



Research Article

Occurrence and genesis of Borjlu travertine located in Nair in Ardabil province based on the geochemical and stable isotopes findings

Ali Lotfibakhsh*

Department of Geology, Faculty of Science, Mohaghegh Ardabali University, Ardabil, Iran

Received: 06 May 2023 Accepted: 04 Dec 2023

Extended Abstract

Introduction: Travertine refers to all non-marine carbonate sediments consisting of calcite/aragonite formed by calcium and CO₂-rich fluids under surface conditions and low pressure. Travertine deposition takes place as a result of the decomposition of calcium bicarbonate and the release of CO₂ gas. Based on elemental geochemistry, origin of carbon dioxide gas and composition of stable isotopes, travertines are divided into two groups: thermogenic and meteogenic. Studies of stable isotopes of carbon and oxygen play a fundamental role in determining the origin and type of travertine. Thermogenic travertines, which are often associated with young volcanic areas, were deposited from medium to high temperature fluids and their carbon isotope composition is heavy. While meteogenic travertines are formed from relatively low temperature fluids and their carbon isotope composition is light.

Materials and methods: In this study, the mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of Borjlu travertine located in the Alborz-Azerbaijan magmatic belt in the northwest of Iran have been investigated based on field and laboratory studies. In this research, petrographic studies were done using microscopic thin sections by polarizing microscope. The samples were analyzed by inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS) to determine Ba and Sr contents. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) imaging have also been used to study the mineralogy of the samples. The analysis of stable isotopes of carbon and oxygen has been done to determine the isotopic composition of carbonate minerals by mass spectrometer (MS) method.

Results and discussion: Three facies including crystalline crust in the form of alternating light and dark layers, raft in the form of discontinuous layers, and shrub consisting of branching structures with rounded and buttons ends can be seen in Barjelo travertine. The result of XRD analysis from the crystalline crust shows that they are formed from pure calcite. SEM image shows the limited presence of microbial accumulations on the surface of calcite crystals. Petrographic studies of the crystalline crust part of travertine show that calcite crystals have grown in three forms of lamellar prisms, fibrous crystals and micrite grains. Some sections also indicate the alternating growth of crystalline crust and shrub facies. The average values of Ba and Sr in the travertine samples are 40.22 and 563.89 ppm, respectively. The values of $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ and $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ isotopes of the samples range from +1.44‰ to +2.19‰ and -14.39 to -16.51‰, respectively. The calculated values of $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ and $\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2)}$ for the samples show changes from +13.84‰ to +16.02‰ and -7.87 to -8.77‰ respectively.

Conclusion: The comparison of Ba and Sr contents indicates the thermogenic origin of Borjlu travertine. Although the $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ positive values in Borjlu travertine indicate its thermogenic origin, its values are lower than typical thermogene travertines. Comparison of $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ and $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ values showed that Borjlu travertine samples located in the field of thermogene and meteogene travertines, which indicates the mixing of two fluids with heavy and light isotopic composition. The calculated values of $\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2)}$ indicate the inorganic and internal origin of CO₂ in the travertine-forming fluid. Also, in the isotope composition diagram of $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ versus $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$, carbonate rocks are shown as the source of CO₂ gas for the formation of Borjlu travertine. Some field evidences, such as the formation of crystalline crust and shrub facies, the presence of a hot spring with a relatively high temperature in the studied area, and the presence of a geothermal reservoir in the depth are signs of active hydrothermal phenomena in the area. It is thought that the presence of limestone units in the region and their contact with the fault system has provided the possibility of infiltration and circulation of hydrothermal fluids containing CO₂ inside them. In this way, the bicarbonate ions necessary for the formation of travertine has been provided by decarbonation and dissolution of these carbonates. It seems that the fault system acted as a conduit for the migration and ascent of fluids containing calcium bicarbonate towards the surface. The mixing of this fluid with meteoric waters near the surface caused lighter isotopic composition of the ascending fluid. Based on isotope composition of travertine samples, the temperature of outflowing fluid is estimated about 70 °C.

Keywords: Stable isotope, Borjlu, Travertine, Thermogene.


Citation: Ali Lotfibakhsh (2023). Occurrence and genesis of Borjlu travertine located in Nair in Ardabil, *Res. Earth. Sci.* 14(4), (63-78)
DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103527

* Corresponding author E-mail address: lotfibakhsh@hotmail.com



نگرشی بر رخداد و زایش تراورتن برجلو واقع در نیر در استان اردبیل براساس یافته‌های ژئوشیمی و ایزوتوپ‌های

پایدار

علی لطفی بخش* 

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

چکیده گسترده

مقدمه: تراورتن به تمام رسوبات کربناتی غیر دریایی متشکل از کلسیت/آراگونیت گفته می‌شود که توسط سیالات کلسیم‌دار غنی از CO₂ در شرایط سطحی و فشار کم تشکیل می‌شود. ترسیب تراورتن در اثر تجزیه بی‌کربنات کلسیم و خروج گاز CO₂ صورت می‌گیرد. تراورتن‌ها را براساس ژئوشیمی عنصری، منشأ گاز CO₂ و ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار، به دو گروه گرمزاد و سطحی‌زاد تقسیم می‌کنند. مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن برای تعیین منشأ و نوع تراورتن نقش اساسی ایفا می‌کنند. تراورتن‌های گرمزاد که اغلب با مناطق آتشفشانی جوان مرتبط هستند از سیالات با دمای متوسط به بالا رسوب کرده و ترکیب ایزوتوپ کربن آنها سنگین است. در حالی که تراورتن‌های سطحی‌زاد از سیالات با دمای نسبتاً پایین تشکیل شده و ترکیب ایزوتوپ کربن آنها سبک است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه به بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و ایزوتوپی تراورتن برجلو واقع در کمرند ماگمایی البرز-آذربایجان در شمال غرب ایران براساس مطالعات میدانی و آزمایشگاهی پرداخته شده است. در این تحقیق مطالعات پتروگرافی با استفاده از مقاطع نازک میکروسکوپی توسط میکروسکوپ پلاریزان صورت گرفته است. برای تعیین مقادیر Sr و Ba نمونه‌ها به روش طیف سنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) تجزیه شدند. همچنین برای مطالعه کانی‌شناسی نمونه‌ها از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن جهت تعیین ترکیب ایزوتوپی کانی‌های کربناتی به روش طیف سنج جرمی (MS) انجام شده است.

نتایج و بحث: در تراورتن برجلو سه رخساره قشر متبلور به شکل تناوبی از لایه‌های روشن و تیره، رخساره شناور به صورت لایه‌های ناپیوسته و رخساره بوته‌ای شامل ساختارهای انشعابی با انتهای گرد و دکمه‌ای قابل مشاهده است. نتیجه آنالیز XRD نمونه ارسالی از قشر متبلور نشان دهنده تشکیل آنها از کلسیت خالص است. تصاویر SEM نشان دهنده حضور محدود تجمعات میکروبی بر روی سطح بلورهای کلسیت است. مطالعات پتروگرافی از بخش متبلور تراورتن نشان می‌دهد که بلورهای کلسیت به سه شکل منشورهای تیغه‌ای، الیافی و میکریتی رشد کرده‌اند. برخی مقاطع نیز نشانگر رشد متناوب رخساره‌های قشر متبلور و بوته‌ای است. مقادیر متوسط Sr و Ba در نمونه‌های تراورتن برجلو به ترتیب ۴۰/۲۲ و ۵۶۳/۸۹ ppm است. دامنه تغییرات مقادیر ایزوتوپ $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ و $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ نمونه‌ها به ترتیب از +۱/۴۴‰ تا +۲/۱۹‰ و -۱۴/۳۹‰ تا -۱۶/۵۱‰ است. مقادیر محاسبه شده $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ و $\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2)}$ برای نمونه‌ها به ترتیب تغییراتی از +۱۳/۸۴‰ تا +۱۶/۰۲‰ و -۷/۸۷‰ تا -۸/۷۷‰ نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری: مقایسه مقادیر Sr و Ba نشان دهنده منشأ گرمزادی تراورتن برجلو است. اگرچه مقادیر مثبت $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ در تراورتن برجلو نشانگر گرمزاد بودن آن است اما مقادیر آن از تراورتن‌های شاخص گرمزاد پایین‌تر است. مقایسه مقادیر $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ و $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ نشان داد که نمونه‌های تراورتن برجلو در محدوده تراورتن‌های گرمزاد و سطحی‌زاد قرار گرفته‌اند که بیانگر اختلاط دو سیال با ترکیب ایزوتوپی سنگین و سبک است. مقادیر محاسبه شده $\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2)}$ نشان دهنده منشأ غیر آلی و درونی CO₂ در سیال تراورتن‌ساز است. همچنین در نمودار ترکیب ایزوتوپ $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ در مقابل $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ ، سنگ‌های کربناتی به عنوان منشأ گاز CO₂ برای تشکیل تراورتن برجلو نشان داده شده‌اند. برخی شواهد میدانی نظیر تشکیل رخساره‌های شناور و بوته‌ای، وجود چشمه آبگرم با دمای نسبتاً بالا در پهنه مورد مطالعه و نیز اثبات حضور یک مخزن زمین‌گرمایی در عمق منطقه نشانه‌های فعال بودن محدوده از منظر پدیده‌های گرمزادی و گرمایی هستند. تصور می‌شود که حضور واحدهای آهکی در منطقه و همبندی آنها با سیستم گسلی، امکان نفوذ و چرخش سیالات گرمایی حاوی CO₂ در داخل آنها را فراهم نموده و با کربن‌زدایی کربنات‌ها یون بی‌کربنات لازم برای تشکیل تراورتن‌ها را تأمین کرده است. به نظر می‌رسد که سیستم گسلی به عنوان مجرای برای مهاجرت و صعود سیالات حاوی بی‌کربنات کلسیم به سمت سطح زمین عمل کرده است. اختلاط این سیال با آب‌های جوی در نزدیکی سطح سبب سبک‌تر شدن ترکیب ایزوتوپی سیال صعود کننده شده است. دمای سیال خروجی براساس ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های تراورتن در حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

واژگان کلیدی: ایزوتوپ پایدار، برجلو، تراورتن، گرمزاد.

استناد: علی لطفی بخش (۱۴۰۲). نگرشی بر رخداد و زایش تراورتن برجلو واقع در نیر در استان اردبیل، پژوهشهای دانش زمین: ۱۴(۴)،

DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103527 (۶۳-۷۸)

E-mail: lotfibakhsh@hotmail.com

* نویسنده مسئول:



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقدمه

تراورتن همراه با تופا و اسپلیوتم مهم‌ترین ته نشست‌های کربناتی قاره‌ای هستند و تشکیل آنها به وسیله عوامل مختلفی کنترل می‌شود. تراورتن به تمام رسوبات کربناتی غیر دریایی ایجاد شده در محل چشمه‌ها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و غارها گفته می‌شود (Fouke et al, 2000) که در طی تشکیل آن سیالات کلسیم‌دار و غنی از CO₂ در شرایط سطحی و فشار کم قرار می‌گیرند (Jamtveit et al, 2006). تشکیل تراورتن به دلیل نسبت دادن آن به هر دو فرآیند زیستی و غیر زیستی همواره بحث‌برانگیز می‌باشد (Fouke, 2011) و نهشته شدن آن در سطح زمین می‌تواند ناشی از کاهش دما، کاهش فشار، آشفستگی جریان سیال و فعالیت‌های بیولوژیکی باشد (Pentecost, 2005; Brogi and Capezzuoli, 2009). از شاخصه‌های ژئوشیمیایی مختلفی می‌توان برای تفکیک و شناسایی کربنات‌های غیردریایی استفاده کرد. به‌طور مثال تراورتن‌ها دارای مقادیر بالایی از سولفور و عناصر کمیاب نسبت به دیگر انواع کربنات‌های آب شیرین هستند که در نتیجه فعالیت و ورود محلول‌های گرمایی اولیه ایجاد شده است. در حالی که توفاهای رسوبات متخلخل محیط آب سرد بوده که حاوی مقادیر بالایی از قطعات گیاهی و جانوری هستند (Janssen et al, 1999). تراورتن یک سنگ آهکی قاره‌ای رسوب کرده در اطراف چشمه‌های آبگرم موجود در مناطق آتشفشانی جوان و سیستم‌های زمین‌گرمایی است و بیشتر از کلسیت و آراگونیت تشکیل شده است (Pentecost, 2005). ترسیب و نهشت تراورتن در اثر تجزیه بی‌کربنات کلسیم و خروج گاز CO₂ صورت می‌گیرد و جوشش آب در چشمه‌های تراورتن‌ساز نیز به دلیل خروج این گاز است. به‌طور کلی صحبت در مورد شرایط تشکیل و خصوصیات تراورتن و سایر کربنات‌های آب شیرین از اواخر قرن نوزدهم آغاز شده است. اما مطالعه در مورد خصوصیات ژئوشیمیایی و ایزوتوپی و همچنین مطالعه آب و هوای دیرینه، مربوط به چند دهه گذشته است (Kele et al, 2011). ایران با داشتن ذخایر و معادن کوچک و بزرگ تراورتن، یکی از کشورهای دارای پتانسیل اقتصادی سنگ‌های تراورتن محسوب می‌شود. این سنگ‌ها در برخی نقاط همچون آذرشهر (تقی‌پور، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۸) شهرت جهانی داشته و خصوصیات منحصر به فردی دارند. نهشته‌های تراورتن آب اسک (رحمانی

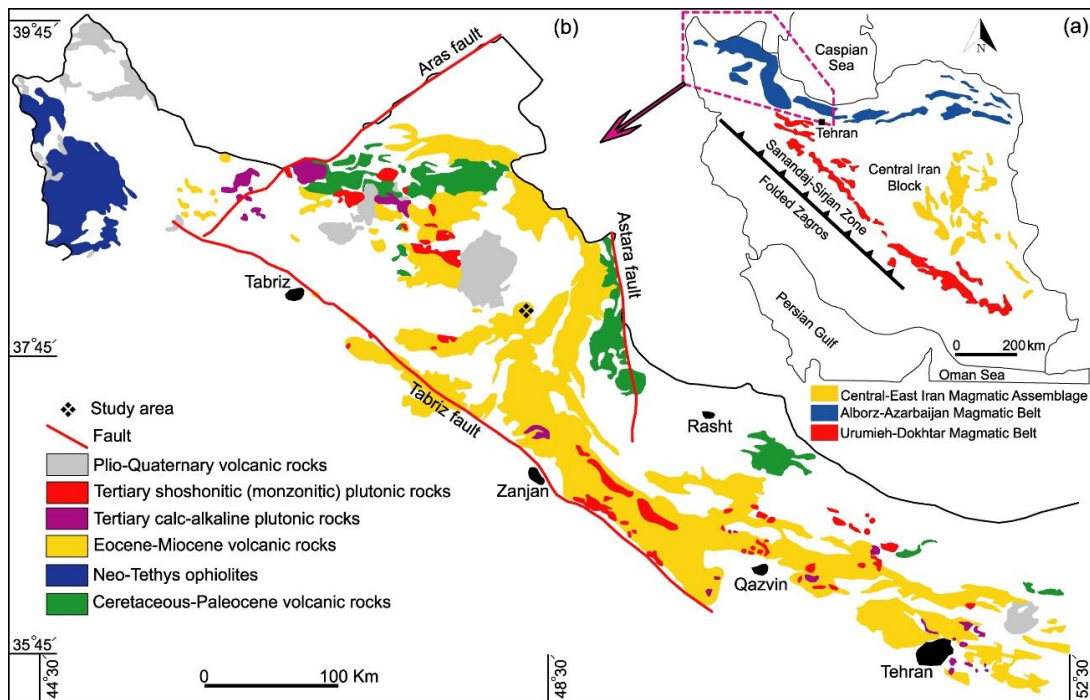
جوانمرد و همکاران، ۱۳۹۱)، محلات (صالحی و محمدی سیانی، ۱۳۹۲)، قروه - تکاب (روشنک و همکاران، ۱۳۹۶)، آذرشهر (ابراهیم زاده و همکاران، ۱۳۹۸) و مجدر (لطفی بخش، ۱۴۰۱) از جمله تراورتن‌هایی هستند که مطالعات ایزوتوپی بر روی آنها انجام شده است. هدف از این مقاله، بررسی نحوه تشکیل و منشأ تراورتن برجلو بر پایه شواهد ژئوشیمیایی و داده‌های ایزوتوپ پایدار کربن و اکسیژن است.

منطقه مورد مطالعه

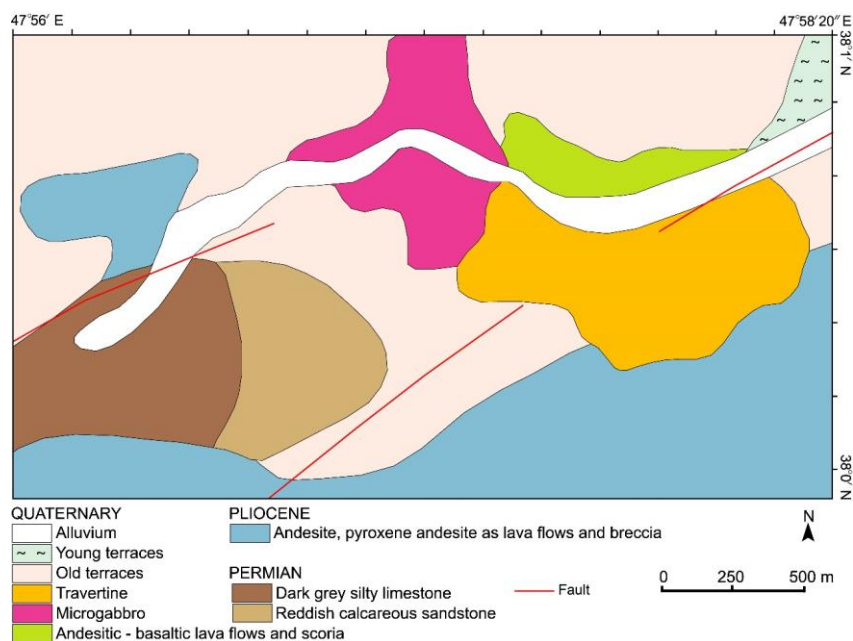
محدوده برجلو (بوشلی به گویش محلی) در ۴۷ کیلومتری جنوب غرب اردبیل و ۵ کیلومتری شهرستان نیر در حاشیه جاده ارتباطی اردبیل - تبریز واقع شده است. این گستره براساس تقسیم بندی واحدهای ساختاری ایران (آقناباتی، ۱۳۸۳) در روی پهنه البرز غربی - آذربایجان و همچنین بر طبق نقشه زیر تقسیمات اصلی تکتونیکی ایران (Stocklin, 1977) در پهنه آتشفشانی ترشیر - کواترنر واقع می‌شود (شکل ۱). قدیمی‌ترین واحدهای منطقه را ماسه سنگ‌های آهکی وابسته به سازند درود و سنگ‌های آهکی ستبر تا متوسط لایه حاوی چرت و اکسیدهای آهن متعلق به سازند روته به سن پرمین تشکیل می‌دهند که به صورت هم‌شیب در بخش غربی محدوده مورد مطالعه برونزد دارند. جریان‌های گدازه و گدازه‌های برشی شده با ترکیب آندزیتی تا پیروکسن آندزیتی به سن پلیوسن واحد بعدی هستند که بر روی سطح فرسایشی آهک‌های روته قرار گرفته‌اند (شکل ۲). سنگ‌های این واحد بافت میکرولیتی پرفیری داشته که در آنها درشت بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند بازالتی و اوژیت در زمینه‌ای متشکل از پلاژیوکلاز، اوژیت و کانی‌های مات قرار گرفته‌اند. گدازه‌های آندزیتی تا آندزیت بازالتی دیگر واحد آتشفشانی است که به‌طور محدود در بخش شمالی توده تراورتن برونزد دارند. این گدازه‌ها اغلب متخلخل بوده و بافت میکرولیتی پرفیری متشکل از درشت بلورهای پلاژیوکلاز، اوژیت و الیون تا ویتروفیریک دارند و در پهنه مورد مطالعه بر روی گدازه‌های پلیوسن قرار گرفته‌اند. توده نیمه آتشفشانی میکروگابرو که در حاشیه غربی توده تراورتن برونزد دارد جوان‌ترین واحد آذرین محدوده مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. سنگ‌های این واحد بافت اینترگرانولار تا میکروگرانولار پرفیری داشته و حاوی کانی

سراب قابل مشاهده می‌باشد که قسمتی از آن نیز قبلاً استخراج شده است. همچنین در بخش میانی توده تراورتن چشمه‌ای با حداقل دبی همراه با آثار گاززدایی مشهود در سطح آن فعال است (شکل ۳).

های پلاژیوکلاز کلسیک، اوژیت، الیوین به شدت ایدینگسیتی شده و فلدسپات آلکالن هستند (امینی، ۱۳۷۳). توده تراورتن در پهنه برجلو به صورت یک تپه پست به رنگ زرد تا قرمز در مجاورت جاده اصلی نیر به



شکل ۱: توزیع مجموعه‌های ماگمایی سنوزوئیک در ایران (Siani et al, 2015)؛ b: نقشه زمین‌شناسی که واحدها و ساختارهای سنگی اصلی کمر بند ماگمایی البرز-آذربایجان و موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران را نشان می‌دهد (Castro et al, 2013).



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی محدوده برجلو



شکل ۳: الف و ب: نمایی از توده تراورتن مورد مطالعه همراه با بلوک‌های استخراجی رها شده در بخش پایینی توده؛ پ و ت: نمایی دور و نزدیک از چشمه نیمه فعال در بخش میانی توده تراورتن که در نمای نزدیک حباب‌های حاصل از رهایی گاز CO₂ در سطح آن مشخص است.

تعیین مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن انتخاب و پس از پودر شدن به آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک ارسال گردیدند. نمونه‌ها در داخل کیپسول‌های شیشه ای که قبلاً هوای موجود در آنها تخلیه شده تحت تأثیر اسید فسفریک قرار داده شدند تا گاز CO₂ متصاعد شده از هر نمونه توسط دستگاه طیف سنج جرمی اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه ISOPRIME 100 صورت گرفت و دقت آن ± 0.3 در هزار برای $\delta^{13}\text{C}$ و ± 0.1 در هزار برای $\delta^{18}\text{O}$ است. نتایج نمونه‌ها طبق روابط ۱ و ۲ نسبت به استاندارد مرجع VPDB^۱ برای کربن و اکسیژن سنجیده شده و بر حسب در هزار (%) بیان شده‌اند:

رابطه (۱)

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{Sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{Standard}}} - 1 \right] \times (1000)$$

رابطه (۲)

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Standard}}} - 1 \right] \times (1000)$$

مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ علاوه بر استاندارد مرجع VPDB نسبت به استاندارد SMOW^۲ نیز طبق رابطه ۳ محاسبه شده و بر حسب در هزار بیان می‌شود (آدابی، ۱۳۹۰؛ Pentecost, 2005):

رابطه (۳)

$$\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})} = 1.03086 \delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})} + 30.86$$

بخش دیگری از نمونه‌های انتخابی برای مطالعات ایزوتوپی، جهت تعیین مقادیر Sr و Ba با استفاده از روش ICP-MS به آزمایشگاه زرازمای زنگان ارسال گردیدند. مقادیر باریم و استرانسیم و نتایج تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار کربن و

منطقه برجلو خود بخشی از سیستم تکتونوماگمایی است که در کنترل سیستم‌های ماگمایی ولکانو پلوتونی نیر- زرج آباد، قصر داغ و سبلان از یک سو و سیستم‌های تکتونیکی- ساختاری خطواره نیر- اردبیل (بالیخلوچای)، کنگرلو- اردبیل و جنوب قوشه داغ (تلخه رود) از سوی دیگر به عنوان عامل ناحیه‌ای بوده است؛ که توانسته منطقه تکتونو- ماگمایی با تلاطم و عملکرد متفاوتی را به وجود آورد. در پهنه مورد مطالعه چشمه آبگرم بوشلی در ۵۰۰ متری روستای بوشلی واقع شده است. دبی چشمه در حدود ۲ لیتر در ثانیه و به صورت دائمی و سرریز در جریان است. دمای آب تقریباً بالا و در حدود ۴۹ درجه سانتی‌گراد است. ظاهر و رنگ آب زلال و بی‌رنگ و بی‌بو و مزه آن کمی گس و شور با pH ۶/۹ است. آنیون و کاتیون‌های مهم آن عبارتند از سدیم، کلسیم، کلر و بی‌کربنات، ترکیب آب آن از نوع کلروبی‌کربنات سدیک و کلسیک گازدار خیلی گرم است (بلبلی، ۱۳۹۵). مطالعه داده‌های مگنتوتلوریک در پهنه بوشلی حضور یک مخزن زمین‌گرمایی در عمق بیش از ۳۰۰۰ متری نشان داده است (زینال‌پور و همکاران، ۱۳۹۷).

مواد و روش‌ها

در طی پیمایش و بازدید میدانی از نهشته تراورتن در مجموع تعداد ۳۷ نمونه برداشت شد. پس از انتخاب تعدادی از نمونه‌ها جهت تهیه مقطع نازک، تعداد ۹ نمونه برای

تصویبررداری SEM به شرکت پژوهش‌های متالورژی رازی ارسال گردید.

اکسیژن نمونه‌های ارسالی از توده تراورتن در گستره برجلو در جدول ۱ ارائه شده است. دو نمونه نیز جهت مطالعه کانی‌شناسی با استفاده از روش تجزیه XRD و

جدول ۱: نتایج تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن نمونه‌ها از توده تراورتن برجلو

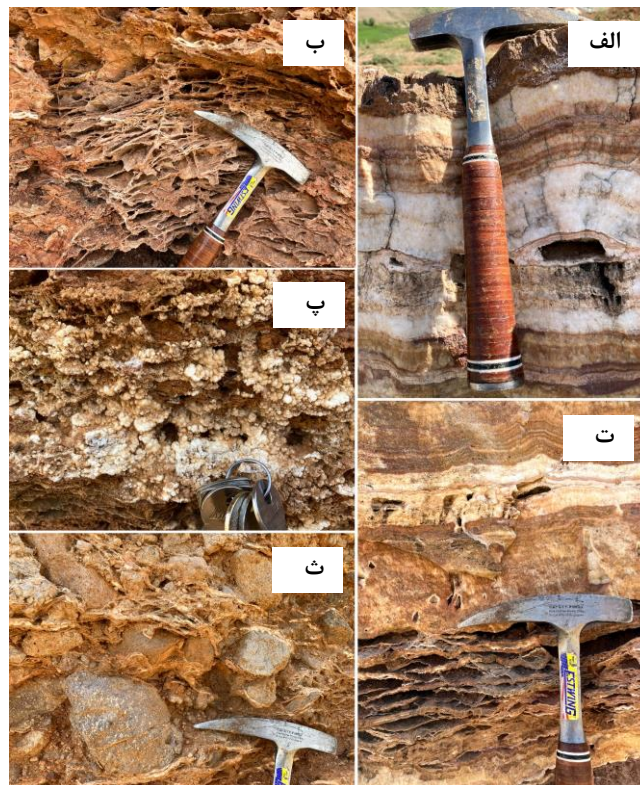
Sample	Ba ppm	Sr ppm	$\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ ‰	$\delta^{13}\text{C}_{(\text{CO}_2)}$ ‰
Tra-B1	68	721	+1.66	-16.03	+14.33	-8.50
Tra-B2	57	631	+1.69	-16.51	+13.84	-8.47
Tra-B3	45	612	+1.88	-15.73	+14.64	-8.24
Tra-B4	35	539	+2.03	-14.39	+16.02	-8.06
Tra-B5	28	571	+1.54	-15.44	+14.94	-8.65
Tra-B6	31	607	+1.44	-16.01	+14.35	-8.77
Tra-B7	30	498	+1.98	-15.98	+14.39	-8.12
Tra-B8	21	339	+2.11	-14.71	+15.70	-7.97
Tra-B9	47	557	+2.19	-14.82	+15.58	-7.87
Average	40.22	563.89	+1.83	-15.51	+14.86	-8.30

معمول در نتیجه ته نشست سریع از جریان آب چشمه‌ها در بسترهای با شیب ملایم یا صاف، لبه‌ها و دیواره سدها، سطح پایین دیواره آبشارها و در شکاف-پشته‌ها و همچنین به شکل تناوبی از لایه‌های روشن و تیره رنگ در دهانه چشمه‌ها تشکیل می‌شود (Pentecost, 2005).

بحث و نتایج

بررسی میدانی و کانی‌شناسی تراورتن برجلو

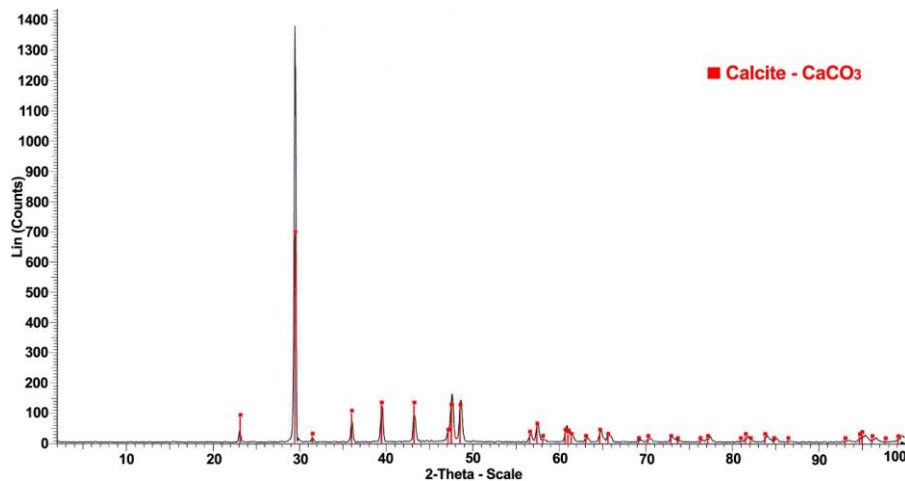
نهشته‌های تراورتن رخساره‌های سنگی متنوعی بر حسب شرایط و عوامل مؤثر در تشکیل نشان می‌دهند. در تراورتن برجلو سه رخساره قشر متبلور، شناور و بوته‌ای قابل مشاهده است (شکل ۴). قشرهای متبلور^۳ در تراورتن‌ها به‌طور



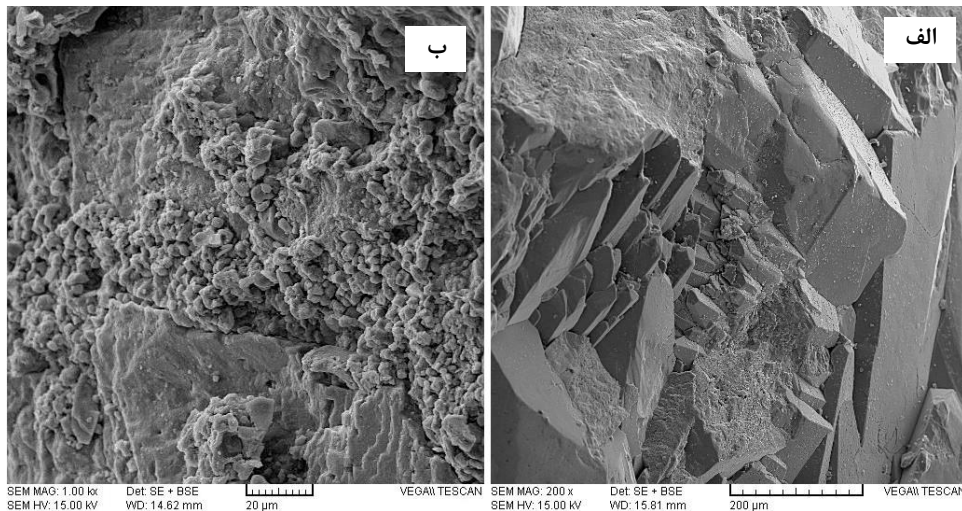
شکل ۴: رخساره‌های کربناتی تشکیل شده در تراورتن برجلو: الف: لایه‌های متناوب تشکیل دهنده قشر متبلور؛ ب: رخساره شناور متشکل از لایه‌های نازک رسوب کرده بر روی هم؛ پ: رخساره بوته‌ای؛ ت: تناوبی از رخساره قشر متبلور در بالا و شناور در پایین؛ ث: قطعات سنگ بستر آتشفشانی در قاعده توده تراورتن.

آید. رخساره بوته‌ای^۵ شامل ساختارهای انشعابی با انتهای گرد و دکمه‌ای هستند که توسط فعالیت باکتریایی تشکیل شده و از سیمای رایج در تراورتن‌های گرمزادی محسوب می‌شود (Pentecost, 2005). نتیجه آنالیز XRD نمونه ارسالی از قشر متبلور نشان دهنده تشکیل آنها از کلسیت خالص است (شکل ۵). تصاویر SEM نشان دهنده حضور محدود تجمعات میکروبی بر روی سطح بلورهای کلسیت است (شکل ۶).

ته نشست کانی‌ها در تراورتن‌ها همیشه به بستر سخت نیاز ندارد و گاهی کانی‌ها در سطح آب به واسطه نیروی کشش سطحی آن به صورت لایه‌های نازک شناور^۴ تشکیل می‌شوند. رشد لایه در نهایت سبب سنگینی و فرو رفتن آن به کف حوضچه شده و در آنجا به صورت لایه‌های ناپیوسته روی یکدیگر قرار می‌گیرند (Pentecost, 2005). رخساره شناور بیشتر در تراورتن‌های گرمزادی دیده شده و در نتیجه خروج سریع CO₂ در حوضچه‌های آرام به وجود می‌



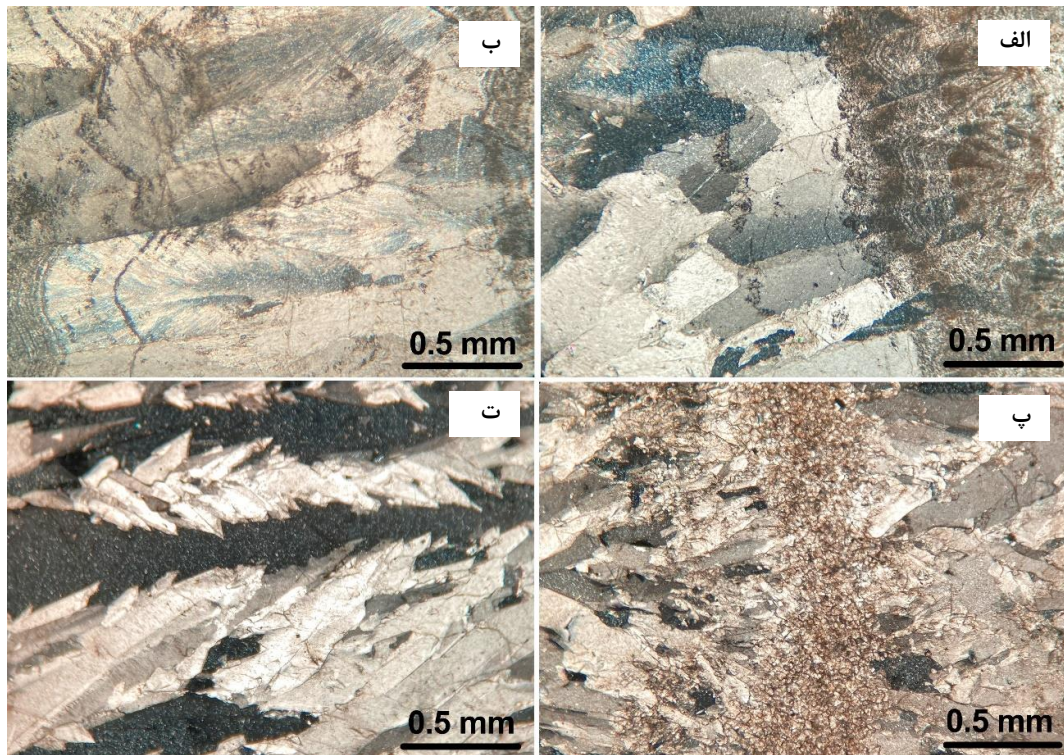
شکل ۵: الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ارسالی از تراورتن برجلو



شکل ۶: تصاویر SEM از نمونه‌های تراورتن برجلو: الف: تجمعی از بلورهای منشوری به هم فشرده کلسیت؛ ب: تجمعی از اجتماع میکروبی تشکیل شده بر روی بلورهای کلسیت.

متناوبی متشکل از بلورهای تیغه‌ای و میکریت حضور داشتند که بیانگر رشد فصلی آنها در زمستان به صورت غیرزیستی با تشکیل بلورهای تیغه‌ای و در بهار/تابستان به صورت زیستی با تشکیل میکریت است (Pentecost, 2005) (شکل ۷).

جهت مطالعات پتروگرافی از بخش متبلور تراورتن تعدادی مقاطع میکروسکوپی تهیه گردید. در این واحد بلورهای کلسیت به سه شکل منشورهای تیغه‌ای، الیافی و میکریتی رشد کرده‌اند. در برخی مقاطع رخساره‌های قشر متبلور و بوته‌ای به صورت متناوب تشکیل شده‌اند. همچنین لایه‌های

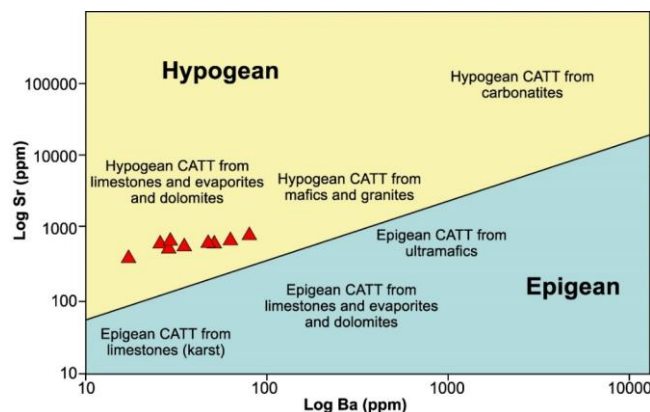


شکل ۷: الف: تغییر رخساره از قشر متبلور در سمت چپ به بوته‌ای در سمت راست؛ ب: رشد الیافی بلورهای کلسیت؛ پ: رشد فصلی تراورتن شامل لایه زمستانی متشکل از بلورهای تیغه‌ای کلسیت در دو طرف و لایه تابستانی متشکل از میکرواسپار و میکریت در وسط؛ ت: رشد تیغه‌ای بلورهای کلسیت.

۲۰۰ ppm دارند. مقادیر باریوم و استرانسیم در انواع مربوط به سیستم‌های سطحی‌زاد بسیار کم و به ترتیب کمتر از ۸۰ و ۱۰۰ ppm است (Minissale et al, 2002). با توجه به اینکه مقادیر متوسط باریوم و استرانسیم در نمونه‌های تراورتن برجلو به ترتیب ۴۰/۲۲ و ۵۶۳/۸۹ ppm است (جدول ۱) این نمونه‌ها در نمودار باریوم در برابر استرانسیم در محدوده گرم‌زاد با منشأ سنگ آهک، تیخیری‌ها و دولومیت قرار می‌گیرند (شکل ۸).

مطالعه عناصر Sr و Ba و ایزوتوپ‌های C و O

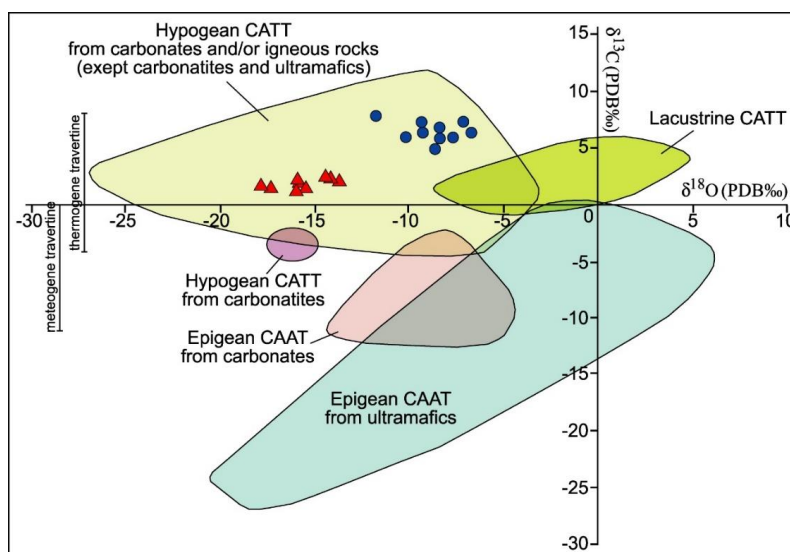
در تراورتن‌ها می‌توان از نمودار استرانسیم در برابر باریوم برای تشخیص رژیم هیدرولیکی و گروه‌های سنگ منشأ مختلف استفاده کرد (Teboul et al, 2016). برای نمونه، گروه سنگ‌های آهکی، تیخیری‌ها و دولومیت‌ها معمولاً مقادیر باریوم کم (کمتر از ۱۰۰ ppm) و استرانسیم زیاد (بیشتر از ۴۰۰ ppm) دارند. سنگ‌های با منشأ گرانیتی و مافیک مقادیر باریوم ۹۳۰-۱۵ و استرانسیم بیش از



شکل ۸: نمودار نمایی باریوم در برابر استرانسیم برای تراورتن‌ها از منشأهای مختلف و موقعیت نمونه‌های متعلق به تراورتن برجلو (▲) روی این نمودار (Teboul et al, 2016).

کم هستند و ترکیب ایزوتوپ کربن آنها سنگین ($+8\%$) < $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ است. در حالی که تراورتن‌های سطحی‌زاد از سیالات با دمای نسبتاً پایین تشکیل شده و نرم با بافت متخلخل و محتوای مواد آلی بالا هستند و ترکیب ایزوتوپ کربن آنها سبک ($\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})} < 0\%$) است (Kele et al, 2003). مقادیر ایزوتوپی کربن و اکسیژن در تراورتن‌ها در نتیجه عواملی نظیر دمای آب، میزان تبخیر، سرعت جریان، فاصله از چشمه و فعالیت‌های زیستی می‌تواند تغییر کند. همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات مقادیر ایزوتوپ $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ نمونه‌ها از $+1/44\%$ تا $+2/19\%$ با میانگین $+1/83\%$ است. همچنین تغییرات مقادیر ایزوتوپ $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ نمونه‌ها دامنه‌ای از $-14/39\%$ تا $-16/51\%$ با میانگین $-15/51\%$ دارد. در شکل ۹ انواع مختلف تراورتن و توفای گرم‌زاد و سطحی‌زاد براساس مقادیر ایزوتوپ کربن و اکسیژن و نوع سنگ مؤثر در تشکیل آنها ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نمونه‌های تراورتن برجلو در محدوده تراورتن و توفای گرم‌زاد از سنگ منشأ کربناته یا آذرین (به جز کربناتیت و اولترامافیک) قرار می‌گیرند. در این نمودار نمونه‌های تراورتن مجرد (لطفی بخش، ۱۴۰۱) واقع در ۵۵ کیلومتری جنوب شرق اردبیل به عنوان نزدیک‌ترین توده تراورتن به محدوده برجلو که بر روی منطقه ولکانوپلوتونیک مشابهی واقع شده است نیز جهت مقایسه ارائه شده است.

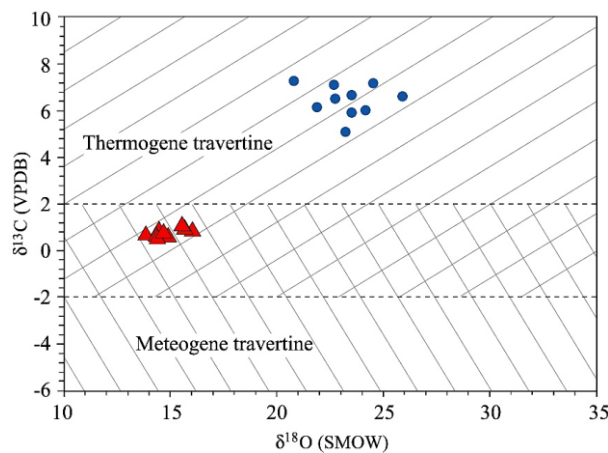
گروه کربنات‌ها همگی دامنه وسیعی از تغییرات ایزوتوپ کربن ($\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ $+15\%$ تا -25%) و ایزوتوپ اکسیژن ($\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ $+35\%$ تا 0%) را به نمایش می‌گذارند (Pentecost, 2005). تراورتن‌ها نسبت به $\delta^{13}\text{C}$ غنی‌شدگی نسبی نشان داده و این ویژگی یکی از ابزارهای مورد استفاده در تمایز آنها از دیگر سنگ‌های کربناتی است (Pedley, 2009). همچنین فرآیند تفکیک ایزوتوپی کربن و اکسیژن در نهشته‌های تراورتن مهم است. زیرا این تفکیک، اطلاعاتی را در مورد منبع دی‌اکسید کربن، شرایط فیزیکوشیمیایی ترسیب (نرخ درجه حرارت) و تأثیر فرآیندهای زیستی بیان می‌کند. با توجه به اینکه دی‌اکسید کربن موجود برای تشکیل تراورتن ممکن است از منابع گوناگونی همچون کربن‌زدایی سنگ آهک، گاززدایی جبهه، هیدرولیز و اکسیداسیون کربن احیایی مشتق شده باشد، تفسیر نشانه‌های ژئوشیمیایی تراورتن‌ها نیاز به توجه خاص دارد (Pentecost, 2005). تراورتن‌ها را براساس ژئوشیمی عنصری، منشأ گاز دی‌اکسید کربن و ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار، به دو گروه گرم‌زاد^۶ و سطحی‌زاد^۷ تقسیم می‌کنند (Mohammadi et al, 2020). مطالعات بر روی ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن برای تعیین منشأ و نوع تراورتن از سال ۱۹۵۰ آغاز شد (Kele et al, 2003) و امروزه این مطالعات در بررسی تراورتن‌ها نقش اساسی ایفا می‌کنند. تراورتن‌های گرم‌زاد از سیالات با دمای متوسط به بالا رسوب کرده و اغلب دارای بافت توده‌ای و محتوای مواد آلی



شکل ۹: مقادیر ایزوتوپ کربن و اکسیژن برای تراورتن و توفای کلسیتی آراگونیتی (CATT) و موقعیت نمونه‌های متعلق به تراورتن برجلو (●) و تراورتن مجرد (▲) در روی آن (Teboul et al, 2016)

پیچیده‌تر از تفسیر داده‌های $\delta^{13}\text{C}$ است (Pentecost, 2005). مقادیر پایین ^{18}O با فرآیند تبخیر ضعیف و دمای بالای آب در هنگام تشکیل تراورتن مرتبط است. همچنین کاهش مقدار ^{18}O در نهشته‌های گرمزاد می‌تواند در نتیجه تبادل ایزوتوپی با سنگ میزبان صورت بگیرد (Fritz, 1968). جهت تعیین نقش و میزان مشارکت سیالات گرمابی و آب‌های جوی مقادیر $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ برای نمونه‌ها براساس رابطه ۳ محاسبه شد که تغییراتی از $+13/84\%$ تا $+16/02\%$ با مقدار میانگین $+14/86\%$ نشان می‌دهند (جدول ۱). ترسیم داده‌های $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ در برابر $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که داده‌های متعلق به تراورتن مجدر منطبق با شاخص ایزوتوپی تراورتن‌های گرمزاد است (Pentecost, 2005)، به این مفهوم که توسط سیالات حاوی CO_2 با منشأ عمیق به وجود آمده‌اند (لطفی بخش، ۱۴۰۱). در حالی که داده‌های متعلق به تراورتن برجلو در محدوده تراورتن‌های گرمزاد و سطحی‌زاد (نزدیک به مرز گرمزاد) قرار گرفته‌اند. در چنین شرایطی تراورتن از سیالات حاوی CO_2 با دو منشأ درونی (ایزوتوپ سنگین‌تر) و سطحی (ایزوتوپ سبک‌تر) تشکیل شده‌اند (Sinisi et al, 2016; Torok et al, 2017).

مقادیر مثبت ایزوتوپ $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ نمونه‌ها دلالت بر گرمزاد بودن تراورتن برجلو دارد. مقادیر مثبت و بالای $\delta^{13}\text{C}$ می‌تواند نشان دهنده ارتباط سیال با منشأ عمیق CO_2 مرتبط با کربن‌زدایی کربنات‌ها، فرآیندهای حرارتی، دگرگونی و ماگمایی و یا انتشار CO_2 حاصل از ولکانسیسم فعال باشد (Karaisaoglu and Orhan 2018; Teboul et al, 2016; Beradi et al, 2016). همچنین مقادیر بالای $\delta^{13}\text{C}$ در برخی تراورتن‌ها نتیجه افزایش فرآیندهای گاززدایی CO_2 و یا وجود آب‌های سطحی و زیرزمینی غنی از ^{13}C است (Ibrahim et al, 2017; Turi, 1986). همانطور که در نمودار شکل ۹ مشخص است اگرچه هر دو تراورتن برجلو و مجدر در محدوده گرمزاد قرار دارند، اما مقادیر کربن و اکسیژن نمونه‌های تراورتن برجلو نسبت به نمونه‌های تراورتن مجدر سبک‌تر است. در نتیجه این دو تراورتن علی‌رغم داشتن منشأ یکسان باید تحت شرایط متفاوتی رسوب کرده باشند. مقادیر $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ به دلیل تغییرات در ترکیب و دمای آب، غلظت کربن و گونه یونی (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) دامنه گسترده‌ای دارد (Kele et al, 2008). به همین دلیل تفسیر داده‌های $\delta^{18}\text{O}$ به دلیل امکان تبادل اکسیژن موجود در ساختمان کربنات‌ها با اکسیژن مولکول‌های آب تا حدودی



شکل ۱۰: نمودار مقادیر $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ در مقابل $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ و موقعیت نمونه‌های متعلق به تراورتن برجلو (▲) و تراورتن مجدر (●) در روی آن (Pentecost, 2005).

فرآیند گاززدایی سریع و ۲) فعالیت میکروب‌ها و جلبک‌ها (Rodrigo-Naharro et al, 2013). تراورتن‌های گرمزاد همواره حاوی برخی از حامل‌های جوی هستند و در ارتباط با انحلال سنگ آهک در سیستم‌های هیدروژئولوژیکی عمقی می‌باشند و حجم زیاد دی‌اکسید کربن آنها از فرآیندهای حرارتی درون زمین یا حتی از زیر پوسته زمین

منشاء دی‌اکسید کربن در تشکیل تراورتن برجلو

ترسیب کلسیت نتیجه کاهش pH حاصل از خروج CO_2 در ضمن به تعادل رسیدن سیال با اتمسفر است (Rodrigo-Naharro et al, 2013; Dreybrodt et al, 1992). به نظر می‌رسد تشکیل تراورتن متأثر از دو عامل اصلی باشد: ۱) کاهش سریع فشار هیدرواستاتیک و $p\text{CO}_2$ در نتیجه یک

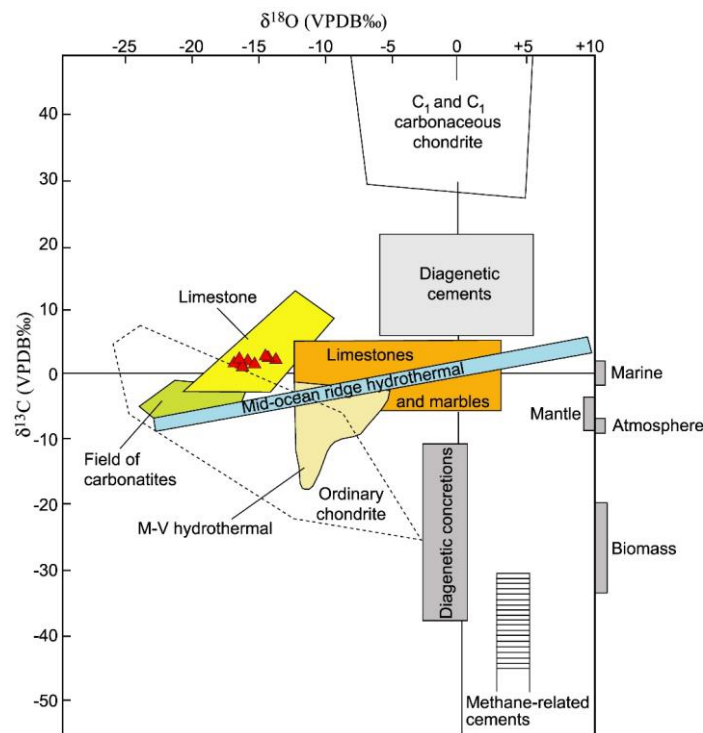
منشأ می‌گیرد (Kele et al, 2011; Beradi et al, 2016). با وجود این، انواع مختلفی از سایر سنگ‌ها می‌توانند به عنوان منشأ عناصر سازنده تراورتن‌ها نقش داشته باشند. مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که سنگ‌های آذرین نظیر بازالت، ریولیت، کربناتیت، الترامافیک، سینیت و گرانیت و سایر سنگ‌های رسوبی نظیر آهک، دولومیت، سنگ‌های تخییری و مارن نیز می‌توانند به عنوان منشأ کلسیم و سایر عناصر سازنده تراورتن‌ها ایفای نقش کنند (Teboul et al, 2016). از داده‌های ایزوتوپی می‌توان برای تعیین منشأ CO_2 در تراورتن‌ها استفاده کرد. برای این منظور باید $\delta^{13}C$ دی-اکسید کربن براساس رابطه ۴ محاسبه شود (Kele et al, 2011). براساس این رابطه، $\delta^{13}C$ دی-اکسید کربن آزاد شده از آب در هنگام رسوب تراورتن را می‌توان از مقادیر اندازه گیری شده $\delta^{13}C$ تراورتن به دست آورد (Kele et al, 2003).

رابطه ۴)

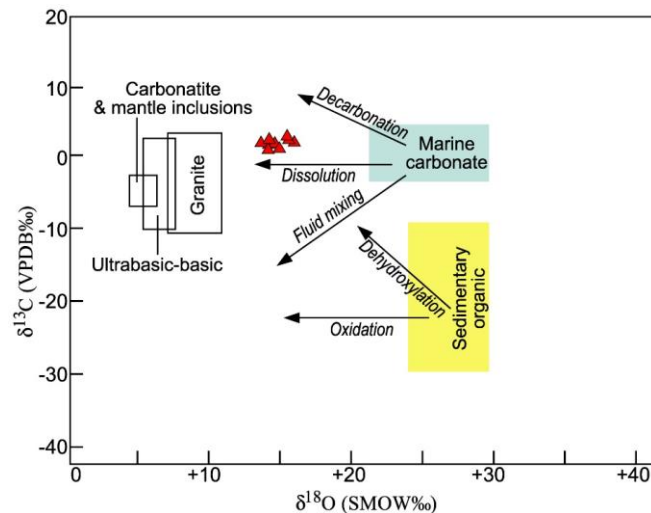
$$\delta^{13}C(CO_2) = 1.2 \delta^{13}C_{(Travertine)} - 10.5$$

دامنه تغییرات مقادیر $\delta^{13}C(CO_2)$ با توجه به نتایج به دست آمده براساس رابطه ۴ از $-7/87\%$ تا $-8/77\%$ با میانگین

۸/۲۹% است (جدول ۱). دگرگونی حرارتی سنگ‌های آهکی (Hoefs, 2009, $\delta^{13}C \sim 0\%$), اتمسفر ($\delta^{13}C \sim -20\%$), ترکیبات آلی (Pentecost, 2005, -7%), و کربن ماگمایی-گوشته‌ای ($\delta^{13}C < -3\%$) (Hoefs, 2009) در سیال کانی‌ساز هستند. همچنین مقادیر CO_2 در سیال کانی‌ساز می‌باشد و از پوسته مشتق شده است در حالی که مقادیر منفی‌تر نشان دهنده منشأ آلی CO_2 است (Hoefs, 2004). با توجه به نمودار ترکیب ایزوتوپ $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ در مقابل $\delta^{18}O_{(VPDB)}$ گاز CO_2 از منشأهای مختلف، نمونه‌های تراورتن بر جلو در محدوده کربنات قرار می‌گیرند (شکل ۱۱). همچنین ترسیم این داده‌ها بر روی نمودار $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ در مقابل $\delta^{18}O_{(SMOW)}$ نشان می‌دهد که کربن اولیه برای تشکیل تراورتن از انحلال و تا حدودی کربن‌زدایی کربنات‌ها به دست آمده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: نمودار $\delta^{18}O_{(VPDB)}$ - $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ برای CO_2 از منشأهای مختلف و موقعیت نمونه‌های متعلق به تراورتن بر جلو (▲) در روی آن (Rollinson, 1993).



شکل ۱۲: نمودار $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})} - \delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ و موقعیت نمونه‌های متعلق به تراورتن برجلو (▲) در روی آن (Hu et al, 2017).

فرآیند تشکیل تراورتن هستند از $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ آب‌های سطحی زمان حاضر استفاده می‌کنند که ممکن است با $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ آب در زمان تشکیل تراورتن متفاوت باشد. در این مطالعه برای تعیین دمای رسوب کربنات از رابطه ۵ (Wang et al, 2022) استفاده شده که در آن تنها $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ برای تعیین دما لحاظ گردیده است. در این رابطه T دمای رسوب کلسیت بر حسب درجه سانتی‌گراد بوده و مقادیر $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ بر حسب VDPB است (جدول ۲).

رابطه ۵)

$$T = 16.9 - 4.38(\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} + 5.3) + 0.1(\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} + 5.3)^2$$

جدول ۲: دمای محاسبه شده برای نمونه‌ها از توده تراورتن برجلو

Sample	Tra-B1	Tra-B2	Tra-B3	Tra-B4	Tra-B5	Tra-B6	Tra-B7	Tra-B8	Tra-B9
T (°C)	75.41	78.56	73.46	64.97	71.59	75.28	75.08	66.97	67.66

مطالعات قبلی (Fouke et al, 2000; Pentecost, 2005) عوامل اصلی کنترل کننده رسوب کلسیت و آراگونیت عبارتند از: دما و ترکیب شیمیایی (Mg/Ca) آب، $p\text{CO}_2$ و سرعت گاززدایی CO_2 . کیتانو (Kitano, 1963) تراورتن‌های با هر دو ترکیب کلسیت و آراگونیت توصیف کرد و به این نتیجه رسید که کلسیت در جایی که سرعت گاززدایی CO_2 کمتر است تشکیل شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی مقادیر Ba و Sr و مطالعات ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{13}\text{C}$ در تراورتن برجلو دلالت بر گرم‌زاد بودن آن دارد. محاسبه مقادیر $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})}$ نشان داد که بین سیالات

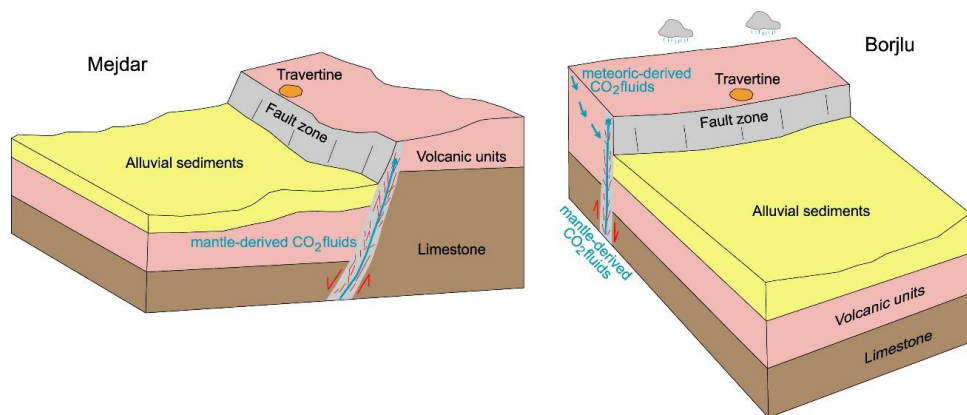
تعیین دمای نسبی تشکیل تراورتن

با توجه به تأثیر دما بر روی $\delta^{18}\text{O}$ می‌توان از مقادیر آن برای تعیین دمای تشکیل کربنات‌ها استفاده کرد (Huang et al, 2005; Li et al, 2013). چندین معادله برای تعیین دمای رسوب کربنات‌های معدنی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به اندرسن و آرتور (Anderson and Arthur, 1983)، کیم و انیل (Kim and O'Neil, 1997) و فریدمن و انیل (Friedman and O'Neil, 1977) اشاره کرد که در همه آنها محاسبه بر مبنای $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ و $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}}$ است. در این محاسبات با فرض اینکه سیالات جوی، سیال اصلی در

تراورتن‌ها ممکن است ترکیب آراگونیتی، کلسیتی یا هر دو داشته باشند. در مطالعات قبلی (Fouke et al, 2000) اشاره شده است که آراگونیت معمولاً در اطراف دهانه چشمه رسوب کرده و اگر دمای آب بالاتر از ۴۴ درجه سانتی‌گراد باشد، آراگونیت تشکیل می‌شود و اگر دمای کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد باشد، فقط کلسیت رسوب می‌کند. این یافته‌ها بر خلاف مشاهدات در چشمه تراورتن Egerszalók است، جایی که در دمای نزدیک به ۷۰ درجه سانتی‌گراد است، کلسیت تقریباً خالص رسوب کرده و آراگونیت دورتر از چشمه در دمای ۴۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد رسوب می‌کند (Kele et al, 2008). نمونه‌های برداشت شده از تراورتن برجلو نیز ترکیب کلسیتی داشته و در محدوده دمایی ۶۴/۹۷ تا ۷۸/۵۶ سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند. براساس

اختلاط این سیالات با آب‌های جوی در نزدیکی سطح سبب سبک‌تر شدن ترکیب ایزوتوپی سیال صعود کننده شده است (مشابه با تراورتن Rapolla در ایتالیا (Sinisi et al, 2016)). ترسیب کلسیت در دمای حدوداً ۷۰ درجه صورت گرفته است. وجود چشمه آبگرم با دمای نسبتاً بالا در پهنه مورد مطالعه و نیز اثبات حضور یک مخزن زمین گرمایی در عمق منطقه نشانه‌های فعال بودن محدوده از منظر پدیده‌های گرمزادی و گرمایی هستند.

با منشأ عمیق و سیالات سطحی اختلاط صورت گرفته است و همین فرآیند دلیل سبک‌تر بودن ایزوتوهای C و O در تراورتن برجلو نسبت به تراورتن مجدر است (شکل ۱۳). تصور می‌شود که حضور واحدهای آهکی در منطقه و همبندی آنها با سیستم گسلی، امکان نفوذ و چرخش سیالات گرمایی حاوی CO_2 در داخل آنها را فراهم نموده و با کربن-زدایی کربنات‌ها یون بی‌کربنات لازم برای تشکیل تراورتن را تأمین کرده است. به نظر می‌رسد که سیستم گسلی به عنوان مجرای برای مهاجرت و صعود سیالات حاوی بی-کربنات کلسیم به سمت سطح زمین عمل کرده است.



شکل ۱۳: انگاره بیانگر مدل ترسیب تراورتن در دو محدوده برجلو و مجدر

است. بدین وسیله نگارنده از مسئولان مربوط کمال تشکر و سپاسگزاری دارد.

سپاسگزاری

این مقاله از حمایت و پشتیبانی مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه محقق اردبیلی برخوردار بوده

پانویس

- 1-Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)
- 2-Standard mean Ocean Water (SMOW)
- 3-Crystalline crust
- 4-Raft

- 5-Shrub
- 6-Thermogene
- 7-Meteogene

منابع (References)

- Adabi, M.H., 2018. Sedimentary geochemistry, Arian Zamin Publications, second edition, 476 p (in Persian).
- Aghanabati, S.A., 1383. Geology of Iran. Publications of the Organization of Geology and Mineral Explorations of Iran, 586 p (in Persian).
- Anderson, T.F. and Arthur, M.A., 1983. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and

- paleoenvironmental problems, In: Arthur, M.A., Anderson, T.F., Kaplan, I.R., Veizer, J., Land, L.S. (Eds.), Stable Isotopes in Sedimentary Geology: SEPM Short Course, v. 10, p. 1-151.
- Amini, B., 1373. Geological map report 1:100000 of Meshgin Shahr. Organization of Geology and Mineral Exploration of the country (in Persian).

- Berardi, G., Vignaroli, G., Billi, A., Rossetti, F., Soligo, M., Kele, S., Baykara, M., Bernasconi, S.M., Castorina, F., Tecce, F. and Shen, C., 2016. Growth of a Pleistocene giant carbonate vein and nearby thermogene travertine deposits at Semproniano, southern Tuscany, Italy: Estimate of CO₂ leakage, *Tectonophysics*, v. 690, p. 219-239.
- Bolboli, L., 2015. Physiological benefits of warm mineral waters (for athletes), Sanaye Sorekh Publications, 105 p (in Persian).
- Brogi, A. and Capezzuolli, E., 2009. Travertine deposition and faulting: the fault-related travertine fissureridge at Terme S. Giovanni, Rapolano Terme (Italy), *International Journal of Earth Sciences*, v. 98, p. 931-947.
- Castro, A., Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z. and Chichorro, M., 2013. Late Eocene–Oligocene post-collisional monzonitic intrusions from the Alborz magmatic belt, NW Iran. An example of monzonite magma generation from a metasomatized mantle source, *Lithos*, v. 180-181, p. 109-127.
- Caracausi, A., Paternoster, M. and Nuccio, P.M., 2015. Mantle CO₂ degassing at Mt. Vulture Volcano (Italy): relationship between CO₂ outgassing of volcanoes and the time of their last eruption, *Earth and Planetary Science Letter*, v. 411, p. 268-280.
- Ebrahimzadeh, B., Jafarzadeh, M., Bagheri, R. and Salehi, M.A., 2018. Geochemistry and origin of constituent elements of Azarshahr travertine deposits (East Azerbaijan). *Stratigraphy and Sedimentology Research*, v. 35, p. 55-76 (in Persian).
- Friedman, I. and O'Neil, J.R., 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. U.S. Geological Survey Professional Paper 440-KK, p. 1-12.
- Fouke, B.W., 2011. Hot-spring systems geobiology: Abiotic and biotic influences on travertine formation at Mammoth hot springs, Yellowstone National Park, USA. *Sedimentology*, v. 58, p. 170-219.
- Dreybrodt, W., Buhmann, D., Michaelis, J. and Usdowski, E., 1992. Geochemically controlled calcite precipitation by CO₂ outgassing: Field measurements of precipitation rates in comparison to theoretical predictions. *Chemical Geology*, v. 97(3-4), p. 285-294.
- Fouke, B.W., Farmer, J.D., Des Marais, D.J., Pratt, L., Sturchio, N.C., Burns, P.C. and Discipulo, M.K., 2000. Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA), *Sedimentary Research*, v. 70, p. 565-585.
- Fritz, P., 1968. Der Isotopengehalt der Mineralwasserquellen von Stuttgart und Umgebung und ihrer ittel pleistozänen Travertin-Ablagerungen, *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, v. 50, p. 53-69.
- Hoefs, J., 2009. *Stable Isotope Geochemistry*, 6th Edition, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 286 p.
- Hoefs, J., 2004. *Stable Isotope Geochemistry*, 5th Edition. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 244 p.
- Hu, R., Fu, S., Huang, Y., Zhou, M.F., Fu, S., Zhao, C., Wang, Y., Bi, X. and Xiao, J., 2017. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model, *Journal of Asian Earth Science*, v. 137, p. 9-34.
- Huang, C.M., Wang, C.S. and Tang, Y., 2005. Stable carbon and oxygen isotopes of pedogenic carbonates in Ustic Vertisols: implications for paleoenvironmental change, *Pedosphere*, v. 15, p. 539-544.
- Ibrahim, K.M., Makhlof, I.M., El Naqah, A.R. and Al-Thawabteh, S.M., 2017. Geochemistry and stable isotopes of travertine from Jordan Valley and Dead Sea areas, *Minerals*, v. 7(5), p. 82-98.
- Jamtveit, B., Hammer, O., Andersson, C., Dysthe, D.K., Heldmann, J. and Vogel, M.L., 2006. Travertines from the Troll thermal springs, Svalbard. *Norwegian Journal of Geology*, v. 86, p. 387-395.
- Karaisaoglu, S. and Orhan, H., 2018. Sedimentology and geochemistry of the Kavakköy Travertine (Konya, central Turkey), *Carbonates and Evaporites*, v. 33(3), p. 783-800.
- Kele, S., Demeny, A., Siklosy, Z., Nemeth, T., Toth, M. and Kovacs, M.B., 2008. Chemical and stable isotope compositions of recent hot-water travertines and associated thermal waters, from Egerszalók, Hungary: depositional facies and non-equilibrium fractionations, *Sedimentary Geology*, v. 211(3-4), p. 53-72.
- Kele, S., Ozkul, M. and Forizs I., 2011. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low- temperature

- non-equilibrium calcite-water fractionation. *Sedimentary Geology*, v. 238(1-2), p. 191-212.
- Kele, S., Vaselli O., Szabo, C. and Minissale, A., 2003. Stable isotope geochemistry of Pleistocene travertine from Budakalász (Buda Mts, Hungary), *Acta Geologica Hungarica*, v. 46(2), p. 161-175.
- Kim, S.T. and O'Neil, J.R., 1997. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 61, p. 3461-3475.
- Kitano, Y., 1963. Geochemistry of calcareous deposits found in hot springs, *Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ*, v. 11, p. 68-100.
- Li, X., Xu, W., Liu, W., Zhou, Y., Wang, Y., Sun, Y. and Liu, L., 2013. Climatic and environmental indications of carbon and oxygen isotopes from the lower cretaceous calcrete and lacustrine carbonates in Southeast and Northwest China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 385, p. 171-189.
- Lotfi Bakhsh, A., 1401. Study of stable isotopes of carbon and oxygen in Mejdar travertine deposit in the southeast of Ardabil, *Geology of Iran*, v. 63, p. 81-94 (in Persian).
- Lu, H.Y., Linb, C.K., Linb, W., Lioua, T.S., Chenc, W.F. and Changd, P.Y., 2011. A natural analogue for CO₂ mineral sequestration in Miocene basalt in the Kuanhsi-Chutung area, Northwestern Taiwan, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 5, p. 1329-1338.
- Minissale, A.D., Kerrick, M., Magro, G., Murrell, M.T., Paladini, M., Rihs, S., Sturchio, N.C., Tassi, F. and Vaselli, O., 2002. Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatic implications, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 203, p. 709-728.
- Mohammadi, Z., Claes, H., Capezzuoli, E., Mozafari, M., Soete, J., Aratman, C. and Swennen, R., 2020. Lateral and vertical variations in sedimentology and geochemistry of sub-horizontal laminated travertines (Çakmak quarry, Denizli Basin, Turkey), *Quaternary International*, v. 540, p. 146-168.
- Pedley, M., 2009. Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments, *Sedimentology*, v. 56(1), p. 221-246.
- Pentecost, A., 2005. *Travertine*. Springer, 445 p.
- Rahmani Jovanmard, S., Tuti, F., Omidian, S. and Ranjbaran, M., 2013. Mineralogy and genesis of the fissure-ridge and vein-type travertines of Ab-Ask based on petrographic studies and isotopic analysis. *Carbon and oxygen, Geology of Iran*, v. 6, p. 51-61 (in Persian).
- Rodrigo-Naharro, J., Delgado, A., Herrero, M.J., Granados, A. and Perez del Villar, L., 2013. Current travertines precipitation from CO₂-rich groundwaters as an alert of CO₂ leakages from a natural CO₂ storage at Gañuelas-Mazarrón Tertiary Basin (Murcia, Spain), *Informes Técnicos Ciemat*, v. 1279, p. 1-53.
- Roshank, R., Mor, F., Keshavarzi, B. and Omidian, S., 2016. Petrography and classification of Qorveh-Takab travertines based on isotopic analyzes and SEM images. *Earth Science Research*, v. 8, p. 136-151 (in Persian).
- Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data*, Longman Scientific and Technical, 420 p.
- Salehi, L. and Mohammadi Siyani, M., 2013. Geochemical studies of carbon and oxygen stable isotopes in travertine deposits of Mahallat (southeast of Arak), *Geology of Iran*, v. 7, p. 31-40 (in Persian).
- Siani, M., Mehrabi, B., Azizi, H., Wilkinson, C.M. and Ganerod, M., 2015. Geochemistry and geochronology of the volcano-plutonic rocks associated with the Glojeh epithermal gold mineralization, NW Iran. *Open Geosciences*, v. 7, p. 207-222.
- Sinisi, S., Vita Petruolo, A., Agosta, F., Paternoster, M., Belviso, C. and Grassa, F., 2016. Contrasting fault fluids along high-angle faults: a case study from Southern Apennines (Italy), *Tectonophysics*, v. 690, p. 206-218.
- Stocklin, J., 1977. Structural correlation of the Alpine ranges between Iran and central Asia, *Mem. Ser. Society of Geology of France*, v. 8, p. 333-353.
- Taghipour, K., Khatib, M.M., Hihat, M.R., Vaezi hir, A. and Shabanian, A., 2018. The role of structural controls in the hydrogeochemistry of travertine-forming springs in Azarshahr region, Azarbaijan, Northwestern Iran. *Geology of Iran*, v. 13, p. 105-121 (in Persian).
- Taghipour, K. and Mohajel, M., 2012. The structure and formation of travertine ridges in Azarshahr region, Azarbaijan, Northwestern Iran, *Geology of Iran*, v. 7, p. 15-33 (in Persian).

- Teboul, P.A., Durllet, C., Gaucher, E.C., Virgone, A., Girard, J.P., Curie, J., Lopez, B. and Camoin, G.F., 2016. Origins of elements building travertine and tufa: new perspectives provided by isotopic and geochemical tracers, *Sedimentary Geology*, v. 334, p. 97-114.
- Torok, A., Mindszenty, A., Claes, H., Kele, S., Fodor, L. and Swennen, R., 2017. Geobody architecture of continental carbonates: "Gazda" travertine quarry (Sütt}o, Gerecse Hills, Hungary), *Quaternary International*, v. 437, p. 164-185.
- Turi, B., 1986. Stable Isotope Geochemistry of Travertine. *Handbook of Environmental Isotopic Geochemistry*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p. 207-208.
- Wang, N., Dai, S., Nechaev, V.P., French, D., Graham, I.T., Zhao, F. and Zuo, J., 2022. Isotopes of carbon and oxygen of siderite and their genetic indications for the Late Permian critical-metal tuffaceous deposits (Nb-Zr-REY-Ga) from Yunnan, southwestern China. *Chemical Geology*, v. 592, p. 1-18.
- Zainalpour, A., Quaed Rahmati, R., Moradzadeh, A. and Rahmani, M.R., 2017. Exploration of geothermal reserves in the Bushli-Sablan region using magnetotelluric data, *Applied Geophysics Research*, v. 4, p. 171-186 (in Persian).