

بررسی رخساره‌های رسوبی و مشخصه‌های هیدروشیمیایی نهشته‌های کربناته آب اسک، جنوب شرق آتشفشان دماوند

سمیه رحمانی جوانمرد^(۱)، محسن رنجبران^(۲) و وهاب امیری^(۳)

۱. استاد مدعو، گروه جغرافیا، مؤسسه آموزش عالی الشتر، لرستان، الشتر، ایران

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

چشمه‌های آهک‌ساز آب اسک در فاصله ۸۵ کیلومتری شمال شرقی تهران در دامنه شرقی آتشفشان دماوند واقع شده‌اند. نهشته‌های این چشمه‌ها، بیشتر به صورت تراورتن دیده می‌شوند. بررسی‌های میکروسکوپی حاکی از وجود چهار رخساره غیرزیستی و تعداد دو رخساره زیستی در تراورتن‌های آب اسک است. بر اساس توالی رسوب‌گذاری و رخساره‌های سنگی و همچنین با دور شدن از چشمه‌ها سه نوع مختلف تراورتن در منطقه شناسایی شد (تراورتن‌های نوع اول با مورفولوژی دهانه‌ای و کانالی، تراورتن‌های نوع دوم با مورفولوژی حوضچه‌ای، سدی و آبشاری و تراورتن‌های نوع سوم یا لامینه‌ای). بر روی نمودار $\delta^{13}C$ در مقابل $\delta^{18}O$ (VPDB)، این تراورتن‌ها در دو رده آنکوبید و قشرهای بلورین از نظر سنگ‌رخساره قرار می‌گیرند. بر اساس رخساره‌های شناسایی شده، این چشمه‌ها گرمابی هستند و در رده چشمه‌های ترموزن قرار می‌گیرند. مقادیر مثبت ضریب اشباع شدگی لائزلیه (LSI) برای چشمه‌های پشنگ، نادعلی و زاغ بیانگر فوق اشباع بودن این نمونه‌ها نسبت به کربنات کلسیم است و همین موضوع موجب رسوب‌گذاری قابل توجه در اطراف چشمه‌های مورد نظر شده است. در مقابل، مقدار LSI منفی در چشمه سر پل به تحت اشباع بودن آب نسبت به کربنات کلسیم اشاره دارد. بنابراین به نظر می‌رسد نقش این چشمه در رسوب‌گذاری تشکیلات تراورتنی در این منطقه کمتر از سایر چشمه‌ها است. همچنین موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار بهینه شده گیبس و نمودار ون و بردام نشان می‌دهد، برهمکنش آب با سنگ‌های کربناته و تا حدودی سیلیکاته به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین عناصر کلسیم و سدیم در این منطقه شناخته می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: آب اسک، ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن، تراورتن‌های گرم‌آزاد، رخساره رسوبی، هیدروشیمی.

مقدمه

بیش از ده چشمه سرد و دما دار مورد توجه ویژه گردشگران و همچنین پژوهشگران می‌باشد. نهشته‌های این چشمه‌های آهک‌ساز، بیشتر تراورتن می‌باشد. اصطلاح تراورتن پیش‌تر توسط کوهن (Cohn, 1864) به کار رفته است و در وسیع‌ترین معنای آن به همه رسوبات کربناته غیردریایی تشکیل شده

مجموعه چشمه‌های معدنی آب اسک (واقع در ۸۵ کیلومتری شمال شرق تهران) در ترازهای پایین ارتفاعی جاده هراز رخنمون دارند. این منطقه از نواحی شناخته شده در دامنه جنوب شرقی آتشفشان دماوند است و بواسطه ظهور

* نویسنده مرتبط: rahmani.somaye@gmail.com

آب، دما، pH، سرعت و غیره اشاره دارد. به دلیل تغییر مکان چشمه‌ها که ناشی از تغییر سرعت جریان آب چشمه‌ها و باز و بسته بودن دهانه چشمه‌هاست رخساره‌ها به طور نسبی جانشین هم شده و به طور مداوم بازسازی می‌شوند (Fouke et al., 2003; Fouke et al., 2001; Fouke et al., 2000). از سوی دیگر براساس مورفولوژی و کانی‌شناسی، در تراورتن‌ها پنج رخساره رسوبی (دهانه^۱، کانالی^۲، حوضچه‌ای^۳، دامنه نزدیک به منشأ^۴ و دامنه دور از منشأ^۵) شناسایی شده است (Inskeep and McDermott, 2005; Fouke et al., 2000; Chafetz and Folk, 1984 (شکل ۱). پنتکاست و وایلز (Pentecost and Viles, 1994) و پنتکاست (Pentecost, 1995 a, b) تراورتن‌ها را براساس شکل و محیط رسوبی به هفت گروه رده‌بندی کرده‌اند (شکل ۲): الف) پشته‌ای-شکافی، ب) آبشاری، پ) سدی، ت) قشرهای رودخانه‌ای، ث) قشرهای دریاچه‌ای با آنکوئید، ج) مردابی و چ) رودایت‌های سطحی سیمانی شده. اوزکول و همکاران (Özkul et al., 2002) با استفاده از مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن تراورتن‌ها را براساس سنگ‌رخساره به نه گروه زیر، رده‌بندی کرده‌اند: ۱) قشرهای بلورین، ۲) بوته‌ای، ۳) آنکوئیدی یا پیزولیتی، ۴) تیغه‌ای، ۵) پوشیده شده از حباب گاز، ۶) نی‌مانند، ۷) سنگ آواری، ۸) قلوهای و ۹) خاک‌های دیرینه^۷. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های آب گرم بستگی به ترکیب محلول نفوذ کننده، عمق مهاجرت، زمان اقامت آب‌های گرم در مسیر مهاجرت و واکنش‌های آب/سنگ در عمق سازندها (اختلاط با رسوبات هوا نژده) دارد (Kele et al., 2008). این ویژگی‌ها ترکیب رسوبات کربناته مانند تراورتن را که از این آب‌ها تشکیل می‌شود تحت تأثیر قرار می‌دهد.

انصاری (2013, Ansari)، رحمانی جوانمرد (1390)،

دریا نزدیک چشمه‌های زمینی، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و غارها اشاره دارد (Sanders and Friedman, 1967). طبق تعریف پنتکاست (Pentecost, 2005b) تراورتن یک سنگ آهک قاره‌ای رسوب کرده در اطراف چشمه‌هاست و از کلسیت یا آراگونیت با تخلخل بین بلورین پایین تا متوسط، تخلخل قالبی یا داربستی بالا تشکیل شده است. تراورتن در محیط وادوز یا اساساً فراتیک تشکیل می‌شود و رسوب‌گذاری آنها از طریق انتقال دی‌اکسیدکربن از منابع زیرزمینی که منجر به فوق اشباع شدن کربنات کلسیم می‌شود؛ صورت می‌گیرد. در مورد رده‌بندی تراورتن‌ها، طبقه‌بندی جامعی بر مبنای خصوصیات سنگ‌شناسی و ارتباط ژنتیکی این ویژگی‌ها با محیط رسوبی ارائه نشده و تاکنون بیشتر طبقه‌بندی‌ها بر مبنای ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی بوده است (Jones and Renaut, 2010; Guo and Riding, 1998; Folk et al., 1985; Chafetz and Folk, 1984; Cipriani et al., 1972; Gonfiantini et al., 1968). بیشتر تحقیقات انجام شده در سطح جهانی حاکی از ارتباط محیط تشکیل تراورتن‌ها به سیستم گرمابی و در سه سیستم رسوبی (تراورتن‌های گرم‌زاد) و متشکل از هشت نوع رسوب کربناته است (جدول ۱). تراورتن‌ها متشکل از رسوبات متنوعی می‌باشند و ناشی از دو فرایند اصلی هستند (Gandin and Capezuoli, 2008): ۱) رسوبات کربناته‌ای که از آب‌های جاری منشأ می‌گیرد و در طی رسوب‌گذاری که هم در شرایط اپی‌ژن (سیستم‌های گرمابی زیرجوی) و هم در شرایط هیپوژن (کانال‌های زمین گرمایی عمیق) می‌تواند رخ می‌دهد، به صورت پوسته‌های سخت دچار سنگ‌شدگی می‌شوند (رخساره‌های کربناته زیستی و غیرزیستی)؛ ۲) رسوباتی که مانند کربنات‌های دریایی در محیط‌های زیرآبی نظیر دریاچه‌ها، باتلاق‌ها، رودخانه‌ها و حوضچه‌های موقتی ته‌نشین شده و به ترتیب از طریق فرایندهایی مانند تعلیق یا حمل و نقل به شکل دانه‌های سست و مجزا، رسوب‌گذاری و در نهایت دفن شدن به سنگ تبدیل می‌شوند. رخساره‌های تراورتنی به ته‌نشینی تراورتن‌ها در طیفی از شرایط محیطی مانند درجه حرارت، عمق نسبی

1. Thermogene travertines
2. Vent
3. Channel
4. Pound
5. Proximal slope
6. Distal slope
7. Palaeosols

با شیمی آب، تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب چشمه‌های تراورتن‌ساز نیز انجام خواهد شد.

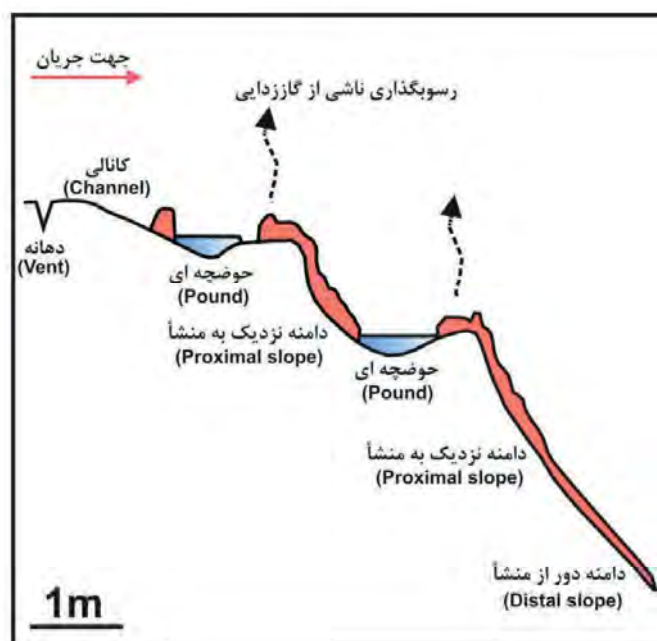
روش مطالعه

برای انجام این پژوهش از داده‌های نمونه‌های آبی منتشر شده توسط انصاری (Ansari, 2013) استفاده شد. همچنین در طی پژوهش حاضر، پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند درجه حرارت، EC و pH بعضی از چشمه‌های اسک اندازه‌گیری شد (جدول ۴). به منظور تعیین رخساره‌های رسوبی، از تراورتن‌ها در امتداد مسیر جریان چشمه‌های آب نمونه‌برداری (۵۰ نمونه) انجام گرفت و تصاویر لازم از ویژگی‌های صحرایی و ماکروسکوپی منطقه تهیه شد. در راستای بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های بافتی و رخساره‌ای، تعدادی مقطع نازک از نمونه‌ها تهیه و با میکروسکوپ

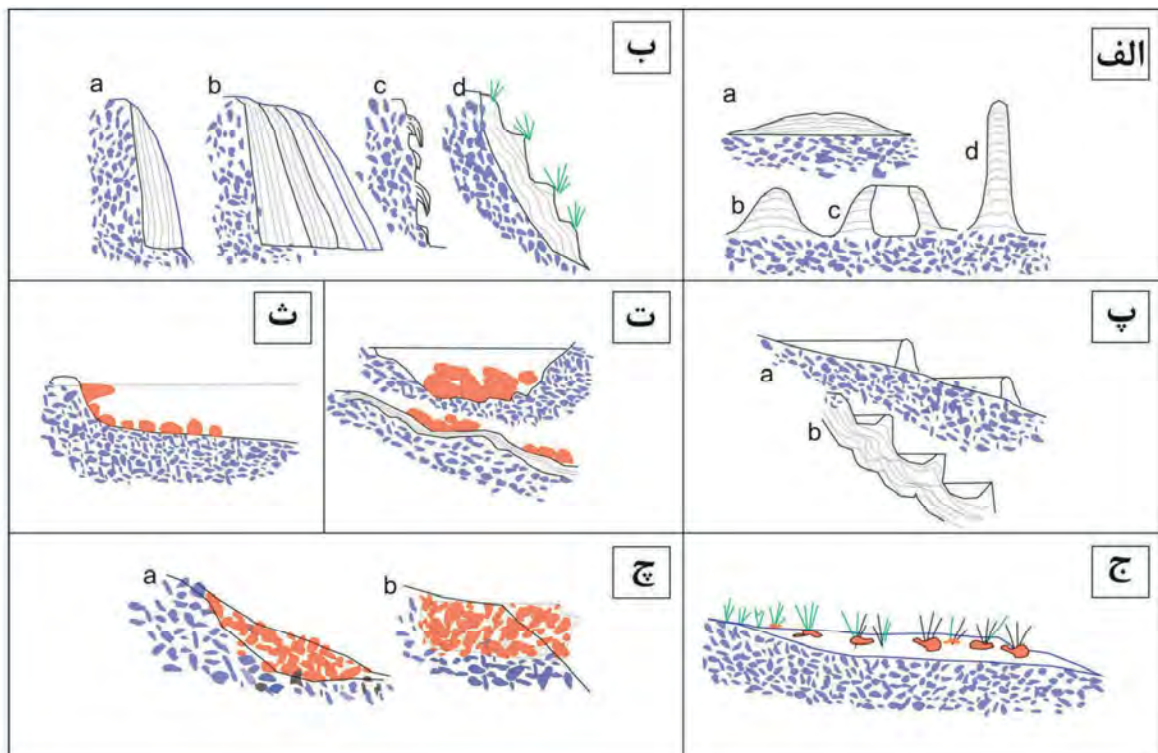
رحمانی جوانمرد و همکاران (Rahmani Javanmard et al., 2012) و رنجبران و همکاران (Ranjbaran et al., 2019) به ترتیب با بررسی فاکتورهای فیزیکوشیمیایی آب چشمه‌ها، مطالعات زمین‌شیمیایی و ایزوتوپی نهشته‌های کربناته ناشی از فعالیت چشمه‌ها و همچنین نتایج حاصل از مطالعات دورسنجی به بررسی عوامل مؤثر در ظهور چشمه‌های این ناحیه پرداختند. اما تاکنون مطالعات جامعی برای رده‌بندی و بررسی رخساره‌های رسوبی تراورتن‌های آب اسک و سازوکار تشکیل آنها انجام نشده است. از این رو، در بررسی‌های پیش‌بینی شده در طی این پژوهش، با استفاده از نتایج حاصل از مطالعات میکروسکوپی و از دید ایزوتوپی‌های پایدار کربن و اکسیژن به توصیف و بررسی رخساره‌های رسوبی تراورتن‌های مورد مطالعه پرداخته می‌شود. علاوه بر این، در راستای درک بهتر ارتباط رخساره‌های تراورتنی

جدول ۱. رده‌بندی بافتی کربنات‌های گرمایی (سنگ آهک‌های تراورتنی) (Gandin and Capezzuoli, 2014)

قشرهای بلورین غیرزیستی	قشرهای زیستی
بلورهای پرماند	بایندستون
بلورهای شعاعی-بادبزی	میکرایت لخته‌ای (ترومبولیت)
سنگ‌های اسفنجی	استروماتولیت
	بوته‌های دندریتی
	طبقه‌های میکروبی



شکل ۱. مقطع عرضی از رخساره‌های تراورتنی و جهت جریان آب چشمه (Fouke et al., 2000)



شکل ۲. رده‌بندی تراورتن‌ها براساس شکل و محیط رسوبی (Pentecost and Viles, 1994; Pentecost, 1995a, b)

زمین‌شناسی منطقه

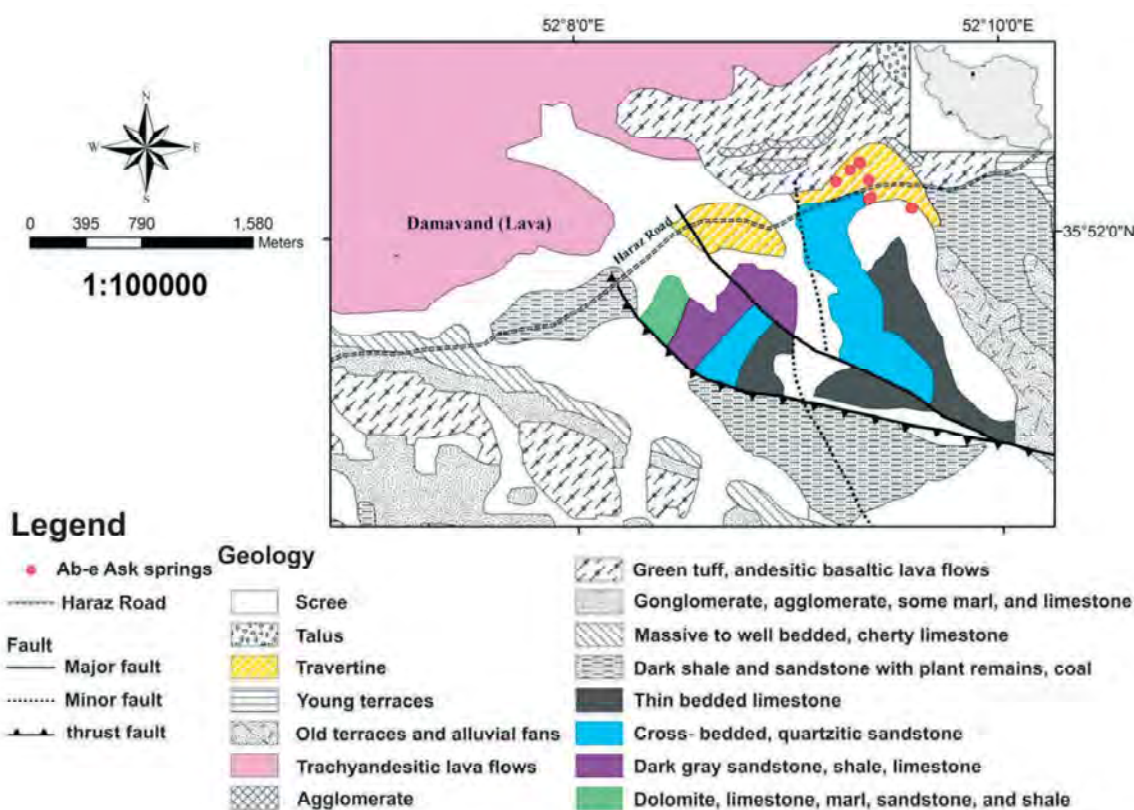
منطقه آب اسک بین طول جغرافیایی $۵۲^{\circ}۰۸'$ تا $۵۲^{\circ}۱۰'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۳۵^{\circ}۵۱'$ تا $۳۵^{\circ}۵۲'$ شمالی واقع شده است (شکل ۳). از نظر زمین‌شناسی این منطقه در حد فاصل بین سازندهای دوران پالئوزویک، مزوزویک تا نهشته‌های آذرآواری و توده‌های آذرین قرار دارد (شکل ۳). سازندهای پالئوزویک موجود در منطقه، متشکل از سنگ آهک میلا و سنگ آهک دورود هستند. از جمله سازندهای مزوزویک موجود در منطقه می‌توان به سنگ آهک الیکا، ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های سازند شمشک و سنگ آهک سازند لار اشاره کرد. این منطقه بخشی از پهنه ساختاری البرز مرکزی است و دو روند ساختاری شرق-شمال شرق (البرز شرقی) و غرب-شمال غرب (البرز غربی) در منطقه کوه آتشفشانی دماوند به هم می‌رسند. گسل‌های فعال و توانمند فشارشی (مانند گسل مشا) و چین‌خوردگی‌های عظیم کم و بیش شرقی-غربی در پهنه ۶۰۰ کیلومتری البرز

پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفتند. سپس به منظور مطالعه دقیق‌تر با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مورد بررسی واقع شدند. با توجه به اینکه این تراورتن‌ها از زمانی که شروع به رسوب‌گذاری کرده‌اند به طور مستقیم در معرض آب‌های جوی^۲ قرار دارند بنابراین پتانسیل لازم برای تحمل فرایندهای دیاژنزی را پیدا کرده‌اند. بر اساس مطالعات پتروگرافی، دیاژنز در این تراورتن‌ها به وسیله وجود کلسیت ثانویه یا کلسیت تبلور یافته، قابل شناسایی است. به همین منظور با استفاده از دستگاه Craftsman Rotary مدل EX 22 M 22000 RPM، کلسیت ثانویه جدا شد و آنالیزهای ایزوتوپی ^{13}C و ^{18}O بر روی تراورتن‌های مورد مطالعه انجام گرفت. مقدار ایزوتوپ‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جرمی Thermo Fisher DELTA-V با دقت ± 0.2 پرمیل و برحسب استاندارد پی‌دی بلمنیت (PDB) در آزمایشگاه ایزوتوپ پایدار ETH (زوریخ، سوئیس) انجام شد. انجام آنالیز SEM در دانشکده برق دانشگاه تهران محقق شد.

1. Scanning electron microscope
2. Meteoric water

امیدیان (۱۳۸۶) معتقدند که تغییر جهت رژیم تنشی در این زمان، عامل تکتونیکی برای ایجاد درز و شکاف‌های عمیق در ناحیه شکننده خمشی البرز مرکزی می‌باشد و موجب فوران دماوند در یک محیط تراکششی شده است. به نظر می‌رسد که فعالیت سیستم‌های جدید تکتونیکی حاکم بر البرز مرکزی، ظهور چشمه‌های متعدد اطراف آتشفشان دماوند و نهشته‌های تراورتنی ناشی از آن را فراهم کرده است (امیدیان، ۱۳۸۶). بر اساس اطلاعات نقشه زمین‌شناسی، گسل‌های ساختاری ایرا و نوا با روند ESE و دارا بودن مکانیسم معکوس در شرق آتشفشان دماوند، جزء سیستم تکتونیکی البرز مرکزی محسوب می‌شوند. ادامه روند این گسل‌ها به سمت غرب، با افزایش شاخه‌های فرعی فعالی همراه است و با تغییر جهت بارز به زیر گدازه‌های دماوند در منطقه آب اسک محو می‌شوند (اسکویی و امیدیان، ۱۳۹۳).

حاکمی از کوهزایی فعال این ناحیه است. پی‌سنگ رسوبی حاشیه غیرفعال پالئوزوییک-موزووییک این منطقه همراه با تظاهرات رسوبی-آتشفشانی سنوزوییک به دلیل این کوهزایی فعال که ناشی از فشارش مداوم صفحه عربستان به صفحه ایران است، از نظر تکتونیکی به شدت متحول شده است. چرخش راستگرد بلوک خزر در 2 ± 5 میلیون سال پیش منجر به تغییر روند گسلش فشارشی راستگرد این ناحیه به چپگرد شده است (Allen et al., 2003). امیدیان (۱۳۸۶) با بررسی‌های پالئواسترس در اطراف آتشفشان دماوند و تحلیل شواهد متعدد ثبت خش‌لغزهای گسلی فشارشی دارای مؤلفه امتدادی چپگرد که بر روی خش‌لغزهای فشاری با مؤلفه امتدادی راستگرد حک شده بودند، روند تنشی این منطقه را همخوان با سیستم تراکششی معرفی کردند. حسن‌زاده و همکاران (Hassanzadeh et al., 2006) و



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی خلاصه شده منطقه مورد مطالعه که در آن موقعیت زمین‌شناسی تراورتن‌ها و چشمه‌های تراورتن‌ساز مشخص شده است (Allenbach and Shteiher, 1966)

بحث

رخساره‌های رسوبی

سد در اینجا به سدهای سرریز مصنوعی اطلاق می‌شود. در سدها، جریان آب مقدار زیادی از قطعات و خرده‌های گیاهان را جمع می‌کند و باعث رشد جلبک‌ها و پوشش آهکی می‌شوند و این خود باعث گسترش تراورتن‌زایی و بزرگ شدن سدها می‌شود. از انواع سدها می‌توان به سدهای کوچک^۱ در منطقه مورد مطالعه اشاره کرد (شکل ۴-ث) که دارای مقیاس کوچک هستند و اغلب در تراورتن‌های گرم‌آباد دیده می‌شوند (Geurts et al., 1992). تعدادی از تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه نیز به شکل آبشاری و به دو صورت فعال و غیرفعال دیده می‌شوند (شکل ۴-ج و چ). این نوع از تراورتن‌ها بر روی سرایشی‌های تند در اثر افت سرعت جریان و فشار آب به وجود آمده‌اند. بعضی از آن‌ها در فواصل متغیری از منشأ آب توسعه پیدا کرده‌اند و حالت توده‌ای دارند. در منطقه مورد مطالعه این رسوبات بر اساس طبقه‌بندی پنتکاست (Pentecost, 2005b) از نوع رسوبات فرسایشی^۲ هستند. مورفولوژی این نوع از آبشارها تا حد بسیار زیادی به وسیله مسیر سیلاب آب کنترل شده است و بر روی دیوارهای قائم گسترش یافته‌اند (شکل ۴-ج و چ). دامنه دور از منشأ^۱: در نهایت انتقال تدریجی به رخساره دامنه دور از منشأ، جایی که تراورتن‌های لامینه‌ای رخنمون دارند صورت می‌گیرد (شکل ۴-خ). این رخساره از کلسیت بلوکی تشکیل شده است (شکل ۴-خ). در ادامه، به بررسی رخساره‌های شناسایی شده در تراورتن‌های آب اسک در دو گروه رخساره‌های غیرزیستی^{۱۱} و رخساره‌های زیستی^{۱۲} پرداخته خواهد شد (جدول ۲).

تراورتن‌ها تقریباً شامل دو گونه اصلی کربنات کلسیم، آراگونیت و کلسیت هستند. این کانی‌ها اطلاعاتی را در مورد محیط‌های گذشته ارائه می‌دهند. شرایطی که براساس آن این کانی‌ها می‌توانند تشکیل شوند متغیر است و شامل ترکیب شیمیایی منبع آب، درجه حرارت، فعالیت‌های میکروبی (Fouke et al., 2000; Turi, 1986)، فشار، نرخ رسوبگذاری، تلاطم و نرخ انتشار دی‌اکسید کربن می‌باشد (Lippmann, 1973; Kitano, 1962). در منطقه مورد مطالعه و با فاصله گرفتن از دهانه چشمه‌ها، پنج رخساره تراورتنی براساس شکل و ترکیب کانی‌شناسی تشخیص داده شده است:

دهانه^۱: این رخساره از بلورهای سوزنی کلسیت با اندازه کمتر از ۱۰۰ میکرومتر تشکیل شده است (شکل ۴-الف).

کانالی^۲: این رخساره از بلورهای سوزنی کلسیت تشکیل شده است و به صورت افقی در کانال‌های رودخانه‌ای گسترش پیدا کرده و یک شکل پلکانی به نام تخت‌انک^۳ یا تراس‌های پلکانی شکل را تشکیل داده است (شکل ۴-ب).

دامنه نزدیک به منشأ^۴: در امتداد این رخساره حوضچه‌ها (شکل ۴-پ)، تراورتن‌های سدی (شکل ۴-ت و ث) و تراورتن‌های آبشاری^۵ بر روی سرایشی‌های تند تشکیل شده است (شکل ۴-ج و چ). از نظر ترکیب کانی‌شناسی این رخساره از بلورهای کلسیت ستونی یا رشته‌ای تشکیل شده است (شکل ۴-ح). این عقیده وجود دارد که اسپار ستونی تا حد بسیار زیادی مربوط به اوایل دیاژنز و نئومورفیسم هستند (Braithwaite, 1979; Love and Chafetz, 1988;

Janssen et al., 1999). رخساره حوضچه‌ای^۶ ناشی از افت شدید در جریان آب چشمه‌هاست (شکل ۴-پ) و به دلیل پایین بودن درجه حرارت آب از کلسیت تشکیل شده است. تراورتن‌های سدی^۷ در اطراف یکی از چشمه‌های آب گرم موجود در منطقه به نام چشمه بیلاق تشکیل شده‌اند (شکل ۴-ت). این نوع تراورتن‌ها از تراورتن‌های نوع آبشاری به وسیله افزایش موضعی عمودی خود که منجر به تشکیل آبگیر شده است تشخیص داده می‌شوند. اصطلاح

1. Vent
2. Channel
3. Terracette
4. Proximal slope
5. Cascade
6. Pound
7. Dam travertines
8. Mini dam
9. Erosively-shaped
10. Distal slope
11. Abiotic
12. Microbially



شکل ۴. تصاویری از رخساره‌های تراورتنی منطقه مورد مطالعه. الف) رخساره دهانه، ب) رخساره کانالی، پ) رخساره حوضچه‌ای، ت) رخساره سدی، ث) نمایی از سدهای کوچک در تراورتن‌های مورد مطالعه، ج و چ) رخساره آبشاری، ح) تصویر SEM از کلسیت رشته‌ای یا ستونی، خ) رخساره دامنه دور از منشأ

جدول ۲. رخساره‌های کربناته زیستی و غیرزیستی شناسایی شده در چشمه‌های تراورتن ساز آب اسک

قشرهای زیستی	قشرهای بلورین غیرزیستی
بایندستون (استروماتولیت)	بلورهای سوزنی
طبقه‌های میکروبی	بلورهای شعاعی-بادبزی
	قشر بلورین
	سنگ‌های اسفنجی

رخساره‌های غیرزیستی

رخساره، شکل بادبزنی و شعاعی، به دلیل فرار گرفتن وجود بلورهای کشیده کلسیت است که با زوایه غیر از ۹۰ درجه نسبت به سنگ بستر قرار دارند.^۱

در منطقه مورد مطالعه، رخساره‌های بلورین غیرزیستی متشکل از بلورهای کلسیت می‌باشد و به صورت بلورهای سوزنی، بادبزنی-شعاعی، قشر بلورین و سنگ‌های اسفنجی قابل مشاهده است (شکل ۵).

رخساره قشر بلورین^۵

در این نوع سنگ رخساره، بلورهای کلسیت عمود بر لایه‌های میکرایتی رشد کرده‌اند (شکل ۵-ج و چ). با فاصله گرفتن از دهانه چشمه‌ها این رخساره بیشتر به صورت تناوبی از لایه‌های روشن کلسیت اسپاریتی و لایه‌های تیره رنگ اکسید آهن قابل مشاهده است (شکل ۵-ج و چ).

رخساره توفای^۱

در منطقه مورد مطالعه، این رسوبات نرم و سست، با سطوح سبز و به شکل ندولار در کانال‌های رودخانه‌ای دیده می‌شوند، به صورت لایه‌های نازک بر روی اشیای مختلف نه‌نشین شده‌اند و نهشته‌های عهد حاضر کربنات کلسیم در منطقه محسوب می‌شوند (شکل ۵-الف). مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد این رسوبات نرم و سست از بلورهای خیلی ریز کربنات کلسیم یا لوبلینایت تشکیل شده‌اند و حاوی حدود ۳۵ تا ۷۵ درصد آب هستند. به هنگام رسوب‌گذاری حالت پلاستیکی دارند، ولی بعد از خشک شدن به صورت پودر در می‌آیند (رحیم‌پور بناب، ۱۳۸۴؛ شکل ۵-ب). پدلی (Pedley, 1987) اشکال یک کلسیت تیغه‌ای با یک ماکل پلکانی^۲ که لوبلینایت^۳ نامیده می‌شود را از منطقه Caerwys که احتمال دارد در ارتباط با خشکی باشد توصیف کرده است. منشأ بلورهای لوبلینایت به نظر می‌رسد در ارتباط با مراحل انتهایی سیمانی شدن در توفای باشند (Gruszczyski et al., 2004). فولک و همکاران (Folk et al., 1985) گزارش کردند، بلورهای لوبلینایت در طی تبخیر، زمانی که پوشش‌های باکتریایی به طور کامل خشک شده باشند تشکیل می‌شوند. تصاویر SEM این رسوبات نشان می‌دهد که فعالیت‌های جلبکی مانند دیاتومه‌ها در نهشته شدن آنها نقش بسزایی داشته است (شکل ۵-پ). این بلورها شاخص محیط متئوریک-وادوز هستند و در جایی که نرخ اشباع‌شدگی نسبت به کربنات کلسیم افزایش یافته و جریان آب آشفته است تشکیل می‌شوند (Nelson, 1990; Chafetz et al., 1985).

سنگ‌های اسفنجی^۶

برخی از این عوارض در اثر خروج گازهایی که به صورت محلول در آب وجود دارد و یا دارای منشأ آرگانیکی (گیاهان، باکتری‌ها و جلبک‌ها) هستند، به وجود می‌آیند. این اشکال همواره بعد از نهشتگی بسته شده و به صورت کره یا آلایت کوچکی در سطح رسوب ظاهر می‌شود و آن‌ها را به عنوان سنگ اسفنجی یا سنگ لانه زنبوری^۷ نامگذاری می‌کنند (شکل ۵-ح).

رخساره‌های زیستی^۸

رخساره‌های بلورین زیستی در منطقه مورد مطالعه به صورت بایندستون-استروماتولیت و تجمع میکروبی قابل مشاهده هستند (شکل ۶).

رخساره بایندستون استروماتولیتی^۹

این رخساره به صورت تناوبی از پوشش‌های جلبکی و کلیست میکرایتی-اسپاریتی قابل مشاهده است (شکل ۶-الف). رشد جلبک‌های سبز در چشمه‌های آب گرم اسک و تشکیل تراورتن بر روی آنها باعث ایجاد نوعی ساخت استروماتولیتی شده است. لامیناسیون‌های میکرایتی

1. Tufa
2. Enechelon twinning
3. Lublinit
4. Fan-ray crystals
5. Crystalline crust
6. Foam rocks
7. Honeycomb rock
8. Microbialite
9. Stromatolitic bindstone

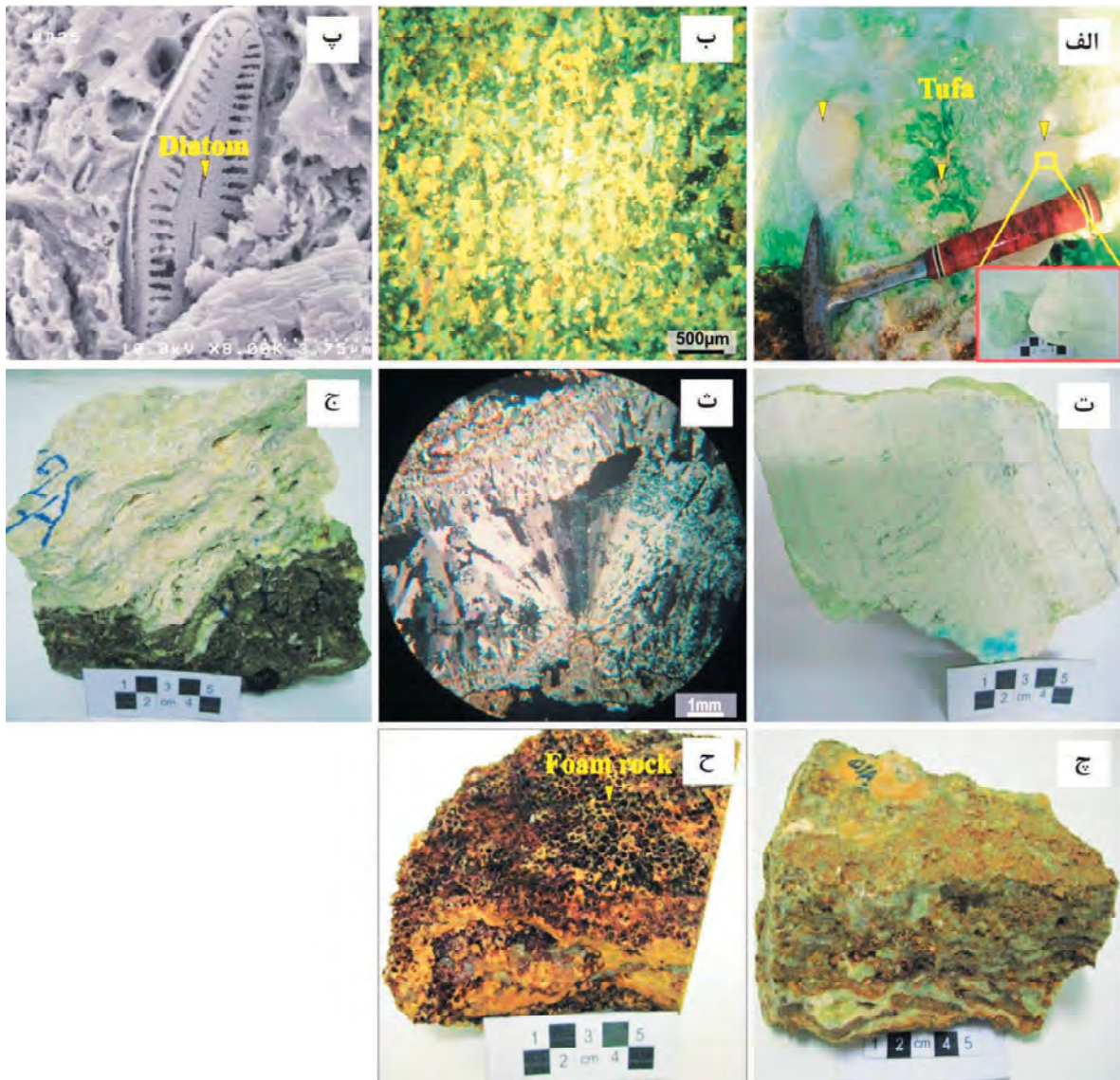
بلورهای بادبزنی-شعاعی^۴

در تراورتن‌های مورد مطالعه این بلورها به شکل بادبزنی و شعاعی قابل مشاهده هستند (شکل ۵-ت و ث). در این

رخساره گرینستون پلوئیدی^۲

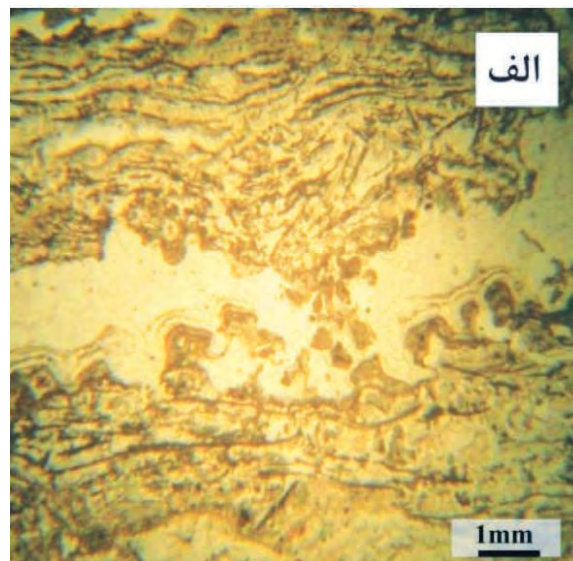
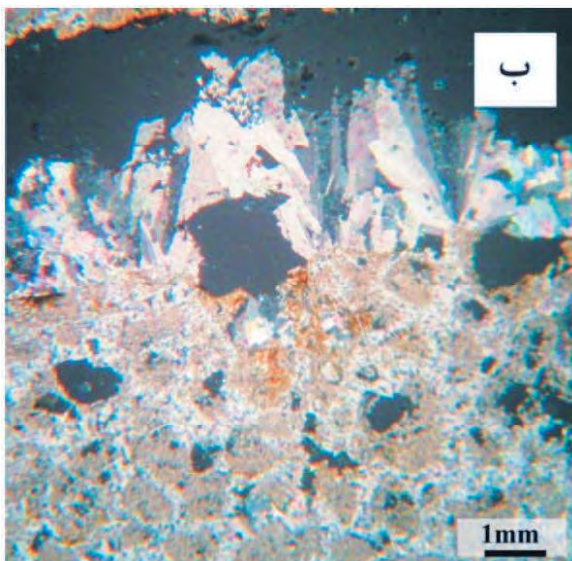
این رخساره در تراورتن‌های مورد مطالعه از پلوئیدها با بافت لخته‌ای تشکیل شده است و به احتمال زیاد دارای منشأ میکروبی هستند (شکل ۶-ب). تجمعاتی از پلوئیدها با ساختار لخته‌ای^۳ در طیف گسترده‌ای از انواع تراورتن‌ها به‌ویژه آنهایی که در ارتباط با کلونی باکتری‌ها و سیانوباکتری‌ها هستند گزارش شده است (Mohanty and Das, 1997).

بیشتر در این تراورتن‌های جلبکی، جایی که بیشتر در رابطه با رشد فصلی جلبک‌ها می‌باشند، آشکار هستند. میکرایت‌ها در اطراف و شاید در کلونی باکتری‌ها و در اطراف جلبک‌ها و اساساً سیانوباکتری‌ها ته‌نشین می‌شوند (Monty, 1996; Freytet and Plet, 1976). برخی از این جلبک‌ها با بافت کلو فورم^۱ در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شوند (شکل ۶-الف).



شکل ۵. الف و ب) توف در مقیاس صحرایی و در مقطع میکروسکوپی که در آن بلورهای ریز کربنات کلسیم یا لوبلینایت نشان داده شده است (نور پلاریزه)، پ) تصویر SEM از توف، ت و ث) بلورهای بادبزنی-شعاعی در مقیاس صحرایی و میکروسکوپی (نور پلاریزه)، ج و چ) سنگ رخساره قشرهای بلورین در تراورتن‌های مورد مطالعه، ح) پوششی از حباب‌های گازی در سطح تراورتن‌های لامینه‌ای که بر اثر خروج گاز به وجود آمده است

1. Colloform
2. Peloidal grainstone
3. Clotted structure



شکل ۶. الف) رخساره بایندستون (استروماتولیت) (نور پلاریزه)، ب) پلوئیدها در مقاطع میکروسکوپی تراورتن‌های لامینه‌ای (نور پلاریزه)

آبی هستند (Chafetz and Meredith, 1983). وجود رشته‌های جلبکی در مقاطع نازک و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ نشان می‌دهد، فعالیت‌های بیولوژیکی مانند جلبک‌های سبز-آبی در تشکیل این تراورتن‌ها نقش قابل توجهی داشته‌اند.

تحلیل هیدروژئوشیمیایی

آنالیز فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد فاصله طی شده توسط آب‌های زیرزمینی از منطقه تغذیه تا محل برداشت و همچنین مدت زمان تماس آن با کانی‌های انحلال‌پذیر را در اختیار قرار دهد (Domenico and Schwartz, 1990). عوامل مختلفی می‌توانند ترکیب شیمیایی آب را کنترل کنند. برخی از مهم‌ترین آنها شامل برهمکنش آب با سازندهای زمین‌شناسی در مسیر حرکت، تبادلات یونی، واکنش‌های ژئوشیمیایی و همین‌طور آلودگی‌های انسانی است (Amiri et al., 2021b, 2021c).

در این مطالعه، از نتایج آنالیز فیزیکوشیمیایی برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی چشمه‌های مورد مطالعه (جدول ۴؛ شکل ۸) استفاده شده است. به منظور تعیین اعتبار نتایج آنالیز شیمیایی آب، درصد خطای بیلان بار^۲ که به صورت

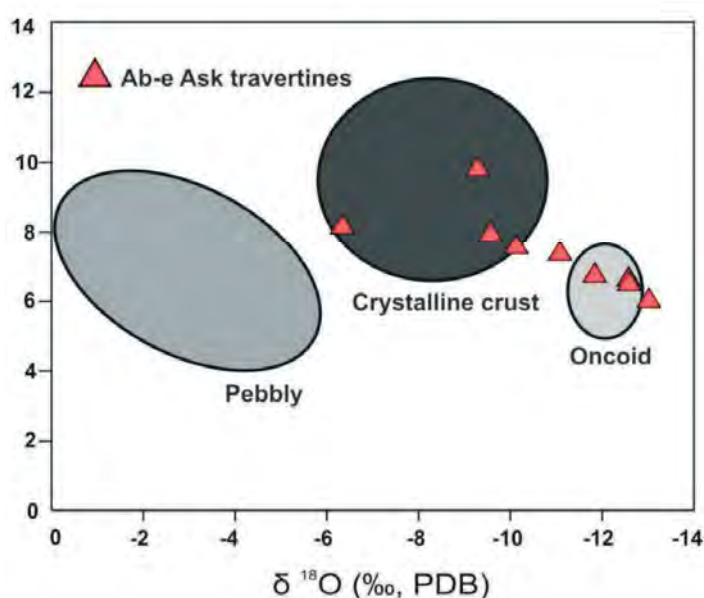
تعیین سنگ‌رخساره تراورتن‌ها با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار

به منظور تعیین سنگ‌رخساره تراورتن‌های آب اسک آنالیزهای $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{13}\text{C}$ بر روی آنها انجام شده است (جدول ۳). تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه، دارای مقادیر $\delta^{13}\text{C}$ در حدود $+6$ تا $+9.79$ پرمیل و مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در گستره‌ای بین -13.02 تا -6.34 پرمیل بر اساس استاندارد VPDB می‌باشند. نمونه‌های مورد مطالعه از نظر مقدار $\delta^{13}\text{C}$ غنی‌شدگی قابل توجهی نشان می‌دهند. این غنی‌شدگی به کربنات‌زدایی سنگ آهک، فعالیت‌های جلبکی و گاز زدایی سریع چشمه‌های آب گرم نسبت داده شده است (Rahmani Javanmard et al., 2012). ایزوتوپ‌های اکسیژن نسبت به ایزوتوپ‌های کربن بیشتر تحت تأثیر دیاژنز قرار می‌گیرند و تفسیر آنها نسبت به ایزوتوپ کربن از صحت کمتری برخوردار است (Pentecost, 2005b). بنابراین، انواع تفریق دی‌اکسید کربن بهتر از ایزوتوپ‌های اکسیژن شناخته شده است و این امر ناشی از تبادل اکسیژن کربنات‌ها با اکسیژن مولکول‌های آب است (Pentecost, 2005b). در نمودار مقادیر ایزوتوپی اکسیژن و کربن، نمونه‌های آب اسک در دو رده قشر بلورین و آنکوئید (پیزولیت) قرار می‌گیرند (شکل ۷). وجود پیزولیت‌ها در نهشته‌های تراورتنی بسیار متداول است و در ارتباط با فعالیت جلبک‌های سبز-

1. Scanning electron microscope
2. Charge Balance Error-CBE

جدول ۳. داده‌های ایزوتوپی کربن و اکسیژن تراورتن‌ها در منطقه ژئوترمال آب اسک

شماره نمونه	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)
SR T1	-۱۲/۵۸	۶/۶۱	۱۸/۹۲
SR M 13	-۱۳/۰۲	۶	۱۷/۴۳
SR Z 14	-۱۲/۵۹	۶/۴۸	۱۷/۸۸
SR A 22	-۱۷/۸۴	۶/۷۲	۱۸/۶۵
SR A 12	-۱۷/۰۸	۷/۳۵	۱۹/۴۳
SR A 15	-۱۰/۱۳	۷/۵۴	۲۰/۴۱
SR A 60	-۹/۵۷	۷/۹۲	۲۰/۹۹
SR A 9	-۹/۲۹	۹/۷۹	۲۱/۲۸
SR B 32	-۶/۳۴	۸/۱۴	۲۴/۳۲



شکل ۷. مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{13}\text{C}$ تراورتن‌های آب اسک با توجه به سنگ‌رخساره (Roshanak et al., 2018)

موجود در آب را نشان می‌دهد، یکی از مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه‌های مربوط به تعادلات ژئوشیمیایی و نرخ حلالیت مواد مختلف است. مقدار pH نمونه‌های آب بین شش تا ۶/۸ تغییر می‌کند و این بیانگر حالت اسیدی اندک آب‌های این چشمه‌ها است. از این پارامتر به همراه تغییرات دما، غلظت یون‌های بیکربنات، کلسیم و TDS برای تعیین تمایل آب برای انحلال بیشتر محیط انتقال آب و یا ته‌نشینی املاح آب استفاده می‌شود. بررسی ضریب اشباع شدگی لائزلیه^۱ می‌تواند وضعیت اشباع‌شدگی آب از نظر میزان کربنات کلسیم و همین‌طور پتانسیل انحلال بیشتر

فرمول زیر بیان می‌شود را می‌توان برای آنالیزهای هر نمونه آب مورد استفاده قرار داد:

$$CBE = \frac{\sum cations - |\sum anions|}{\sum cations + |\sum anions|} \times 100 \quad (1) \text{ معادله}$$

که در آن، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها برحسب meq/l می‌باشد. بررسی مقدار CBE برای آنالیز شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که برخی در دامنه خطای ترجیحی $\pm 5\%$ درصدی و برخی نیز با دارا بودن بیشینه خطای قابل قبول $\pm 10\%$ می‌توانند برای تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

pH که قدرت واکنش آب با مواد اسیدی یا قلیایی

1. Langelier Saturation Index (LSI)

جدول ۴. پارامترهای فیزیکی‌وشیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه

نام چشمه‌ها	pH	EC	HCO ₃	Cl	SO ₄	K	Na	Mg	Ca	Fe	SiO ₂	T
نادعلی	۶/۶	۳۱۶۰	۱۲۵۶/۸	۴۲۶/۵	۱۰۷۸	۲۷/۳	۲۲۹/۹	۳۶	۳۷۶/۶	۱/۲	۱۷/۵	۲۸
زاغ	۶/۷	۳۰۰۰	۱۱۳۴/۷	۴۳۷/۹	۹۸/۹	۲۷/۳	۲۲۹/۹	۶۷/۴	۳۲۲/۶	۰/۹۱	۱۵	۲۵
سرپل	۶	۳۱۱۰	۱۲۳۸/۵	۴۰۰/۷	۹۵/۵	۲۹/۳	۲۱۷/۵	۵۷/۶	۳۷۰	۱/۰۴	۱۶/۵	۳۲
پشنک	۶/۸	۲۶۰۰	۷۹۳	۱۱۷	۱۰۶	۲۸	۲۱۵	۷۳	۶۸۰	۰/۵	۲۶/۷	۳۱
قل قل	۶/۲۸	۱۳۹۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۳/۴
جنب مخبرات	۶/۳۸	۳۶۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۹/۲
بیلاق	۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳۰

* مقدار EC بر حسب $\mu\text{S}/\text{cm}$ ، دما بر حسب درجه سانتیگراد و سایر مؤلفه‌ها بر حسب mg/L است. توجه شود که برخی از اطلاعات پس از رفع خطا و صحت سنجی از انصاری (2013, Ansari) برگرفته شده است



شکل ۸. الف) زاغ چشمه، ب) چشمه قل قل (آب اسک)

هستند. این بدان معناست که تیپ شیمیایی این نمونه‌ها بیکربنات کلسیم است. از آنجایی که بیکربنات کلسیم به‌عنوان تیپ غالب آب زیرزمینی در مناطق تغذیه قلمداد می‌شود، به نظر می‌رسد منابع آب مورد مطالعه دارای چرخه کوتاهی از محل تغذیه تا تخلیه هستند. این بدان معناست که تمایل هیدروژئوشیمیایی آب از بیکربنات به سولفات و در نهایت کلروره مشاهده نمی‌شود. این رخداد می‌تواند با توجه به ساختارهای درز و شکافدار منطقه و نقشی که در ایجاد مسیرهای ترجیحی حرکت آب زیرزمینی داشته باشند، قابل توجیه باشد!

منبع و منشأ یون‌های موجود در نمونه‌های آب این چشمه‌ها را می‌توان به‌وسیله تغییر در نسبت $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ به‌عنوان تابعی از کل املاح محلول جامد (TDS) به‌طور جامع مورد

ترکیبات کربناته و یا پتانسیل ته‌نشینی آب را نشان دهد (Esmaeili-Vardanjani et al., 2015). محاسبه‌های انجام شده نشان می‌دهد، مقدار LSI برای چشمه‌های پشنک، نادعلی و زاغ به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۴۵ و ۰/۵۱ است و این بیانگر فوق اشباع بودن این نمونه‌ها از نظر مقدار کربنات کلسیم هستند. همین موضوع منجر به رسوب‌گذاری قابل توجه در اطراف چشمه‌های مورد نظر شده است (Amiri et al., 2021a). از سوی دیگر، مقدار LSI در نمونه تهیه شده از چشمه سرپل برابر با ۰/۰۲۳- است که این به تحت اشباع بودن آب از نظر محتویات کربنات کلسیم اشاره دارد. بنابراین به نظر می‌رسد نقش این چشمه در رسوب سنگ‌های تراورتنی در این منطقه کمتر از سایر چشمه‌های مورد نظر است.

بررسی ترکیب شیمیایی منابع آب مورد مطالعه نشان می‌دهد، کلسیم و بیکربنات به ترتیب کاتیون و آنیون غالب

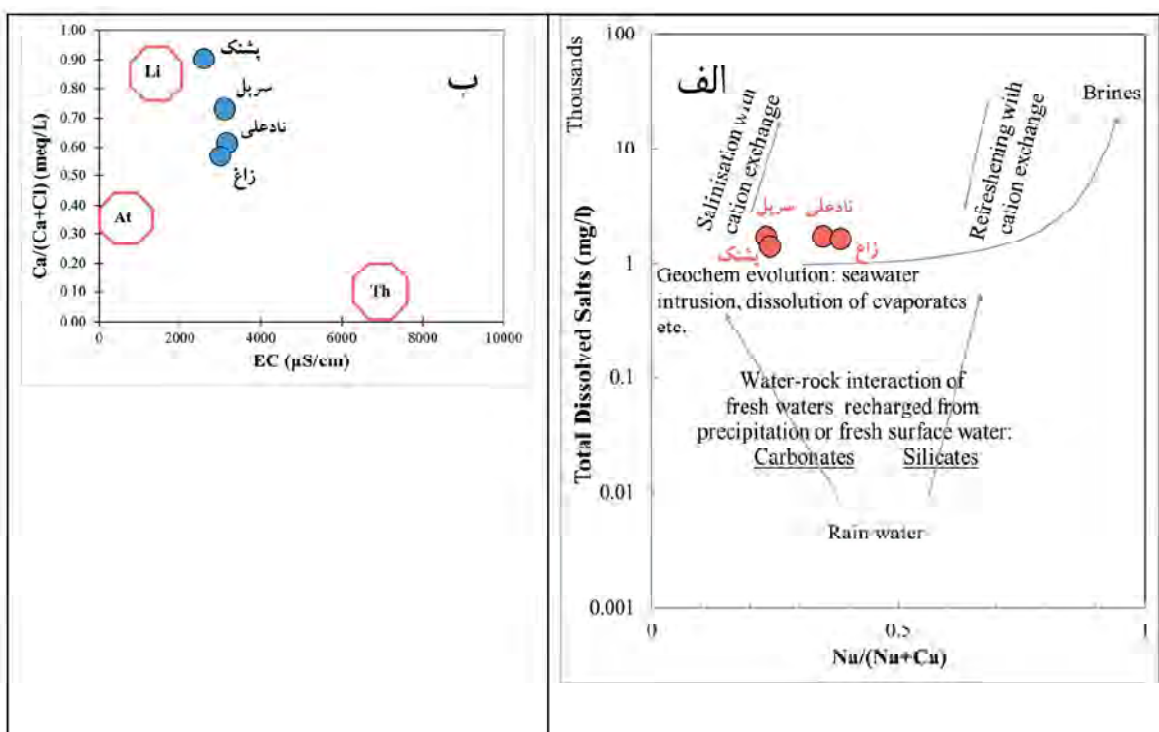
1. Supersaturation
2. Undersaturation

برهمکنش آب با سنگ‌های کربناته و تا حدودی سیلیکاته به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین عناصر کلسیم و سدیم در این منطقه شناخته می‌شوند. در این زمینه می‌توان به قرارگیری نمونه‌ها در میانه برهمکنش آب-سنگ (کربناته-سیلیکاته) توجه کرد (شکل ۹-الف).

علاوه بر موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار بهینه شده گیبس، نمودار ون ویردام نیز برای تعیین منشأ ترکیبات شیمیایی موجود در چشمه‌های مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۹-ب). بر اساس نمودار ون ویردام، آب زیرزمینی را می‌توان در یکی از موقعیت‌های اتمسفری (آب باران)، لیتولوژیک (آب شیرین غنی از کلسیم) و تالاسوتروپیک (آب دریا) متصور شد (Tanaskovic et al., 2012). به عبارتی در چرخه هیدرولوژیکی، همه نمونه‌های آبی در گستره یکی از این سه نوع منشأ اصلی قرار می‌گیرند. موقعیت نمونه آب چهار چشمه دارای آنالیز کامل شیمیایی بر روی این نمودار (شکل ۹-ب) نشان می‌دهد، لیتولوژی منطقه دارای نقش قابل توجهی در کنترل ترکیب شیمیایی این چشمه‌ها است.

ارزیابی قرار داد (Gibbs, 1970). لازم به ذکر است که در این مطالعه با توجه به اینکه تیپ شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه، بیکربنات کلسیم است، مقدار TDS به‌عنوان ضریبی از EC محاسبه شده است. به همین منظور از رابطه $TDS = \alpha EC$ استفاده شده است که در آن، TDS برحسب mg/l ، EC برحسب $\mu S/cm$ (در ۲۵ درجه سانتیگراد) و α ثابت تبدیل است. مقدار α در دامنه ۰/۵۴ تا ۰/۹۶ تغییر می‌کند. در آب‌های تازه (تیپ بیکربناته کلسیم) این ضریب پایین و هر چه بر املاح آب افزوده می‌شود مقدار α نیز بالاتر می‌رود.

بررسی موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار بهینه شده گیبس (Amiri and Berndtsson, 2020) نشان می‌دهد که این نمونه‌های در مسیر تکامل اندک ژئوشیمیایی و در راستای شور شدن قرار گرفته‌اند (شکل ۹-الف). با توجه به مقادیر EC نزدیک به هم در این نمونه‌ها، این جایگاه و روند تکاملی بیشتر به دلیل تغییر در نسبت $Na/(Na+Ca)$ رخ می‌دهد. جهت مکانیسم‌های غالب کنترل کننده ترکیب شیمیایی این نمونه‌ها نشان می‌دهد،



شکل ۹. الف) موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار بهینه شده گیبس (Amiri and Berndtsson, 2020)، ب) نمودار ون ویردام (Tanaskovic et al., 2012)

1. Van Wirdum
2. Thalassotrophic

دو ده آنکویید و قشرهای بلورین قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی و ایزوتوپی نشان می‌دهد، فعالیت‌های بیولوژیکی و باکتریایی مانند جلبک‌های سبز-آبی، دیاتومه‌ها و گاز زدایی سریع چشمه‌های آب گرم در تشکیل سنگ‌رخساره تراورتن‌های مورد مطالعه نقش بسزایی داشته‌اند. به‌منظور ارزیابی کیفی پتانسیل آب چشمه‌های مورد مطالعه در تشکیل نهشته‌های کربناته پارامتر ضریب اشباع‌شدگی لانژلیه (LSI) محاسبه شد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری نشان داد، بیشترین مقادیر ضریب اشباع‌شدگی لانژلیه (LSI) مربوط به چشمه‌های پشنک، نادعلی و زاغ هستند و به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۴۵ و ۰/۵۱ است و این حاکی از فوق اشباع بودن این نمونه‌ها از نظر مقدار کربنات کلسیم هستند. نتایج مطالعه حاضر همچنین نشان داد، کمترین مقادیر ضریب اشباع‌شدگی لانژلیه (LSI) مربوط به چشمه سرپل و برابر با ۰/۲۳- است و این به تحت اشباع بودن آب از نظر محتویات کربنات کلسیم اشاره دارد. بنابراین نقش چشمه سرپل در تشکیل نهشته‌های کربناته کمتر از سایر چشمه‌ها است. نمودار بهینه شده گیبس و نمودار ون ویردام نشان دادند، برهمکنش بین آب با سنگ از عوامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب در منطقه هستند.

منابع

- اسکویی، ب. و امیدیان، ص.، ۱۳۹۳. بررسی ساختاری گسل‌های ایرا و نوا در جنوب شرق آتشفشان دماوند با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۲، ۸۳-۹۶.
- امیدیان، ص.، ۱۳۸۶. تعیین جایگاه زمین‌ساختی آتشفشان دماوند بر اساس شواهد ساختاری و ژئوشیمیایی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ۱۶۷.
- رحمانی جوانمرد، س.، ۱۳۹۰. مطالعه زایش و ژنز تراورتن‌های آب اسک در شرق آتشفشان دماوند با بهره‌گیری از نسبت‌های ایزوتوپی، پتروگرافی و دورسنجی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ۱۵۸.
- رحیم‌پور بناب، حسین.، ۱۳۸۴. سنگ‌شناسی کربناته، ارتباط دیاژنز و تکامل تخلخل. انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷.

این مورد بیشتر برای چشمه پشنک مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، سه نمونه دیگر شامل سرپل، نادعلی و زاغ چرخه اندکی متفاوت را نشان می‌دهند. به عبارتی دیگر، این نمونه‌ها بین سه بخش اتمسفری، لیتولوژیک و تالاسوتروپیک قرار گرفته و تا حدودی می‌تواند افزایش شوری ناشی از افزایش نرخ آزادسازی و ورود ترکیبات شیمیایی را نشان دهد. این تغییرات به دلیل عدم تعادل بیشتر به دلیل تغییر در توزیع یون‌های کلسیم و کلراید است به ترتیبی که نمونه‌های سرپل، نادعلی و زاغ دارای مقدار کلسیم کمتر ولی کلراید و بیکربنات بیشتری در مقایسه با نمونه تهیه شده از چشمه پشنک دارند. یکی در تحلیل این رفتار هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها و یافتن دلیل منطقی برای این تغییر شیمیایی می‌توان از مقدار $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ استفاده کرد. با توجه به اینکه مجموع غلظت سولفات و بیکربنات بیشتر از پنج میلی اکی والان بر لیتر باشد، علاوه بر انحلال کلسیت و سایر ترکیبات کربناته، برهمکنش آب با سایر تشکیلات را به‌عنوان منشأ ثانویه سولفات و بیکربنات در نظر گرفت. این مورد علی‌رغم اینکه چندان قابل ملاحظه نیست ولی با توجه به تنوع سازندهای رسوبی در منطقه می‌تواند منطقی به نظر برسد.

نتیجه‌گیری

در دامنه‌های جنوب شرقی آتشفشان دماوند (۸۵ کیلومتری شرق تهران واقع در پهنه البرز مرکزی) در منطقه آب اسک، چندین چشمه آهک‌ساز وجود دارد. با فاصله گرفتن از مظهر چشمه‌ها، نهشته‌های ذکر شده را می‌توان از دید رخساره به انواع تراورتن‌های نوع اول با مورفولوژی دهانه و کانالی، تراورتن‌های نوع دوم با مورفولوژی حوضچه‌ای، سدی و آبشاری و تراورتن‌های نوع سوم یا لامینه‌ای تفکیک کرد. بررسی‌های میکروسکوپی، وجود چهار رخساره غیرزیستی شامل تופا، بلورهای بادبزنی-شعاعی، رخساره قشر بلورین و سنگ‌های اسفنجی و همچنین تعداد دو رخساره زیستی شامل رخساره بایندستون استروماتولیتی و گرینستون پلوئیدی را در تراورتن‌های آب اسک نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن، این تراورتن‌ها از دید سنگ‌رخساره در

- Allen, M., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25, 659-672.
- Allenbach, P. and Shteiger, R., 1966. Geological map of Damavand, scale 1:100 000, 1 sheet. Tehran, Iran: Geological Survey of Iran.
- Amiri, V. and Berndtsson, R., 2020. Fluoride occurrence and human health risk from groundwater use at the west coast of Urmia Lake, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 921.
- Amiri, V., Bhattacharya, P. and Nakhaei, M., 2021a. The hydrogeochemical evaluation of groundwater resources and their suitability for agricultural and industrial uses in an arid area of Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100527.
- Amiri, V., Li, P., Bhattacharya, P. and Nakhaei, M., 2021b. Mercury pollution in the coastal Urmia aquifer in northwestern Iran: potential sources, mobility, and toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 17546-17562.
- Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R. and Li, P., 2021c. An integrated statistical-graphical approach for the appraisal of the natural background levels of some major ions and potentially toxic elements in the groundwater of Urmia aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-17.
- Ansari, M.R., 2013. Hydrochemistry of the Damavand Thermal springs, North of Iran. *Life Science Journal*, 10(7s), 866-873.
- Braithwaite, C., 1979. Crystal textures of recent fluvial pisolites and laminated crystalline crusts in Dyfed, South Wales. *Journal Sedimentary Petrology*, 49, 181-194.
- Chafetz, H.S., Wilkinson, B.H. and Love, K.M., 1985. Morphology and composition of nonmarine carbonate cements in near-surface settings: In: Schneidermann, N., and Harris, P.M., eds., Carbonate cements, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 36, 337-347.
- Chafetz H.S. and Folk, R.L., 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 289-316.
- Chafetz, H.S. and Meredith J.C., 1983. Recent travertine pisolites (pisoids) from southeastern Idaho, U.S.A. 450-455. In: Peryt TM (ed) *Coated Grains*. New York, Springer-Verlag, 655.
- Chon, F., 1864. Uber die Entstehung des travertine in der Wasserfallen von Tivoli. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Geologie und Palaeontologie Abhandlung*, 40, 580-610.
- Cipriani, N., Ercoli, A., Malesani, P. and Vannucci, S., 1972. I travertini di Rapolano Terme. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 11, 31-46.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990. *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York, 824.
- Esmaeili-Vardanjani, M., Rasa, I., Amiri, V., Yazdi, M. and Pazand, K., 2015. Evaluation of groundwater quality and assessment of scaling potential and corrosiveness of water samples in Kadkan aquifer, Khorasan-e-Razavi Province, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-18.
- Folk, R.L., Chafetz, H.S. and Tiezzi, P.A., 1985. Bizarre forms of depositional and diagenetic calcite in hot-spring travertines, central Italy. In Carbonate cements. Edited by N. Schneidermann and P.M. Harris. SEPM (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists), Special Publication 36, 349-369.
- Fouke, B.W., Bonheyo G. T., Sanzenbacher B. and Frias-Lopez J., 2003. Partitioning of bacterial communities between travertine depositional facies at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA. *Canadian Journal Earth Sciences*, 40, 1531-1548.

- Fouke, B.W., Farmer, J.D., Des Marais, D.J., Pratt, L., Sturchio, N.C., Burns, P.C. and Discipulo, M.K., 2001. Reply-Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA). *Journal of Sedimentary Research*, 71, 497-500.
- 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, U.S.A). *Journal of Sedimentary Research*, 70, 565-585.
- Freytet, P. and Plet, A., 1996. Modern freshwater microbial carbonates: The Phormidium stromatolites (Tufa-Travertine) of southeastern Burgundy (Paris basin, France). *Facies*, 34, 219-237.
- Gandin, A. and Capezzuoli, E., 2014. Travertine: distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring systems. *Sedimentology*, 61, 264-290.
- Gandin, A. and Capezzuoli, E., 2008. Travertine versus calcareous tufa: distinctive petrologic features and related stable isotopes signature. *Italian Journal of Quaternary Sciences*, 21, 125-136.
- Geurts, M.A., Frappier, M. and Tsien, H.H., 1992. Morphogenèse des barrages de travertin de Coal River Springs, Sud-est du territoire du Yukon, *Geographie physique et quaternaire*, 46, 221-232.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Journal of Science*, 17, 1088-1090.
- Gonfiantini, R., Panichi, C. and Tongiorgi, E., 1968. Isotopic disequilibrium in travertine deposition. *Earth Planetary Sciences Letter*, 5, 55-58.
- Gruszczynski, M., Kowalski, B.J., Soltysik, R. and Hercman H., 2004. Tectonic origin of the unique Holocene travertine from the Holy Cross Mts.: microbially and abiologically mediated calcium carbonate, and manganese oxide precipitation. *Acta Geologica Polonica*, 54, 61-76.
- Guo, L. and Riding, R., 1998. Hot-spring travertine facies and sequences Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology*, 45, 163-180.
- Hassanzadeh, J., Omidian, S. and Davidson, J., 2006. A late Pliocene tectonic switch from transpression to transtension in the Haraz sector of central Alborz: implications for the origin of Damavand volcano. *Philadelphia Annual Meeting, Geological Society of America*, 171-28.
- Inskeep, W.P. and McDermott, T.R., 2005. Geomicrobiology of acid-sulfate-chloride springs in Yellowstone National Park. In: *Geothermal Biology and Geochemistry in Yellowstone National Park* (Eds W.P. Inskeep and T.R. McDermott), 143-162. Montana State University Publications, Bozeman.
- Janssen, A., Swennen, R., Podoor, N. and Keppens, E., 1999. Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa deposits from Belgium, *Sedimentary Geology*, 126, 75-95.
- Jones, B. and Renaut, R.W., 2010. Calcareous spring deposits in continental settings. In: *Continental Settings: Facies, Environments and Processes*. (Eds A.M. Alonso Zarza and L.H. Tanner), Elsevier, Amsterdam. 177-224.
- Kele, S., Demeny, A., Siklosy, Z., Nemeth, T., Maria, T. 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*, 211, 53-72.
- Kitano, Y., 1962. A study of the polymorphic formation of calcium carbonate in thermal springs with an emphasis on the effect of tempera-

- ture. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 35, 1980-1985.
- Lippmann, F., 1973. *Sedimentary carbonate minerals*. Springer-Verlag, Heidelberg-New York, 228.
 - Love, K.M. and Chafetz, H.S., 1988. Diagenesis of laminated travertine crusts, Arbuckle Mountains, Oklahoma. *Journal of Sedimentary Research*, 58, 441-445.
 - Mohanty, M. and Das, S., 1997. Microbial signatures in lacustrine and fluvial carbonates; In: *Gondwana (Permian) and Holocene examples India. Facies*, 36, 234-238.
 - Monty, C.L.V., 1976. The origin and development of cryptalgal fabrics. In: Walter, M.R. (Ed.), *Stromatolites. Developments in Sedimentology*, 20, 193-249. Elsevier, Amsterdam.
 - Nelson J., 1990. Experimental investigation of control on cementation on carbonates. *Journal of the Geological Society (London)*, 147, 949-958.
 - Özkul, M., Varol, B. and Alçiçek, M. C., 2002. Depositional environments and petrography of Denizli travertines. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 125, 13-29.
 - Pedley, H.M., 1987. The Flandrian (Quaternary) Caerwys tufa, North Wales: an ancient barrage tufa deposit. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 46, 141-152.
 - Pentecost, A., 2005b. *Travertine*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 446
 - Pentecost, A., 1995a. The microbial ecology of some Italian hot-spring travertines. *Microbios*, 81, 45-58.
 - Pentecost, A., 1995b. Significance of the biomineralizing microniche in a lyngbya (cyanobacterium) travertine. *Geomicrobiology Journal*, 13, 213-222.
 - Pentecost, A. and Viles, H., 1994. A review and reassessment of travertine classification. *Geographie physique et Quaternaire*, 48, 305-314.
 - Rahmani Javanmard, S., Tutti, F., Omidian, S. and Ranjbaran, M., 2012. Mineralogy and stable isotope geochemistry of the Ab Ask travertines in Damavand geothermal field, Northeast Tehran, Iran. *Central European Geology*, 55, 187-212.
 - Ranjbaran, M., Rahmani Javanmard, S. and Sotohian, F., 2019. Petrography and Geochemistry of Quaternary travertines in the Ab-Ask region, Mazandaran Province-Iran. *Geopersia*, 9, 351-365.
 - Roshanak, R., Zarasvandi, A.R., Pourkaseb, H. and Moore, F., 2018. Investigations on Northern Urmia-Dokhtar travertines and comparison with north Sanandaj-Sirjan travertines using 18O and 13C stable isotopes. *Geosciences Journal*, 27, 143-152 (in Persian with English abstract).
 - Sanders, J.E. and Friedman, G.M., 1967. Origin and occurrence of limestones. In: Chilingar, G.V., Bissel, H.J. and Fairbridge, R.W., (Eds), *Carbonate Rocks*, 169-265.
 - Tanaskovic, I., Golobocanin, D. and Miljevic, N., 2012. Multivariate statistical analysis of hydrochemical and radiological data of Serbian spa waters. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 226-234.
 - Turi, B., 1986. Stable isotope geochemistry of travertines, in: Fritz, P., Fontes, J.Ch. (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, 2. Elsevier, Amsterdam, 207-238.