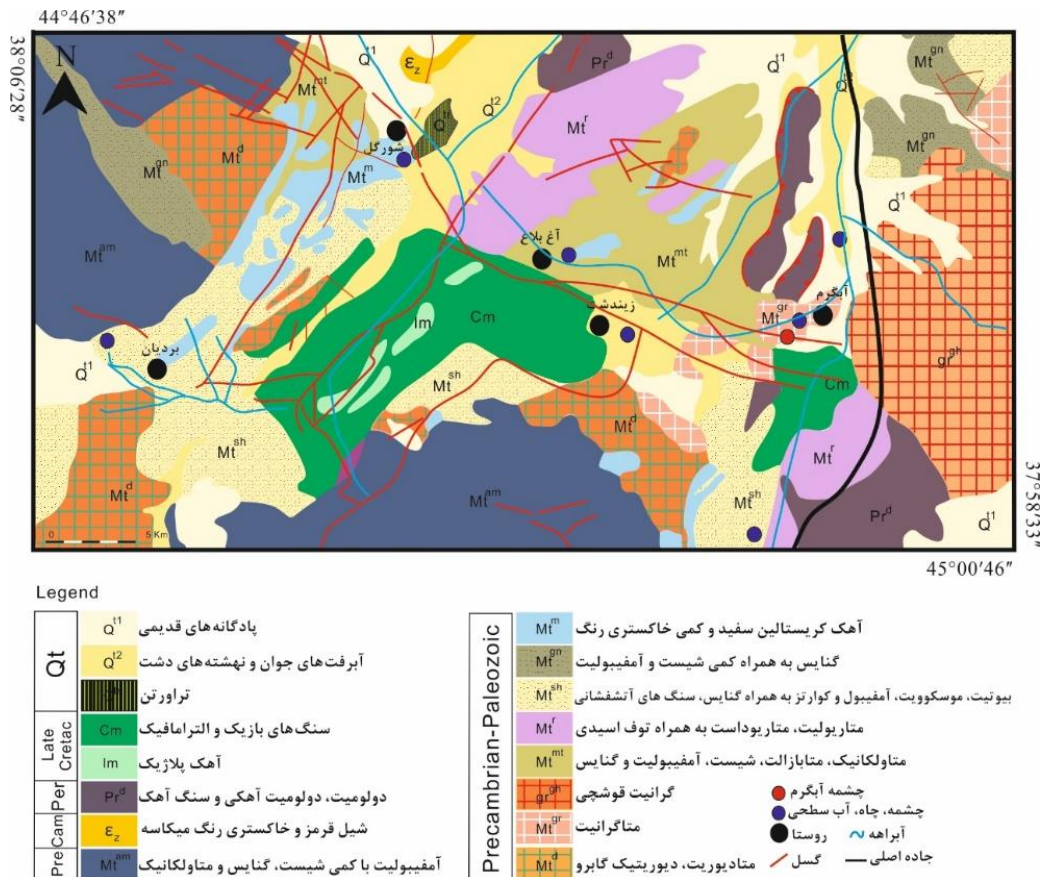
منابع آب زیرزمینی و بررسی برهم‌کنش آب و سنگ در افزایش غلظت برخی عناصر در ترکیب منابع آب زیرزمینی منطقه (به‌خصوص مقادیر بسیار بالای عناصری سمی نظیر آرسنیک و بور در محل چشمه آبگرم ایستی‌سو) و نیز بررسی نقش محلول‌های گرمایی وابسته به توده‌های نفوذی جوان آذرین امری ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش بررسی هیدروشیمی، و تأثیر برهم‌کنش آب-سنگ و سیالات گرمایی بر غلظت برخی عناصر مهم سنگین و کمیاب در ترکیب منابع آب زیرزمینی منطقه جنوب‌شرق سلماس و به‌ویژه چشمه آبگرم ایستی‌سو است که برای این منظور به بررسی غلظت آمون و کاتیون‌های اصلی و عناصری از قبیل As، B، Cs، K، Li، Na، Nb، Rb، S، Se، Si، Sr، Ta، Th و W در ترکیب این آب‌ها پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

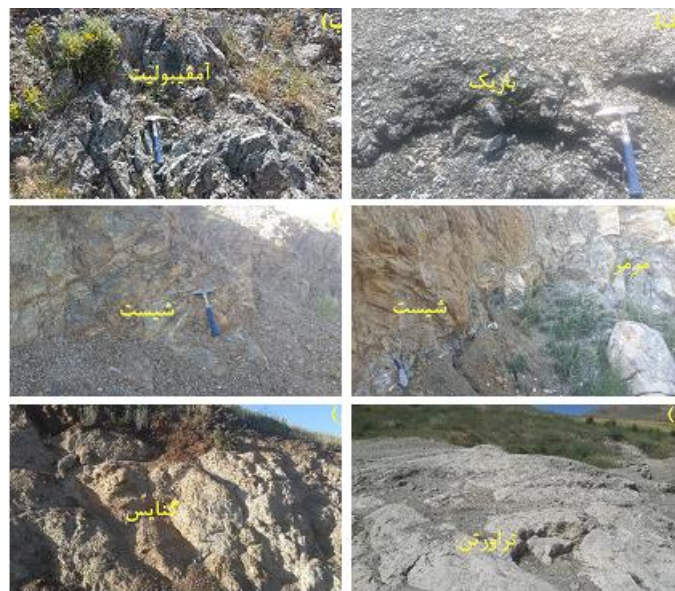
منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی در ۲۰ کیلومتری جنوب شرق شهر سلماس و در فاصله ۵۵ کیلومتری شمال شهر ارومیه و بین طول‌های جغرافیایی ۳۸°، ۴۶° تا ۴۴°، ۴۶°، ۰۰°، ۴۵° شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳°، ۵۸° تا ۳۷°، ۲۸°، ۰۶°، ۳۸° شمالی واقع شده و بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه محسوب می‌شود. از دیدگاه زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه با توجه به تقسیمات واحدهای ساختمانی-رسوبی ایران به‌عنوان بخشی از کمربند دگرگونی و افیولیتی زون سندج-سیرجان شناخته شده است. در پژوهش این منطقه از زیر عنوان زون خوی-مهاباد و زون البرز-آذربایجان تفکیک شده است (Nabavi, 1978). کهن‌ترین سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونه است که درجه دگرگونی آن‌ها در حد رخساره شیبست سبز تا آمفیبولیت و گنایس متغیر است. نهشته‌های متعلق به کامبرین در برگیرنده سازند زاگون است که در بخش شمالی منطقه از گسترش کمی برخوردار است. سنگ‌های کربناته به سن پرمین نیز با ضخامت قابل‌توجهی به‌طور دگر شیب روی واحدهای سنگی قدیمی تر جای گرفته‌اند (شکل ۱). واحدهای افیولیتی موجود در منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین، رسوبی، و دگرگونی است که زمان درهم‌آمیختگی آن‌ها را باید به کراتاسه پسین تا پالئوسن نسبت داد. سنگ‌های آذرین منطقه شامل مجموعه‌ای از انواع سنگ‌های مافیک تا اسیدی هستند که به شکل نسبتاً وسیعی در منطقه دیده می‌شوند (شکل ۱). در محل ظهور چشمه‌ها، واحدهای سنگی غالب از نوع دگرگونی و عمدتاً شامل شیبست، آمفیبولیت و گنایس با سن پرکامبرین هستند که مهم‌ترین و بیش‌ترین حجم واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه را نیز تشکیل می‌دهند (شکل ۲).

<sup>1</sup> Water-rock interaction



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و نیز موقعیت نمونه‌ها روی آن (Khodabandeh, 2003)

Figure 1- The geological map of the studied area and the location of the samples on it (Khodabandeh, 2003)



شکل ۲- واحدهای سنگی در محل ظهور چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Rock units in the springs of the study area

## ۲-۲- روش مطالعه

آباد، آبگرم ایستی سو، زیندشت، کانی سفید، شورگل)، یک نمونه از چاه (چاه روستای بردیان) و دو نمونه از آب‌های سطحی واقع در آبراهه‌های زهکشی چشمه‌ها (شامل یک نمونه تجزیه کامل از آبراهه غرب روستای آبگرم و یک نمونه از آبراهه شمال روستای

در این مطالعه به منظور بررسی خصوصیات چشمه‌های منطقه و نیز بررسی وضعیت آب‌های سطحی و تأثیر واحد سنگی بر کیفیت آن‌ها از تعداد پنج نمونه از چشمه‌ها (شامل چشمه‌های روستای شریف

ها نشان می‌دهد که در چشمه آبگرم ایستی‌سو غلظت متغیرهای EC، TDS، Na، K، Cl و  $\text{HCO}_3$  نسبت به استاندارد آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) بالا بوده و حتی گاهی میزان این متغیرها در ترکیب آب این چشمه از مقادیر بسیار قابل توجهی برخوردار است (جدول ۱). بررسی غلظت آنیون و کاتیون‌های موجود در ترکیب آب چشمه‌ها و آب چاه منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقدار  $\text{HCO}_3$  بین ۲۱۰ تا ۶۷۱۲ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌نماید (جدول ۱). به‌طور کلی بیش‌ترین مقادیر  $\text{HCO}_3$  در چشمه ایستی‌سو و کم‌ترین آن در چشمه روستای آغبلاغ دیده می‌شود. بی‌کربنات اصلی‌ترین آنیون در ترکیب چشمه‌های منطقه است. غلظت Cl در اکثر چشمه‌ها کم‌تر از ۹۵ میلی‌گرم بر لیتر بوده و بیش‌ترین آن در چشمه ایستی‌سو با مقدار ۹۶۰ میلی‌گرم بر لیتر وجود دارد. بررسی مقادیر  $\text{SO}_4$  در ترکیب آب چشمه‌ها نشان می‌دهد که متوسط مقادیر آن ۲۳ میلی‌گرم بر لیتر بوده و در آبگرم ایستی‌سو مقدار آن بسیار بیش‌تر از آب‌های سرد (چشمه شریف‌آباد، زیندشت، آغبلاغ، شورگل و چاه روستای بردیان) است (جدول ۱). نتایج نشان می‌دهد که در آب‌های سرد منطقه مورد مطالعه مقادیر Mg بین ۱۳/۶ تا ۴۴/۹ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. بیش‌ترین مقدار Mg مربوط به چشمه روستای شورگل و کم‌ترین آن نیز مربوط به آبراهه غرب روستای آبگرم است. با این حال، محتوای Mg در چشمه آبگرم ایستی‌سو پایین‌تر از آب‌های سرد منطقه است (جدول ۱). همچنین، در این مطالعه چشمه آبگرم ایستی‌سو حاوی غلظت‌های بالایی از کاتیون‌های Na و K (به ترتیب با مقادیر ۱۸۷/۷ و ۴۳۶۸ میلی‌گرم بر لیتر) است. در حالی که، آب‌های سرد منطقه دارای مقادیر پایین‌تری (کم‌تر از ۳۴/۱ میلی‌گرم بر لیتر) از این کاتیون‌ها هستند (جدول ۱). بررسی غلظت Ca در ترکیب منابع آب مورد مطالعه نیز نشان می‌دهد که مقدار آن در محدوده ۴۴/۹ (چشمه روستای شریف‌آباد) تا ۱۰۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر (چشمه روستای آغبلاغ) تغییر می‌نماید (جدول ۱).

آبگرم فقط برای عنصر بور)، در مرداد ماه ۱۳۹۷ نمونه‌برداری صورت گرفت. متغیرهای EC، T، pH و EC توسط دستگاه پرتابل WTW در صحرا اندازه‌گیری شد. به‌منظور نمونه‌برداری از منابع آب انتخابی ابتدا ظروف نمونه‌برداری توسط آب منبع سه بار شست و شو داده شده و سپس نمونه‌ها در ظرف پلی اتیلن ۲۵۰ میلی‌لیتری جمع آوری شد. به‌منظور تجزیه عناصر سنگین در ترکیب آب‌های منطقه، نمونه‌های مجزا تهیه شده و جهت کاهش pH آب به کم‌تر از ۲، مقدار ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ( $\text{HNO}_3$ ) به آن‌ها اضافه شد. برای تجزیه شیمیایی نمونه‌ها و تعیین آنیون و کاتیون‌ها از روش‌های تیتراسیون (برای تعیین Ca،  $\text{HCO}_3$ ، Cl)، فلیم فتومتر (برای عناصر Na، K)، اسپکتروفوتومتری (برای  $\text{SO}_4$ ) و نیز محاسبه بر اساس سایر یون‌ها (Mg، TDS) در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب شهری استان آذربایجان غربی به انجام رسید. همچنین، جهت تعیین غلظت سایر عناصر و نیز عناصر سنگین از روش ICP-MS استفاده شده است که این تجزیه در آزمایشگاه شرکت مطالعاتی و مواد معدنی زرآرما انجام شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- شیمی آب‌ها

##### ۳-۱-۱- آنیون و کاتیون‌های اصلی آب

نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی آنیون و کاتیون‌های اصلی آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. منشاء یون‌های اصلی موجود در ترکیب آب زیرزمینی می‌تواند ناشی از تاثیر انحلال واحدهای سنگی دربرگیرنده باشد (Dehrami and Amiri 2023). نتایج نشان می‌دهد که میزان هدایت الکتریکی آب در چشمه آبگرم ایستی‌سو ۱۷۰۷۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و در آب‌های سرد منطقه ۴۳۶ تا ۹۱۳ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. همچنین، مقادیر pH آب در چشمه آبگرم ایستی‌سو ۷/۶۷ و در آب‌های سرد منطقه در محدوده ۶/۶۸ تا ۸/۱۷ متغیر است. بررسی

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در منابع آب سطحی و زیرزمینی محدوده مورد مطالعه و نیز حداکثر غلظت مجاز آب شرب (WHO, 2011)

Table 1- The results of the chemical analysis of anions and cations in the surface and groundwater sources of the studied area, as well as the maximum permissible errors of drinking water (WHO, 2011)

Cl	SO4	HCO3	K	Na	Mg	Ca	pH	TDS	EC	T (°C)	محل نمونه‌برداری	شماره نمونه
95	36.56	284.5	1.2	34.1	26	100.3	7.47	584	913	12.5	چشمه شریف‌آباد	Q1
960.8	120.1	6712	187.7	4368	12.15	80.16	7.67	10924	17070	38.3	آبگرم ایستی‌سو	Q2
9.5	18.46	204	1	14.3	13.6	49.3	8.17	279	436	24.3	آبراهه غرب آبگرم	Q3
3.9	18	258.2	0.8	9	18	62	7.63	289	452	14.4	چشمه زیندشت	Q4
8.6	21.63	210.9	0.8	24.6	16	44.9	7.78	279	437	12.2	چشمه آغبلاغ	Q5
13.2	24.86	445.3	0.8	11.2	44.9	95.2	6.68	520	814	15.5	چشمه شورگل	Q6
8.5	13.06	221.5	0.9	34.1	15.5	48	7.16	275	430	12.3	چاه بردیان	Q7
200	500	250	-	200	50	250	6.5-7.5	1000	2000	-	-	WHO

غلظت یون‌ها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، EC بر حسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر، T دما بر حسب سانتی‌گراد

## ۳-۱-۲- عناصر کمیاب

نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب در نمونه‌های آب منطقه جنوب شرق سلماس در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این جدول، غلظت‌ها و تغییرات عناصر Na, Li, K, Cs, B, As, Nb, Rb, S, Se, Si, Sr, Ta, Th و W در چشمه آبگرم ایستی سو نسبت به آب‌های سرد بالا بوده و حتی عموماً غلظت‌های این عناصر در سطحی بالاتر از WHO (2011) است. به عنوان مثال، بیشترین غلظت B در منطقه مربوط به نمونه Q2 (چشمه آبگرم ایستی سو) با مقدار ۶۴۴ میلی‌گرم بر لیتر است. از سوی دیگر، کمترین میزان بور را آب‌های سرد با مقادیر کمتر از ۲/۶۴ میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهند. همچنین، در این مطالعه چشمه آب گرم ایستی سو دارای محتوای بالایی از As و به مقدار ۶۳۲۰ میکروگرم بر لیتر است، در حالی که سایر منابع آبی آرسنیک کمتری (کمتر از ۱۱/۲۷ میکروگرم بر لیتر) را نشان می‌دهند (جدول ۲). قابل ذکر است که، مقادیر ذکر شده از عناصر بور و آرسنیک در ترکیب آب چشمه آبگرم ایستی سو، غلظت‌های بسیار بالاتری را از حداکثر مقدار مجاز آب شرب WHO (2011) که به ترتیب برابر با ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر برای عنصر بور و ۱۰ میکروگرم بر لیتر برای آرسنیک است را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که آب‌های سرد منطقه حاوی مقادیر کمتری از Li و S است، ولی چشمه آبگرم ایستی سو دارای غلظت‌های بالاتری از این عناصر (به ترتیب

۲۶/۲۵ و ۵۶/۹ میلی‌گرم بر لیتر) هستند. همچنین، در این مطالعه آبگرم ایستی سو محتوای بالایی از W را تا محدوده ۵۶۰۰ میکروگرم بر لیتر نشان می‌دهد. در حالی که، آب‌های سرد منطقه دارای مقادیر پایین‌تری از W هستند (جدول ۲). بررسی‌ها نشان می‌دهند که غلظت Rb بین ۱/۱ تا ۵۱/۳۵ میکروگرم بر لیتر تغییر می‌کند. به طور کلی بیشترین مقادیر Rb در چشمه آبگرم ایستی سو و کمترین آن در چاه روستای بردیان مشاهده می‌شود. غلظت Si در اکثر چشمه‌ها کمتر از ۱۴/۷ میلی‌گرم بر لیتر بوده و بیشترین آن در چشمه ایستی سو با مقدار ۳۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر وجود دارد. همچنین، در این مطالعه بیشترین غلظت عناصر Ta, Nb و Th مربوط به چشمه آبگرم ایستی سو (به ترتیب با مقادیر ۱۰/۱۱، ۰/۶۷ و ۵/۳۸ میکروگرم بر لیتر) است. در حالی که، آب‌های سرد از غلظت‌های پایین‌تری (کمتر از ۰/۱۲ میکروگرم بر لیتر) برخوردار هستند. با این حال، آب‌های سرد منطقه مقادیر کمتری از Sr را نشان می‌دهند. در عوض، چشمه‌های آبگرم (مخصوصاً چشمه آبگرم ایستی سو)، دارای غلظت بالایی از Sr (۳/۳۴ میلی‌گرم بر لیتر) است. بررسی مقادیر Se و Cs نیز در ترکیب آب‌های منطقه نشان می‌دهد که مقادیر آن‌ها در آبگرم ایستی سو (به ترتیب با ۳/۳۵ و ۸۹/۵ میکروگرم بر لیتر) بیش‌تر از آب‌های سرد (۲/۹۲ < میلی‌گرم بر لیتر) است (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در منابع آب سطحی و زیرزمینی محدوده مورد مطالعه (بر حسب میلی‌گرم و میکروگرم بر لیتر) و نیز غلظت‌های مجاز آب شرب (WHO, 2011)

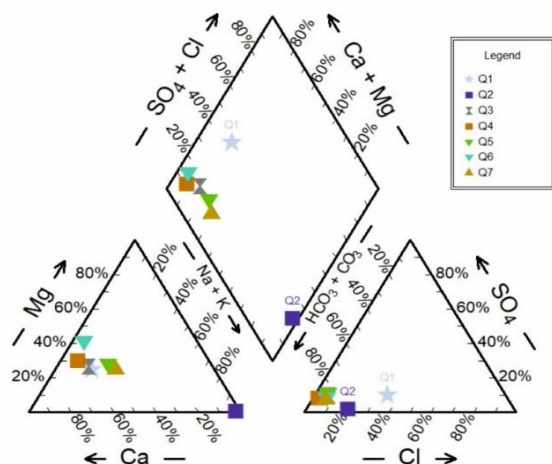
Table 2- The results of the concentration of elements measured in the surface and underground water sources of the study area (in terms of mg l<sup>-1</sup> and µg l<sup>-1</sup>) as well as the permissible errors of drinking water (WHO, 2011)

W	Th	Ta	Sr	Si	Se	S	Rb	Nb	Li	Cs	B	As	شماره نمونه
<1	<0.1	<0.1	0.78	9.2	0.95	<b>14.6</b>	1.2	<0.1	0.02	<0.1	0.62	1.55	Q1
<b>5600</b>	<b>5.38</b>	<b>0.67</b>	<b>3.34</b>	<b>31.5</b>	<b>3.35</b>	<b>56.9</b>	<b>51.35</b>	<b>10.11</b>	<b>26.25</b>	<b>89.5</b>	<b>644</b>	<b>6320</b>	Q2
<1	<0.1	<0.1	0.32	9.2	0.51	9.3	1.58	<0.1	0.02	<0.1	<b>2.46</b>	1.35	Q3
<b>16.48</b>	<0.1	<b>0.12</b>	0.35	11.2	2.79	8.4	2.24	<b>0.9</b>	0.05	<b>1.38</b>	0.55	<b>11.27</b>	Q4
3.79	<0.1	<0.1	0.32	12	<b>2.92</b>	9.9	1.5	<0.1	0.02	0.32	1.84	2.86	Q5
<1	<0.1	<0.1	<b>0.48</b>	<b>14.7</b>	2.19	11.8	<b>6.07</b>	<0.1	<b>0.06</b>	0.12	<0.05	4.59	Q6
<1	<0.1	<0.1	0.21	12.1	1.02	7.2	1.1	<0.1	0.02	<0.1	0.27	3.41	Q7
-	-	-	7	-	10	-	-	-	-	-	0.5	10	WHO

غلظت عناصر B, Li, S, Si, Sr بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و بقیه عناصر بر حسب میکروگرم بر لیتر

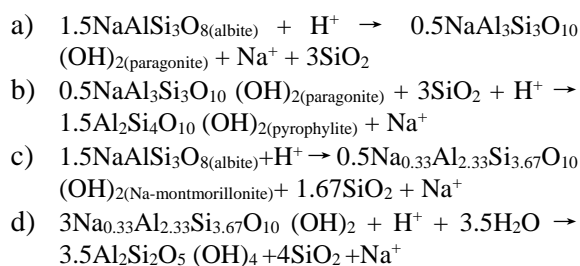
ابزاری در جهت ردیابی ارتباط بین آب چشمه آبگرم ایستی سو (حاوی مقادیر بالایی از عناصر مذکور است) با سامانه‌های ماگمایی-گرمابی جوان موجود در منطقه باشد.

نتایج مقایسه مقادیر آنیون‌ها و کاتیون‌ها و عناصر کمیاب و سنگین شکل ۳ نشان داده شده است. نمودار ارتباطی منطقی بین تغییر غلظت در دو گروه (شامل چشمه آبگرم ایستی سو و سایر نمونه‌های آبی) را نشان می‌دهد. همچنین، بالا بودن مقادیر عناصری که در سامانه‌های ماگمایی به عنوان عناصر ناسازگار (عناصری که در هنگام تبلور ماگما معمولاً در مذاب باقی می‌ماند و وارد بلورهای تازه تشکیل شده نمی‌شود) شاخص شناخته می‌شوند (نظیر B, Li, W, Rb, Cs, Nb, Ta و Th) و تمایل این عناصر به غنی‌شدگی در آب‌های گرمابی می‌تواند به عنوان

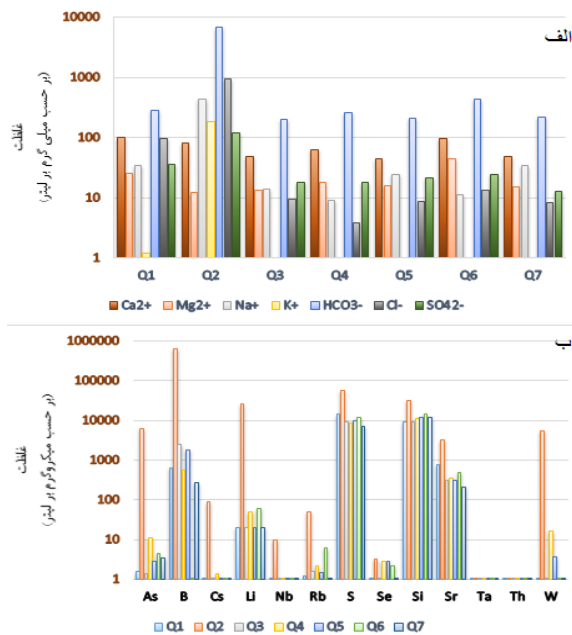


شکل ۴- موقعیت نمونه‌های منطقه مورد مطالعه  
Figure 4- The location of the samples of the study area on the Piper diagram

به‌منظور تعیین منشأ آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه از نمودار استیف استفاده شده است (شکل ۵). باتوجه به این نمودار منشأ غالب آب در نمونه‌های Q1 (چشمه روستای شریف‌آباد)، Q3 (آبراهه غرب روستای آبگرم)، Q4 (چشمه روستای زیندشت)، Q5 (چشمه روستای آغبلاغ)، Q6 (چشمه روستای شورگل)، و Q7 (چاه روستای بردیان) متأثر از واحدهای سنگی کربناته بوده‌اند. انحلال سنگ‌های کربناته و به‌خصوص آهکی می‌تواند باعث افزایش غلظت Ca و HCO<sub>3</sub> در آب‌ها و در تماس با این سنگ‌ها شود. هم‌چنین، در نمونه Q2 (چشمه آبگرم ایستی‌سو) منشأ آب علاوه‌بر واحدهای سنگی در برگیرنده، احتمالاً ناشی از سیالات گرمابی نیز است. بخش عمده بی‌کربنات موجود در ترکیب آب چشمه آبگرم ایستی‌سو می‌تواند مربوط به CO<sub>2</sub> آزاد شده از فرآیندهای ماگمایی باشد. به‌طوری‌که برخی از مطالعات صورت گرفته در سایر مناطق نظیر (Modabberi and Jahromi, 2013) نیز این امر را تأیید می‌نماید. سدیم نیز از غلظت بسیار بالایی (۴۳۶۸ میلی‌گرم بر لیتر) در چشمه آبگرم ایستی‌سو برخوردار است. سدیم یک سازنده اصلی در بیش‌تر سیالات گرمابی بوده و نیز از تجزیه پلاژیوکلاز سدیک در سنگ‌های آذرین و بر اساس واکنش زیر حاصل می‌شود (Pirajno, 2009):



مطالب و واکنش‌های مذکور نشان می‌دهند که ناسازگاری عنصر سدیم در سامانه‌های ماگمایی و تمایل این عنصر برای



شکل ۳- نمودار مقایسه تغییرات غلظت (لگاریتمی) آنیون‌ها، کاتیون‌ها و عناصر سنگین در منابع آب منطقه مورد مطالعه  
Figure 3- Comparison chart of changes in concentration (logarithmic) of anions, cations, and heavy elements in water resources of the studied area

### ۳-۲- بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی

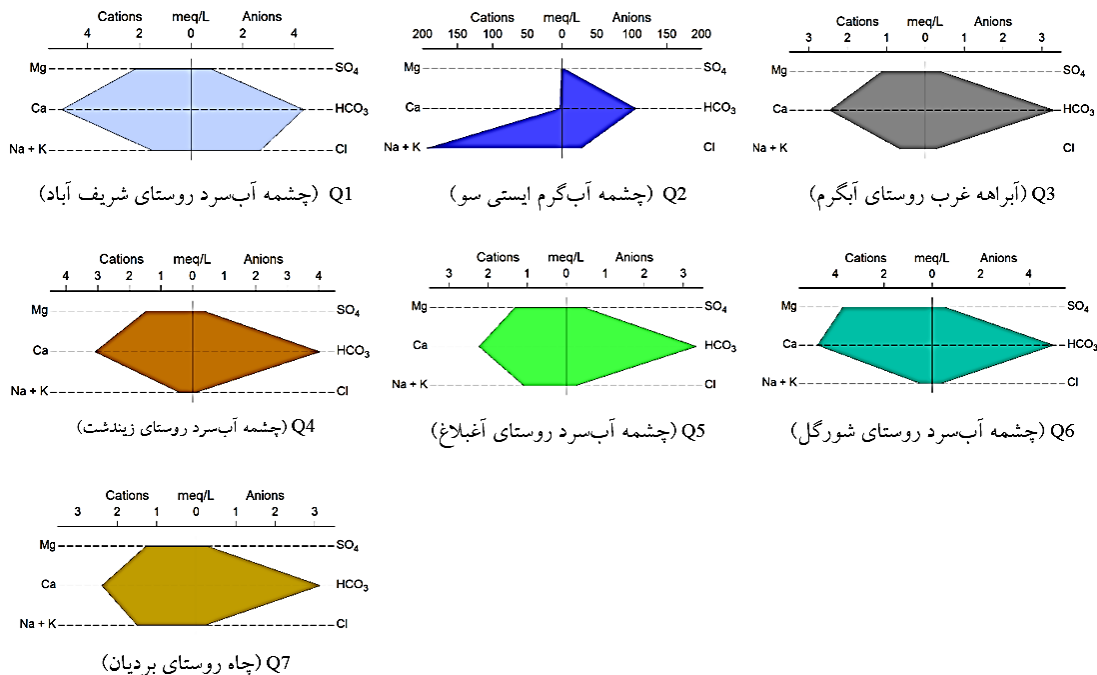
#### ۳-۲-۱- تیپ و منشأ آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

به‌منظور تعیین تیپ و وضعیت شیمیایی نمونه آب‌های منطقه مورد مطالعه از نمودار پایپر استفاده شد. نتایج نشان داد که در تمامی نمونه‌های آب سرد منطقه (شریف‌آباد، زیندشت، آغبلاغ، شورگل و بردیان) عناصر قلیایی خاکی (Ca, Mg) بیش از قلیایی (Na, k) و اسیدهای ضعیف (HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>) بیش از اسیدهای قوی (Cl, SO<sub>4</sub>) بوده و سختی کربناته بیش از ۵۰ درصد است. در این آب‌ها آنیون غالب HCO<sub>3</sub> و کاتیون غالب Ca است، درحالی‌که در چشمه آبگرم ایستی‌سو عناصر قلیایی (Na, k) بیش از قلیایی خاکی (Ca, Mg) و اسیدهای قوی (Cl, SO<sub>4</sub>) بیش از اسیدهای ضعیف (HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>) بوده و قلیایی کربناتی بیش از ۵۰ درصد است. این آب دارای سختی خیلی کمی بوده و آنیون غالب HCO<sub>3</sub> و کاتیون غالب Na است. بر این اساس و با توجه به نمودار شکل ۴ تیپ غالب آب‌های سرد بی‌کربناته کلسیک و آبگرم ایستی‌سو بی‌کربناته سدیک است.



ترکیب آب چشمه آبگرم ایستی سو است. منشأ کلر می‌تواند مربوط به انحلال سنگ‌های تبخیری نظیر گچ و نمک باشد. همچنین، در مناطق ژئوترمال به عقیده Pirajno (2009) مقادیر بالای کلر می‌تواند به جدایش آن از سامانه ماگمایی-گرمابی مرتبط باشد.

افزوده شدن به بخش گرمابی و البته تشدید امکان رهاسازی آن از پلاژیوکلاز سدیک در طی دگرسانی گرمابی را می‌توان از جمله دلایل اصلی غلظت بسیار بالای عنصر سدیم در چشمه آبگرم ایستی سو دانست. کلر (Cl) نیز یکی از آنیون‌های فراوان در



شکل ۵- نمودار استیف مربوط به نمونه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه  
Figure 5- Stiff diagram related to different samples of the studied area

خارج از محدوده نمودار قرار گرفته است. دلیل بالا بودن میزان سدیم و کل مواد جامد محلول در ترکیب آب این چشمه، علاوه بر تأثیر سنگ‌های دربرگیرنده، نشان‌دهنده نقش سیالات گرمابی ناشی از فعالیت‌های هیدروترمال در منطقه است. واکنش بین آب و سنگ و تأثیر لیتولوژی بر هیدروشیمی آب چشمه‌ها می‌تواند از طریق محاسبه شاخص اشباعیت نسبت به کانی‌های مختلف انجام شود. شاخص اشباع (SI) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در رابطه زیر IAP محصول فعالیت یونی و  $K_T$  ثابت تعادل ترمودینامیکی کانی در دمای آب را نشان می‌دهد.

$$SI = \left( \log \frac{IAP}{K_T} \right) \quad (1)$$

در این مطالعه به منظور بررسی انحلال کانی‌های آراگونیت، کلسیت، دولومیت، ژپس، انیدریت و هالیت شاخص‌های اشباع‌شدگی (SI) این کانی‌ها محاسبه شد. در صورتی که اندیس اشباع (SI) کمتر از صفر باشد آب تحت اشباع، و در صورتی که SI برابر صفر باشد ماده و آب در تعادل با یکدیگرند. همچنین، اگر SI بیش از صفر و کمتر از یک باشد آب اشباع بوده و در صورت بالا بودن SI بیش از یک آب فوق اشباع است (Deutsch

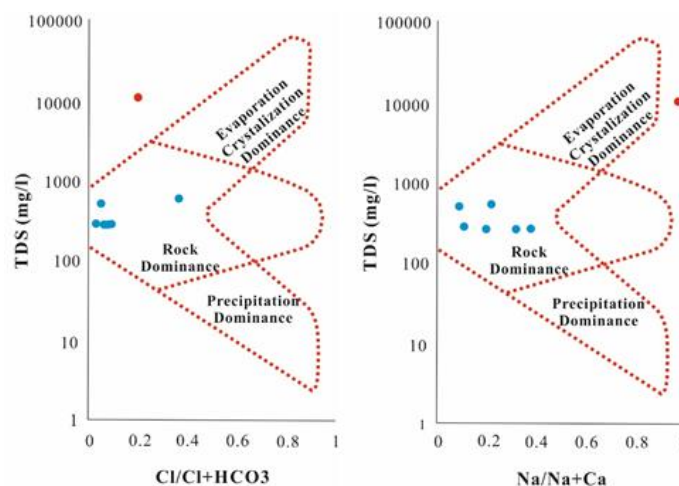
### ۳-۳- ارتباط متقابل بین آب‌های زیرزمینی و سنگ‌های دربرگیرنده

انحلال، و هوازدگی سنگ‌ها و کانی‌ها از عوامل مهم تأثیرگذار در میزان غلظت عناصر در ترکیب آب‌های در تماس با واحدهای سنگی است (Faryabi 2023; Yousefi Mobarhan et al., 2024). در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر واحد سنگی بر غلظت عناصر در ترکیب آب چشمه‌ها و نیز جهت تعیین نقش سیالات گرمابی از نمودار گیبس، شاخص اشباعیت نسبت به کانی‌ها و نمودارهای ترکیبی و همبستگی عناصر و نیز برخی از عناصر به‌عنوان شاخص استفاده شد.

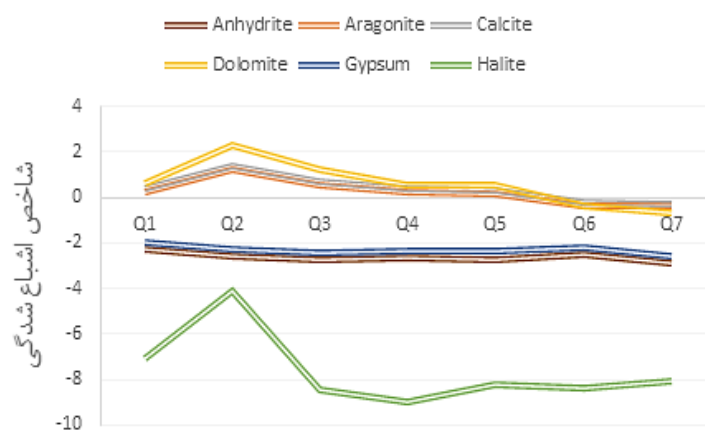
بررسی یون‌های اصلی موجود در ترکیب آب‌های زیرزمینی از طریق نمودار گیبس می‌تواند به تعیین مکانیسم حاکم بر جریان آب زیرزمینی و تأثیر واحدهای سنگی دربرگیرنده کمک نماید (Subbarao, 2011). با توجه به این نمودار، آب‌های سرد منطقه مورد مطالعه (به رنگ آبی) در زونی که پدیده سنگی غالب است، واقع شده‌اند (شکل ۶). این امر نشان‌دهنده اثر متقابل بین سنگ و آب‌های نفوذی حاصل از بارش است. همچنین، در این نمودار چشمه آبگرم ایستی سو به دلیل مقادیر بالای TDS و نیز سدیم

دولومیت و آراگونیت) اشباع تا فوق اشباع بوده و نسبت به کانی‌های سولفات (انیدریت، ژپس و هالیت) حالت تحت اشباعیت از خود نشان می‌دهند. همچنین، با توجه به این نمودار، شاخص اشباعیت در نمونه‌های Q6 (چشمه روستای شورگل) و Q7 (چاه روستای بردیان) نسبت به تمامی کانی‌های کربناته و سولفات منفی بوده و حالت تحت اشباع از خود نشان می‌دهند.

(and Siegel, 1997). نتایج حاصل از محاسبه شاخص اشباعیت نسبت به کانی‌ها نشان می‌دهد که شاخص اشباعیت نسبت به کلسیت بین -۰/۲۶ تا ۱/۳۶، آراگونیت -۰/۴ تا ۱/۲۱، دولومیت -۰/۶۶ تا ۲/۲۷، ژپس -۱/۹۵ تا ۲/۵۹، انیدریت -۲/۴۷ تا ۲/۸۹ و هالیت نیز بین -۴/۱۲ تا ۹/۰۱ تغییر می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۷ نمایش داده شده است، نمونه‌های Q1، Q2، Q3، Q4 و Q5 نسبت به کانی‌های کربناته (کلسیت،



شکل ۶- موقعیت نمونه آب‌های منطقه مورد مطالعه روی نمودار گیبس  
Figure 6- Location of water samples in the study area on the Gibbs diagram



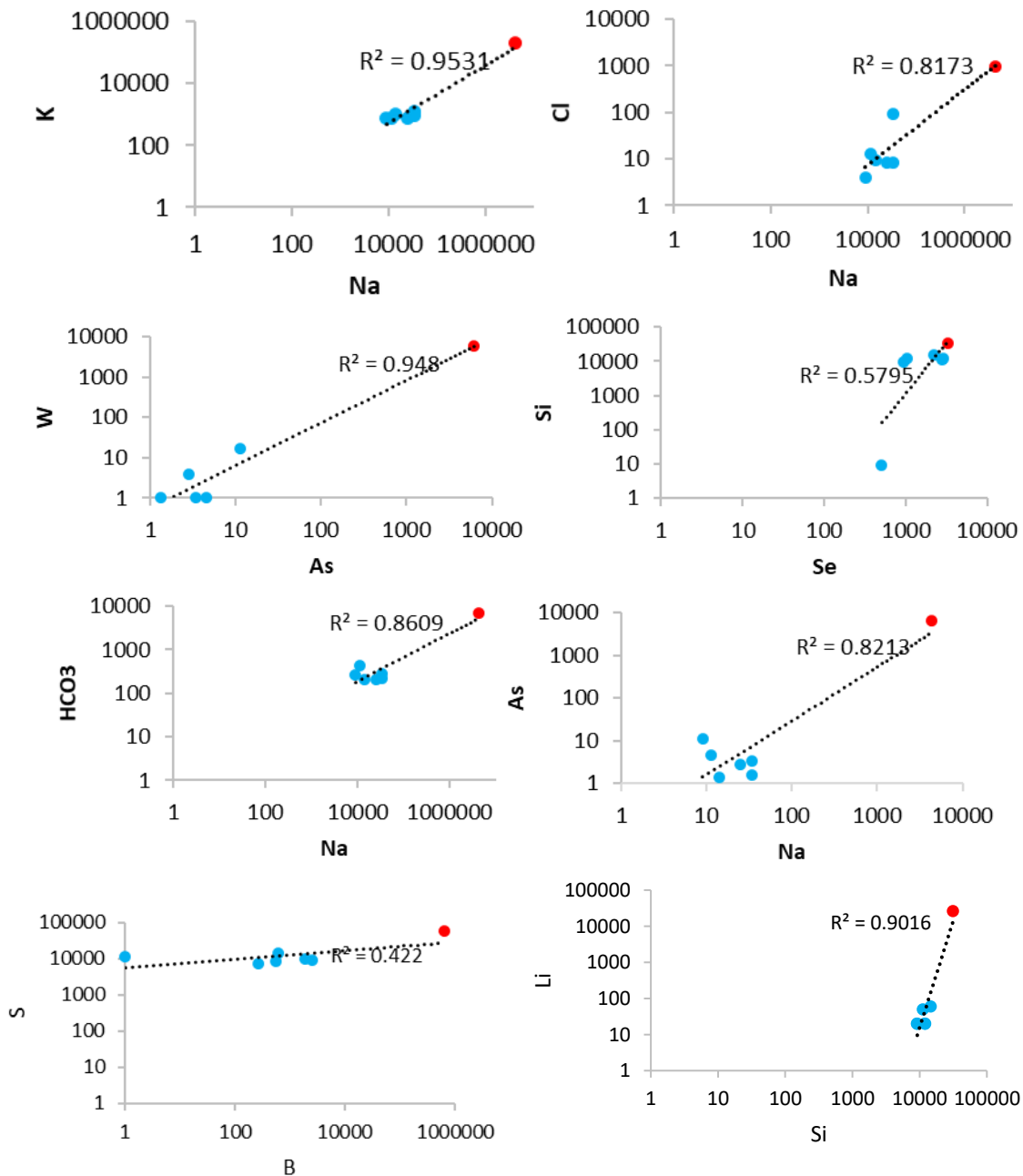
شکل ۷- نمودار شاخص اشباعیت نسبت به کانی‌های کربناته و سولفات در منابع آب منطقه مورد مطالعه  
Figure 7- Graph of the saturation index of the water samples of the studied area concerning carbonate and sulfate minerals

که  $R^2 > 0/7$  نشان می‌دهند همبستگی قوی،  $0/7 < R^2 < 0/5$  همبستگی متوسط و  $R^2 < 0/5$  همبستگی ضعیف در نظر گرفته می‌شوند (Oinam et al., 2012). موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار دومتغیره شکل ۸ نشان می‌دهد که نمونه آب مربوط به چشمه ایستی‌سو به دلیل بالا بودن تمامی یون‌ها و عناصر در ترکیب این آب نسبت به سایر نمونه‌ها مجزاست. از سوی دیگر با توجه به شکل ۸، جفت عناصر K-Na، W-As و نیز Si-Li به

در این مطالعه به منظور بررسی همبستگی و تعیین منشأ عناصر از نمودارهای دومتغیره برای برخی از آنیون و کاتیون‌ها و عناصر استفاده شده است (شکل ۸). به طور کلی ضریب همبستگی ( $R^2$ ) بالا (نزدیک مثبت یک یا منفی یک) به معنی همبستگی خوب بین دو جفت متغیر است و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر عدم ارتباط بین دو متغیر در یک سطح معنادار  $P < 0/5$  است (Asghari Moghaddam and Barzegar, 2015). متغیرهایی

در طی زمان است (Modabberi and Jahromi Yekta, 2013). همچنین، قابل ذکر است که جفت عناصر Sr-Si با  $R^2 = 0.81$  همبستگی متوسط و جفت عناصر S-B نیز با  $R^2 = 0.422$  همبستگی ضعیفی را نشان می‌دهند.

ترتیب با  $R^2 = 0.95$ ،  $R^2 = 0.953$  و  $R^2 = 0.9$  همبستگی بسیار قوی را با یکدیگر نشان می‌دهند. جفت ترکیبات دیگر از قبیل  $HCO_3^-$ -Na، As-Na و Cl-Na نیز به ترتیب با  $R^2 = 0.86$ ،  $R^2 = 0.82$  و  $R^2 = 0.82$  از همبستگی قوی برخوردار هستند، که این مقادیر و همبستگی آن‌ها شواهدی از برهم کنش آب و سنگ



شکل ۸- نمودارهای دو متغیره و همبستگی عناصر مختلف در منابع آب محدوده جنوب شرق سلماس (بر حسب میکروگرم بر لیتر)  
Figure 8- Two-variable graphs and correlation of different elements in water resources of the south-east Selmas area (in  $\mu\text{g l}^{-1}$ )

آمفیبولیت و گنایس) بوده و این سنگ‌ها قابلیت ایجاد ناهنجاری در مقادیر عنصر بور را دارند (شکل ۲). به عنوان مثال، کانی تورمالین با فرمول  $\text{NaFe}^{2+}3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$  یکی از

مشأ غلظت بالای عنصر B در آب‌های سرد منطقه را می‌توان در ارتباط با عامل واحد سنگی دانست. به طوری که حجم عمده سنگ‌های منطقه از نوع دگرگونی (از جنس شیبست،

جدول‌های ۱ و ۲ که به احتمال زیاد توده و یا توده‌های ماگمایی که در اعماق زمین قرار دارند و نیز فعالیت‌های گرمایی وابسته به این توده‌ها، از جمله عواملی هستند که نقش اساسی را در ایجاد ناهنجاری عناصر یاد شده در این چشمه بازی کرده‌اند. بر اساس مطالعات Assadpour et al. (2017) سنگ‌های رسوبی و دگرگونی این محدوده به شدت تکتونیکی بوده و نیز کانی‌زایی عمدتاً در طول چهار منطقه برشی وجود دارد که در نتیجه این امر راه‌های خوبی برای گردش سیالات است. همچنین، به عقیده Vengosh et al. (2002) سامانه‌های ماگمایی قدیمی‌تر نسبت به جوان از بور تهی‌تر بوده و دارای مقادیر بور کم‌تری هستند. بر طبق این گفته شاید بتوان مقادیر بالاتر بور در چشمه آبگرم ایستی سو را به جوان‌تر بودن سامانه ماگمایی نسبت داد. مطالعه انجام شده توسط Pashai Karagoz et al. (2017) روی چشمه‌های آبگرم هفت‌آباد (واقع در جنوب‌غرب ارومیه) نیز نشان داده است که محتوای بالای عناصری نظیر آرسنیک، بور و تنگستن و عدم ارتباط مستقیم غلظت عناصر مذکور با ترکیب واحدهای سنگی منطقه، و از طرفی وابستگی این عناصر به توده‌های آذرین می‌تواند نقش این توده‌ها و محلول‌های گرمایی وابسته به آن‌ها را در افزایش غلظت این عناصر برجسته کند.

چشمه‌های آبگرم حاوی مواد جامد محلول (TDS) هستند و ممکن است دارای عناصر سمی (نظیر آرسنیک، اورانیوم و سایر عناصر کمیاب دیگر) نیز باشند (Smedley and Kinniburgh, 2002; Zhang et al., 2008; Yoshizuka et al., 2010; Bundschuh et al., 2013). غلظت بور اندازه‌گیری شده در آبراهه شمال روستای آبگرم که حاصل ترکیب آبراهه غرب روستای آبگرم و آب چشمه آبگرم ایستی سو است برابر با ۱۵۳ میلی‌گرم بر لیتر بوده و با دبی حدود  $20 \text{ l/s}$  سطح وسیعی از مناطق هم‌جوار و پایین دست را آلوده می‌کند. رهایی این آب‌ها به محیط اطراف نه تنها می‌تواند به بوم‌شناسی آبریان ربط داشته باشد، بلکه پتانسیل بالایی برای ایجاد یک وضعیت خطرناک برای سلامتی ساکنان محلی را ایجاد می‌کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل نشان داد که تیپ غالب آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، کلسیک و در چشمه آبگرم بی‌کربناته سدیک بوده و غلظت برخی از عناصر از قبیل As، B نسبت به آب‌های معمولی بسیار بالا و بیش از حداکثر مقدار مجاز توصیه شده در استاندارد آب شرب است. بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی نشان می‌دهد که بالا بودن  $\text{HCO}_3$  و Ca به دلیل برهم‌کنش بین آب-سنگ و تعویض یونی بوده و به دلیل رهاسازی عنصر بور از ساختار کانی‌های تورمالین و میکای موجود در

کانی‌های اصلی حامل بور محسوب می‌شود و کانی‌های بیوتیت و مسکوویت که به‌وفور در سنگ‌های میکاشیستی و گنایسی منطقه یافت می‌شوند در اثر تماس و واکنش آب با این سنگ‌ها و نیز پتانسیل بالای این سنگ‌ها در ورود عنصر بور به منابع آب زیرزمینی را می‌توان به‌عنوان یکی از دلایل اصلی بالا بودن مقادیر بور در آب‌های منطقه نسبت داد. مطالعه انجام شده توسط Ahangari (2017)، روی سنگ‌های گنایسی منطقه (که در منطقه از حجم گسترده‌ای برخوردارند) نشان داده است که مقادیر کانی تورمالین در این سنگ‌ها بسیار بالاست. با این حال، در منطقه مورد مطالعه بیش‌ترین غلظت بور مربوط به چشمه آبگرم ایستی سو با مقدار ۶۴۴ میلی‌گرم بر لیتر بوده مقایسه شود با حداکثر غلظت مجاز آب شرب (WHO (2011) که برابر با ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر است به احتمال زیاد حضور سنگ‌های دگرگونی و حضور توده‌های ماگمایی در اعماق زمین و به‌خصوص فعالیت‌های گرمایی وابسته به این توده‌ها، از جمله عواملی هستند که در ایجاد ناهنجاری عنصر بور در این چشمه نقش اساسی را ایفا می‌کنند. نتایج بررسی‌های صورت گرفته توسط Asadpour et al. (2016) در بالا بودن غلظت عنصر B در چشمه آبگرم ایستی سو نیز حاکی از برهم‌کنش آب و سنگ در شست و شوی فازهای کانیایی ناپایدار حامل بور مانند مسکوویت، تورمالین، بیوتیت و هورنبلند موجود در سنگ‌های دگرگونی (نظیر گنایس و میکاشیستی)، و نفوذ زبانه‌های سیال‌های ماگمایی حامل بور مرتبط با فعالیت‌های ماگمایی جوان است. مطالعات انجام شده توسط Pashai Karagoz et al. (2017) نیز نشان داده است. در اثر اختلاط آب با سیالات گرمایی مربوط به فعالیت‌های آتشفشانی آرات (در محدوده اطراف شهرستان‌های ماکو و پلدشت)، پتانسیل این ترکیبات در ورود عنصر B به منابع آب زیرزمینی بالا بوده و عامل اصلی در بالا بودن عنصر بور در این آب‌ها را می‌توان به فعالیت‌های گرمایی وابسته به آتشفشان آرات و یا حضور محلول‌های گرمایی در طول گسل‌های مرتبط با این فعالیت آتشفشانی نسبت داد.

نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب برداشت شده نشان می‌دهد که غلظت‌ها و تغییرات عناصر Na، Li، K، Cs، As، Rb، S، Se، Si، Sr، Ta، Th و W در ترکیب آب نمونه‌های آب سرد زیاد نبوده (جدول‌های ۱ و ۲) در نتیجه می‌توان نقش و پتانسیل بسیار ناچیزی را برای ورود این عناصر از طریق واحدهای سنگی منطقه که عمدتاً دگرگونی هستند، در نظر گرفت. از طرفی دیگر، چشمه آبگرم ایستی سو (واقع در روستای آبگرم) علاوه بر عنصر بور، غلظت بالایی از سایر عناصر ذکر شده را حتی بعضاً در مقادیر خیلی بالاتر از حد استاندارد آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) نشان می‌دهد.

نرم افزاری/آماری؛ مرتضی درخشی؛ مشاوره، ویرایش و بازبینی متن مقاله، تجزیه‌های آماری.

### منابع

آهنگری، معصومه (۱۳۹۵). بررسی خاستگاه تورمالین و گارنت در میلونیت گرانیتهای غرب قوشچی-شمال غرب ایران؛ تعیین سنگزایی سنگ اولیه. *بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران*، ۲۵(۴)، ۶۹۷-۷۱۰. <http://ijcm.ir/article-1-989-fa.html>

اسدپور، منیژه، عباس نوین پور، اسفندیار، و نیکروز، رامین (۱۳۹۴). بررسی منشأ زمین‌شناسی آلودگی به عنصر بور در چشمه‌های آب گرم ایستی‌سو، شمال ارومیه. *علوم زمین*، ۲۵(۱۰۰)، ۶۱-۶۶. doi:10.22071/gsj.2016.40688

اصغری مقدم، اصغر، و برزگر، رحیم (۱۳۹۲). بررسی عوامل موثر بر غلظت بالای آرسنیک در آب زیرزمینی آبخوان‌های دشت تبریز. *علوم زمین*، ۲۴(۹۴)، ۱۷۷-۱۹۰. doi:10.22071/gsj.2015.43280

پاشائی قراگوز، توحید، درخشی، مرتضی، و آقازاده، نصرت (۱۳۹۷). بررسی تأثیر لیتولوژی بر غلظت عنصر بور (B) در منابع آب زون خوی-مه‌باد و بخش غربی زون البرز-آذربایجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه.

خدابنده، علی‌اکبر (۱۳۸۲). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلماس. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

دهرمی، رضا و امیری، فاضل. (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری زمین بر کیفیت آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دهرم در استان فارس. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۱۸۰-۱۶۵. doi: 10.22098/mmws.2022.11367.1123

فاریابی، محمد (۱۴۰۲). تعیین منشأ و مکانیزم شوری آب زیرزمینی یک منطقه نیمه‌خشک در جنوب شرق ایران با استفاده از مطالعات ژئوفیزیک و هیدروشیمی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۹۳-۱۱۱. doi: 10.22098/mmws.2022.11298.1119

نبوی، محمدحسن. (۱۳۵۵). دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ص.

یوسفی مبرهن، ابراهیم، کریمی سنگچینی، ابراهیم و لطفی‌نسب، سکینه (۱۴۰۳). بررسی زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی با تأکید بر مصارف صنعتی در حوزه آبریز سفیدرود. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱۳۴-۱۱۹. doi: 10.22098/mmws. 2023.12220.1211

ترکیب سنگ‌های دگرگونی شیست، آمفیبولیت و به‌خصوص گنایس، غلظت آن در آب‌های منطقه افزایش یافته است. در چشمه‌های آبگرم منطقه با تیپ  $\text{Na-HCO}_3$  با غلظت سدیم بالا، به دلیل عدم وجود سنگ‌های تبخیری منشأ یون Na نمی‌تواند فقط ناشی از تأثیر واحدهای سنگی منطقه باشد. بالا بودن مقادیر عناصر K, Cs, B, As, Sr, Si, Se, S, Rb, Nb, Na, Li و W و Th و نتایج بررسی همبستگی بین این عناصر در منابع آب زیرزمینی منطقه و نیز غلظت‌های بالای عناصر مذکور در چشمه آبگرم ایستی‌سو نشان می‌دهد که واحدهای سنگی منطقه به تنهایی، از پتانسیل و قابلیت کافی در ایجاد ناهنجاری در مقادیر این عناصر در منابع آب زیرزمینی برخوردار نیستند. در محل چشمه آبگرم ایستی‌سو به دلیل حضور توده‌های گرم ماگمایی در اعماق، پتانسیل بسیار بالایی برای ورود برخی عناصر به منابع آبی دیده می‌شود. به طوری که بالا بودن غلظت برخی از عناصر شاخص از قبیل B, W, As, Cl می‌تواند به جدایش آن‌ها از سامانظ ماگمایی و گرمایی مرتبط باشد که این امر منجر به ایجاد آلودگی گسترده در آب‌های گرم و سطحی منطقه شده است.

### سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان غربی انجام شده است که بر این اساس از مسئولین محترم این شرکت، به‌خصوص از زحمات خانم دکتر حاجیلاری مدیر محترم دفتر کنترل کیفیت و بهداشت آب و فاضلاب، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار نتایج این پژوهش وجود ندارند.

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### مشارکت نویسندگان

نصرت آقازاده: مفهوم‌سازی، کنترل نتایج، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ توحید پاشایی قراگوز: روش‌شناسی و انجام تجزیه‌های

## References

- Ahangari, M. (2017). Origin of tourmaline and garnet in west Qushchi mylonite granite (NW Iran); constrains on petrogenesis of parental rock. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(4), 697-710. <http://ijcm.ir/article-1-989-fa.html>. [In Persian]
- Alacali, M. (2018). Hydrogeochemical investigation of geothermal springs in Erzurum, East Anatolia (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 77, 802. doi:10.1007/s12665-018-7986-1
- Asadpour, M., Abbas Novinpour, E., & Nikrouz, R. (2016). The geological study of the origin of boron contamination in the Issiso springs, North of Urmia. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 100, 61-66. doi:10.22071/gsj.2016.40688. [In Persian]
- Asghari Moghaddam, A., & Barzegar, R. (2015). Considering factors affecting high arsenic concentration in groundwater resources of Tabriz Plain aquifers. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(94), 177-190. doi:10.22071/gsj.2015.43280. [In Persian]
- Assadpour, M., Heuss, S., & Jafari Bari, M. (2017). Boron contamination in the west of Lake Urmia, NW Iran, caused by hydrothermal activities. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 554-557. doi:10.22071/gsj.2016.40688
- Bundschuh, J., Maity, J.P., Nath, B., Baba, A., Gunduz, O., Kulp, T.R., Jean, J., Kar, S., Yang, H.J., Tseng, Y., Bhattacharya, P., & Chen, C.Y. (2013). Naturally occurring arsenic in terrestrial geothermal systems of western Anatolia, Turkey: potential role in contamination of freshwater resources. *Hazardous Materials*, 262, 951-959. doi:10.22098/mmws.2022.11367.1123
- Dehrami, R., Amiri, F. (2023). Impact assessment of land-use changes on groundwater quality in Dahram watershed of Fars province. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), pp. 165-80. doi:10.22098/mmws.2022.11367.1123. [In Persian]
- Deutsch, W.J., & Siegel, R. (1997). Groundwater geochemistry: Fundamentals and applications to contamination. CRC Press. doi:10.1201/9781003069942
- Durrast, H., & Ngansom, W. (2022). Integrated geophysical and geochemical investigations on the high-salinity geothermal waters of the khlong thom hot spring tourist attraction in Krabi, southern Thailand. *Geosciences Journal*, 26, 621-635. doi:10.1007/s12303-022-0007-0
- Dutta, A., & Gupta, R.K. (2022). Geochemistry and utilization of water from thermal springs of tawang and west kameng districts, arunachal pradesh. *Journal of the Geological Society of India*, 98, 237-244. doi:10.1007/s12594-022-1964-7
- Ebrahimi, D., No, J., & Dashti, A. (2019). Inspecting geothermal prospects in an integrated approach within the West Azarbaijan Province of Iran. *Geothermics*, 77, 224-235. doi:10.1016/j.geothermics.2018.09.007
- Ellis, A.J., & Mahon, W.A.J. (1977). Chemistry and Geothermal Systems. *Chemical Geology*, 25(3), 219-226. doi:10.1016/0009-2541(79)90143-8.
- Faryabi, M. (2023). Delineating the source and mechanism of groundwater salinization in a semi-arid region of southeastern Iran using geophysical and hydrochemical approaches. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 93-111. doi:10.22098/mmws.2022.11298.1119 [In Persian]
- Fournier, R.O. (1979). A revised equation for the na/k geothermometer, geothermal resources council. *Water Resource and Protection*, 3, 221-224. 1000361
- Fournier, R.O., & Truesdell, A.H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 1255-1275. doi:10.1016/0016-7037(73)90060-4
- Furkan Sener, M. (2019). A new approach to Kırşehir (Turkey) geothermal waters using REY, major elements and isotope geochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 78, 75. doi:10.1007/s12665-019-8068-8
- German, C.R., & Von Damm, K.L. (2003). Hydrothermal processes. *Treatise on Geochemistry*, 6, 181-221. doi:10.1016/B0-08-043751-6/06109-0.
- Giggenbach, W.F., Gonfiantini, R., Jangi, B.L., & Truesdell, A.H. (1983). Isotopic and chemical composition of Parbati valley geothermal discharges, NW-Himalaya, India. *Geothermics*, 12, 199-222.
- Hailu, H., & Haftu, S. (2023). Hydrogeochemical studies of groundwater in semi-arid areas of northern Ethiopia using geospatial methods

- and multivariate statistical analysis techniques. *Applied Water Science*, 13, 86. doi:10.1007/s13201-023-01890-w
- Khodabandeh, A. (2003). Geological map 1:100000 of Selmas, Organization of Geology and Mineral Exploration of the country. [In Persian]
- Mahon, W.A.J. (1970). Chemistry in the exploration and exploitation of hydrothermal systems. *Geothermics*, 2(2), 1310–1322. doi:10.1016/0375-6505(70)90449-9
- Modabberi, S., & Jahromi Yekta, S. (2013). Environmental geochemistry and sources of potentially toxic elements in thermal springs in the Sabalan volcanic field, NW Iran. *Environmental Earth Science*, 71, 2821–2835. doi:10.1007/s12665-013-2660-0
- Nabavi, M.H. (1978). An introduction to the geology of Iran, Geologic Survey of Iran, Tehran, 109p. [In Persian]
- Oinam, J.D., Ramanathan, A.L., & Gurmeet, S. (2012). Geochemical and statistical evaluation of groundwater in Imphaland Thoubal district of Manipur, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48, 136–149. doi:10.1016/j.jseaes.2011.11.017
- Pashai Karagoz, T., Derakhshi, M., & Aghazadeh, N. (2017). Investigating the effect of lithology on the concentration of boron element (B) in the water resources of Khoy-Mahabad zone and the western part of Alborz-Azerbaijan zone. Master's Thesis, Islamic Azad University, Urmia, Iran. [In Persian]
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes and mineral systems. Springer Science & Business Media.
- Rezaei, A., Javadi, H., Rezaeian, M., Barani, S. (2018). Heating mechanism of the Abgarm-Avaj geothermal system observed with hydrochemistry, geothermometry, and stable isotopes of thermal spring waters, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77, 635. doi:10.1007/s12665-018-7828-1
- Rezaei, A., Rezaeian, M., & Porkhial, S. (2019). The hydrogeochemistry and geothermometry of the thermal waters in the Mouil Graben, Sabalan volcano, NW Iran. *Geothermics*, 78, 9–27. doi:10.1016/j.geothermics.2018.11.006
- Smedley, P., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517–568. doi:10.1016/S0883-2927(02) 00018-5
- Subbarao, N. (2011). Geochemistry of groundwater in parts of guntur district, andhra pradesh, India. *Environmental Geology*, 41, 552–562. doi:10.1007/s002540100431
- Tang, J., Zhou, X., Zhang, Y., Tian, J., He, M., Li, J., Dong, J., Yucong, Y., Liu, F., Ouyang, S., & Liu, K. (2023). Hydrogeochemistry of fault-related hot springs in the Qaidam Basin, China. *Applied Sciences*, 13(3), 1415. doi:10.3390/app13031415
- Tonani, F. (1970). Geochemical methods of exploration for geothermal energy. *Geothermics*, 2(1), 492–515. doi:10.1016/0375-6505(70)90049-0
- Utagi, U.N., & Purandara, B.K. (2023). Temporal-spatial quality assessment of spring water using WQI and GIS modeling in Western Ghats region of India. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(11), 1–16. DOI:10.1007/s41062-023-01275-7
- Vengosh, A., Helvaci, C., & Karamandersi, I.H. (2002). Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey. *Applied Geochemistry*, 17, 163–183.
- Wang, Y., Gu, H., Li, D., Lyu, M., Lu, L. Zuo, Y. & Song, R. (2021). Hydrochemical characteristics and genesis analysis of geothermal fluid in the Zhaxikang geothermal field in County, southern Tibet. *Environmental Earth Sciences*. 80(11). doi:10.1007/s12665-021-09577-8
- White, D.E. (1970). Geochemistry applied to the discovery, evaluation, and exploration of geothermal energy resources. *Geothermics*, 2(1), 58–80. 1004712.
- WHO (2011) Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization, 4<sup>th</sup> edition.
- Yazdi, M., Farajpour, G., Hasanvand, M., & Navi, P. (2018). Hydrogeochemistry of Isti Su hot spring, Western Azerbaijan, Iran. *Carbonates and Evaporites*, 33, 861–867. doi:10.1007/s13146-018-0458-6
- Yazdi, M., Taheri, M., & Navi, P. (2015). Environmental geochemistry and sources of natural Arsenic in the Kharagan hot springs, Qazvin, Iran. *Environmental Earth Science*, 73, 5395–5404. doi:10.1007/s12665-014-3794-4
- Yoshizuka, K., Nishihama, S., & Sato, H., (2010). Analytical survey of arsenic in geothermal

- waters from sites in Kyushu, Japan, and a method for removing arsenic using magnetite. *Environmental Geochemistry Health*, 32, 297-302. doi: 10.1007/s10653-010-9300-3
- Yousefi Mobarhan, E., Karimi Sanghchini, E., & Lotfinasabasl, S. (2024). Temporal and spatial investigation of groundwater quality with emphasis on industrial uses in Sefid-Rud Basin. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(1),119-134. doi:10.22098/mmws.2023.12220.1211. [In Persian]
- Zhang, G., Liu, C., Liu, H., Jin, Z., Han, G., Li, L (2008). Geochemistry of the Rehai and Ruidian geothermal waters, Yunnan Province, China. *Geothermics*, 37, 73-83. doi:10.1016/j.geothermics.2007.09.002