

Hydrogeochemistry and geothermometry of hot and cold springs in the Sahand Volcanic Region (Northwest of Iran)

Fariba Aghazadeh ¹, Mousa Bagheri ², Morteza Derakhshi ³, Nosrat Aghazadeh ⁴

1. PhD Student, Department of Geology, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran. Email: fariba.aghazadeh@iau.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Geology, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran Email: m.bagheri@iaurmia.ac.ir

3. Department of Geology, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran. Email: mderakhshi@iau.ir

4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran. Email: nosrat.aghazadeh@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:

Received: August 1, 2026

Revised: August 10, 2026

Accepted: September 21, 2026

Published online:
September 23, 2026

Keywords:

Geothermometry

Hot springs

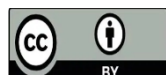
Volcanic geothermal
systems

Sahand Volcanic Region
Northwest Iran

Abstract

The Sahand Volcanic Region in northwest Iran, within the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, hosts numerous hot and cold springs that are useful for understanding hydrogeochemical processes and geothermal-system behaviour in volcanic environments. This study characterizes the hydrogeochemistry of the springs and estimates subsurface reservoir temperatures to evaluate the area's geothermal potential. In summer 2023, water samples were collected from four hot springs (31-54 C) and thirty-four cold springs (20-24 C); temperature, pH and electrical conductivity were measured in situ, and major ions (Ca, Mg, Na, K, HCO₃, SO₄, Cl) and SiO₂ were analyzed. Hydrochemical facies were classified using Piper, Durov and Cl-SO₄-HCO₃ diagrams, and reservoir temperatures were derived from silica and cation geothermometers with the aid of PHREEQC and AquaChem modelling. The waters show low mineralization (average TDS about 220 mg/L) and are dominated by a Ca-HCO₃-SO₄ facies, reflecting intensive water-rock interaction. Hot and cold springs share broadly similar hydrochemistry, pointing to a common source with differing circulation depth and mixing. Quartz geothermometry yields reservoir temperatures of 88.7-123.2 C, indicating a moderate- to high-temperature system, whereas cation geothermometers give unreliable results owing to chemical disequilibrium, consistent with the immature classification of the waters on the Na-K-Mg diagram. Saturation-index calculations show oversaturation with respect to silica and undersaturation with respect to carbonate and sulfate minerals. Overall

How to cite: Aghazadeh, F., Bagheri, M., Derakhshi, M. & Aghazadeh, N. (2026). Hydrogeochemistry and geothermometry of hot and cold springs in the Sahand Volcanic Region (Northwest of Iran). *Geography and Regional Planning*, 16(3), 113-131. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594886.4516>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
DOI: <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594886.4516>

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

Geothermal systems in volcanic regions represent valuable renewable energy resources and provide important insights into subsurface geological and hydrothermal processes. Hydrogeochemical investigations and geothermometry are widely used to determine water origins, evaluate water–rock interactions, identify mixing processes, and estimate geothermal reservoir temperatures. The Sahand Volcanic Region in northwestern Iran, situated within the Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc, contains numerous hot and cold springs that offer opportunities to investigate geothermal activity. However, understanding the chemical characteristics and thermal conditions of these springs requires an integrated analytical approach. This study aims to characterize the hydrogeochemistry of hot and cold springs in the Sahand region, classify their hydrochemical facies, identify the dominant geochemical processes, and estimate subsurface reservoir temperatures. Water samples were analyzed for physicochemical parameters and major dissolved ions, while Piper, Durov, and other hydrochemical diagrams were applied to interpret water composition. Silica and cation geothermometers, supported by geochemical modelling, were used to evaluate reservoir conditions and geothermal potential. The findings contribute to a better understanding of hydrothermal activity, fluid circulation, and geothermal resource prospects in northwestern Iran.

Methodology

During summer 2023, water samples were collected from four hot springs and 34 cold springs in the Sahand Volcanic Region. Field measurements included temperature, pH, and conductivity. Major ions and silica were analyzed cllly. Hydrochemical facies were interpreted using Piper, Durov, and Cl–SO₄–HCO₃ diagrams. Silica and cation geothermometers, together with PHREEQC and AquaChem modelling, were applied to estimate reservoir temperatures and assess geothermal potential.

Results and Discussion

The findings highlight the importance of identifying precise indicators for assessing deteriorated urban fabric and guiding regeneration projects. The results indicate that

deteriorated areas in Mahshahr face challenges related to inadequate infrastructure, limited urban services, physical deterioration, and insufficient attention to social, economic, physical, and environmental dimensions. The questionnaire data, collected from 385 residents and analyzed using SPSS and Excel, were used to evaluate citizens' perceptions of community-based urban improvement. The study emphasizes that urban regeneration can improve residents' quality of life by strengthening local participation, encouraging private investment, supporting small-scale economic activities, and promoting mixed land use. The findings also suggest that sustainable regeneration requires integrated planning and greater coordination among relevant organizations. Comparing the results with previous studies further highlights the significance of physical improvement, environmental sustainability, social revitalization, and the preservation of urban identity. Overall, the study supports the idea that a community-oriented and multidimensional approach to urban regeneration can contribute to improving the quality and sustainability of Mahshahr's deteriorated urban fabric. Effective implementation requires coordinated interventions that address local needs and strengthen residents' involvement in rehabilitation and future development planning.

Conclusion

This study integrated hydrogeochemical analysis and geothermometry to evaluate the geothermal potential of the Sahand Volcanic Region in northwestern Iran. A total of 38 spring samples, including four hot springs and 34 cold springs, were investigated. The results indicate low mineralization, with an average total dissolved solids concentration of approximately 220 mg/L. Calcium is the dominant cation in about 66% of the samples, while sulfate is the dominant anion in approximately 58%. Accordingly, the prevalent hydrochemical facies is Ca–HCO₃–SO₄, suggesting substantial interaction between groundwater and carbonate- and sulfate-bearing rocks. The broadly similar hydrochemical facies of hot and cold springs indicate a common recharge source, probably related to atmospheric precipitation.

Differences in chemical composition and temperature appear to reflect variations in circulation depth, residence time, and mixing rather than distinct fluid origins. The Cl-SO₄-HCO₃ diagram further suggests that some hot springs are peripheral waters, whereas others show steam-heated or deeper, more mature characteristics. Cold springs mostly represent peripheral waters circulating at shallow depths. Geothermometric results highlight the importance of selecting methods appropriate to the chemical state of the waters. The Na-K-Mg diagram classifies the samples as immature, indicating that chemical disequilibrium and mixing limit the reliability of cation geothermometers. In contrast, quartz geothermometry provides more dependable

reservoir-temperature estimates of 88.7–123.2°C, averaging approximately 107°C. These results point to a moderate- to relatively high-temperature geothermal system with potential for direct use and further exploration. Saturation calculations also indicate silica oversaturation and carbonate and sulfate mineral undersaturation. Overall, the combined use of hydrochemical diagrams, silica geothermometry, and geochemical modelling provides a more robust assessment than any single method. The findings identify Sahand as a promising geothermal area, while emphasizing the need for detailed exploration to confirm reservoir conditions and assess practical development potential.

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Third author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation

of information and results, preparing a draft of the article

Fourth author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest

هیدروژئوشیمی و ژئوترمومتری چشمه‌های آب گرم و سرد منطقه آتشفشانی سهند (شمال غرب ایران)

فریبا آقازاده^۱، موسی باقری^۲✉، مرتضی درخشی^۳، نصرت آقازاده^۴

۱. دانشجویی دکتری، گروه زمین شناسی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: fariba.aghazadeh@iau.ac.ir

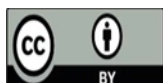
۲. استادیار گروه زمین شناسی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: m.bagheri@iaurmia.ac.ir

۳. استادیار گروه زمین شناسی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: mderakhshi@iau.ac.ir

۴. استادیار گروه عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران. رایانامه: nosrat.aghazadeh@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	منطقه آتشفشانی سهند در شمال غرب ایران و در محدوده کمربند ماگمایی ارومیه-دختر، میزبان چشمه‌های آب گرم و سرد متعددی است که بررسی هیدروژئوشیمیایی آن‌ها می‌تواند شناخت بهتری از رفتار سامانه‌های زمین گرمایی در محیط‌های آتشفشانی فراهم کند. هدف این پژوهش، تعیین ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی این چشمه‌ها و برآورد دمای مخزن زیرسطحی برای ارزیابی پتانسیل زمین گرمایی منطقه است. در تابستان سال ۱۴۰۲، از چهار دهنه چشمه آب گرم (با دماهای ۳۱ تا ۵۴ درجه سلسیوس) و ۳۴ دهنه چشمه آب سرد (با دماهای ۲۰ تا ۲۴ درجه سلسیوس) در محدوده مطالعاتی نمونه‌برداری انجام شد. پارامترهای دما، pH و هدایت الکتریکی (EC) در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری شدند و غلظت یون‌های اصلی شامل Cl^- ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، Na ، K ، Mg ، Ca و Si با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی تعیین گردید. رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی با دیگرام‌های پایپر و دوروف و دمای مخزن با زمین‌دماسنج‌های سیلیسی و کاتیونی، همراه با مدل‌سازی ژئوشیمیایی در نرم‌افزارهای PHREEQC و AquaChem برآورد شد. نتایج نشان داد که آب‌ها از نظر مینرالیزاسیون ضعیف بوده (میانگین TDS حدود ۲۲۰ میلی گرم بر لیتر) و رخساره غالب آن‌ها از نوع $Ca-HCO_3-SO_4$ است که ناشی از برهم‌کنش شدید آب و سنگ است. شباهت هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های گرم و سرد، منشأ مشترکی را برای آن‌ها نشان می‌دهد، هرچند عمق گردش و میزان اختلاط متفاوت است. زمین‌دماسنج کوارتز دمای مخزن را بین ۸۸/۸ تا ۱۲۳/۲ درجه سلسیوس برآورد کرد که بیانگر سامانه‌ای با دمای متوسط تا نسبتاً بالاست، درحالی‌که زمین‌دماسنج‌های کاتیونی به دلیل عدم تعادل شیمیایی و اختلاط، نتایجی غیرقابل اعتماد دادند؛
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	
کلیدواژه‌ها: چشمه‌های آب گرم ژئوترمومتری سامانه زمین گرمایی آتشفشانی شمال غرب ایران منطقه آتشفشانی سهند	

استناد: آقازاده، فریبا، باقری، موسی، درخشی، مرتضی و آقازاده، نصرت. (۱۴۰۵). هیدروژئوشیمی و ژئوترمومتری چشمه‌های آب گرم و سرد منطقه آتشفشانی سهند (شمال غرب ایران). *جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای*، ۱۶(۳)، ۱۳۱-۱۱۳. DOI: 10.22034/jgeoq.2026.594886.4516



مقدمه

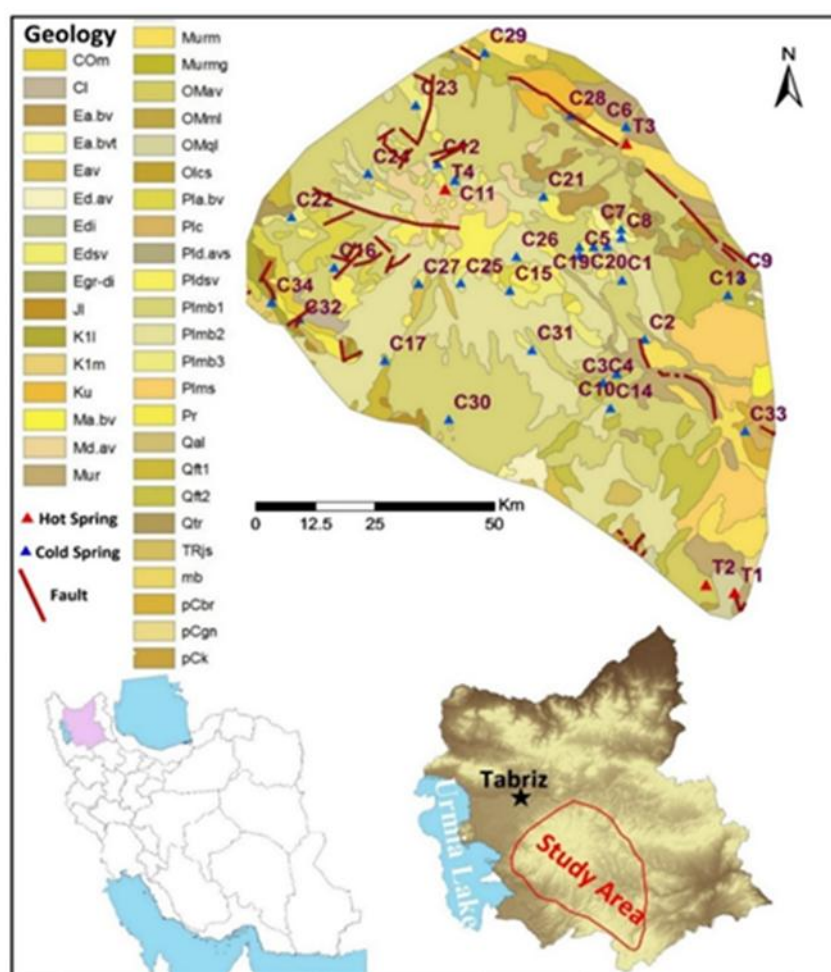
سامانه‌های زمین گرمایی در مناطق آتشفشانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر شناخته می‌شوند. این سامانه‌ها عمدتاً در نواحی فعال از نظر تکتونیکی توسعه می‌یابند؛ مناطقی که وجود شار حرارتی بالا، نفوذ توده‌های ماگمایی و شبکه‌های گسلی با تراوایی مناسب، شرایط لازم برای گردش سیالات گرمایی و تشکیل مخازن زمین گرمایی را فراهم می‌کند. در دهه‌های اخیر، توسعه رویکردهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهش‌های گسترده‌ای را در زمینه سامانه‌های زمین گرمایی در سراسر جهان به دنبال داشته است. در این راستا، هیدروژئوشیمی و ژئوترمومتری به‌عنوان دو ابزار بنیادی در تبیین فرایندهای ژئوشیمیایی، تعیین منشأ و مسیر تکامل سیالات و برآورد ویژگی‌های مخازن زمین گرمایی، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. مطالعات هیدروژئوشیمیایی آب‌های گرم و سرد از مهم‌ترین روش‌های ارزیابی سامانه‌های زمین گرمایی محسوب می‌شوند و اطلاعات ارزشمندی درباره منشأ سیالات، فرایندهای برهم‌کنش آب و سنگ، میزان اختلاط آب‌ها و الگوهای گردش و جریان سیالات در زیرسطح فراهم می‌کنند. شیمی یون‌های اصلی و دی‌اگرام‌های متداول هیدروژئوشیمیایی مانند پایپر و دوروف به‌طور گسترده برای شناسایی نوع آب و تحول ژئوشیمیایی سیالات زمین گرمایی به کار می‌روند (Appelo & Poatma, 2005; Durov, 1948; Piper, 1944). افزون بر این، روش‌های ژئوترمومتری، به‌ویژه زمین‌دماسنج‌های سیلیسی و کاتیونی، به‌طور گسترده برای برآورد دمای مخازن زیرسطحی و ارزیابی منابع زمین گرمایی کاربرد دارند؛ هرچند کارایی این روش‌ها به شدت به وضعیت تعادل شیمیایی و میزان اختلاط با آب‌های زیرزمینی کم‌عمق، به‌ویژه در مناطق آتشفشانی با آب‌های نابالغ، وابسته است (Gunnarsson et al., 2014; Giggenbach, 1988; Fournier & Potter, 1982). تحت تأثیر گسل‌ها و شکستگی‌هایی است که به‌عنوان مسیر صعود سیالات گرم از عمق به سطح عمل می‌کنند. پژوهش‌های متعددی نقش موقعیت تکتونیکی، تغییرات سنگ‌شناختی و عمق جریان سیال را در کنترل ویژگی‌های ژئوشیمیایی سامانه‌های زمین گرمایی و بازتاب‌های سطحی آن‌ها نشان داده‌اند (Rezaei et al., 2023; Karimi et al., 2022; Ghasemi & Talbot, 2006). ایران دارای مناطق آتشفشانی زمین گرمایی امیدبخش متعددی از جمله کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر است که بخش بزرگی از مرکز و شمال غرب کشور را در بر می‌گیرد. پژوهش‌های گوناگونی درباره فعالیت‌های زمین گرمایی در مناطقی چون سبلان، دماوند و سهند انجام شده که پتانسیل زمین گرمایی و ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی قابل توجه این مناطق را نشان می‌دهد (Fedele et al., 2023; Ebrahimi et al., 2023; Noorollahi et al., 2007). منطقه آتشفشانی سهند در این میان به‌عنوان یکی از مناطق آتشفشانی مهم و برجسته شمال غرب ایران شناخته می‌شود. با این حال، ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و پتانسیل ژئوترمومتری چشمه‌های آب گرم و سرد منطقه سهند تاکنون با رویکردی یکپارچه شامل شیمی یون‌های اصلی، روش‌های ژئوترمومتری، دی‌اگرام‌های هیدروژئوشیمیایی و مدل‌سازی ژئوشیمیایی به‌طور جامع مورد ارزیابی قرار نگرفته است. به‌ویژه، اثر اختلاط سیالات و عدم تعادل شیمیایی بر دقت و کاربرد روش‌های مختلف ژئوترمومتری هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است. در این راستا، اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: (۱) تعیین ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های آب گرم و سرد منطقه آتشفشانی سهند، (۲) طبقه‌بندی انواع آب‌ها و شناسایی فرایندهای ژئوشیمیایی غالب کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آن‌ها، (۳) برآورد دمای مخزن با استفاده از روش‌های مختلف ژئوترمومتری، و (۴) ارزیابی پتانسیل زمین گرمایی منطقه از دیدگاه منطقه‌ای و زمین‌ساختی. نتایج این پژوهش می‌تواند دیدگاه تازه‌ای درباره رفتار سامانه‌های زمین گرمایی در شمال غرب ایران ارائه دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه آتشفشانی سهند در شمال غرب ایران و حدود ۴۰ کیلومتری جنوب شهر تبریز واقع شده و بخشی از کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر، یکی از مهم‌ترین پهنه‌های آتشفشانی ایران، به‌شمار می‌رود. این منطقه توسط استراتوولکان سهند با ارتفاع حدود ۳۷۰۷ متر از سطح دریا و مساحتی نزدیک به ۳۰۰۰ کیلومترمربع سیطره دارد. جایگاه زمین‌شناسی منطقه بازتاب‌دهنده تاریخچه تکاملی پیچیده ماگماتیسم پس از برخورد، مرتبط با همگرایی صفحات عربی و اوراسیا است. فعالیت آتشفشانی در منطقه سهند از تریکیات

بازالتی تا ریولیتی متغیر است و شامل سنگ‌شناسی‌های گوناگونی مانند گدازه، ایگنیمبریت، گنبد و مواد پیروکلاستیک می‌شود. سنگ‌های آندزیتی و داسیتی گسترش زیادی دارند و در برخی موارد دستخوش دگرسانی هیدروترمال شده‌اند. عناصر ساختاری، به‌ویژه سامانه‌های گسلی منطقه‌ای مانند گسل شمال تبریز، در کنترل جریان سیال و فعالیت‌های زمین‌گرمایی و لرزه‌ای منطقه نقش مهمی دارند (Kharazmi & Fadaei, 2022). این ویژگی‌های ساختاری، مسیر مناسبی برای صعود سیالات زمین‌گرمایی عمقی به سطح فراهم می‌کنند. وجود چشمه‌های آب گرم و سرد و فومرول‌های متعدد، نشانه‌ای از یک سامانه زمین‌گرمایی فعال با شار حرارتی قابل توجه در عمق است. با توجه به پیچیدگی زمین‌شناسی و ساختاری، منطقه آتشفشانی سه‌پند محیط طبیعی مناسبی برای بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی و زمین‌گرمایی به‌شمار می‌رود (Fazel & Raeesi, 2022). نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

۲-۲- نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های صحرایی

نمونه‌برداری آب در تابستان ۱۴۰۲ از مجموع سی‌وهشت چشمه شامل چهار چشمه آب گرم و سی‌وچهار چشمه آب سرد انجام شد (شکل ۱). دامنه دمای چشمه‌های آب گرم بین ۳۱ تا ۵۴ درجه سلسیوس و دمای چشمه‌های آب سرد بین ۲۰ تا ۲۴ درجه سلسیوس بود. پارامترهای دما (T)، pH و هدایت الکتریکی (EC) بلافاصله پس از خروج آب و در محل هر نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه قابل حمل WTW Multi 340i/SET با الکتروود pH اندازه‌گیری شد.

۲-۳- جمع‌آوری نمونه و آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های آب با بطری‌های پلی‌اتیلنی از پیش تمیزشده و مطابق روش‌های استاندارد نمونه‌برداری هیدروژئوشیمیایی جمع‌آوری شدند. برای آنالیز کاتیون‌ها و فلزات کمیاب، ۲۵۰ میلی‌لیتر آب با فیلتر غشایی $\mu m 0/45$ صاف و سپس با اسید نیتریک

فوق‌خالص تا pH کمتر از ۲ اسیدی شد تا از رسوب فلزات جلوگیری شود. برای آنالیز آنیون‌ها نیز ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب با همان اندازه فیلتر صاف شد. کاتیون‌های اصلی Ca، Mg، Na و K با روش‌های ICP-MS و فلیم‌تومتری، و آنیون‌های HCO₃ و Cl و سیلیس با روش تیتراسیون اندازه‌گیری شدند؛ غلظت سولفات نیز با اسپکتروفتومتری تعیین شد. مجموع جامدات محلول (TDS) از مجموع غلظت کاتیون‌های اصلی محاسبه شد. صحت آنالیزها با محاسبه خطای توازن یونی بررسی و تأیید شد که در تمام موارد در محدوده قابل‌قبول قرار داشت.

نمونه	دما (°C)	pH	EC (μS/cm)	نوع آب	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂
T1	54.4	6.64	570	Ca-SO ₄	48.1	15.4	20.5	59.4	48.2	115.8	115.3	52
C1	22.4	7.73	358	Ca-HCO ₃	30.2	8.4	7.4	44.6	39	52.8	73.2	-
C2	22.4	7.38	511	Ca-SO ₄	50	15.8	35.5	3.84	40.8	102	116.2	-
C3	23.4	7.78	410	Mg-SO ₄	36	29.6	14.7	0.69	9.6	120	114.5	-
C4	21.3	7.07	404	Ca-SO ₄	52	21.9	14.8	0.98	12.1	125	118.8	-
C5	21.7	7.61	132	Ca-HCO ₃	21	10.6	1.9	0.08	8.3	30	61	-
C6	24.1	7.79	460	Ca-SO ₄	38	19.6	32.1	0.45	28.8	108	85.2	-
C7	20.9	6.97	338	Ca-SO ₄	56	15.8	9.3	0.11	9.6	112	113.2	-
C8	21.7	7.44	335	Ca-SO ₄	62	7.3	14.2	0.21	7.2	104	106.8	-
C9	23	7.37	362	Mg-	40	31.3	8.1	0.11	19.5	131	91.4	-

				SO ₄								
C10	20.2	7.25	148	Na-Cl	6.2	2.7	15	14.9	23.4	18.7	22	-
T4	31.8	6.8	290	Ca-Cl	18.6	7.8	19.8	19.2	47.5	22.6	56.7	58
C11	23.5	6.98	290	Ca-Cl	18.6	7.8	19.8	19.2	47.5	22.6	56.7	-
C12	20.8	7.62	570	Ca-SO ₄	48.1	15.5	20.5	59.4	48.2	115.8	115.3	-
T2	46.8	6.22	358	Ca-SO ₄	30.3	8.4	7.3	44.6	38.9	52.9	73.2	37
T3	42	6.49	148	Na-Cl	6.2	2.6	14.9	14.8	23.4	18.7	21.9	56
C13	22.1	7.53	374	Ca-SO ₄	58	13.4	2.3	0.12	9.6	82	91.5	-
C14	23.3	8.1	495	Ca-HCO ₃	54.5	22.5	5.3	12.5	25.8	57.6	175.1	-
C15	22.5	7.6	168	Na-SO ₄	5.2	6	15.4	11.3	18.7	42.3	23.8	-
C16	23.4	7.12	234	Na-SO ₄	17.4	4.1	21.8	7.8	22	39.9	43.3	-
C17	22.9	6.98	342	Ca-SO ₄	35.2	7	10.8	23.8	18.4	80.2	59.8	-
C18	20.5	7.66	423	Ca-SO ₄	41.5	2	42	7.4	56.7	79.3	43.9	-
C19	21.8	7.42	369	Mg-SO ₄	11.6	25.5	15.6	13.6	12.8	139.3	12.2	-
C20	24.1	7.1	281	K-Cl	10.1	9.4	14.5	35.6	63.8	20.2	18.3	-
C21	23.3	8.4	157	Ca-HCO ₃	17.2	1.7	9	7.3	17.4	25.5	34.1	-
C22	23.7	7.86	369	Ca-SO ₄	38.9	9.5	9.6	22.7	26.6	95.6	49.9	-
C23	22.5	7.91	264	Mg-HCO ₃	19.2	12.4	8.8	11	31.55	10.6	98.8	-
C24	21.8	7.2	384	Ca-SO ₄	52.3	1.5	16.8	21.9	19.8	88.4	86	-

C25	22.6	6.84	377	Ca-Cl	38.5	7.2	7.8	50.4	46.8	33.2	106.7	-
C26	23.9	7.21	127	Mg-SO4	7.6	6.9	5.2	5	13.8	36	11.6	-
C27	22.7	7.67	272	Ca-SO4	18.3	9	14.3	18	18.8	70.6	42.1	-
C28	21.4	7.15	193	Na-Cl	8.6	7.1	18	8.6	156	36.1	54.3	-
C29	20.8	7.26	179	Na-SO4	4.8	6.4	17	15.6	25.2	52.9	7.3	-
C30	21.4	7.96	406	Ca-Cl	38.6	2	19.8	43.8	83.3	46.6	51.8	-
C31	20.9	6.88	567	Mg-Cl	26.6	34	20.7	37.1	109.5	35.5	109.2	-
C32	24.3	7.15	430	Ca-SO4	33.9	4.6	29.8	46.1	21	116.2	74.5	-
C33	21.5	7.44	578	Ca-Cl	42.7	13.4	18.1	76.6	110	18.7	133.6	-
C34	22.7	7.38	183	Ca-Cl	15.8	1.8	15.6	8.6	32.2	20.6	29.9	-

جدول ۱: نتایج آنالیز نمونه‌های آب (غلظت یون‌ها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر)

رخساره‌ها و انواع آب با استفاده از دیاگرام‌های متداول هیدروشیمیایی، شامل دیاگرام پایپر، دیاگرام دوروف و دیاگرام مثلثی Cl-SO4-HCO3 شناسایی شدند. دمای مخزن با زمین‌دماسنج‌های سیلیسی (کوارتز، کلسدونی، کریستوبالیت و سیلیس بی‌شکل) و زمین‌دماسنج‌های کاتیونی (Na-K، Na-K-Ca، Na-K-Mg، Mg-Li) برآورد شد. از دیاگرام مثلثی Na-K-Mg نیز برای ارزیابی میزان دستیابی به تعادل شیمیایی و اعتبار زمین‌دماسنج‌های کاتیونی استفاده شد.

۴-۲- روش‌های ژئوترمومتری و ارزیابی تعادل شیمیایی

دمای مخزن زمین‌گرایی با استفاده از ژئوترموترهای سیلیسی و کاتیونی، بر اساس روابط (۱) تا (۸)، برآورد شد. ژئوترموترهای سیلیسی شامل کوارتز (رابطه ۱)، کلسدونی (رابطه ۲)، کریستوبالیت (رابطه ۳) و سیلیس بی‌شکل (رابطه ۴) بودند که به دلیل پایداری نسبی در سامانه‌های زمین‌گرایی مختلط و سامانه‌های شیمیایی نابالغ به کار گرفته شدند. همچنین، ژئوترموترهای کاتیونی Na/K (رابطه ۵)، Na-K-Ca (رابطه ۶) و K/Mg (رابطه ۷) به منظور مقایسه نتایج و ارزیابی دمای مخزن محاسبه شدند. در رابطه (۶)، β ضریب تصحیح دما است که برای دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس برابر ۳/۴ و برای دماهای پایین‌تر از ۱۰۰ درجه سلسیوس برابر ۳/۱ می‌باشد. تمام غلظت‌های یونی در این روابط بر حسب میلی‌گرم بر لیتر (mg/L) هستند.

$$T = \frac{1309}{5.19 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (1)$$

$$T = \frac{1032}{4.69 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (2)$$

$$T = \frac{1000}{4.78 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (3)$$

$$T = \frac{731}{4.52 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (4)$$

$$T = \frac{1217}{1.483 - \log\left(\frac{Na}{K}\right)} - 273.15 \quad (5)$$

$$T = \frac{1647}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + \beta \left[\log\left(\frac{\sqrt{Ca}}{Na}\right) + 2.06 \right] + 2.47} - 273.15 \quad (6)$$

$$T = \frac{4410}{14 - \log\left(\frac{K^2}{Mg}\right)} - 273.15 \quad (7)$$

$$T = \frac{2200}{\log\left(\frac{Mg}{Li}\right) + 5.47} - 273.15 \quad (8)$$

که در این روابط، T: دمای مخزن (درجه سانتی‌گراد)، SiO₂: غلظت سیلیس محلول در آب (mg/L Na: غلظت سدیم (mg/L K: غلظت پتاسیم (mg/L Ca: غلظت کلسیم (mg/L β: ضریب تصحیح دمایی که مقدار آن برای دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱/۳ و برای دماهای پایین‌تر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۴/۳ می‌باشد. به منظور ارزیابی تعادل ترمودینامیکی و بررسی فرایندهای برهم‌کنش آب-سنگ، مدل‌سازی ژئوشیمیایی و محاسبه شاخص اشباع (Saturation Index: SI) (رابطه ۸) کانی‌ها با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC انجام شد. شاخص اشباع برای کانی‌های منتخب سیلیسی، کربناتی و سولفاتی محاسبه شد تا وضعیت پایداری یا ناپایداری این کانی‌ها و نقش آن‌ها در کنترل ترکیب شیمیایی آب‌های زمین‌گرمایی ارزیابی شود. همچنین، تحلیل‌های مکانی و تهیه نقشه موقعیت نقاط نمونه‌برداری با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS انجام گرفت.

$$SI = \log (IAP/K) \quad (۸)$$

$$IAP = \alpha_A^x \times \alpha_B^y$$

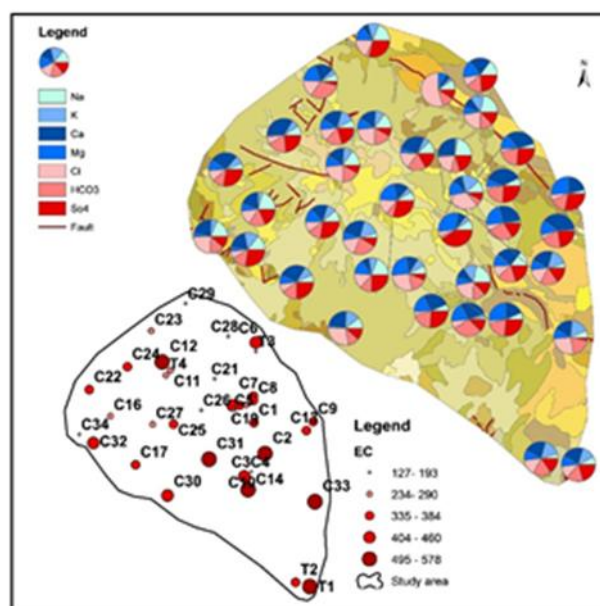
که در آن، SI: شاخص اشباع کانی، IAP: حاصل ضرب فعالیت یون‌های تشکیل‌دهنده کانی در محلول، K: ثابت تعادل ترمودینامیکی واکنش انحلال کانی در دمای مورد نظر، α_A: فعالیت یون A و α_B: فعالیت یون B می‌باشند.

- نتایج و بحث

۱-۳ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب چشمه‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب چشمه‌های گرم و سرد منطقه سه‌پند در جدول ۱ ارائه شده است. دمای سطحی چشمه‌های آب گرم بین ۳۱ تا ۵۴ درجه سلسیوس و دمای چشمه‌های آب سرد بین ۲۰ تا ۲۴ درجه سلسیوس با میانگین حدود ۲۲ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. مقادیر pH آب‌های نمونه‌برداری شده عموماً خنثی تا کمی قلیایی است که بیانگر شرایط هیدروشیمیایی ضعیف قلیایی در منطقه است. هدایت الکتریکی (EC) تغییرات متوسطی میان نمونه‌ها نشان می‌دهد که بازتاب‌دهنده تفاوت غلظت یون‌های محلول و شدت برهم‌کنش آب و سنگ است. مقادیر جامدات محلول کل (TDS) در چشمه‌های گرم و سرد نسبتاً پایین تا متوسط است که بیانگر مینرالیزاسیون محدود و زمان ماند کوتاه تا متوسط در زیرسطح است. به طور کلی، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی پایه نشان‌دهنده منشأ عمدتاً جوی برای آب چشمه‌ها با درجات متفاوتی از تأثیر زمین‌گرمایی است. غلظت یون‌های اصلی نشان می‌دهد که کلسیم کاتیون غالب و سولفات و بی‌کربنات آنیون‌های غالب در بیشتر نمونه‌ها هستند (جدول ۱). بررسی دقیق‌تر داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که کلسیم کاتیون غالب (در حدود ۶۶ درصد نمونه‌ها) و سولفات آنیون غالب (در حدود ۵۸ درصد نمونه‌ها) است. بیشینه و کمینه غلظت کلسیم، بی‌کربنات و سدیم به ترتیب در چشمه‌های آب گرم ۴۸/۱

تا ۶/۲، ۱۱۵/۳ تا ۲۱/۹ و ۲۰/۵ تا ۷۰/۳ میلی گرم بر لیتر است، و در چشمه‌های آب سرد به ترتیب ۶۲ تا ۴/۸، ۱۷۵/۱ تا ۷/۳ و ۴۲ تا ۱/۹ میلی گرم بر لیتر است؛ بیشینه غلظت سولفات نیز در کل نمونه‌ها ۱۳۹/۳ میلی گرم بر لیتر ثبت شد. بر اساس این توزیع یونی، تیپ غالب آب در هر دو گروه چشمه از نوع $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ است. نوع غالب آب یعنی $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ ، حاصل انحلال کانی‌های کربناتی (آهک) و سولفاتی (ژیپس یا سولفیدها) است که با زمین‌شناسی آتشفشانی و دگرگونی منطقه سازگار است؛ به این ترتیب که سیالات هیدروترمال با سنگ‌های کربناته و سولفاته برهم‌کنش کرده و آب را از Ca ، HCO_3 و SO_4 غنی می‌سازند. حضور انواع Na-Cl و Mg-SO_4 در برخی نمونه‌ها (مانند C10، C19 و C31) بیانگر تأثیر موضعی منابع شور یا ورودی‌های هیدروترمال عمقی‌تر است. چشمه‌های آب گرم (۳۱ تا ۵۴ درجه سلسیوس) با TDS متوسط (میانگین ۲۲۰ میلی گرم بر لیتر) و غلظت‌های بالای SO_4 (تا ۱۳۹ میلی گرم بر لیتر) و HCO_3 (تا ۱۷۵ میلی گرم بر لیتر) بیانگر برهم‌کنش طولانی آب و سنگ در سامانه زمین‌گرمایی هستند. چشمه‌های سرد نیز روندهای یونی مشابهی نشان می‌دهند، اما در برخی نمونه‌ها (مانند C28 و C33) غلظت Cl بالاتری دیده می‌شود که احتمالاً به انحلال گازهای هیدروترمال (HCl) یا اختلاط با سیالات عمقی غنی از کلر مربوط است. گازهای هیدروترمال مانند CO_2 با منشأ آتشفشانی نیز می‌توانند با آب زیرزمینی واکنش داده و به تولید HCO_3 و افزایش SO_4 و Ca کمک کنند.



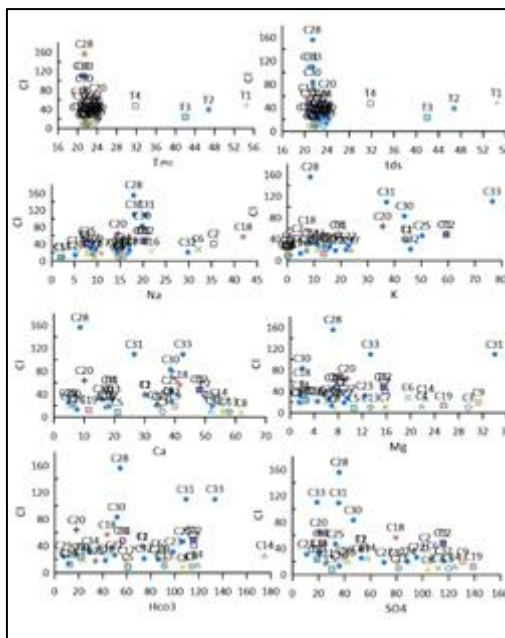
شکل (۲): نمودار آماری آنیون‌ها و کاتیون‌های آب چشمه‌های گرم و سرد منطقه به همراه مقادیر EC نمونه‌ها

روابط یونی، همبستگی زمین‌شیمیایی و منشأ عناصر

کلر یونی محافظه کارانه با واکنش‌پذیری اندک است و به عنوان ردیاب مناسبی برای شناسایی منشأ یون‌هایی مانند Ca ، K ، Mg و Na در آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ای به کار می‌رود. در منطقه مورد مطالعه، چشمه‌های گرم و سرد همبستگی ضعیفی میان کلر و سایر یون‌ها نشان می‌دهند (شکل ۳). چشمه‌های سرد نسبت Cl/HCO_3 بالاتری دارند که بیانگر مسیرهای جریان کوتاه‌تر و گردش سریع‌تر است، درحالی‌که چشمه‌های گرم نسبت Cl/HCO_3 پایین‌تری نشان می‌دهند که مسیرهای جریان طولانی‌تر و گردش عمیق‌تر را نشان می‌دهد. نسبت پایین Cl/Na در چشمه‌های گرم بیانگر برهم‌کنش طولانی مدت آب و سنگ و زمان ماند طولانی است.

بررسی همبستگی یون‌ها و پارامترها (جدول ۴) روابط قوی محدودی را نشان می‌دهد. مهم‌ترین همبستگی میان HCO_3 و Ca برابر با ۰/۸۱ و نیز با EC به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۷۳ مشاهده می‌شود که بیانگر فرایند انحلال کربنات، معمول در آبخوان‌های آهکی یا دولومیتی است. همبستگی متوسط SO_4 و Ca برابر با ۰/۶۰ نیز بیانگر انحلال ژیپس یا حضور کانی‌های سولفاته است. همبستگی معکوس دما و pH با r برابر با منفی ۰/۵۷- نیز احتمالاً ناشی از وابستگی حلالیت CO_2 به دما است؛ در دماهای

بالا تر، حلالیت CO_2 کاهش یافته، غلظت HCO_3 و CO_3 کم می‌شود و pH افت می‌کند که ویژگی مشخصه سامانه‌های زمین گرمایی است. نسبت بالای Cl/HCO_3 در چشمه‌های سرد بیانگر برهم کنش محدود آب و سنگ به دلیل مسیرهای جریان کوتاه است که ماهیت محافظه کارانه کلر را حفظ می‌کند؛ در مقابل، نسبت پایین این نسبت در چشمه‌های گرم بازتاب دهنده فرایندهای ژئوشیمیایی گسترده تر مرتبط با گردش عمیق تر و زمان ماند بیشتر است.



شکل (۳): روابط بین SO_4 ، HCO_3 ، Ca ، K ، Na ، TDS و Mg در برابر یون Cl

جدول (۴): ماتریس همبستگی پارامترهای فیزیکوشیمیایی و یون‌های اصلی چشمه‌های آب گرم و سرد

پارامتر	دما	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃
دما	1	57/0-	09/0	02/0-	06/0-	03/0-	31/0	01/0-	00/0	02/0
pH	57/0-	1	01/0	11/0	05/0	04/0-	25/0-	14/0-	07/0	07/0
EC	09/0	01/0	1	73/0	54/0	73/0	50/0	27/0	52/0	75/0
Ca	02/0-	11/0	73/0	1	31/0	07/0	10/0	11/0-	60/0	81/0
Mg	06/0-	05/0	54/0	31/0	1	07/0-	09/0-	02/0	50/0	54/0
Na	03/0-	04/0-	37/0	07/0	07/0-	1	09/0	30/0	22/0	02/0-
K	31/0	25/0-	50/0	10/0	09/0-	09/0	1	47/0	13/0-	20/0
Cl	01/0-	14/0-	27/0	11/0-	02/0	30/0	47/0	1	35/0-	10/0
SO ₄	00/0	07/0	52/0	60/0	50/0	22/0	13/0-	35/0-	1	36/0
HCO ₃	02/0	07/0	75/0	81/0	54/0	02/0-	20/0	10/0	36/0	1

تفسیر دقیق تر غلظت پتاسیم نکات مهمی درباره منشأ این یون آشکار می‌سازد. برخلاف بیشتر آب‌های زیرزمینی که در آن‌ها غلظت پتاسیم به طور معمول کمتر از سدیم است (به دلیل جذب ترجیحی K توسط کانی‌های رسی مانند ایلیت)، در بخش قابل توجهی از نمونه‌های سهند (از جمله T1 و نمونه‌های C20 ، C25 ، C30 تا C33) غلظت پتاسیم بر حسب میلی گرم بر لیتر از سدیم فراتر می‌رود. با این حال، بررسی نسبت‌های معادل گرمی (میلی‌اکی‌والان بر لیتر) نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها کلسیم همچنان کاتیون غالب باقی می‌ماند، زیرا وزن معادل پایین تر کلسیم موجب سهم بیشتر آن در بار یونی کل می‌شود؛ به همین دلیل تیپ آب این نمونه‌ها در دیگرام پایپر همچنان کلسیمی طبقه بندی می‌شود.

ماتریس همبستگی (جدول ۴) نشان می‌دهد پتاسیم با هدایت الکتریکی و کلر همبستگی مثبت متوسط و با سولفات و pH همبستگی ضعیف تا منفی دارد. این الگو نشان می‌دهد منشأ پتاسیم بیشتر با اختلاط با سیالات شور یا کلره عمقی و انحلال کانی‌های سیلیکاتی پتاسیم دار (مانند فلدسپار پتاسیم و بیوتیت موجود در سنگ‌های آندزیتی-داسیتی منطقه) مرتبط است تا با

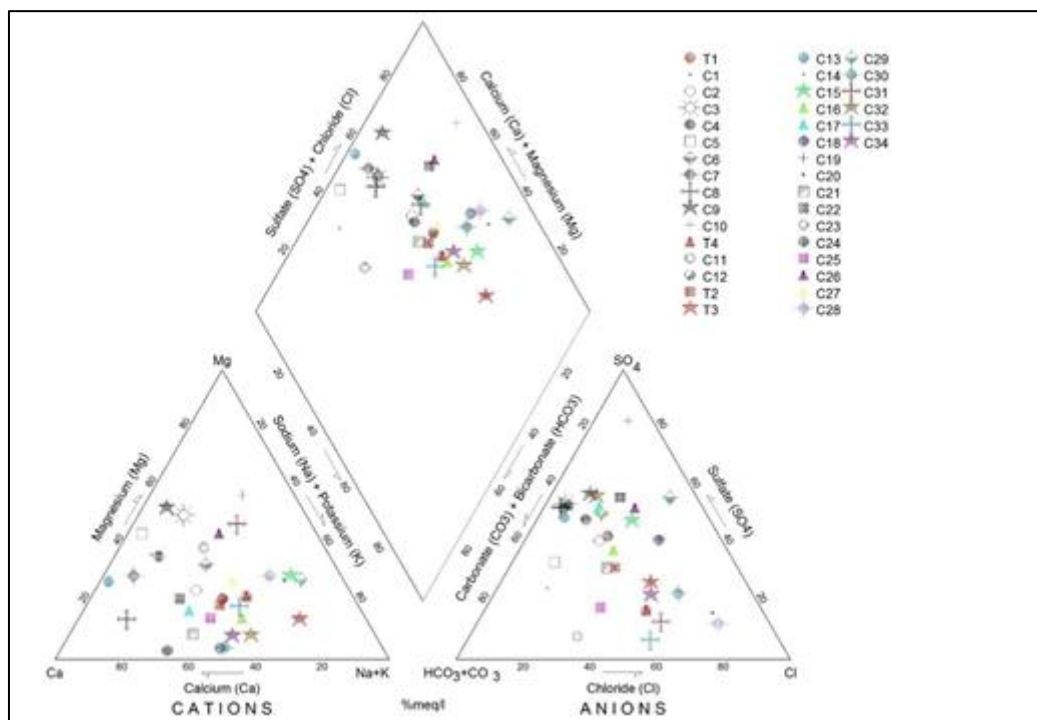
انحلال کانی‌های کربناتی یا سولفات‌ها. غلظت نسبتاً بالای پتاسیم در برخی نمونه‌های چشمه گرم و سرد همچنین می‌تواند ناشی از تبادل یونی با کانی‌های رسی دگرسانی هیدروترمال یا آزادسازی پتاسیم طی دگرسانی شیشه آتشفشانی باشد. این یافته با کاربرد محدود زمین‌دماسنج‌های کاتیونی سازگار است، زیرا غلظت پتاسیم در این نمونه‌ها بیشتر تحت تأثیر فرایندهای سطحی و اختلاط قرار دارد تا تعادل شیمیایی با سنگ مخزن در دمای بالا.

تیپ‌بندی هیدروشیمیایی آب بر پایه دیاگرام‌های پایپر، دوروف و $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$

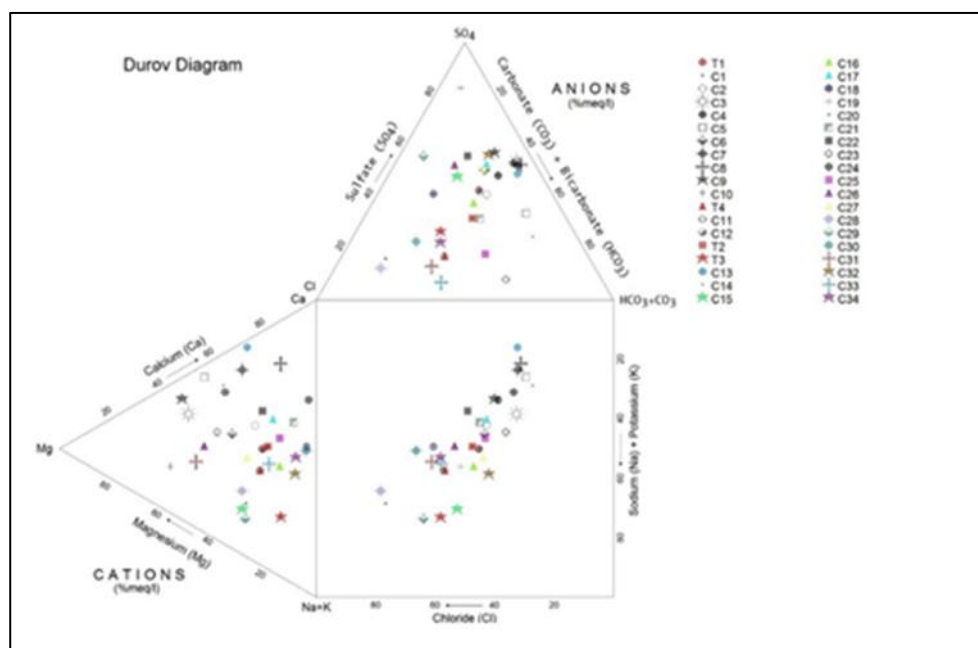
دیاگرام پایپر (شکل ۴) نشان می‌دهد که نمونه‌های چشمه‌های سرد عمدتاً در ضلع کلسیمی مثلث کاتیونی و نزدیک به رأس سولفات-بی‌کربناته مثلث آنیونی متمرکز شده‌اند که با غلبه گسترده تیپ‌های Ca-SO_4 و Ca-HCO_3 در این گروه سازگار است. نمونه‌های چشمه گرم پراکندگی بیشتری نشان می‌دهند. T_1 و T_2 در تیپ Ca-SO_4 ، T_4 در تیپ Ca-Cl و T_3 در تیپ Na-Cl قرار می‌گیرند که بیانگر تأثیرپذیری بیشتر چشمه‌های گرم از اختلاط با سیالات عمقی غنی از کلر است. با این حال، نمونه‌های هر دو گروه نزدیک به مرکز لوزی دیاگرام پایپر قرار دارند که بیانگر توازن نسبی میان غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها و نبود غلبه مشخص هیچ یونی در سطح کل مجموعه داده‌هاست. این وضعیت می‌تواند از چند منشأ ناشی شود: منشأ مختلط (ترکیب آب سطحی و زیرزمینی)، دستیابی به تعادل شیمیایی از طریق برهم‌کنش طولانی‌مدت با سنگ‌ها و کانی‌ها در طول مسیر جریان، یا در مورد چشمه‌های گرم، منشأ عمقی که در آن آب‌های هیدروترمال با سنگ‌های داغ در فشار بالا و طی زمان طولانی به تعادل رسیده‌اند.

دیاگرام دوروف (شکل ۵) الگوی مشابهی را تأیید می‌کند: چشمه‌های سرد عمدتاً در بخش مرکزی تا کلسیمی-سولفات/بی‌کربناته دیاگرام متمرکزند که بیانگر منشأ سطحی یا برهم‌کنش با سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی کم‌عمق است؛ در مقابل، پراکندگی نمونه‌های چشمه گرم (به‌ویژه T_3 و T_4) به سمت بخش کلریدی دیاگرام، بیانگر تعادل با سنگ‌های داغ‌تر یا اختلاط با سیالات عمقی‌تر است.

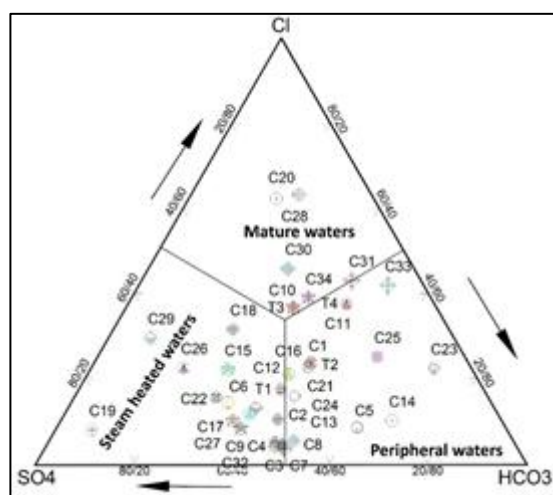
دیاگرام مثلثی $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ (شکل ۶) بر پایه طبقه‌بندی (Giggenbach 1988)، تفاوت‌های هیدروشیمیایی روشنی را میان دو گروه چشمه آشکار می‌سازد: بیشتر نمونه‌های چشمه سرد در محدوده آب‌های پیرامونی (Peripheral Waters) قرار می‌گیرند که بیانگر تأثیر فرایندهای سطحی و منشأ کم‌عمق است؛ برخی نمونه‌های چشمه سرد نیز در محدوده آب‌های بخاردار (Steam Heated Waters) با غلظت بالای SO_4 قرار دارند که به اکسایش سولفیدها یا انحلال گازهای آتشفشانی مربوط می‌شود. از میان چهار چشمه آب گرم، نمونه‌های T_4 و T_2 (۵۰ درصد در محدوده آب‌های پیرامونی، نمونه T_1 ، ۲۵ درصد در محدوده آب‌های بخاردار، و نمونه T_3 ، ۲۵ درصد در محدوده آب‌های بالغ (Mature Waters) با غلظت بالای Cl و نشانه منشأ عمقی قرار می‌گیرد. این الگو نشان می‌دهد که برخلاف چشمه‌های سرد که به‌طور یکنواخت منشأ کم‌عمق دارند، چشمه‌های گرم طیفی از تکامل ژئوشیمیایی را از آب‌های تازه تا آب‌های بالغ عمقی نشان می‌دهند و کاربرد دیاگرام $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ را در تمایز منشأ و فرایندهای هیدروشیمیایی چشمه‌های گرم و سرد منطقه تأیید می‌کند.



شکل (۴): دیاگرام پایپر ترکیبات شیمیایی اصلی چشمه‌های گرم و سرد



شکل (۵): دیاگرام دوروف ترکیبات شیمیایی اصلی چشمه‌های گرم و سرد



برآورد دمای مخزن با روش‌های ژئوترموتری

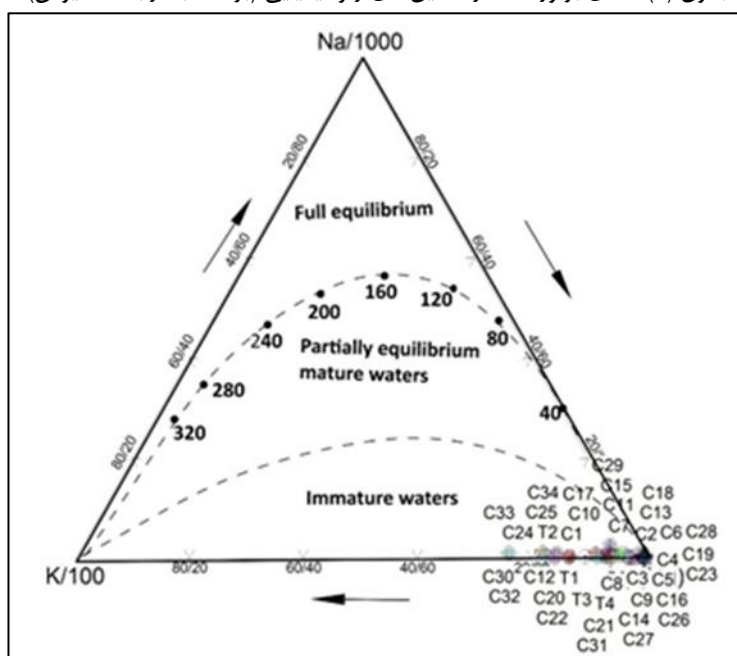
ژئوترموتری یکی از ابزارهای اصلی برای برآورد دمای مخزن زمین‌گرایی بر پایه ترکیب شیمیایی سیالات صعودکننده به سطح است. زمین‌دماسنج‌های سیلیسی معمولاً در سامانه‌هایی که واکنش آب و سنگ به تعادل نسبی رسیده و اختلاط محدودی رخ داده باشد، عملکرد قابل‌اعتمادتری دارند؛ در مقابل، زمین‌دماسنج‌های کاتیونی به شدت تحت تأثیر نسبت‌های Na ، K ، Ca و Mg قرار دارند و کارایی آن‌ها در آب‌های نابالغ یا دستخوش اختلاط به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. با به‌کارگیری هر دو گروه از این روش‌ها برای نمونه‌های چشمه‌های آب‌گرم سهند (T1 تا T4)، می‌توان دمای مخزن را برآورد و میزان اعتبار هر روش را در این سامانه ارزیابی کرد. در ادامه، نتایج این برآوردها ارائه و تفسیر می‌شود.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، زمین‌دماسنج کوارتز قابل‌اعتمادترین برآورد دما را برای نمونه‌های چشمه گرم، در محدوده ۸۸/۷ تا ۱۲۳/۲ درجه سلسیوس، ارائه می‌دهد که بیانگر سامانه‌ای با دمای متوسط تا نسبتاً بالاست. زمین‌دماسنج کلسدونی دماهای پایین‌تری (۵۷/۹ تا ۹۵/۰ درجه سلسیوس) نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از خنک‌شدن هنگام صعود یا اختلاط با آب‌های کم‌عمق باشد. زمین‌دماسنج‌های کریستوبالیت و سیلیس بی‌شکل دماهای بسیار پایین یا منفی به دست می‌دهند که نشان می‌دهد این فازهای سیلیسی با سیالات زمین‌گرایی در تعادل نیستند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از زمین‌دماسنج کوارتز را برای برآورد دقیق‌تر دما در این سامانه تأیید می‌کند، زیرا کمترین تأثیر را از فرایندهای خنک‌سازی و اختلاط می‌پذیرد.

زمین‌دماسنج‌های کاتیونی نتایج پیچیده‌تری ارائه می‌دهند. زمین‌دماسنج Na-K دماهای غیرواقعی بسیار بالایی (۵۴۰ تا ۱۴۷۳ درجه سلسیوس) نشان می‌دهد که احتمالاً ناشی از شرایط عدم تعادل یا اختلاط با منابع آبی دیگر است و کاربرد این روش را برای این نمونه‌ها نامناسب می‌سازد. زمین‌دماسنج‌های Na-K-Ca ، Na-K-Ca-Mg و Mg-Li دماهایی معقول‌تر اما همچنان بالا (بیش از ۲۸۵ تا بیش از ۳۵۰ درجه سلسیوس) نشان می‌دهند که وجود مخزن عمقی با دمای بالا را مطرح می‌سازد؛ با این حال، این نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند، زیرا احتمالاً تحت تأثیر اختلاط یا پیچیدگی‌های کانی‌شناختی قرار دارند. نمودار مثلی Na-K-Mg (شکل ۷) نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های چشمه گرم و سرد، در محدوده آب‌های نابالغ (Immature Waters) قرار می‌گیرند که بیانگر عدم دستیابی این آب‌ها به تعادل کامل شیمیایی با سنگ‌های مخزن عمقی و تأثیرپذیری از فرایندهای سطحی یا اختلاط با آب‌های زیرزمینی کم‌عمق است. غلظت بالای منیزیم و پایین سدیم و پتاسیم بیانگر برهم‌کنش محدود با سنگ‌های داغ عمقی و فقدان بلوغ حرارتی است. بر این اساس، در سامانه زمین‌گرایی سهند نمی‌توان به زمین‌دماسنج‌های کاتیونی اتکا کرد و زمین‌دماسنج کوارتز، با برآورد دمای مخزن در محدوده ۷/۸۸ تا ۲/۱۲۳ درجه سلسیوس (میانگین حدود ۱۰۷ درجه)، مناسب‌ترین برآورد را ارائه می‌دهد. هرچند محاسبات دقیق برای نمونه‌های T3 و T4 به ترتیب ۲/۱۰۷ و ۸/۱۰۸ درجه را نشان می‌دهد که با میانگین حدود ۱۰۲ درجه برای کل سامانه سازگار است.

زمین‌دماسنج	T1	T2	T3	T4
کوارتز	104.29	88.72	111.72	123.17
کوارتز (حداکثر افت بخار)	104.69	91.19	111.08	120.85
کلسدونی	74.55	57.90	82.57	95.04
آلفا-کریستوالیت	53.85	38.63	61.17	72.52
بتا-کریستوالیت	6.97	< 0	13.86	24.61
سیلیس بی‌شکل	< 0	< 0	< 0	4.49
Na-K	353	490	210	208
Na-K-Ca	> 300	> 300	294.78	285.29
Na-K-Ca-Mg	346.88	> 350	> 350	> 350
Mg-Li	311.07	338.32	> 350	> 350

جدول (۲): دمای برآورد شده از تحلیل‌های ژئوشیمیایی (بر حسب درجه سلسیوس)



شکل (۷): دیاگرام مثلی Na-K-Mg

شاخص اشباع کانی‌ها و پتانسیل رسوب‌گذاری

شاخص اشباع (SI) کانی‌های محاسبه شده برای نمونه‌های چشمه گرم (T1 تا T4) ویژگی‌های ژئوشیمیایی مهمی از سامانه زمین‌گرمایی را آشکار می‌سازد (جدول ۳). برخلاف انتظار رایج در بسیاری از سامانه‌های زمین‌گرمایی سیلیسی، نمونه‌ها نسبت به کانی‌های سیلیسی کوارتز (SI بین ۰/۸۴ تا ۰/۹۹-) و کلسدونی (SI بین ۳/۱۲ تا ۱/۶۸-)، کم‌اشباع هستند که نشان می‌دهد سیال هنوز ظرفیت انحلال بیشتر این فازهای سیلیسی را دارد. در مقابل، نمونه‌ها نسبت به آراگونیت (SI بین ۰/۴۷ تا ۰/۸۷) و ژپس (SI بین ۰/۴۶ تا ۰/۱۱) اشباع تا فوق‌اشباع هستند که بیانگر گرایش به رسوب این دو کانی هنگام خنک‌شدن یا کاهش فشار CO₂ در سیال است. سایر کانی‌های کربناتی و سولفاتی، شامل کلسیت (SI بین ۸/۱۱ تا ۷/۵۷-) و دولومیت (SI بین ۵/۳۲ تا ۱/۶۷-) و انیدریت (SI بین ۷/۲۴ تا ۴/۵۸-) به شدت کم‌اشباع هستند و نشان می‌دهند آب همچنان توانایی انحلال بیشتر این کانی‌ها را در صورت وجود در مخزن دارد. کم‌اشباعی هالیت (SI بین ۲/۶۶ تا ۰/۷۷-) و سپولیت (SI بین ۳/۲۵ تا ۱/۶۸-) نیز بازتاب‌دهنده شوری پایین و غلظت ناکافی منیزیم و سیلیس برای تشکیل این کانی‌هاست. این یافته‌ها رفتار ژئوشیمیایی آب چشمه‌های گرم را روشن می‌سازد؛ برخلاف تصور رایج، اشباع‌شدگی نسبت به سیلیس در این سامانه مشاهده نشد و بنابراین خطر رسوب سیلیسی در کوتاه‌مدت محدود است. در مقابل، اشباع‌شدگی نسبت به آراگونیت و ژپس می‌تواند مشکلات رسوب‌گذاری

(اسکیل) کربناته و سولفات را در خطوط لوله و تجهیزات سطحی ایجاد کند که چالش رایجی در سامانه‌های زمین‌گرمایی کربناته است. کم‌اشباعی کلسیت، دولومیت، انیدریت، هالیت و سپیولیت نیز نشان می‌دهد آب همچنان قادر به انحلال این کانی‌هاست، درحالی‌که شوری پایین بیانگر رقیق بودن سیال زمین‌گرمایی است. شناخت این وضعیت‌های اشباع برای مدیریت خطر رسوب‌گذاری و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع زمین‌گرمایی اهمیت دارد.

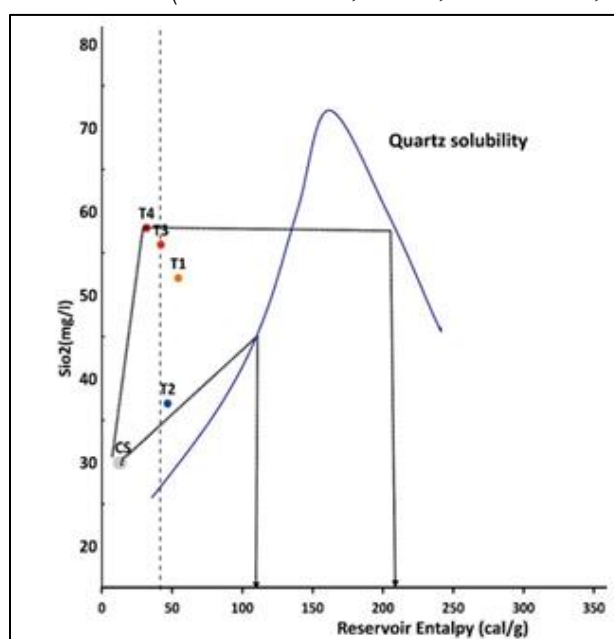
جدول (۳): شاخص اشباع نمونه‌های آب چشمه‌ها نسبت به کانی‌های مختلف

نمونه	سپیولیت	کوارتز	هالیت	ژپیس	دولومیت	کلسدونی	کلسیت	آراگونیت	انیدریت
T1	-1.68	-0.99	-0.77	0.18	-1.67	-1.68	-7.59	0.52	-4.58
T2	-2.19	-2.01	-1.82	0.11	-3.82	-2.12	-8.11	0.47	-7.24
T3	-3.25	-2.84	-2.66	0.33	-5.32	-3.12	-7.99	0.71	-6.62
T4	-2.89	-1.73	-1.58	0.46	-3.18	-2.66	-7.57	0.87	-4.68

دیاگرام سیلیس-آنتالپی، فرایندهای اختلاط و کنترل‌های ساختاری

برآورد دمای مخزن، گامی کلیدی در ارزیابی پتانسیل انرژی و بهره‌برداری بهینه از منابع زمین‌گرمایی است که با روش‌های مختلفی از جمله زمین‌دماسنج‌های شیمیایی، دیاگرام‌های آنتالپی-سیلیس و مدل‌سازی ژئوشیمیایی انجام می‌شود. بر اساس شکل ۸، دیاگرام سیلیس-آنتالپی چشمه‌های آب گرم منطقه بینشی مهم درباره ویژگی‌های حرارتی و شیمیایی سامانه زمین‌گرمایی فراهم می‌کند. نمونه‌های چشمه گرم (T1 تا T4) در محدوده آنتالپی متوسط (۱/۱۳۳ تا ۷/۲۲۷) کیلوژول بر کیلوگرم با غلظت سیلیس ۳۷ تا ۵۸ قسمت در میلیون قرار می‌گیرند. نبود روند مشخص میان آنتالپی و غلظت سیلیس، احتمال اختلاط با آب‌های آرام‌تر یا تغییرات در ترکیب شیمیایی مخزن را مطرح می‌سازد.

در مقابل، نمونه چشمه سرد (CS) آنتالپی پایین (۶۲/۸ کیلوژول بر کیلوگرم) و غلظت سیلیس پایینی (۳۰ قسمت در میلیون) نشان می‌دهد که با منشأ کم‌عمق و غیرزمین‌گرمایی آن سازگار است. این دیاگرام ماهیت زمین‌گرمایی چشمه‌های آب گرم را نشان می‌دهد و فرایندهای احتمالی خنک‌شدن یا اختلاط طی صعود را آشکار می‌سازد، درحالی‌که چشمه سرد تأثیر آب‌های سطحی یا زیرزمینی کم‌عمق را بازتاب می‌دهد. شباهت هیدروشیمیایی رخساره‌های چشمه‌های گرم و سرد نیز منشأ مشترک تغذیه جوی را نشان می‌دهد؛ اختلاط میان سیالات زمین‌گرمایی صعودکننده و آب‌های زیرزمینی سرد کم‌عمق نقش مهمی در کنترل دما و ترکیب شیمیایی سطحی ایفا می‌کند. چنین رفتار غالب اختلاط پیش‌تر در سامانه‌های زمین‌گرمایی آتشفشانی ایران، ترکیه و ایسلند نیز گزارش شده است (Karimi et al., 2020; Kim et al., 2020).



شکل (۸): دیاگرام سیلیس-آنتالپی چشمه‌های آب گرم منطقه مورد مطالعه

عناصر ساختاری نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل پراکندگی و شیمی مظاهر زمین‌گرایی منطقه سهند دارند. سامانه‌های گسلی مرتبط با پهنه گسل شمال تبریز، مسیرهای ترجیحی برای صعود سیالات گرم عمقی به سطح فراهم می‌کنند. توزیع مکانی چشمه‌های آب گرم در امتداد روندهای ساختاری اصلی، این تفسیر را تقویت می‌کند که افزایش تراوایی در طول پهنه‌های گسلی، مهاجرت عمودی سیال را تسهیل می‌کند. تفاوت‌های دما و ترکیب شیمیایی چشمه‌ها بیشتر به تفاوت در عمق گردش و زمان ماند سیال مربوط است تا منابع اساساً متفاوت. کنترل‌های ساختاری مشابهی در سایر کمان‌های آتشفشانی از جمله کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر و سامانه‌های زمین‌گرایی ترکیه گزارش شده است، جایی که تراوایی کنترل‌شده با گسل، صعود و بازتاب سطحی سیال زمین‌گرایی را هدایت می‌کند (Rezaei et al., 2023).

با توجه به دماهای برآوردشده مخزن و ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی، سامانه زمین‌گرایی سهند منبعی با دمای متوسط تا بالا به‌شمار می‌رود که پتانسیل کاربردهای مستقیم مانند گرمایش فضا، کشاورزی گلخانه‌ای و بالتوترایی استفاده درمانی از آب‌های معدنی) را دارد؛ نبود سیالات بسیار شور و مینرالیزاسیون نسبتاً پایین آب‌ها نیز برای بهره‌برداری زمین‌گرایی مطلوب است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در برنامه‌های آینده توسعه و اکتشاف این منطقه، موارد زیر مدنظر قرار گیرد: نخست، پایش دوره‌ای غلظت سیلیس محلول و شاخص اشباع کانی‌های سیلیسی به‌منظور مدیریت خطر رسوب‌گذاری (اسکیل) در خطوط لوله و تجهیزات سطحی، که با توجه به گرایش به اشباع‌شدگی سیلیس در نمونه‌های این پژوهش، چالشی محتمل هنگام خنک‌شدن و صعود سیال خواهد بود؛ دوم، حفر گمانه‌های اکتشافی در امتداد پهنه گسل شمال تبریز و سایر روندهای ساختاری اصلی، با توجه به نقش این عناصر ساختاری در هدایت صعود سیالات گرم؛ و سوم، تلفیق داده‌های ایزوتوپی و ژئوفیزیکی در مطالعات آتی برای کاهش عدم قطعیت ناشی از اختلاط سیالات و بهبود برآورد عمق و دمای مخزن. چالش‌های مشابه رسوب‌گذاری سیلیس پیش‌تر در سایر سامانه‌های زمین‌گرایی غنی از سیلیس نیز گزارش شده و بر اهمیت پایش ژئوشیمیایی مستمر تأکید می‌کند (Gunnarsson et al., 2014). یافته‌های این پژوهش همچنین به مجموعه دانش رو به رشد درباره سامانه‌های زمین‌گرایی کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر می‌افزاید.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش با یافته‌های سایر مطالعات هیدروژئوشیمیایی در کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر و مناطق زمین‌گرایی مشابه در ایران و ترکیه همخوانی قابل‌توجهی دارد. تیپ غالب $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ و مینرالیزاسیون پایین چشمه‌های سهند مشابه ویژگی‌های گزارش‌شده برای سامانه زمین‌گرایی آبگرم-آج است، جایی که رضایی و همکاران (۲۰۱۸) نیز اختلاط گسترده سیالات زمین‌گرایی با آب‌های زیرزمینی کم‌عمق را عامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب دانستند. برآورد دمای مخزن با زمین‌دماسنج کوارتز (۷/۸۸ تا ۲/۱۲۳ درجه سلسیوس) در سهند در محدوده مشابهی با سامانه‌های زمین‌گرایی دنیزی و قزل‌دره در ترکیه قرار دارد که توسط گوندوز و کایا (۲۰۱۸) و چولاک و همکاران (۲۰۱۳) با دماهای مخزنی نزدیک به این محدوده گزارش شده‌اند و هر دو سامانه را در رده منابع زمین‌گرایی با دمای متوسط قرار می‌دهند. ناکارآمدی زمین‌دماسنج‌های کاتیونی به دلیل عدم تعادل شیمیایی، ویژگی مشترکی است که در بسیاری از سامانه‌های زمین‌گرایی آتشفشانی جوان از جمله سامانه‌های ایسلندی (Gunnarsson et al., 2014) و سامانه‌های ایران و ترکیه (Karimi et al., 2022) نیز مشاهده شده و تأییدکننده کاربرد محدود این روش‌ها در آب‌های نابالغ است. اشباع‌شدگی نسبت به سیلیس و کم‌اشباعی نسبت به کربنات‌ها، الگویی است که وایت (۱۹۸۸) نیز آن را ویژگی مشخصه سامانه‌های زمین‌گرایی غرب آمریکا دانسته است.

با این حال، تفاوت‌هایی نیز میان سهند و سامانه‌های مشابه دیده می‌شود؛ برای نمونه، غلظت نسبتاً بالای پتاسیم مشاهده‌شده در برخی چشمه‌های سهند بیشتر از میزان معمول گزارش‌شده در سامانه‌های زمین‌گرایی نیپال (Gautam et al., 2019) است که می‌تواند به تفاوت در سنگ‌شناسی منشأ سنگ‌های آندزیتی-داسیتی غنی از فلدسپار پتاسیم مربوط باشد. به‌طور کلی، این مقایسه نشان می‌دهد که سامانه زمین‌گرایی سهند از نظر رفتار هیدروژئوشیمیایی و محدودیت‌های ژئوترموتری با سایر سامانه‌های زمین‌گرایی آتشفشانی جوان همخوانی دارد، هرچند ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی، تفاوت‌های جزئی در ترکیب یونی ایجاد می‌کند.

در این پژوهش، با رویکردی یکپارچه هیدروژئوشیمیایی و ژئوترموتری، ۳۸ نمونه از چشمه‌های آب گرم و سرد منطقه آتشفشانی سهند در شمال غرب ایران (شامل ۴ چشمه آب گرم و ۳۴ چشمه آب سرد) بررسی و پتانسیل زمین‌گرایی سامانه ارزیابی شد. نتایج نشان داد در حدود ۶۶ درصد نمونه‌ها کلسیم کاتیون غالب و در حدود ۵۸ درصد نمونه‌ها (سولفات آنیون غالب است؛ بر این اساس، تیپ آب غالب از نوع $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ با جامدات محلول کل پایین است که بیانگر مینرالیزاسیون ضعیف و برهم‌کنش قوی آب با کانی‌های کربناتی و سولفاته است.

شباهت کلی رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های آب گرم و سرد بیانگر منشأ مشترک تغذیه جوی است، به‌طوری‌که تفاوت‌های ترکیب شیمیایی بیشتر تحت تأثیر عمق گردش، زمان ماند و اختلاط قرار دارد تا منشأ متفاوت سیال. بر پایه دیگرام مثلی $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ ، از میان چشمه‌های آب گرم، ۵۰ درصد در محدوده آب‌های پیرامونی، ۲۵ درصد در محدوده آب‌های بخاردار و ۲۵ درصد در محدوده آب‌های بالغ با نشانه منشأ عمقی قرار می‌گیرند؛ چشمه‌های سرد نیز عمدتاً نماینده آب‌های پیرامونی با گردش کم عمق هستند. محاسبات ژئوترموتری نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها، دیگرام مثلی Na-K-Mg وضعیت نابالغ (Immature Waters) را تأیید می‌کند؛ بر این اساس، به دلیل عدم تعادل شیمیایی و اختلاط سیالات زمین‌گرایی با آب‌های زیرزمینی کم عمق، نمی‌توان به زمین‌دماسنج‌های کاتیونی اتکا کرد. در مقابل، زمین‌دماسنج‌های سیلیسی، به‌ویژه زمین‌دماسنج کوارتز، برآورد قابل‌اعتمادتری از دمای مخزن در محدوده $(7/88)$ تا $(2/123)$ درجه سلسیوس) با میانگین نزدیک به 107 درجه سلسیوس برای هر چهار نمونه چشمه آب گرم ارائه می‌دهند که بیانگر وجود منبع زمین‌گرایی با دمای متوسط تا نسبتاً بالا و قابلیت بهره‌برداری مستقیم و همچنین پتانسیل اکتشافی بیشتر است.

افزون بر این، نتایج محاسبه شاخص اشباع کانی‌ها نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های چشمه گرم نسبت به کانی‌های سیلیسی (کوارتز و کلسدونی) کم‌اشباع هستند (SI منفی)، در حالی که نسبت به آراگونیت و ژیس اشباع تا فوق‌اشباع می‌باشند (SI مثبت)؛ اشباع‌شدگی نسبت به کانی‌های سیلیسی بیانگر خطر بالقوه رسوب‌گذاری است که احتمالاً طی خنک‌شدن محلول‌ها رخ می‌دهد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که هیدروژئوشیمی چشمه‌های سهند تحت تأثیر ترکیبی از فعالیت هیدروترمال، سنگ‌شناسی، کنترل ساختاری و اختلاط قرار دارد؛ در حدود دو سوم نمونه‌ها، نشانه غلبه ژئوشیمیایی کلسیم و بیش از نیمی از نمونه‌ها (۵۸ درصد) غلبه سولفات را نشان می‌دهند که مؤید تأثیرپذیری گسترده از برهم‌کنش آب و سنگ در سامانه است. کاربرد توان طبقه‌بندی هیدروژئوشیمیایی، ژئوترموتری و مدل‌سازی ژئوشیمیایی، رویکردی مستحکم برای مطالعه فعالیت زمین‌گرایی در مناطق آتشفشانی به‌شمار می‌رود. نتایج این پژوهش برای شناخت بهتر فعالیت زمین‌گرایی منطقه حائز اهمیت است و منطقه آتشفشانی سهند را، با برآورد دمای مخزن نزدیک به 107 درجه سلسیوس، به‌عنوان منطقه‌ای امیدبخش برای اکتشاف زمین‌گرایی معرفی می‌کند.

منابع

- Abbaszadeh, M., & Ghafory-Ashtiany, M. (2017). Geological features and volcanic activity of the Sahand region, northwestern Iran. *Journal of Volcanology*, 45(3), 121-135.
- Aghahosseini, R., Jalilinasrabady, S., & Ghasemi, M. (2023). Machine learning-assisted geothermometry: Improving temperature estimation in heterogeneous geothermal reservoirs. *Geothermics*, 108, 102603.
- Akıncı, Ö., Yılmaz, M., & Arslan, A. (2015). Geochemical characteristics and geothermal potential of the Denizli geothermal field, Turkey. *Geothermics*, 56, 42-50.
- Alavi, M., & Takin, M. (2020). Tectonic evolution of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc. *Geological Journal*, 55(4), 983-1004.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). CRC Press.
- Çolak, S., Yılmaz, M., & Aydın, H. (2013). Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal waters in the Kızıldere geothermal field, Turkey. *Geothermics*, 46, 36-47.

- Durov, S. A. (1948). Natural waters and graphic representation of their composition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 59, 87-90.
- Ebrahimi, M., Noorollahi, Y., & Yousefi, H. (2023). Geothermal energy potential of the Sahand volcanic zone: A feasibility study for sustainable development in northwest Iran. *Renewable Energy*, 202, 343-356.
- Fedele, S., Saccorotti, G., & Romano, G. (2023). Geothermal potential of the Sahand Volcanic Region: An overview. *Geothermics*, 94, 101984.
- Fournier, R. O. (1981). Application of geothermometry to geologic studies. *Geothermal Resources Council Transactions*, 5, 15-22.
- Fournier, R. O. (1999). Geochemistry of thermal waters. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 27, 213-245.
- Gautam, P., Shrestha, S., & Sharma, P. (2019). Hydrogeochemical processes and influence of dissolved ions in geothermal systems of Nepal. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(4), 1901-1918.
- Ghasemi, H., & Talbot, C. J. (2006). Structural controls on volcanism in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Arc, Iran. *Tectonophysics*, 413(1-4), 149-160.
- Giggenbach, W. F. (1981). Geothermal mineral equilibria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(3), 393-410.
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12), 2749-2765.
- Gunnarsson, I., Sigurðsson, O., & Arnórsson, S. (2014). Geochemical analysis of geothermal fluids from the Hellisheiði power plant, Iceland. *Geothermics*, 50, 61-69.
- Gündüz, O., & Kaya, M. (2018). Geothermal resources and potential in the Denizli region, Turkey: Geochemical and isotopic studies. *Environmental Earth Sciences*, 77, 329.
- Karimi, S., Taghipour, B., & Türkmenoğlu, A. G. (2022). Comparative hydrogeochemistry of volcanic geothermal systems in Iran and Türkiye: The role of magmatic degassing and fluid-rock interaction. *Applied Geochemistry*, 146, 105476.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.
- 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(18), 635.
- Tüfekçi, V., Güler, C., & Yılmaz, M. (2014). Geochemical investigation of the Kızıldere geothermal field, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285, 26-39.
- White, D. E. (1988). Geochemistry of geothermal waters in the western United States: Applications of geothermometry. *Geothermics*, 17(3-4), 299-305.
- Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Jalilinasrabady, S. (2023). Reliability of integrated silica-cation geothermometers in Iranian geothermal systems. *Geothermics*