Payame Noor University

Journal of Structural Geology and Applied Tectonics (SGAT)

***Journal homepage*: https://sgat.journals.pnu.ac.ir/**

Tectonic Controls on the Formation of the Ramsar Hot Springs, Central Alborz: A Hydrogeochemical and Structural Approach

Amin Zandi Shafaq*[1]

1- M.Sc., Technical Expert, Regional Water Company of Tehran, Tehran, Iran.

Keywords

Central Alborz,
Hydrogeochemistry,
Ramsar hot springs,
South Caspian subduction,
Thrust faults

Extended Abstract

Introduction

The Central Alborz Range marks the southern boundary of the South Caspian Basin and forms a key segment of the Alpine-Himalayan orogenic belt (Allen *et al*., 2003; Zanchi *et al*., 2009). The northern slopes of the Alborz are actively influenced by the ongoing convergence between the South Caspian block and the Eurasian plate (Ritz *et al*., 2006), generating a complex network of strike-slip and thrust faults that significantly affect the regional hydrogeology (Eshaghpour & Alizadeh, 2015). The Ramsar hot springs, located along the Caspian Fault in the northern Central Alborz, have gained worldwide fame due to their exceptionally high natural radioactivity (Alizadeh, 2022). Previous research has focused on geochemistry (Nabavi, 1976; Nazari & Shahidi, 2011; Nazemi, 1976) and medical aspects (Ghiassi-Nejad *et al*., 2002), but the precise role of individual faults in controlling fluid circulation and thermal characteristics remains unclear. Furthermore, the mechanism of heat transfer and fluid ascent pathways have not been integrated into a coherent tectonic-hydrothermal model. This study aims to address these questions by integrating hydrogeochemical data with structural analysis to: (1) characterize the springs and classify them by origin, (2) analyze active fault systems and their relationship with spring emergence, and (3) propose a conceptual tectonic-hydrothermal model explaining water origin, heat source, and fluid ascent pathways.

Methodology

Geological maps (1:100,000 and 1:250,000) and fault data were obtained from the Geological Survey of Iran. Landsat 8 imagery (30 m resolution) and a DEM (12.5 m)

Receive: 2026-07-11

Accepted: 2026-10-22

Published: 2026-11-01

***Corresponding Author: Name and surname; E-mail: aminzandishafagh_geo@yahoo.com

How to cite this article: Zandi Shafaq, A. (2025). Tectonic Controls on the Formation of the Ramsar Hot Springs, Central Alborz: A Hydrogeochemical and Structural Approach. *Structural Geology and Applied Tectonics, 1*(2): 83-96. DOI: 10.30473/sgat.2026.78699.1014

Copyright © 2026, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.This is an open access article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

were processed in ArcGIS 10.8. Satellite images were enhanced using directional filters, and rose diagrams were generated using RockWorks.

Seven hot springs (Mother, Bridge, Sadat Mahalleh, Ashkargamab, Sang-e-Boneh-Kesh, Hotel, and Ab-Siah) were sampled. Geographic locations were recorded using GPS (±3 m accuracy). Temperature, pH, and electrical conductivity (EC) were measured on site using precalibrated instruments. Water samples were collected in polyethylene bottles, stored at 4°C, and transported to the laboratory.

Major cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) were determined using ICP-OES, and major anions (Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-) using Ion Chromatography. Ionic ratios (Na/Cl, Ca/Mg) were calculated, and the Giggenbach triangular diagram (Na-K-Mg) was employed to distinguish shallow from deep waters. All spatial data were integrated into ArcGIS to produce an overlay map, and distances from springs to major faults were calculated. Finally, a conceptual tectonic-hydrothermal model was proposed.

Results and Discussion

Physicochemical Characteristics: Spring water temperatures range from 29°C to 48°C, with the highest at Sadat Mahalleh (48°C) and the lowest at Ab-Siah (29°C). EC values vary widely from 10,040 to 27,610 µS/cm, with the highest at Hotel and the lowest at Ashkargamab. pH ranges between 6.2 and 6.5. Springs located along major faults (Hotel, Mother, Pol, Ab-Siah) exhibit significantly higher EC values than marginal springs (Sadat Mahalleh, Ashkargamab, Sang-e-Boneh-Kesh), indicating the direct influence of fault structures on dissolved mineral content.

Chemical Composition: Major ionic composition includes Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, and HCO_3^-. The highest Na^+ (5239.9 mg/L) and Cl^- (8786.2 mg/L) concentrations were observed in the Mother spring. The Na/Cl ratio in deep springs (Mother, Pol, Hotel) ranges from 0.59 to 0.60, suggesting dissolution of evaporitic salts, while in Ab-Siah it drops to 0.11, indicating different controlling mechanisms. The Ca/Mg ratio in all thermal springs ranges from 2 to 3, indicating Triassic dolomites as the main reservoir rocks. In adjacent cold springs, this ratio decreases to ~1, confirming their karstic origin.

Spring Classification Using the Giggenbach Diagram: Based on the Giggenbach diagram, the springs are classified into two groups. The first group (Sadat Mahalleh, Ashkargamab, Sang-e-Boneh-Kesh) plots near the Mg apex, indicating a shallow meteoric origin influenced by river water mixing (EC: 10,040–14,000 µS/cm). The second group (Hotel, Mother, Pol, Ab-Siah) plots toward the Na-K apex, indicating a deep hydrothermal origin (EC: 18,000–27,610 µS/cm). These springs are predominantly located along major thrust faults, including the Caspian Fault and Khoshchal thrusts.

Heat Source Evaluation: Some researchers attributed water heating to radon decay. However, a quantitative assessment shows that heat generated from radon-222 decay (half-life 3.8 days) in a typical spring (flow rate ~1 L/s) is negligible (10^{-5} J/s) compared to the specific heat of water (4180 J/kg·°C) and cannot sustain a temperature of 47°C. Therefore, radioactive decay cannot be considered the primary heat source. Instead, given the thin crust of the South Caspian Basin, the main heat source appears to be the high geothermal gradient (40–60 mW/m²) resulting from crustal extension (Green *et al*., 2009), combined with frictional heating along active thrust faults.

Role of Radioactivity: In this model, radioactivity plays a secondary role. Deep thermal waters pass through uranium- and thorium-rich layers during ascent. Near the surface, pressure reduction releases radon-222 gas, and radium-226 precipitates in travertine as $RaCO_3$. This explains the high radioactivity without requiring radon as the primary heat source.

Structural Controls: All thermal springs are located within 500 m of major thrust faults, confirming their role as main conduits for deep fluid ascent. The NW-SE trend of these faults aligns with the Alborz strike and compressional stress direction (Ritz *et al*., 2006). Cold springs adjacent to thermal springs occur in pure limestone formations devoid of uranium and have karstic origins, preventing sufficient heating at depth.

Tectonic-Hydrothermal Model: A three-stage conceptual model is proposed. In Stage 1 (Geodynamics), the South Caspian Basin generates compressional stresses and NW-SE trending thrust faults, while crustal thinning increases geothermal heat flux. In Stage 2 (Fluid Circulation), surface waters and fossil brines infiltrate through deep faults, heat up due to the geothermal gradient, and interact with carbonate, evaporite, and acidic igneous rocks. In Stage 3 (Ascent and Emergence), heated waters ascend along thrust faults due to reduced density. During ascent, they dissolve radioactive elements, and near the surface, pressure reduction releases radon and precipitates radium. Hot water emerges where faults intersect the surface, while cold springs appear where the reservoir is karstic limestone.

Comparison with Previous Models: This model differs from previous research in three aspects. First, contrary to earlier studies attributing a marine origin to all springs, our findings demonstrate that at least three springs have shallow origins influenced by river water mixing. Second, while earlier models considered radon decay as the primary heat source, our calculations indicate that the geothermal gradient and frictional heating are the main heat sources, with radioactivity playing a secondary role. Third, while previous research emphasized the Caspian Fault as the sole conduit, our study demonstrates that a broader network of thrust faults also play important roles. This integrated model offers greater explanatory power, although its validation requires complementary isotopic and geothermometric investigations.

Conclusions

This study has provided a clear picture of the Ramsar hot springs by integrating hydrogeochemical data with structural analysis. The findings reveal two distinct groups: a shallow group influenced by river water mixing and a deep group resulting from prolonged water-rock interaction with carbonate and evaporite rocks.

One of the most important contributions is the re-evaluation of the heat source. Contrary to the prevailing hypothesis that attributed heating primarily to radon decay, quantitative calculations demonstrate that this hypothesis is energetically untenable. Instead, the evidence points toward the high geothermal gradient resulting from crustal thinning in the South Caspian Basin, combined with frictional heating along thrust faults, as the primary heat source.

The spatial proximity of all thermal springs to major thrust faults confirms the role of these structures as main conduits for deep fluid ascent. The three-stage model demonstrates how the geodynamic processes of the South Caspian Basin have facilitated water infiltration, heating, and eventual emergence as hot springs. This model also explains the contrasting behavior of adjacent cold springs.

While this conceptual model offers greater comprehensiveness compared to previous studies, its final validation requires complementary isotopic and geothermometric data. Despite these limitations, the findings can be applied to the management of geothermal water resources, assessment of the region's radiological potential, and a better understanding of the geodynamics of the Central Alborz.

.

نشریه زمین شناسی ساختاری و زمین ساخت کاربردی

https://sgat.journals.pnu.ac.ir

کنترل‌های زمین‌ساختی بر تشکیل چشمه‌های آبگرم رامسر، البرز مرکزی: رهیافتی هیدروژئوشیمیایی و ساختاری

امین زندی شفق[*۱]

۱- کارشناس ارشد، کارشناس فنی، شرکت آب منطقه‌ای تهران، تهران، ایران.

کلیدواژه‌ها

البرز مرکزی،
هیدروژئوشیمی،
چشمه‌های آبگرم رامسر،
فرورانش خزر جنوبی،
گسل‌های راندگی

چکیده

چشمه‌های آبگرم رامسر در شمال البرز مرکزی و در همسایگی گسل خزر جای گرفته‌اند و به دلیل پرتوزایی طبیعی بسیار بالا، در جهان کم‌نظیر هستند. این پژوهش با هدف ارزیابی مجدد پیوند این چشمه‌ها با ساختارهای زمین‌ساختی، منشأ آب و عامل گرمایش آنها انجام شده است. برای این منظور، هفت دهانه چشمه به صورت هدفمند انتخاب شدند. پژوهش به شیوه توصیفی-تحلیلی و با تلفیق کارهای میدانی و آزمایشگاهی دنبال شده است. نمونه‌های آب برای شناسایی ترکیب شیمیایی به آزمایشگاه ارسال و شاخص‌های فیزیکوشیمیایی در محل اندازه‌گیری شدند. برای واکاوی ساختارهای زیرسطحی، از تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی و نرم‌افزار ArcGIS بهره گرفته شد و برای پی‌بردن به منشأ آب‌ها، از نمودار گیگنباخ و نسبت‌های یونی استفاده گردید. نوآوری پژوهش در ارائه مدلی سه‌مرحله‌ای است که در آن، فرضیه رایج گرمایش توسط واپاشی رادون کنار گذاشته شده و گرمای زمین‌گرمایی ناشی از نازک‌شدن پوسته و اصطکاک گسل‌های راندگی، به عنوان منبع اصلی گرما معرفی شده است. بر پایه نمودار گیگنباخ، چشمه‌ها به دو دسته سطحی، متأثر از آب رودخانه و عمیق، حاصل تماس با سنگ‌های کربناته و تبخیری تقسیم شدند. بررسی‌های ساختاری نشان داد که همه چشمه‌های آبگرم بر بستر گسل‌های راندگی اصلی جای گرفته‌اند و این گسل‌ها نقش مجرای اصلی را برای بالا آمدن آب‌های گرم ایفا می‌کنند. مدل پیشنهادی، تفاوت چشمه‌های آب سرد همجوار را نیز توجیه می‌کند و نشان می‌دهد که زمین‌پویایی حوضه خزر جنوبی با ایجاد گسل‌های راندگی، بستر لازم برای شکل‌گیری این چشمه‌ها را فراهم کرده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۱۰

*نویسنده مسئول:
امین زندی شفق

رایانامه:
aminzandishafagh_geo@yahoo.com

ارجاع به این مقاله: زندی شفق، ا. (۱۴۰۵). کنترل‌های زمین‌ساختی بر تشکیل چشمه‌های آبگرم رامسر، البرز مرکزی: رهیافتی هیدروژئوشیمیایی و ساختاری. *زمین شناسی ساختاری و زمین ساخت کاربردی*، ۱(۲): ۹۶-۸۳.

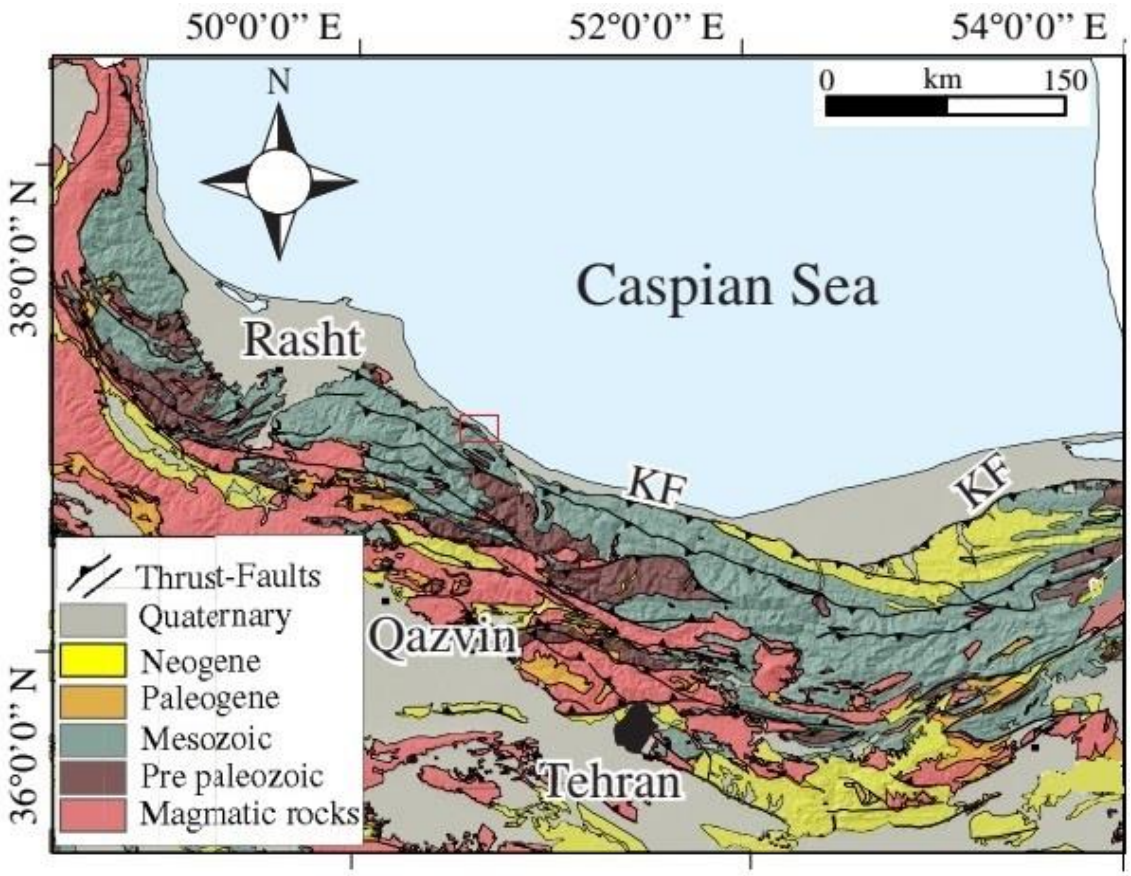
شناسه دیجیتال مقاله: 10.30473/sgat.2026.78699.1014

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است.

ناشر: دانشگاه پیام نور

مقدمه

رشته‌کوه البرز مرکزی، مرز جنوبی حوضه خزر جنوبی را مشخص می‌کند (شکل ۱)، و خود بخشی کلیدی از کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا به شمار می‌رود (Allen *et al.*, 2003; Zanchi *et al.*, 2009). ریشه این کوهزایی به برخورد صفحه‌های اوراسیا و گندوانا بازمی‌گردد؛ برخوردی که با بسته‌شدن اقیانوس پالئوتتیس در زمان تریاس همراه بود (Ghorbani, 2021). حوضه خزر جنوبی یکی از منحصربه‌فردترین حوضه‌های رسوبی جهان است که دارای بیش از ۲۰ کیلومتر رسوبات مزوزوئیک و ترشیاری بر روی پوسته‌ای از نوع اقیانوسی یا قاره‌ای بسیار نازک‌شده است (Abdullayev *et al.*, 2024; Green *et al.*, 2009). این حوضه با نرخ فرونشست غیرعادی و شار رسوبی بسیار بالا، شرایط مناسبی برای توسعه سیستم‌های پویای هیدروکربنی فراهم کرده است (Abdullayev *et al.*, 2024). بررسی‌های جدید نشان می‌دهد که مرز زمین‌ساختی میان حوضه خزر جنوبی و حوضه کورا، تغییرات گرادیان زمین‌گرمایی را کنترل می‌کند و بنابراین بر پتانسیل هیدروکربنی منطقه تأثیر می‌گذارد (Abdullayev *et al.*, 2024).



شکل (۱): نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه که با کادر قرمز مشخص شده است.

Figure (1): Location map of the study area marked with a red box.

دامنه‌های شمالی البرز همچنان تحت تأثیر همگرایی فعال میان بلوک خزر جنوبی و صفحه اوراسیا قرار دارد (Ritz *et al.*, 2006). البرز مرکزی میزبان حدود ۵ میلی‌متر در سال کوتاه‌شدگی و ۴ میلی‌متر در سال حرکت راستالغز چپ‌گرد بین صفحات عربستان و اوراسیا بر روی گسل‌های راستالغز و راندگی است (Vernant *et al.*, 2004). این برخورد و همگرایی، شبکه پیچیده‌ای از گسل‌ها را در منطقه پدید آورده است؛ گسل‌هایی با سازوکارهای گوناگون از راستالغز گرفته تا راندگی که هر یک به گونه‌ای بر هیدروژئولوژی منطقه اثر گذاشته‌اند (Eshaghpour & Alizadeh, 2015). خود حوضه خزر جنوبی به عنوان یک بلوک صلب

رفتار می‌کند که فعالیت لرزه‌ای پیرامون آن به روشنی نشان‌دهنده مرزهای فعال زمین‌ساختی آن است (Jackson, 2002) و برخی شواهد حاکی از فرورانش این بلوک به سمت غرب در زیر کوه‌های تالش و البرز است (Allen *et al*., 2003).

در میان این پهنه زمین‌ساختی پویا، چشمه‌های آبگرم رامسر جای گرفته‌اند؛ چشمه‌هایی که در امتداد گسل خزر و در زون شمالی البرز مرکزی قرار دارند و شهرت جهانی‌شان را مدیون پرتوزایی طبیعی بسیار بالای خود هستند (Alizadeh, 2022). پژوهش‌های پیشین در این منطقه عمدتاً دو مسیر اصلی را دنبال کرده‌اند: گروهی به بررسی زمین‌شیمی و زمین‌گرمایی چشمه‌ها پرداخته و ترکیب عنصری و دمای آب‌ها را توصیف کرده‌اند (Nabavi, 1976; Nazari & Shahidi, 2011; Nazemi, 1976) و گروهی دیگر بر جنبه‌های پزشکی و پرتوزایی طبیعی متمرکز شده و اثرات زیست‌محیطی رادیوم و رادون را بررسی کرده‌اند (Ghiassi-Nejad *et al*., 2002).

با وجود این تلاش‌ها، هنوز پرسش‌های بی‌پاسخ بسیاری باقی است. اگرچه حضور گسل‌ها در منطقه به خوبی شناخته شده، اما نقش دقیق هر یک از آنها در هدایت سیالات زیرزمینی و تأثیرشان بر دمای آب و شوری چشمه‌ها، همچنان در هاله‌ای از ابهام قرار دارد. مطالعات پیشین بیانگر این هست که چشمه‌ها منشأ دریایی دارند و در پی فرورانش حوضه خزر جنوبی و راندگی پوسته ایران مرکزی بر روی پوسته خزر جنوبی، آب شور دریا به مناطق شکسته‌شده گسل خزر نفوذ کرده و با آزادسازی رادون ناشی از فعالیت گسل‌ها و واپاشی آن به رادیوم گرم می‌شود و سپس در امتداد گسل‌های راندگی خزر صعود کرده و چشمه‌های آبگرم رامسر را تشکیل می‌دهد، همچنین این مطالعات وجود چشمه‌های آب سرد مجاور را ناشی از منشأ کارستی آنها دانسته است (Alizadeh, 2022).

با این حال، این پژوهش عمدتاً بر نقش گسل خزر تأکید داشته و به بررسی دقیق سایر ساختارهای گسلی منطقه (مانند راندگی‌های خشچال، سربالان و ازارود) و تأثیر آنها بر تنوع ترکیب شیمیایی چشمه‌ها نپرداخته است. افزون بر این، درباره منشأ زمین‌ساختی خود حوضه خزر جنوبی نیز دو دیدگاه متفاوت وجود دارد. برخی آن را حوضه‌ای در حال فرونشست می‌دانند که بر اثر خنک‌شدن لیتوسفر پدید آمده (Green *et al*., 2009)، در حالی که برخی دیگر شواهدی از فرورانش فعال پوسته اقیانوسی خزر به سمت شمال ارائه می‌دهند (Allen *et al*., 2004; Devlin *et al*., 1999) این پرسش اساسی همچنان بی‌پاسخ مانده است که کدام یک از این مدل‌های زمین‌ساختی با ویژگی‌های چشمه‌های آبگرم رامسر همخوانی بیشتری دارد. گذشته از آن، مکانیسم دقیق انتقال حرارت و مسیرهایی که سیالات گرم از اعماق تا سطح زمین طی می‌کنند، تاکنون در قالب یک مدل تکتونیک-هیدروترمال یکپارچه به تصویر کشیده نشده است.

پژوهش حاضر کوشیده است تا با تلفیق داده‌های هیدروژئوشیمیایی و بررسی دقیق ساختارهای زمین‌ساختی منطقه، به این پرسش‌ها پاسخ دهد. در این راه، ابتدا ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های آبگرم و معدنی رامسر شناسایی و بر اساس منشأ آنها طبقه‌بندی شده‌اند. سپس ساختارهای زمین‌ساختی منطقه با تأکید بر گسل‌های فعال، مورد تحلیل قرار گرفته و پیوند آنها با محل خروج چشمه‌ها آشکار شده است. در گام نهایی، کوشش شده تا یک مدل مفهومی از روابط تکتونیک-هیدروترمال ارائه شود؛ مدلی که بتواند منشأ آب، منبع گرما و مسیرهای صعود سیالات را در چارچوب زمین‌پویایی حوضه خزر جنوبی و البرز مرکزی توضیح دهد و به ویژه، تفاوت رفتار شیمیایی چشمه‌های آب گرم و آب سرد مجاور را به روشنی تبیین کند.

روش بررسی

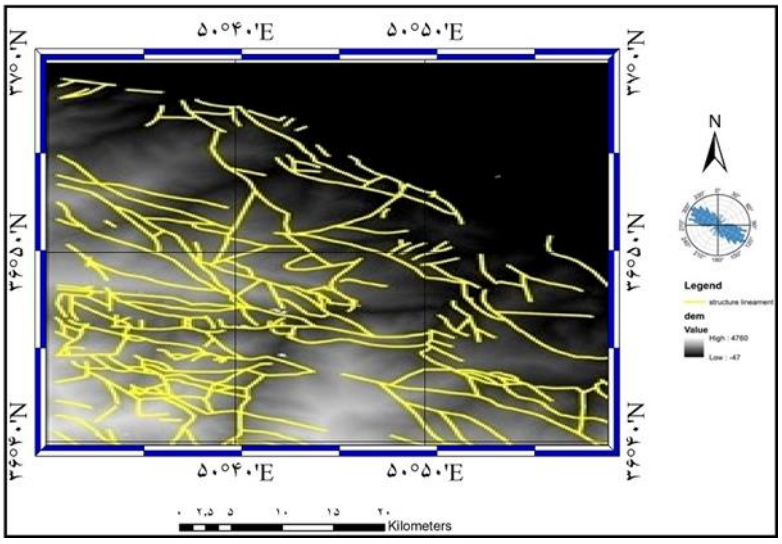
برای رسیدن به اهداف این پژوهش، روش کار در چهار گام اصلی طراحی شد: مطالعات کتابخانه‌ای و آماده‌سازی داده‌های پایه، کار میدانی و نمونه‌برداری، تحلیل‌های آزمایشگاهی، و در نهایت تفسیر و پردازش داده‌ها.

مطالعات پایه و آماده‌سازی داده‌ها

در نخستین گام، نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه رامسر و پیرامون آن در مقیاس‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰، همراه با داده‌های مربوط به گسل‌ها، از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شد. این داده‌ها در کنار تصاویر ماهواره‌ای لندست با قدرت تفکیک ۳۰ متر و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۱۲٫۵ متر، وارد نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰٫۸ شدند. برای اینکه همه داده‌ها از هماهنگی مکانی برخوردار باشند، آنها به سیستم مختصات جهانی (UTM) و مبنای دیتوم WGS84 تبدیل شدند. روی تصاویر ماهواره‌ای نیز پردازش‌هایی مانند اعمال فیلترهای جهتی و افزایش کنتراست خطی انجام شد تا آثار ساختاری و خطواره‌های زمین‌شناختی با دقت بیشتری قابل شناسایی شوند. سپس، گسل‌هایی که روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی شده بودند، با گسل‌های درون نقشه‌های زمین‌شناسی تطبیق داده شدند و در نهایت، رزدیاگرام آنها با کمک افزونه RockWorks در محیط ArcGIS ترسیم گردید (شکل۲).

عملیات میدانی و نمونه‌برداری

در گام بعدی، هفت دهانه چشمه آبگرم شامل مادر، پل، سادات‌محله، اشکرگرماب، سنگ بنه‌کش، هتل و آب‌سیاه، مورد بازدید میدانی و نمونه‌برداری قرار گرفتند. موقعیت هر یک از این چشمه‌ها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) با دقت حدود ۳ متر، ثبت شد .شاخص‌های فیزیکوشیمیایی آب همچون دما، اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC)، در همان محل و با دستگاه‌های قابل‌حمل که پیش از استفاده کالیبره شده بودند، اندازه‌گیری شدند. برای آنالیز شیمیایی، نمونه‌های آب در بطری‌های پلی‌اتیلنی ۵۰۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری شدند؛ بطری‌هایی که ۲۴ ساعت پیش از نمونه‌برداری، با آب مقطر شسته شده و سپس سه بار با آب همان چشمه شستشو داده شده بودند. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها بلافاصله در یخچال قابل‌حمل با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به آزمایشگاه آب منطقه‌ای استان گیلان منتقل شدند.



شکل (۲): نقشه خطواره ها و گسل های منطقه

Figure (2): Map of lineaments and faults in the region

تحلیل‌های آزمایشگاهی

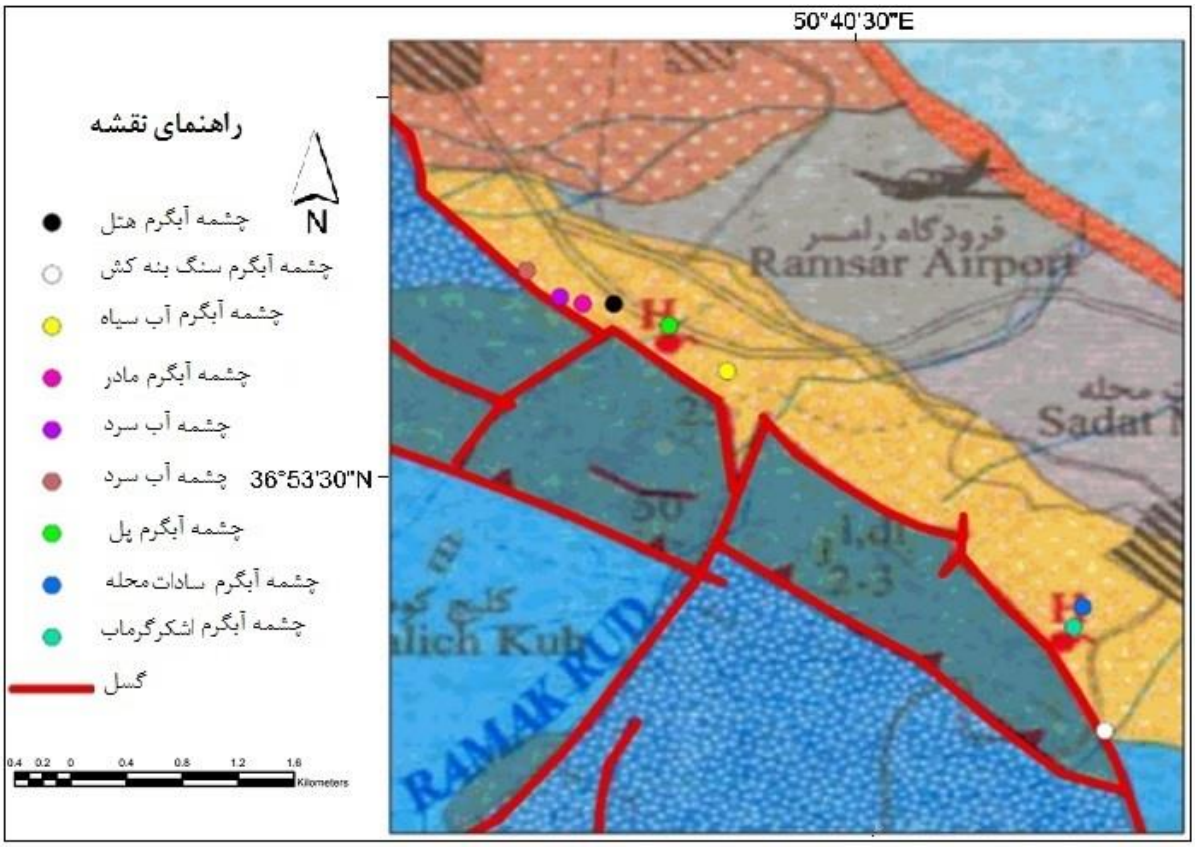
آنالیز شیمیایی نمونه‌ها در آزمایشگاه آب منطقه‌ای استان گیلان انجام گرفت. برای اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌های اصلی (سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) از دستگاه طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی مدل Spectro Arcos با دقت ۰/۰۱

میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد. آنیون‌های اصلی کلر، سولفات و بی‌کربنات نیز با دستگاه کروماتوگرافی یونی مدل Metrohm 881 و با همان دقت اندازه‌گیری شدند. افزون بر این، برای اطمینان از صحت نتایج، غلظت بی‌کربنات در محل نمونه‌برداری با روش تیتراسیون اسیدی نیز اندازه‌گیری و با یافته‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید.

برای پی‌بردن به منشأ آب‌ها، نسبت‌های یونی کلیدی مانند Na/Cl، Ca/Mg و (Na+K)/(Ca+Mg) محاسبه شدند. همچنین، برای تشخیص منشأ سطحی یا عمقی آب‌ها و برآورد دمای مخزن، از نمودار مثلثی گیگنباخ (Na-K-Mg) بهره گرفته شد. این نمودار به دلیل کاربرد گسترده‌اش در پژوهش‌های زمین‌گرمایی و توانایی آن در تفکیک آب‌های بالغ، نیمه‌بالغ و سطحی، برای این پژوهش انتخاب گردید.

تحلیل و تفسیر داده‌ها

در گام پایانی، همه داده‌های گردآوری شده از منابع مختلف اعم از اطلاعات مکانی، مشاهدات میدانی و یافته‌های آزمایشگاهی در پایگاه داده نرم‌افزار ArcGIS گرد هم آمدند تا نقشه نهایی منطقه تهیه شود؛ نقشه‌ای که موقعیت چشمه‌ها، گسل‌های فعال و واحدهای سنگی را به صورت همپوشان نشان می‌دهد (شکل ۳). برای روشن شدن ارتباط فضایی میان چشمه‌ها و ساختارهای گسلی، فاصله افقی هر چشمه تا نزدیک‌ترین گسل اصلی اندازه‌گیری و محاسبه شد. سرانجام، با تلفیق سه دسته یافته نتایج تحلیل‌های ساختاری، داده‌های هیدروژئوشیمیایی و مدل‌های زمین‌پویایی موجود یک مدل مفهومی از روابط تکتونیک-هیدروترمال برای منطقه رامسر ارائه شد.



شکل (۳): نقشه زمین شناسی و موقعیت چشمه های آب رامسر

Figure (3): Geological map and location of Ramsar water springs

نتایج

یافته‌های این پژوهش در چهار بخش جداگانه ارائه می‌شود :ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی چشمه‌ها، ترکیب شیمیایی آب، طبقه‌بندی چشمه‌ها بر اساس نمودار گیگنباخ، و در نهایت نتایج حاصل از تحلیل ساختاری.

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی چشمه‌ها

دمای آب چشمه‌های مورد مطالعه در بازه ۲۹ تا ۴۸ درجه سانتی‌گراد در نوسان است؛ گرم‌ترین آنها چشمه سادات‌محله با ۴۸ درجه و سردترین آنها چشمه آب‌سیاه با ۲۹ درجه سانتی‌گراد است. هدایت الکتریکی (EC) نیز دامنه گسترده‌ای از ۱۰۰۴۰ تا ۲۷۶۱۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر را نشان می‌دهد که بیشترین مقدار به چشمه هتل و کمترین آن به چشمه اشکرگرماب تعلق دارد. pH همه چشمه‌ها نیز بین ۶/۲ تا ۶/۵ قرار گرفته که نشان از ماهیت خنثی تا کمی اسیدی آب‌های منطقه دارد (جدول ۱).

نکته جالب توجه اینکه چشمه‌هایی که در امتداد گسل‌های اصلی منطقه جای گرفته‌اند همانند هتل، مادر، پل و آب‌سیاه، هدایت الکتریکی به مراتب بالاتری نسبت به چشمه‌های حاشیه‌ای همانند سادات‌محله، اشکرگرماب و سنگ بنه‌کش دارند. این تفاوت آشکار، گویای تأثیر مستقیم ساختارهای گسلی بر میزان املاح محلول در آب چشمه‌هاست.

جدول (۱): موقعیت جغرافیایی، دما، EC، pH و عناصر شیمیایی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

Table (1): Geographical location, temperature, EC, pH and chemical elements of the springs in the study area

ردیف	نام چشمه	موقعیت	دما	EC	PH	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	Hco3 mg/l
1	Madarshah	50.56 59E 36.90 25N	42	27500	6.5	684.2	193.44	5239.4	38.22	8786.2	24.75
2	Pol	50.66 14E 36.90 13N	39.5	26400	6.4	737.4	174.72	4997.9	38.22	8386.87	24.75
3	Sadat mahalleh	50.68 94E 36.88 11N	48	14000	6.5	-	-	-	-	-	-
4	Eshkergarmab	50.68 88E 36.88 11N	42	10040	6.4	439	120	-	-	3550	971
5	Sangbonehkesh	50.69 01E 39.87 35N	44	11000	6.5	419	116	-	-	2911	1007
6	Hotel	50.65 75E 36.90 25N	47	27610	6.5	441	2750	140	0.01	9607	845
7	Absiah	50.66 58E 36.89 86N	42	18000	6.3	4482	750	750	-	67805	461

Madarshah: مادر شاه؛ Pol: پل؛ Sadat mahalleh: سادات محله؛ Eshkergarmab : اشکرگرماب؛ Sangbonehkesh: سنگ بنه‌کش؛ Hotel: هتل؛ Absiah: آب سیاه.

ترکیب شیمیایی آب چشمه‌ها

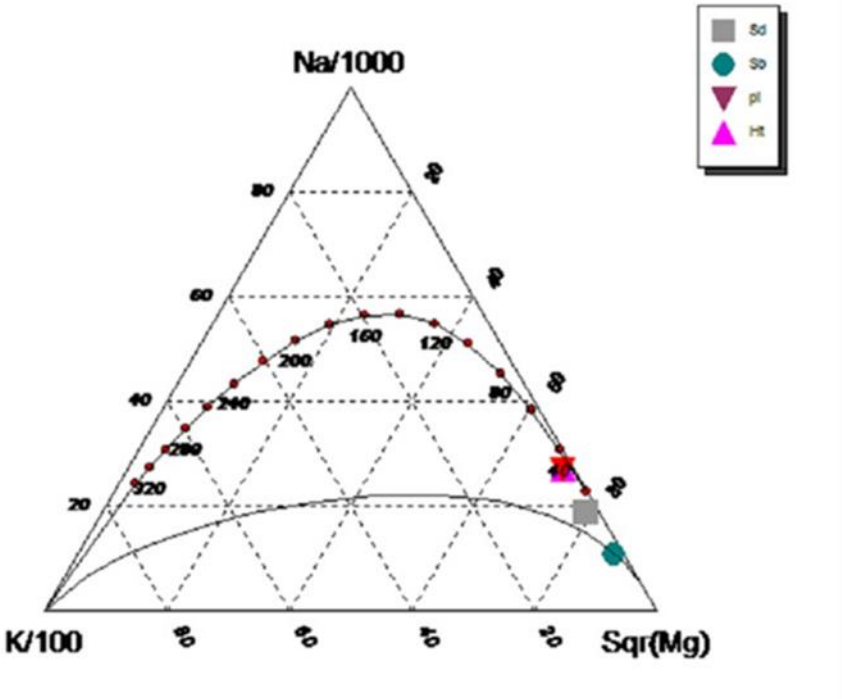
آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که ترکیب اصلی آب چشمه‌های منطقه را یون‌های سدیم، کلر، کلسیم، منیزیم، پتاسیم و بی‌کربنات تشکیل می‌دهند. بیشترین غلظت سدیم و کلر به ترتیب ۵۲۳۹/۹ و ۸۷۸۶/۲ میلی‌گرم بر لیتر، در چشمه مادر دیده شد و همین چشمه بود که بالاترین مقادیر کلسیم و منیزیم به ترتیب ۶۸۴/۲ و ۱۹۳/۴۴ میلی‌گرم بر لیتر را نیز به خود اختصاص داد (جدول ۱).

نسبت‌های یونی محاسبه شده، تصویر روشن‌تری از منشأ آب‌ها به دست می‌دهند. نسبت Na/Cl در چشمه‌های عمقی مادر ، پل و هتل، بین ۰/۵۹ تا ۰/۶۰ قرار دارد، در حالی که این نسبت در چشمه آب‌سیاه به حدود ۰/۱۱ می‌رسد. نزدیک بودن نسبت Na/Cl به یک در سه چشمه نخست، بیانگر آن است که انحلال نمک‌ها سهم قابل‌توجهی در تأمین سدیم و کلر این چشمه‌ها دارد. در مقابل، نسبت پایین Na/Cl در چشمه آب‌سیاه، حکایت از مکانیسم‌های دیگری در کنترل ترکیب شیمیایی این چشمه دارد.

نسبت Ca/Mg در همه چشمه‌های آبگرم بین ۲ تا ۳ است که نشان می‌دهد سنگ مخزن اصلی این چشمه‌ها، سنگ‌های کربناته دولومیتی هستند .اما در چشمه‌های آب سرد مجاور، این نسبت به حدود ۱ کاهش می‌یابد و جنس سنگ مخزن عمدتاً آهکی تشخیص داده می‌شود که گواهی بر منشأ کارستی این چشمه‌هاست.

طبقه‌بندی چشمه‌ها بر اساس نمودار گیگنباخ

نمودار مثلثی گیگنباخ (Na-K-Mg) که برای تشخیص منشأ سطحی یا عمقی آب‌ها و نیز تخمین دمای تعادل با سنگ مخزن به کار می‌رود، چشمه‌های منطقه را به دو گروه مجزا تقسیم می‌کند (شکل ۴):



شکل (۴): رنگ خاکستری: چشمه آبگرم سادات‌محله و اشکرگرماب. رنگ سبز: چشمه آبگرم سنگ بنه‌کش، رنگ صورتی: چشمه آبگرم هتل و مادر رنگ بنفش: چشمه آبگرم پل و آب سیاه.

Figure (4): Gray color: Sadat hot spring, Mahalla and Ashkar hot springs. Green: Spa spring, pink: Hotel and Mother spa Purple: Pol and black water spa

گروه اول چشمه‌های با منشأ سطحی که چشمه های آب گرم سادات‌محله، اشکرگرماب و سنگ بنه‌کش در این گروه جای می‌گیرند. این چشمه‌ها در نمودار به راس منیزیم نزدیک‌تر هستند، که نشان از تأثیر آب‌های سطحی بر ترکیب شیمیایی آنها دارد. شوری کمتر این چشمه ها و هدایت الکتریکی بین ۱۰۰۴۰ تا ۱۴۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، گواهی بر اختلاط با آب‌های شیرین رودخانه محلی دارد. این چشمه‌ها بیشتر در نزدیکی بستر رودخانه و در فاصله بیشتری از گسل‌های اصلی قرار دارند.

گروه دوم چشمه‌های با منشأ عمقی که چشمه های آب گرم هتل، مادر، پل و آب‌سیاه در این گروه قرار می‌گیرند. این چشمه‌ها در نمودار از راس منیزیم فاصله گرفته و به سمت راس سدیم-پتاسیم میل کرده‌اند، که نشان از تعادل طولانی‌مدت آب با سنگ مخزن در اعماق بیشتر دارد. شوری بالای این چشمه ها و هدایت الکتریکی بین ۱۸۰۰۰ تا ۲۷۶۱۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، مؤید منشأ عمقی و عدم اختلاط چشم گیر با آب‌های سطحی است. این چشمه‌ها عمدتاً در امتداد گسل‌های راندگی اصلی منطقه قرار گرفته‌اند.

نتایج تحلیل ساختاری

بررسی تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین‌شناسی، شبکه پیچیده‌ای از گسل‌ها را در منطقه رامسر آشکار می‌کند. مهم‌ترین این ساختارها عبارتند از: راندگی‌های جنوب و شمال خشچال، راندگی سربالان، راندگی ازارود، گسل راستالغز نوشا، راندگی‌های سه هزار-جنت‌رودبار، راندگی‌های لیره‌سر، گسل راستالغز جواهرده و گسل عادی خزر (شکل ۳). این گسل‌ها هر یک در جای خود، نقشی در شکل‌گیری چهره زمین‌ساختی منطقه داشته‌اند.

رزدیاگرام گسل‌ها نشان می‌دهد که جهت‌گیری غالب این ساختارها در دو راستای اصلی متمرکز است :شمال‌غرب-جنوب‌شرق و شرق-غرب (شکل ۲). راستای نخست با جهت کلی رشته‌کوه البرز و همچنین با جهت تنش‌های فشارشی ناشی از همگرایی صفحه‌های زمین‌ساختی همخوانی کامل دارد. راستای دوم اما بیشتر به گسل‌های عادی و شماری از گسل‌های راستالغز مربوط می‌شود که در مراحل بعدی تحولات زمین‌ساختی منطقه پدید آمده‌اند.

اما شاید گویاترین یافته، جایگاه چشمه‌ها در این شبکه گسلی باشد. از مجموع ۷ چشمه آبگرم مورد مطالعه، همه آنها در فاصله کمتر از ۵۰۰ متری گسل‌های راندگی اصلی قرار گرفته‌اند. در مقابل، چشمه‌های آب سرد در فواصل دورتری از گسل‌ها جای دارند و عمدتاً درون سازندهای آهکی خالص که فاقد رادیواکتیویته بالا هستند شکل گرفته‌اند. این تفاوت آشکار در جایگاه مکانی، به روشنی نشان می‌دهد که گسل‌ها نقش راه‌گذر اصلی را برای رسیدن آب‌های گرم به سطح ایفا می‌کنند، در حالی که چشمه‌های سرد از مسیرهای کارستی تغذیه می‌شوند (شکل ۳).

جالب‌تر آنکه خود چشمه‌های آبگرم نیز تقریباً بر یک خط راست با راستای N50W قرار گرفته‌اند؛ راستایی که با جهت کلی گسل‌های راندگی منطقه به ویژه گسل خزر هماهنگی نزدیکی دارد. این هم‌راستایی، گواهی بر آن است که همین سیستم گسلی است که نقش اصلی را در تعیین محل خروج چشمه‌های آبگرم بر عهده دارد.

بحث

بر اساس نمودار مثلثی گیگنباخ، چشمه‌های رامسر به دو گروه مجزا تقسیم می‌شوند. چشمه‌های سادات‌محله، اشکرگرماب و سنگ بنه‌کش در نزدیکی راس منیزیم جای گرفته‌اند که نشان از منشأ سطحی آنها دارد. این چشمه‌ها در همسایگی رودخانه قرار دارند و شوری پایین‌تری نسبت به سایر چشمه‌ها دارند؛ بنابراین، به نظر می‌رسد آب این چشمه‌ها با آب شیرین رودخانه مخلوط شده است. در سوی دیگر، چشمه‌های هتل، مادرشاه، پل و آب‌سیاه از راس منیزیم فاصله گرفته و به سمت راس سدیم-پتاسیم حرکت کرده‌اند؛ این یعنی این چشمه‌ها ریشه در اعماق دارند و آب آنها سال‌ها در تماس با سنگ‌های کربناته و تبخیری، ترکیب شیمیایی خود را به دست آورده است. نسبت سدیم به کلر در چشمه‌های مادر و پل که نزدیک به یک است، نشان می‌دهد که نمک‌های تبخیری مانند هالیت، در اعماق، منبع اصلی این یون‌ها هستند. این موضوع با حضور سازندهای تبخیری در توالی‌های رسوبی حوضه خزر جنوبی (Smith-Rouch, 2006) همخوانی دارد. همچنین نسبت کلسیم به منیزیم، گواهی می‌دهد که سنگ مخزن اصلی این چشمه‌ها، دولومیت‌های تریاس، به ویژه سازندهای الیکا و روته هستند.

یکی از چالش‌برانگیزترین پرسش‌ها درباره این چشمه‌ها، منبع گرمای آنهاست. برخی پژوهشگران پیشین گرمایش آب را حاصل واپاشی رادون و تبدیل آن به رادیوم دانسته‌اند (Alizadeh, 2022). اما یک محاسبه ساده نشان می‌دهد که انرژی حاصل از واپاشی رادون-۲۲۲، با نیمه‌عمر کوتاه ۳/۸ روزه، در یک چشمه با دبی معمولی حدود ۱ لیتر بر ثانیه، در مقایسه با گرمای ویژه آب، ۴۱۸۰ ژول بر کیلوگرم درجه سانتی‌گراد، آنقدر ناچیز است که نمی‌تواند دمای چشمه‌ای با دبی پایدار را در حدود ۴۷ درجه سانتی‌گراد حفظ کند .بنابراین، این فرضیه از نظر کمی چندان قابل‌دفاع نیست. به نظر می‌رسد منبع اصلی گرما را باید در جای دیگری جستجو کرد. با توجه به نازک بودن پوسته در حوضه خزر جنوبی (Allen *et al*., 2003) و فعالیت گسل‌های عمیق، به نظر می‌رسد که گرادیان زمین‌گرمایی بالای منطقه و نیز گرمای ناشی از اصطکاک گسل‌های راندگی، نقش اصلی را در گرمایش آب‌ها ایفا می‌کنند (Green *et al*., 2009). بر اساس این مدل، آب‌های سطحی و آب‌های فسیل محبوس در رسوبات، از طریق گسل‌ها به اعماق نفوذ می‌کنند، در آنجا گرم می‌شوند و سپس به دلیل کاهش چگالی و افزایش نیروی شناوری، دوباره به سمت بالا صعود کرده و در سطح به صورت چشمه ظاهر می‌شوند. در این میان، رادیواکتیویته نقشی ثانویه دارد؛ آب‌های گرم در مسیر صعود خود از لایه‌های غنی از اورانیوم و توریم، سنگ‌های آذرین اسیدی سازند علم‌کوه و آکاپل و همچنین دولومیت‌های تریاس عبور می‌کنند و عناصر رادیواکتیو را با خود حمل می‌کنند. وقتی این آب‌ها به سطح نزدیک می‌شوند و فشار کاهش می‌یابد، گاز رادون-۲۲۲ آزاد شده و رادیوم-۲۲۶ در رسوبات تراورتن به صورت $RaCO_3$ ته‌نشین می‌شود. این فرآیند به خوبی پرتوزایی بالای چشمه‌های رامسر را توضیح می‌دهد، بدون آنکه نیاز باشد رادون را منبع اصلی گرما در نظر بگیریم.

بر اساس بررسی‌های میدانی و تحلیل‌های مکانی، فاصله کمتر از ۵۰۰ متر به عنوان آستانه‌ای انتخاب گردید که تمامی چشمه‌های آبگرم را در مجاورت گسل‌های اصلی نشان می‌دهد؛ موضوعی که در پژوهش‌های مشابه نیز به عنوان شعاع مؤثر تأثیر گسل‌ها بر هیدروژئولوژی مناطق کوهستانی معرفی شده است (Curewitz & Karson, 1997; Faulkner *et al*., 2010)

گسل‌ها در اینجا نقش راه‌گذرهای اصلی را برای صعود آب‌های گرم از اعماق ایفا می‌کنند. راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی گسل‌های خشچال، سربالان و ازارود با جهت کلی البرز و تنش‌های فشارشی ناشی از همگرایی صفحه‌ها همخوانی کامل دارد (Ritz *et al*., 2006). در کنار این چشمه‌های آبگرم، چشمه‌های آب سردی نیز دیده می‌شوند که در سازندهای آهکی خالص و فاقد اورانیوم و توریم قرار دارند و از مسیرهای کارستی تغذیه می‌شوند. این چشمه‌ها فرصت کافی برای گرم شدن در اعماق را نمی‌یابند و به همین دلیل سرد باقی می‌مانند. این تفاوت در مسیر تغذیه، به روشنی نقش ساختارهای زمین‌شناختی را در تعیین دمای آب چشمه‌ها نشان می‌دهد.

با تلفیق همه این یافته‌ها، می‌توان یک مدل سه‌مرحله‌ای برای تشکیل چشمه‌های آبگرم رامسر ترسیم کرد. در مرحله نخست، حوضه خزر جنوبی با پوسته‌ای نازک از نوع اقیانوسی یا قاره‌ای بسیار کشیده‌شده، در حال فرورانش به سمت شمال در زیر پشته آپشرون و یا در حال فرونشست بر اثر خنک‌شدن لیتوسفر است (Allen *et al*., 2004; Green *et al*., 2009). این فرآیند، تنش‌های فشارشی را در دامنه‌های شمالی البرز پدید آورده و گسل‌های راندگی با روند غالب شمال‌غربی-جنوب‌شرقی را شکل داده است. نازک‌شدن پوسته نیز شار زمین‌گرمایی را افزایش داده است. در مرحله دوم، آب‌های سطحی و آب‌های شور محبوس در رسوبات از طریق شکاف‌ها و گسل‌های عمیق از جمله گسل خزر، به درون پوسته نفوذ کرده و در آنجا با سنگ‌های کربناته دولومیت‌های تریاس، سنگ‌های تبخیری مثل هالیت و سنگ‌های آذرین اسیدی حاوی اورانیوم و توریم واکنش نشان می‌دهند و ترکیب شیمیایی خود را به دست می‌آورند. در مرحله سوم، این آب‌های گرم به دلیل کاهش چگالی و افزایش فشار هیدرواستاتیک، در امتداد گسل‌های راندگی به سمت بالا صعود می‌کنند. در مسیر صعود، عناصر رادیواکتیو را جذب می‌کنند و در نزدیکی سطح، با کاهش فشار، گاز رادون آزاد شده و رادیوم در رسوبات ته‌نشین می‌شود. در نهایت، آب گرم در محل

برخورد گسل با سطح زمین به صورت چشمه ظاهر می‌شود. در مناطقی که گسل به سطح نمی‌رسد و یا سنگ مخزن از نوع کارستی است، چشمه‌های آب سرد ظهور می‌یابند.

این مدل، اگرچه بر پژوهش‌های پیشین استوار است، اما در سه جنبه اصلی با آنها تفاوت دارد. نخست، در حالی که برخی پژوهشگران پیشین با استناد به شوری بالا، منشأ همه چشمه‌ها را آب دریا معرفی کرده‌اند، یافته‌های ما بر اساس نمودار گیگنباخ نشان می‌دهد که دست‌کم سه چشمه سادات‌محله، اشکرگرماب و سنگ بنه‌کش منشأ سطحی دارند و با آب رودخانه مخلوط شده‌اند. دامنه تغییرات هدایت الکتریکی از ۱۰۰۴۰ تا ۲۷۶۱۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، گویای تنوع قابل‌توجهی در منشأ آب‌هاست که مدل‌های پیشین قادر به توجیه آن نیستند .دوم، در حالی که مدل‌های پیشین واپاشی رادون را منبع اصلی گرما معرفی کرده‌اند، ما با استناد به محاسبات کمی، گرادیان زمین‌گرمایی بالا و گرمایش اصطکاکی ناشی از حرکت گسل‌های راندگی را به عنوان منبع اصلی گرما معرفی می‌کنیم و رادیواکتیویته را عاملی ثانویه محسوب می‌داریم. سوم، پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر نقش گسل خزر تأکید داشته‌اند، در حالی که پژوهش ما نشان می‌دهد مجموعه‌ای از گسل‌های راندگی از جمله راندگی‌های شمال و جنوب خشچال، راندگی سربالان و راندگی ازارود نیز نقش مهمی در هدایت سیالات و کنترل محل خروج چشمه‌ها ایفا می‌کنند. مدل ما با در نظر گرفتن این سه تفاوت تنوع منشأ آب‌ها، منبع گرمایی واقع‌گرایانه‌تر و شبکه گسترده‌تری از ساختارهای گسلی از قدرت تبیین بیشتری برخوردار است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تلفیق داده‌های هیدروژئوشیمیایی و تحلیل‌های ساختاری، تصویر نسبتاً روشنی از منشأ و رفتار چشمه‌های آبگرم رامسر به دست داده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که این چشمه‌ها از نظر منشأ به دو گروه متمایز تقسیم می‌شوند: گروهی با منشأ سطحی که به وضوح از آب‌های رودخانه‌ای تأثیر پذیرفته‌اند و گروهی با منشأ عمقی که حاصل تعامل طولانی‌مدت آب با سنگ‌های کربناته و تبخیری در اعماق است. این تفکیک، که بر اساس نمودار گیگنباخ و نسبت‌های یونی انجام شد، گامی مهم در شناخت بهتر این سیستم پیچیده هیدروترمال به شمار می‌رود.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، بازنگری در منبع گرمایش این چشمه‌هاست .بر خلاف فرضیه رایج که واپاشی رادون را عامل اصلی افزایش دما می‌دانست، محاسبات کمی نشان داد که این فرضیه از نظر انرژی چندان قابل‌دفاع نیست. در عوض، شواهد به سمت گرادیان زمین‌گرمایی ناشی از نازک‌شدن پوسته حوضه خزر جنوبی و نیز گرمایش اصطکاکی گسل‌های راندگی اشاره دارد. در این چارچوب، رادیواکتیویته نقشی ثانویه پیدا می‌کند و صرفاً به عنوان نشانگری از عبور آب‌های عمقی از لایه‌های غنی از اورانیوم و توریم عمل می‌کند.

نزدیکی مکانی تمامی چشمه‌های آبگرم به گسل‌های راندگی اصلی، به روشنی گواهی می‌دهد که این ساختارها نقشی کلیدی در هدایت آب‌های گرم از اعماق به سطح ایفا می‌کنند. مدل سه‌مرحله‌ای ارائه‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که چگونه زمین‌پویایی حوضه خزر جنوبی با ایجاد تنش‌های فشارشی و شکل‌دهی گسل‌های رانده، زمینه‌ساز نفوذ آب‌ها به اعماق، گرمایش آنها و در نهایت صعود و خروج به صورت چشمه‌های آبگرم شده است. این مدل همچنین می‌تواند تفاوت رفتار چشمه‌های آب سرد مجاور را نیز به خوبی توجیه کند؛ چراکه این چشمه‌ها در سازندهای آهکی خالص و فاقد اورانیوم شکل گرفته و از مسیرهای کارستی تغذیه می‌شوند.

با این حال، این مدل مفهومی، هرچند از جامعیتی بیشتر نسبت به پژوهش‌های پیشین برخوردار است، اما برای تأیید نهایی نیازمند پشتیبانی داده‌های تکمیلی است. اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار و استفاده از ژئوترمومترهای دقیق‌تر، می‌تواند درک ما را از این سیستم پیچیده هیدروترمال عمیق‌تر کند. با وجود این محدودیت‌ها، یافته‌های این پژوهش می‌تواند در مدیریت منابع آب‌های ژئوترمال، ارزیابی پتانسیل پرتوزایی منطقه و همچنین درک بهتر از زمین‌پویایی البرز مرکزی مورد استفاده قرار گیرد.

References

Abdullayev, N., Guliyev, I., Kadirov, F., Huseynova, S. M., Javadova, A., Maharramov, B., & Mukhtarov, A. S. (2024). Novel interpretation of the crustal structure and hydrocarbon evolution within the South Caspian and Kura sedimentary basins, Azerbaijan. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *46*(3). https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306357

Alizadeh, H. (2022). The role of active geological structures in forming hot springs in Ramsar, Iran. *Geology Today*, *38*(6), 230-235. https://doi.org/10.1111/gto.12413.

Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, *23*(2). https://doi.org/10.1029/2003TC001530.

Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., & Qorashi, M. (2003). Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of structural geology*, *25*(5), 659-672. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00064-0.

Curewitz, D., & Karson, J. A. (1997). Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *79*(3-4), 149-168. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(97)00027-9

Devlin, W., Cogswell, J., Gaskins, G., Isaksen, G., Pitcher, D., Puls, D., . . . & Wall, G. (1999). The south caspian basin–young, cool, and full of promise. *AAPG Bulletin*, *83*(12).

Eshaghpour, M., & Alizadeh Saloomahalleh, H. (2015). Relationship between thermal springs of Western Alborz Mountains and regional tectonics. *Paper presented at the Proceedings of World Geothermal Congress, Melbourne, Australia*, 19–25.

Faulkner, D., Jackson, C., Lunn, R., Schlische, R., Shipton, Z., Wibberley, C., & Withjack, M. (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of structural geology*, *32*(11), 1557-1575. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009

Ghiassi-Nejad, M., Mortazavi, S., Cameron, J., Niroomand-Rad, A., & Karam, P. (2002). Very high background radiation areas of Ramsar, Iran: preliminary biological studies. *Health physics*, *82*(1), 87-93. 10.1097/00004032-200201000-00011.

Ghorbani, M. (2021). The geology of Iran: tectonic, magmatism and metamorphism: *Springer*.

Green, T., Abdullayev, N., Hossack, J., Riley, G., & Roberts, A. M. (2009). Sedimentation and subsidence in the south Caspian Basin, Azerbaijan. https://doi.org/10.1144/SP312.12.

Jackson, J. A. (2002). Using earthquakes for continental tectonic geology *International Geophysics* (81) 491-cp492): Elsevier. 10.1016/S0074-6142(02)80234-0

Nabavi, M. (1976). An introduction to the geology of Iran, Geological Survey of Iran: Farsi.

Nazari, H., & Shahidi, A. (2011). Seismotectonic of Iran (Alborz). *Geological Survey of Iran, Tehran*, *97*.

Nazemi, F. (1976). Studies of radioactive sediments in East of Ramsar. 42-48.

Ritz, J.-F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., & Vernant, P. (2006). Active transtension inside central Alborz: A new insight into northern Iran–southern Caspian geodynamics. *Geology*, *34*(6), 477-480. https://doi.org/10.1130/G22319.1.

Smith-Rouch, L. S. (2006). Oligocene–Miocene Maykop/Diatom Total Petroleum System of the South Caspian Basin Province, Azerbaijan, Iran, and Turkmenistan. *Retrieved from.* https://doi.org/10.3133/b2201I.

Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., ... & Tavakoli, F. (2004). Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data. *Earth and planetary science letters*, *223*(1-2), 177-185. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.04.017.

Zanchi, A., Zanchetta, S., Berra, F., Mattei, M., Garzanti, E., Molyneux, S., . . . & Sabouri, J. (2009). The Eo-Cimmerian (Late Triassic) orogeny in North Iran. https://doi.org/10.1144/SP312.3