مطالعات ژئوشیمیایی ایزوتوپ پایدار کربن و اکسیژن در نهشته های تراورتن محلات (جنوب شرق اراک)

لیلا صالحی[۱و*] و مریم محمدی سیانی[۲]

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. کارشناسی ارشد پترولوژی، مربی گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۲

چکیده

کربنات‌های آب شیرین از نظر ویژگی‌های ژئوشیمیایی به‌خصوص ویژگی‌های ژئوشیمی ایزوتوپی با یکدیگر متفاوت هستند. مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعاتی کربنات‌ها از جمله تراورتن است. محدوده محلات با داشتن ذخایر عظیم تراورتن بستر چنین مطالعاتی را فراهم می‌سازد. این منطقه بخشی از پهنه ساختاری ایران مرکزی است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه، سازند سلطانیه و جوان‌ترین آن‌ها، نهشته‌های تراورتن است. این نهشته‌ها با اشکال تپه‌ای در اطراف محلات برون‌زد داشته و معادن متعددی را تشکیل می‌دهند. بر اساس مطالعات ایزوتوپ پایدار اکسیژن و کربن، سنگ‌های تراورتن به دو دسته تقسیم می‌شوند: تراورتن‌های نوع ترموژن و نوع متئوژن. دامنه تغییرات مقادیر ایزوتوپ کربن۱۳ تراورتن‌های ترموژن از ‰ ۴- تا ‰ ۸+ متغیر است و تراورتن‌های متئوژن دارای دامنه تغییرات $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ از ‰ ۰ تا ‰ ۱۱- می‌باشند. در نمونه‌های تراورتن محلات، این دامنه بین ‰ ۱/۶۹ تا ‰ ۹/۷۰ قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تراورتن‌های ترموژن است. به‌علاوه، راه دیگری که می‌توان نوع نهشته‌های تراورتن را از هم تفکیک کرد، تعیین منشا دی‌اکسید کربن است. به‌طوری‌که مقادیر پایین $\delta^{13}C_{CO_2}$ آبی که در زمان ته‌نشست تراورتن وجود داشته است، دلالت بر ترموژن بودن تراورتن دارد. در این منطقه $\delta^{13}C_{CO_2}$ برابر با ‰ ۸/۴۷- است که ترموژن بودن این نهشته‌ها را تایید می‌کند. همچنین با استفاده از ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ دمای آب در زمان نهشت سنگ‌های تراورتن تعیین می‌شود. دمای نهشت تراورتن آبگرم محلات، ۴۳ درجه سانتیگراد محاسبه شده است. این دما، شاهدی بر ترموژن بودن این نهشته است.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ پایدار، تراورتن، ژئوشیمی، محلات.

مقدمه

کربنات‌های غیردریایی شامل تراورتن، توفا و اسپلیوتم[۱] است که در محیط‌های دریاچه‌ای، رودخانه‌ای و غارها تشکیل می‌شوند. این کربنات‌ها مهم‌ترین ته‌نشست‌های مرتبط با آب و هوای قاره‌ای هستند و به وسیله عوامل مختلفی‌کنترل می‌شوند. برای تفکیک و شناسایی کربنات‌های غیردریایی، شاخصه‌های ژئوشیمیایی متعددی وجود دارند. به‌طور مثال تراورتن‌ها نسبت به دیگر انواع کربنات‌های آب شیرین، دارای مقادیر بالایی از سولفور و عناصر کمیاب هستند که در نتیجه فعالیت و ورود محلول‌های گرمابی اولیه ایجاد شده است. درحالی‌که

* نویسنده مرتبط Salehi1006@gmail.com

1. Speleothem

توفا نشان‌گر رسوبات متخلخل محیط آب سرد است و دارای مقادیر بالایی از قطعات گیاهی و جانوری است.(Janssen et al., 1999) به‌طورکلی 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). علی‌رغم پژوهش‌های روز افزون در مورد نهشته‌های تراورتن در جهان، مطالعات علمی بر روی ذخایر عظیم تراورتن در ایران اندک است. ایران با داشتن ذخایر و معادن کوچک و بزرگ تراورتن، یکی از کشورهای دارای پتانسیل اقتصادی سنگ‌های تراورتن و به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین صادرکنندگان تراورتن در جهان محسوب می‌شود. این سنگ‌ها در برخی نقاط همچون شهرستان محلات و آذرشهر شهرت جهانی داشته و خصوصیات منحصر به فردی دارند. بنابراین مطالعات زمین‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی این نهشته‌ها در راستای مسائل اقتصادی و معدنکاری ضروری به نظر می‌رسد. در قدم اول، بررسی نحوه تشکیل این نهشته‌ها و شناسایی منشا آنها ضروری است. هدف از این مقاله، طبقه‌بندی سنگ‌های تراورتن با استفاده از داده‌های ایزوتوپ پایدار کربن و اکسیژن در منطقه محلات و تعیین منشا این نهشته‌ها است.

موقعیت جغرافیایی و جایگاه زمین‌شناسی منطقه

از نظر جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، در شهرستان محلات – استان مرکزی قرار می‌گیرد. مختصات جغرافیایی منطقه عبارتست از: ′۱۵ °۵۰ تا ′۳۰ °۵۰ طول شرقی و ′۴۵ °۳۳ تا ′۰۰ °۳۴ عرض شمالی. وسعت تقریبی محدوده ۱۸۰ کیلومتر مربع است.

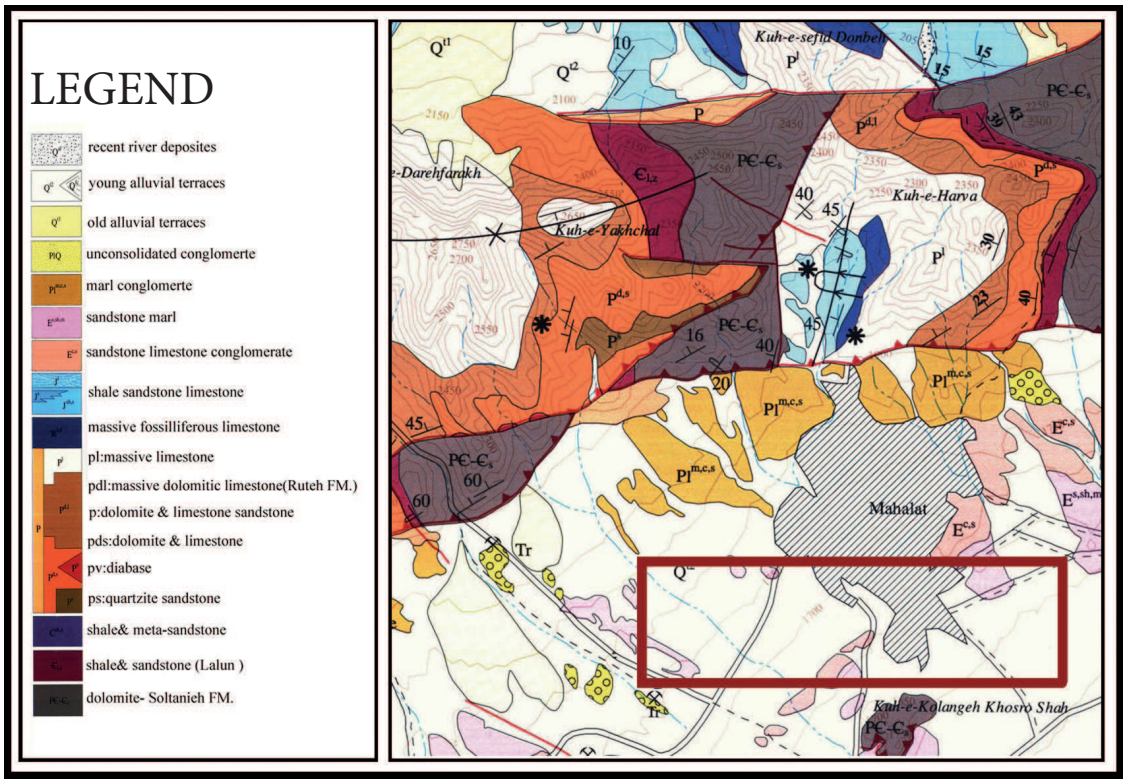
این منطقه یکی از غنی‌ترین مناطق دارای نهشته‌های تراورتن در ایران محسوب می‌شود (شکل ۱) و از لحاظ تقسیم‌بندی ساختاری، بخشی از پهنه ساختاری ایران مرکزی است. واحدهای رسوبی به سن پروتروزوئیک پسین – پالئوزوئیک با روند ساختاری شمال شرق – جنوب غرب در شمال غرب شهرستان محلات رخنمون دارند و از نظر چینه‌شناسی، واحدهای پروتروزوئیک پسین و پالئوزوئیک به‌طور کامل قابل مقایسه با واحدهای معادل خود در دیگر بخش‌های ایران مرکزی و البرز می‌باشد.

کهن‌ترین سنگ‌های رخنمون یافته در این محدوده مربوط به سازند سلطانیه است. در میان واحدهای پالئوزوئیک سنگ‌های اردوویسین، سیلورین و دونین رخنمون ندارند. سنگ‌های مزوزوئیک از گسترش خوبی برخوردار هستند و از واحدهای سنگی سنوزوئیک، تنها سنگ‌های ائوسن، پلیوسن و نهشته‌های کواترنر گسترش دارند (شکل ۲).

روش مطالعه

پس از مطالعات صحرایی و بازدید از معادن مختلف تراورتن در محدوده شهرستان محلات، جمعاً تعداد ۶۰ نمونه به‌منظور مطالعات آزمایشگاهی برداشت شد. این نمونه‌ها از معادن مختلف منطقه شامل معادن‌حاجی–آباد، عباس‌آباد، دره بخاری، آبیار، آتشکوه و از رسوبات و سنگ‌های تراورتن چشمه‌های آبگرم این منطقه (چشمه آبگرم آب دنبه و چشمه آب گرم سلیمانی) برداشت شده‌اند. در مرحله نمونه‌برداری از معادن، سعی شده است علاوه بر در نظر گرفتن پراکنش خوب نمونه‌ها، از سطوح ارتفاعی مختلف نیز نمونه‌برداری شود. پس از مطالعه مقاطع نازک، تعداد ۷ نمونه سنگی و یک نمونه آب (۱۰۰ میلی‌لیتر) برداشت

شکل ۱. عکس ماهواره‌ای منطقه محلات. بخش‌های روشن‌تر نشان دهنده معادن کوچک و بزرگ تراورتن است. در این شکل جایگاه معادن حاجی‌آباد و عباس‌آباد نیز مشخص شده است.



شکل ۲. قسمتی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات اقتباس از سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۸۶). محدوده مورد مطالعه با مستطیل مشخص شده است.

شده ازچشمه‌های نزدیک ذخایر تراورتن برای مطالعه ایزوتوپ پایدار کربن و اکسیژن انتخاب شد. نمونه‌های سنگی، پس از پودر شدن توسط مته ریز به دانشگاه اوتاوا (کانادا) ارسال گردید. این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت تاثیر اسید فسفریک ۱۰ درصد در دمای بالای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفته تا گاز متصاعد شده از هر نمونه توسط دستگاه طیف‌سنج جرمی اندازه‌گیری شود. خطای اندازه‌گیری ایزوتوپی در حد ۰/۱‰ ± بوده است. نمونه‌ها طبق رابطه ۱ نسبت به استاندارد مرجع سنجیده شده و بر حسب ‰ بیان شده‌اند:

رابطه ۱ $\delta^{13}C = [(^{13}C/^{12}C)_{Sample}/(^{13}C/^{12}C)_{Standard}] -1 \ (1000)$

برای $\delta^{13}C$ استاندارد مرجع[1] VPDB است و استاندارد مرجع برای $\delta^{18}O$ علاوه بر VPDB استاندارد[2] SMOW می‌باشد (آدابی، ۱۳۹۰) که در رابطه ۱ به جای $^{13}C/^{12}C$ مقادیر $^{18}O/^{16}O$ جایگزین می‌شود. از آنجاکه در این پژوهش نیاز به مقادیر $\delta^{18}O$ بر مبنای استاندارد SMOW است، با توجه به رابطه ۲ مقادیر $\delta^{18}O$ (VPDB) بر مبنای استاندارد SMOW نیز محاسبه شده‌اند (Co-plen et al., 1983).

رابطه ۲ $\delta^{18}O_{(SMOW)} = 1.0309\ \delta^{18}O_{(VPDB)} + 30.92$

نتایج تجزیه ایزوتوپ پایدار کربن و اکسیژن نمونه‌های تراورتن در منطقه محلات به صورت جدول ۱ ارائه شده است.

نتایج و بحث

سنگ‌های تراورتن دارای اشکال متنوعی هستند و بر اساس معیارهای مختلفی رده‌بندی می‌شوند. به‌طورکلی مهم‌ترین خصوصیاتی که بر مبنای آن رده‌بندی تراورتن صورت می‌گیرد عبارت است از: فرایند ته‌نشست، ژئوشیمی دی‌اکسید کربن، فابریک تراورتن و ریخت‌شناسی آن.

یکی از پراهمیت‌ترین روش‌های مطالعاتی کربنات‌ها، مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن است. عموماً گروه کربنات‌ها دامنه وسیعی از تغییرات ایزوتوپ کربن $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ را به نمایش می‌گذارند (۱۵‰+تا ۲۵ ‰-) (Pentecost, 2005)، همچنین دامنه تغییرات ایزوتوپ اکسیژن $\delta^{18}O_{(SMOW)}$ کربنات‌ها از ۰‰ تا ۳۵‰ متغیر است (Pentecost, 2005). جالب آن‌که سنگ‌های تراورتن نسبت به ایزوتوپ پایدار کربن ۱۳ غنی‌شدگی نشان می‌دهند (Pedley, 2009). این مشخصه به‌عنوان یکی از روش‌های شناسایی تراورتن و سایر کربنات‌ها مطرح می‌شود (Pedley, 2009). همچنین فرایند تفکیک ایزوتوپی کربن و اکسیژن در نهشته‌های تراورتن مهم است. این تفکیک، اطلاعاتی را در مورد منبع دی‌اکسید کربن، شرایط فیزیکوشیمیایی ته‌نشست (نرخ درجه حرارت) و تاثیر فرایندهای زیستی بیان می‌کند (Pente-cost, 2005)، به هر حال تفسیر نشانه‌های ژئوشیمیایی تراورتن نیاز به توجه خاص دارد؛ زیرا دی‌اکسیدکربن ممکن است از منابع گوناگونی همچون کربن‌زدایی سنگ آهک، گاززدایی جبه، هیدرولیز و اکسیداسیون کربن احیایی مشتق شده باشد (Pente-cost, 2005).

1. Vienna Pee Dee Belemnite
2. Standard mean Ocean Water

جدول ۱. نتایج تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار نمونه‌های تراورتن محلات همراه با سایر ویژگی‌ها.

نمونه	$\delta_{13}C_{(VPDB)}$	$\delta^{18}O_{(VPDB)}$	$\delta^{18}O_{(SMOW)}$	طول و عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	رنگ	محل
AB2	8.03	-9.31	21.32	″N 33º 51′ 42 ″E 50º 31′ 34	1670	سفید	عباس‌آباد
AB7	2.92	-8.01	22.67	″N 33º 51′ 33 ″E 50º 31′ 44	1740	دودی	عباس‌آباد
AB7-1	9.70	-10.60	19.99	″N 33º 51′ 39 ″E 50º 31′ 50	1675	سفید	عباس‌آباد
AB20	8.50	-9.72	20.89	″N 33º 51′ 45 ″E 50º 31′ 38	1680	سفید	عباس‌آباد
O47	1.69	-10.92	19.66	″N 33º 59′ 99 ″E 50º 33′ 11	1613	کرم- قهوه ای	چشمه آبگرم
HN1	1.95	-10.24	20.36	″N 33º 51′ 46 ″E 50º 24′ 10	1792	کرم روشن	حاجی‌آباد
TH-A	2.50	-8.28	22.38	″N 33º 51′ 01 ″E 50º 24′ 41	1747	کرم روشن	حاجی‌آباد
OW1	-	-	-5.23	″N 33º 59′ 99 ″E 50º 33′ 11	1611	بی رنگ	آب چشمه آبگرم

رده‌بندی تراورتن بر مبنای داده‌های ایزوتوپ پایدار

مطالعات ایزوتوپ پایدار کربن و اکسیژن برای شناسایی منشا تراورتن از سال ۱۹۵۰ به وسیله Craig آغاز شد (Kele et al., 2003). برای تعیین منشا و نوع تراورتن، تجزیه ژئوشیمیایی ایزوتوپ پایدار نقش اساسی را ایفا می‌کند.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات ایزوتوپ اکسیژن $\delta^{18}O_{(VPDB)}$ نمونه‌های اندازه‌گیری شده از ۸/۰۱‰- تا ۱۰/۹۲‰- متغیر است و میانگین $\delta^{18}O_{(VPDB)}$ آنها ۹/۵۸‰- است. همچنین، تغییرات مقادیر ایزوتوپ کربن $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ نمونه‌ها، دامنه‌ای از ۱/۶۹‰+ تا ۹/۷۰‰+ را نشان می‌دهد و میانگین $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ آنها در حدود ۵/۰۴ ‰+ است.

علاوه‌براین، مقادیر $\delta^{18}O_{(SMOW)}$ از طریق رابطه ۲ محاسبه شده و دامنه تغییرات ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ بر مبنای SMOW، مقادیری از ۱۶/۶۲‰+ تا ۲۰/۴۳‰+ را نشان می‌دهد و میانگین آنها بر مبنای $\delta^{18}O_{(SMOW)}$ معادل ۱۸/۷۴‰+ است.

بر اساس مطالعه ایزوتوپ پایدار، سنگ‌های تراورتن به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از: تراورتن‌های نوع ترموژن و تراورتن‌های نوع متئوژن (Pentecost, 1995). تراورتن‌های ترموژن دارای بافت توده‌ای بوده و محتوای مواد زیستی آنها کم است و مستقیماً از چشمه‌های حرارتی با درجه حرارت بالا ته‌نشین می‌شوند. ترکیب ایزوتوپی کربن $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ آن‌ها، دامنه ای بین ۴‰- تا ۸ ‰+ دارد. تشکیل این نوع تراورتن‌ها می‌تواند

جدول ۲. مشخصات تراورتن‌های ترموژن و متئوژن (Turi,1986; Pentecost,1995)

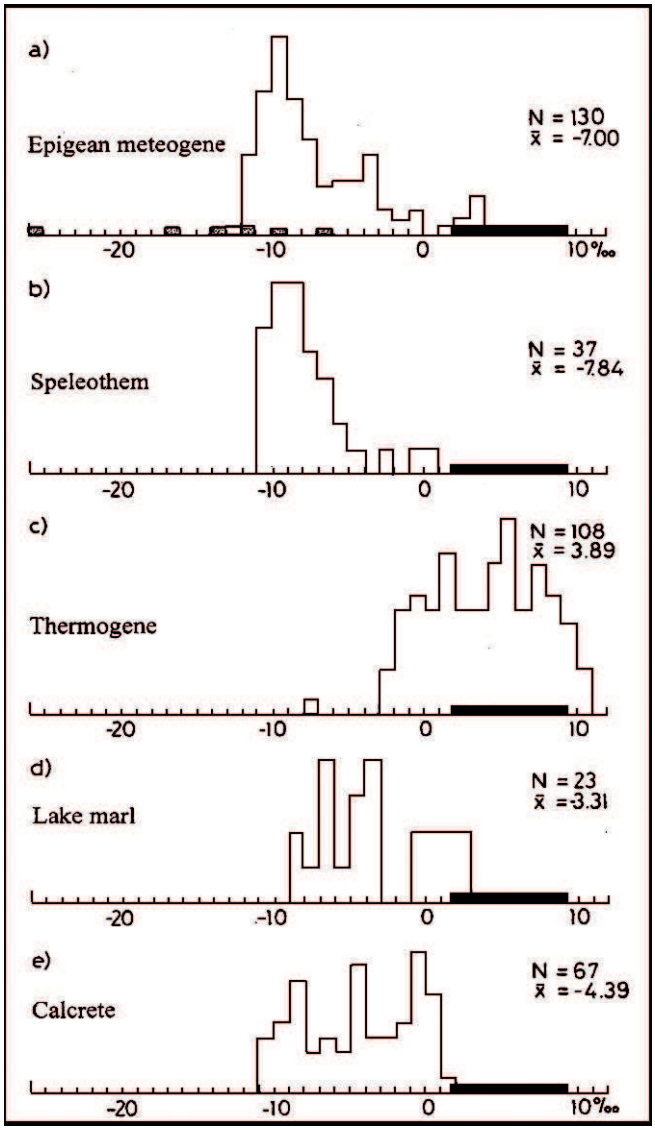
تراورتن متئوژن Meteogene	تراورتن ترموژن Thermogene
منطبق با عوامل آب و هوایی	محیط زمین گرمایی
$-11‰ < \delta^{13}C_{(VPDB)} < 0‰$	$-4‰ < \delta^{13}C_{(VPDB)} < +8‰$
تمرکز بالایی از کربن آلی	تمرکز بالایی از کربن غیر آلی
نرخ پایین رسوبگذاری (کمتر از ۱۰ میلیمتر در سال)	نرخ بالای رسوبگذاری (بیشتر از ۱۰ میلیمتر در سال)
محلول اولیه با درجه حرارت پایین	محلول اولیه با درجه حرارت بالا
لایه‌بندی‌های ظریف فصلی، حفرات زیاد و ساخت‌های متخلخل	گاززدایی سریع : ایجاد بلورهایی حبابی شکل و شعاعی
معمولاً مرتبط با آب وجریان‌های آشفته (شبیه آبشارها)	معمولا مرتبط با فعالیت تکتونیکی یا فعالیت آتشفشانی حاضر یا گذشته
وسعت رسوبات بستگی به میانگین سالانه ته‌نشست، درجه حرارت و تخلخل خاک دارد.	_

به فعالیت زمین‌گرمایی نسبت داده شود. این جریان‌های گرمایی مربوط به عهد حاضر یا فعالیت‌های آتشفشانی گذشته هستند (جدول۲).

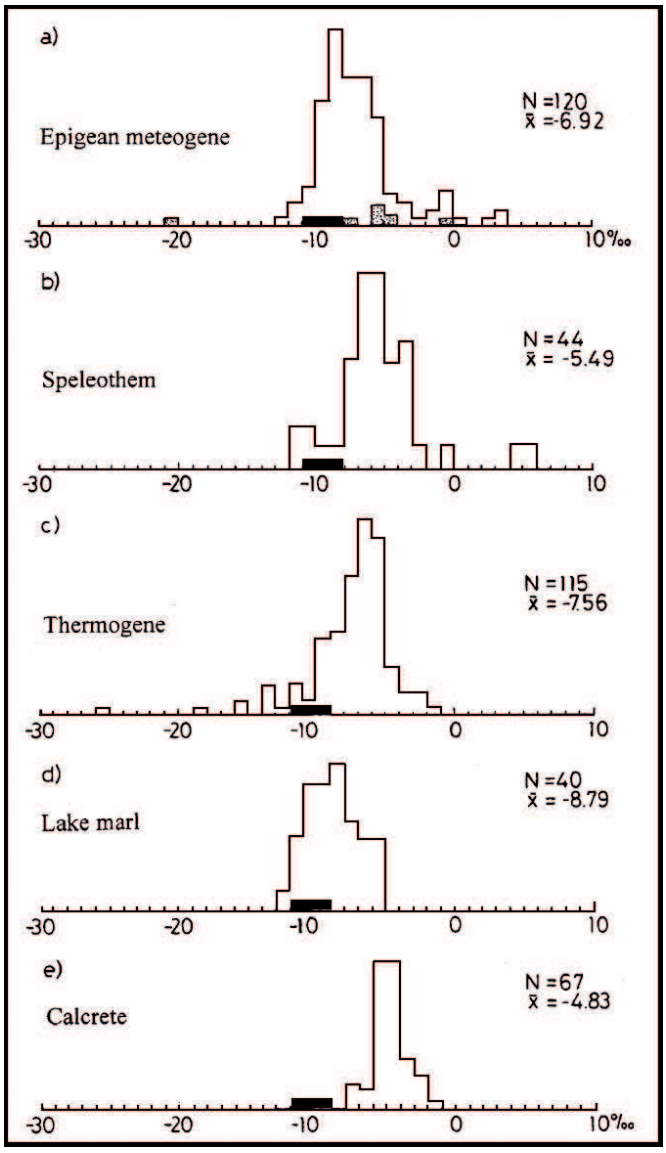
تراورتن‌های متئوژن معمولاً نرم بوده و دارای تخلخل بسیار زیادی هستند. محتوای مواد زیستی آن‌ها بالاست و ترکیب ایزوتوپی کربن $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ آنها، دامنه‌ای از ‰۱۱- تا ‰ ۰ دارد. تشکیل تراورتن‌های متئوژن مرتبط با عوامل آب و هوایی است (Turi,1986).

ایزوتوپ کربن $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ نمونه‌های منطقه، مقادیر مثبتی را نشان می‌دهد که شاهدی بر ترموژن بودن این نهشته‌ها است. همچنین دامنه تغییرات نمونه‌های مورد مطالعه با نمودار توزیع $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ تراورتن و سایر کربنات‌های آب شیرین که توسط Pentecost (2005) ارائه گردیده، مقایسه شده است (شکل ۳). در این شکل، محدوده کربنات‌های آب شیرین (تراورتن متئوژن، اسپلیوتم، تراورتن ترموژن، مارل‌های دریاچه‌ای و کالکریت) بر مبنای مقادیر $\delta^{13}C_{(VPDB)}$ مشخص شده است. همان‌گونه‌که در شکل ملاحظه می‌شود، دامنه تغییرات ایزوتوپ کربن ۱۳ نمونه‌های منطقه محلات، نسبت به این محدوده‌ها سنجیده شده و این نتیجه حاصل شده که دامنه تغییرات ایزوتوپ کربن ۱۳ نمونه‌های منطقه محلات، هم‌پوشانی مشخصی را با محدوده تراورتن‌های ترموژن جهان نشان می‌دهد (شکل ۳).

اما مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ نمونه‌های مورد مطالعه، نمی‌تواند نوع خاصی از کربنات‌ها را به نمایش بگذارد (شکل ۴)، زیرا دامنه تغییرات $\delta^{18}C_{(VPDB)}$ آنها بین ‰۸/۰۱- و ‰۱۰/۹۲- است. این دامنه متعلق به نوع خاصی از کربنات‌های آب شیرین نیست و در این محدوده هم‌پوشانی بین انواع کربنات‌های آب شیرین وجود دارد. در نتیجه برمبنای مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ نمی‌توان به‌طور دقیق، نوع کربنات‌ها را



شکل ۳. توزیع مقادیر ایزوتوپ کربن ۱۳ ($\delta^{13}C$) کربنات‌های آب شیرین در جهان بر اساس میانگین (Pentecost, 2005). محدوده ای که با رنگ سیاه مشخص شده است مقادیر ایزوتوپ کربن ۱۳ نمونه‌های تراورتن محلات را نشان می‌دهد.



شکل ۴. توزیع مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ $\delta^{18}O_{(VPDB)}$ کربنات‌های آب شیرین در جهان بر اساس میانگین (Pentecost, 2005) محدوده سیاه مقادیر ایزوتوپ کربن ۱۳ نمونه‌های تراورتن محلات را نشان می‌دهد.

مشخص کرد. معمولاً تفسیر داده‌های ایزوتوپ اکسیژن سخت‌تر از داده‌های ایزوتوپ کربن می‌باشد دلیل آن تبادل اکسیژن موجود در ساختمان کربنات‌ها با اکسیژن مولکول‌های آب است (Pentecost, 2005). بنابراین جهت تعیین نوع تراورتن، داده‌های ایزوتوپ کربن کارآمدتر است.

یکی دیگر از خصوصیات تراورتن‌های نوع ترموژن، وجود چشمه‌هایی در اطراف این نوع سنگ‌ها است که دارای مقادیر بالایی از سولفور و استرانسیوم است (Cipriani et al., 1977; Pedley, 2009). این مشخصه در منطقه محلات بارز است چنان‌که در حوالی نهشته‌های عظیم تراورتن، چشمه‌های آبگرم با مقادیر بالایی از سولفور و استرانسیوم وجود دارد.

همچنین ترکیب ایزوتوپ پایدار نهشته‌های تراورتن محلات با سایر نهشته‌های جهان مقایسه شده است (شکل ۵). نکته‌ای که در این نمودار مشاهده می‌شود قرارگیری نمونه‌ها در دو دامنه متفاوت از ایزوتوپ‌های کربن است.

یک گروه با دامنه تغییرات $\delta^{13}C$ در حدود ۱‰+ تا ۳‰+ و دیگری با دامنه تغییرات ۸‰+ تا ۱۰‰+ دیده می‌شود (محدوده‌های مستطیل شکل). مقادیر پایین ایزوتوپ کربن ۱۳ مربوط به نمونه‌هایی از معادن حاجی‌آباد و چشمه آبگرم است که به‌خوبی از نمونه‌های معدن عباس‌آباد قابل تفکیک است. نمونه‌های مربوط به معدن عباس‌آباد، دارای مقادیر بالاتری از ایزوتوپ سنگین کربن هستند. همان‌طورکه در شکل ۵ مشاهده می‌شود، محدوده قرارگیری نمونه‌های معادن حاجی‌آباد و چشمه آبگرم با محدوده مربع شکل نهشته بوداکالاز[1] مجارستان هم‌پوشانی نشان می‌دهد (Kele et al., 2003). به‌دلیل این هم‌پوشانی، ویژگی‌های این نهشته بررسی و با نهشته‌های محلات مقایسه می‌شود:

1. Buda Kalaz, Hungary

این نهشته در شمال غرب بوداپست قرار گرفته و مربوط به زمان پلیئستوسن است و براساس مطالعات صحرایی و پتروگرافی، به دو واحد پایینی و بالایی تقسیم می‌شود. واحد پایینی منسجم، دارای لایه‌بندی ظریف و رنگ روشن است. واحد بالایی نرم و دارای تخلخل زیادتر بوده و قطعاتی از جلبک و مواد گلی در آن دیده می‌شود. میانگین مقادیر $\delta^{13}C$ آن ۱/۲ ‰ و $\delta^{18}O_{SMOW}$ آن ۱۱/۵ ‰ – است.

وجود چشمه‌های آبگرم در اطراف این نهشته، شواهد پتروگرافی و قرارگیری مقادیر ایزوتوپ کربن ۱۳ در دامنه مقادیر ایزوتوپ کربن تراورتن نوع ترموژن، این نهشته را جزء تراورتن‌های نوع ترموژن قرار می‌دهد (Kele et al., 2003).

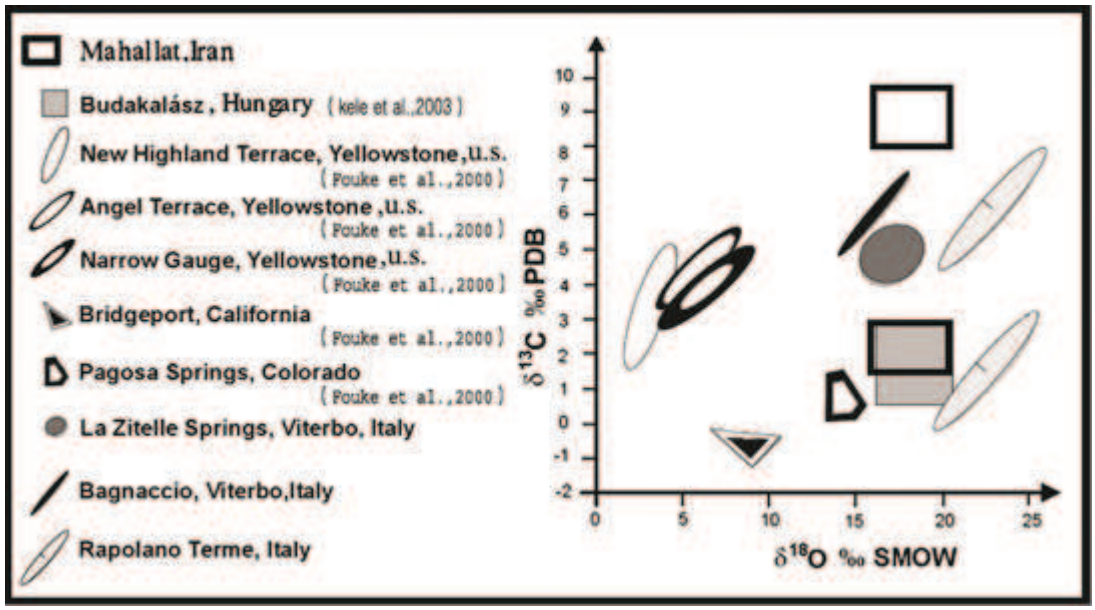
از جمله خصوصیات نهشته‌های تراورتن محلات، وجود واحد بالایی و پایینی است به‌طوری‌که واحد بالایی نرم، متخلخل و حاوی مواد گلی فراوان است و به‌دلیل سست بودن و عدم قابلیت کوپ‌دهی، از ارزش اقتصادی پایینی برخوردار است و به عنوان باطله محسوب می‌شوند. واحد پایینی به‌صورت فشرده با لایه‌بندی ظریف و منسجم است. میزان تخلخل، کمتر از واحد بالایی است. این تخلخل‌ها به‌صورت یکنواخت در سنگ توزیع شده و اغلب منجر به تشکیل حفرات بزرگ در سنگ نمی‌شوند در نتیجه، این نوع تخلخل ، قابلیت مثبتی در سنگ به‌حساب آمده و دورریز سنگ را کاهش می‌دهد. در مورد رنگ نیز، اگرچه درجه رنگینی تراورتن به عوامل گوناگونی نظیر میزان ورود عناصری همچون آهن، منیزیم، گوگرد، فسفر و مواد آلی بستگی دارد، با این‌حال معمولاً تراورتن‌های نوع ترموژن رنگ‌های روشنی را نشان می‌دهند. تراورتن‌های عباس‌آباد دارای رنگ بسیار روشن و درخشان بوده و نسبت به سایر نهشته‌ها از فشردگی و انسجام بالاتری برخوردار هستند. همچنین این نهشته دارای مقادیر بالاتری از ایزوتوپ سنگین کربن نسبت به سایر نهشته‌های تراورتن محلات است. این غنی‌شدگی می‌تواند ناشی از تفریق غیرتعادلی در طی گاززدایی سریع گاز CO_2 حل شده (غنی از 12C) باشد (Uysal et al., 2009). اما این فرایند به تنهایی نمی‌تواند مسئول مقادیر بسیار بالای $\delta^{13}C$ باشد. به‌نظر می‌رسد که با افزایش فاصله از چشمه‌های آب‌گرم، نقش فعالیت فتوسنتزی میکروارگانیسم‌ها (جلبک‌ها) بر روی ترکیب ایزوتوپی تراورتن‌های رسوب کرده در مقایسه با گاززدایی افزایش یافته (Guo et al., 1996) و مسئول اصلی غنی‌شدگی ایزوتوپ کربن تا حدود تقریباً ۷‰ در تراورتن‌های عباس‌آباد باشد. با توجه به هم‌پوشانی بارز محدوده نهشته‌های حاجی‌آباد و آبگرم با نهشته بوداکالاز و همچنین شباهت‌های زیاد بین نهشته‌های تراورتن محلات و این نهشته، ترموژن بودن نهشته‌های مورد مطالعه تایید می‌شود.

منشاء دی‌اکسید کربن به عنوان عامل تشکیل تراورتن

یکی از روش‌هایی که می‌توان نوع نهشته‌های تراورتن را مشخص کرد، تعیین منشاء دی‌اکسید کربن با استفاده از داده‌های ایزوتوپی است؛ چرا که CO_2 می‌تواند از منابع گوناگونی از جمله فرایند کربن‌زدایی سنگ آهک، گاززدایی گوشته، هیدولیز و اکسیداسیون کربن احیایی مشتق شده باشد (Pentecost, 2005). برای تعیین منشا CO_2 در این مقاله از رابطه ۳ (Panichi and Tonjiorgi, 1976; Kele et al., 2011) استفاده شده است.

$$\delta^{13}C_{CO_2} = 1.2\ \delta^{13}C_{travertine} - 10.5 \qquad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه، با استفاده از $\delta^{13}C$ اندازه‌گیری شده در سنگ تراورتن، می‌توان مقدار $\delta^{13}C$ دی‌اکسید کربن آزاد شده از آب را در زمان ته‌نشست تراورتن تعیین کرد. لازم به ذکر است، فقط نمونه‌هایی از تراورتن می‌توانند به طور محلی منشا CO_2



شکل ۵: ترکیب ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸ و کربن ۱۳ نهشته‌های تراورتن جهان و محدوده‌های مشخص شده برای نمونه‌های تراورتن محلات (اقتباس از Kele et al., 2003).

را مشخص نمایند که نزدیک‌ترین فاصله را به محل خروج آب چشمه داشته باشند (Kele et al., 2008). بر این اساس، $\delta^{13}C$ اندازه‌گیری شده نهشته تراورتن آبگرم (۱/۶۹) در نمونه O47 که نزدیک‌ترین فاصله را به محل خروج آب چشمه آبگرم دارد، استفاده شده و به این طریق محاسبه می‌شود:

$$\delta^{13}C_{CO_2} = 1.2 \times 1.69 - 10.5 \rightarrow \delta^{13}C_{CO_2} = -8.47\ ‰$$

از آنجاکه مقادیر پایین $\delta^{13}C_{CO_2}$ (از ‰ ۳ – تا ‰ ۷ –) در انواع سنگ‌ها، نشاندهنده منشا ماگمایی دی‌اکسید کربن و مقادیر بین ‰۵– تا ‰۱۰– دلالت بر دی‌اکسید کربن برخاسته از گوشته دارد (Hoefs, 1987)، منشاء CO_2 این نهشته‌ها را می‌توان مرتبط با فرایندهای درونی زمین به‌خصوص فرایند گاززدایی گوشته دانست که خود تاییدی بر ترموژن بودن این نهشته‌ها است. در نتیجه، فرایند ته‌نشست در این نهشته‌ها، با چرخش سیالات گرمابی حامل CO_2 که از اعماق زیاد منشا گرفته‌اند، مرتبط می‌باشند، این سیالات پس از چرخش درون واحدهای آهکی موجود، یون بی‌کربنات لازم برای تشکیل تراورتن را فراهم کرده‌اند (رابطه ۴).

رابطه۴ $$CaCO_3 + CO_2 + H_2O = Ca^{2+} + 2(HCO_3)^-$$

اگرچه از طریق رابطه ۴، منشا دی‌اکسید کربن به گاززدایی گوشته مربوط می‌شود، ولی روش‌های دیگری نیز برای تایید این منشا، از جمله اندازه‌گیری $^3He / ^4He$ که می‌تواند حضور گازهای مشتق شده از گوشته را نشان دهد، وجود دارد. (Kele et al., 2011) به‌علاوه حضور مجراهای تغذیه‌کننده نظیر گسل‌ها برای خروج گاز از درون زمین لازم است. با مطالعه گسل بزرگ راندگی در شمال محلات و گسل‌هایی با راستای شمال غرب – جنوب شرق در جنوب محلات که می‌توانند به‌عنوان مجراهای تغذیه‌کننده عمل کرده باشند، منشا دی‌اکسید کربن را می‌توان با اطمینان بیشتری ، مشخص کرد.

ریخت‌شناسی نهشته‌های تراورتن

علاوه برموارد ذکر شده، تراورتن‌های ترموژن و متئوژن از نظر ریخت‌شناسی نیز متفاوت هستند. تراورتن‌های متئوژن دارای اشکال استالاگمیت، سد رودخانه‌ای[1] و قشرهای رودخانه‌ای[2] هستند درحالی‌که تراورتن‌های ترموژن اشکال تپه‌ای و شکاف – پشته[3] را نشان می‌دهند (Penetcost, 2005). تمام نهشته‌های تراورتن محدوده مورد مطالعه دارای اشکال تپه‌ای بوده و تراورتن نوع ترموژن را تایید می‌کنند (شکل ۶).

تعیین درجه حرارت آب در زمان تشکیل تراورتن

یکی از مهم‌ترین کاربردهای ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در کربنات‌ها، استفاده از آن به‌عنوان یک زمین دماسنج است (Morse and Mackenzi, 1990). در مطالعات ایزوتوپی نهشته‌های تراورتن، می‌توان دمای آب را در زمان تشکیل این نهشته‌ها تعیین کرد. O´Neil et al. (1969) رابطه‌ای را برای تعیین دمای مذکور پیشنهاد کرده‌اند:

رابطه ۵ $$10^3 In\ \alpha_{CaCO_3\text{-}Water} = 2.78\ (10^6 / T^2) - 2.89$$

در اینجا $\alpha_{CaCO_3\text{-}Water}$ ضریب تفکیک کلسیت و آب و T درجه حرارت بر حسب کلوین است. در این رابطه می‌توان به جای $10^3 In\ \alpha_{CaCO_3\text{-}Water}$ مقدار $\delta_{CaCO_3} - \delta_{water}$ را قرار داد (هوفز، ۲۰۰۴)

شکل ۶. نمایی از تپه‌های تراورتنی واقع در اطراف محلات.

1. River dam
2. Stream crust
3. Fissure ridges

به طوری‌که:

رابطه۶ $\delta_{CaCO_3} - \delta_{water} = \Delta_{CaCO_3\text{-}Water} = 10^3 \ln \alpha_{CaCO_3\text{-}Water}$

در این رابطه $\delta^{18}O$ سنگ و آب بر مبنای استاندارد SMOW قرار داده می‌شود. همچنین از رابطه Anderson and Arthur (۱۹۸۳) نیز می‌توان استفاده نمود (رابطه ۷):

رابطه ۷ $T°C = 16 - 4.14\,(\delta_C - \delta_W) + 0.13\,(\delta_C - \delta_W)^2$

در این رابطه، T دمای تشکیل بر مبنای درجه سانتیگراد، δ_C مقدار ایزوتوپ اکسیژن محاسبه شده در سنگ تراورتن بر اساس مقیاس PDB و δ_W مقدار ایزوتوپ اکسیژن آبی است که تراورتن از آن ته‌نشست کرده است و بر اساس مقیاس SMOW بیان می‌شود.

شرط استفاده از معادلات بالا، استفاده از $\delta^{18}O$ آبی است که در تعادل با نمونه‌های تراورتن باشد. در نتیجه برای محاسبه دما از $\delta^{18}O$ نمونه آب چشمه آبگرم (۵/۲۳-) و نمونه تراورتن در تعادل با آن یعنی نمونه مربوط به چشمه آبگرم استفاده شده است:

$\delta^{18}O_{SMOW} = 66/19$ و $\delta^{18}_{VPDB} = -10/92$

$\delta_{CaCO_3} - \delta_{Water} = 2.78\,(10^6 / T^2) - 2.89$

$19.66 - (-5.23) = 2.78\,(10^6 / T^2) - 2.89$: $T = 316$ °K,

$T = 43°C$ (مربوط به چشمه آبگرم)

$T°C = 16 - 4.14\,(\delta_C - \delta_W) + 0.13\,(\delta_C - \delta_W)^2$

$T°C = 16 - 4.14\,[-10.92 - (-5.23)] + 0.13\,[-10.92 - (-5.23)]^2$, $T°C = 43°C$

دمای به‌دست آمده، حاکی از آن است که این نهشته از آب‌های گرم مرتبط با فرایندهای درونی زمین ناشی شده است؛ چرا که ته‌نشست از چشمه‌های آبگرم مرتبط با این فرایندها، دمایی بالاتر از ۳۷ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد (Pentecost, 2005).

نتیجه‌گیری

براساس دامنه تغییرات ایزوتوپ کربن $\delta^{13}C$ نمونه‌های محدوده مورد مطالعه (۱/۶۹‰ تا ۹/۷۰‰) و مقایسه آنها با نمودار توزیع مقادیر ایزوتوپ کربن نمونه‌های کربنات آب شیرین، تراورتن نوع ترموژن برای نهشته‌های محلات پیشنهاد می‌شود. همچنین منشا دی‌اکسید کربن آب در زمان ته‌نشست تراورتن با توجه به رابطه ۳ برگرفته از فرایندهای درونی زمین به‌خصوص فرایند گاززدایی گوشته است و محلول‌های گرمابی غنی از دی اکسید کربن پس از برخورد به واحدهای آهکی، آن‌ها را حل کرده و یون بی‌کربنات لازم برای تشکیل تراورتن را فراهم کرده‌اند. این نهشته‌ها از نظر ریخت‌شناسی، اشکال تپه‌ای را به‌وجود آورده‌اند که نشانه‌ای از تراورتن‌های نوع ترموژن است. با مطالعات ایزوتوپ پایدار اکسیژن نیز، دمای تشکیل و نهشت یکی از نهشته‌ها (نهشته آبگرم) ۴۳ درجه سانتیگراد محاسبه شده است که دال بر منشا ترموژنی این سنگ‌ها است.

منابع

– آدابی، م.، ح.، ۱۳۹۰. ژئوشیمی رسوبی. انتشارات آرین زمین، چاپ دوم، ۴۷۶.

– شیخ‌الاسلامی، م.، زمانی، ر.، پدرام، م.، ۱۳۸۶. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات. سازمان زمین‌شناسی کشور، ۳۳۲.

– هوفز، ی.، ۲۰۰۴. زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های پایدار. مترجم، علیرضایی، س.، مرکز نشر دانشگاهی.

- Anderson, T.F. and Arthur, M.A., 1983. Stable isotope of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems, Chapter 1, in: Stable Isotopes in Sedimentary Geology, Short Course Notes, 10, Section 1.1-1. 151.

- Cipriani, N., Malesani, P. and Vannucci, S., 1977. I travertine dell' Italia Centrale. Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, 98, 85-115.

- Coplen, T.B., Kendall C. and Hopple, J., 1983. Comparison of stable isotope reference samples. Nature (London), 302, 236-238.

- Guo, L., Andrews, J., Riding, R., Dennis, P. and Dresser, Q., 1996. Possible microbial effects on stable carbon isotopes in hot-spring travertines. Journal of Sedimentary Research, 66, 468-473.

- Hoefs, j., 1987. Stable Isotope Geochemistry. Springer, Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 241.

- Janssen, A., Swennen, R., Podoor, N. and Keppens, E., 1999. Biological and diagenetic influence in recent and fossil tuffa from Belgium. Sedimentary Geology, 126, 74-95.

- Kele, S., Demény, A., Siklósy, Z., Németh, T., Mária, T. and Kovács, 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, 211, 53-72.

- Kele, S., Özkul M. and Fórizs I., 2011. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation. Sedimentary Geology, 238, 1-2, 191-212.

- Kele, S., Vaselli O., Szabó C. and Minissale, A., 2003. Stable isotope geochemistry of Pleistocene travertine from Budakalász (Buda Mts, Hungary). Acta Geologica

Hungarica, 46, 2, 161-175.

- Morse, J.W. and Mackenzi, F.T., 1990. Geochemistry of Sedimentary Carbonate. New York. Elsevier, 707.

- O'Neil, J.R., Clayton, R.N. and Mayeda, T.K., 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. The Journal of Chemical Physics, 51, 5547-5558.

- Panichi, C. and Tongiorgi, E., 1976. Carbon isotopic composition of CO_2 from springs, fumaroles, mofettes and travertines of central and southern Italy: a preliminary prospection method of geothermal areas, in: Proceedings of the 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Energy, San Francisco, 20-29 May, 1975, 815-825.

- Pedley, M., 2009. Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. Sedimentology, 56, 1, 221-246.

- Pentecost, A., 1995. The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia. Quaternary Science Review, 1005-1028.

- Pentecost, A., 2005. Travertine, Springer, United Kingdom,445.

- Turi, B., 1986. Stable Isotope Geochemistry of Travertine. Handbook of Environmental Isotopic Geochemistry, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 207-208

- Uysal, T., Feng, Y., Zhao, J., Isik, V., Nuriel, P. and Golding, S.D., 2009. Hydrothermal CO_2 degassing in seismically active zones during the late Quaternary. Chemical Geology, 265, 442-454.