

بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های ترورتن‌ساز منطقه ماکو و تعیین منشأ آب چشمه-ها بر اساس ژئوشیمی و کانی‌شناسی رسوبات و نهشته‌های اطراف آنها

نصرت آقا زاده^{۱*}، یاسر گلستان^۲

۱- استادیار گروه عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

۲- کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

* نویسنده مسئول: nosrataghazadeh@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

چکیده

آب چشمه‌ها نماینگر مناسبی جهت ارزیابی تأثیر متقابل آب سنگ و تغییرات تراز آب در آبخوان‌های سازند سخت به‌شمار می‌آیند. منطقه ماکو در شمال غرب ایران و در استان آذربایجان غربی واقع شده است. تأمین بخشی از آب مورد نیاز کشاورزی منطقه از طریق چشمه‌های ترورتن‌ساز و نقش این چشمه‌ها در فرآیند نهشت ترورتن و تأثیر ترکیب شیمیایی آبها بر روی تغییر رنگ ترورتن‌ها باعث شده که مطالعه خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه حائز اهمیت باشد. لذا بر این اساس در این پژوهش، به ارزیابی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی، تغییرات ترکیب شیمیایی و منشأ آب چشمه‌ها از طریق نمونه‌برداری از آب، رسوبات ته‌نشستی و واحدهای سنگی اطراف چشمه‌ها که رخنمون داشتند، پرداخته شد. نتایج حاصل از تفسیر نمودارهای هیدروژئوشیمیایی، نسبت‌های یونی و شاخص اشباعیت نسبت به کانی‌ها نشان داد که سنگ مخزن آبخوان آهک ناخالص بوده و آب چشمه‌ها نسبت به کانی‌های کربناته اشباع تا فوق‌اشباع و نسبت به کانی‌های سولفاته تحت‌اشباع و تیپ آنها Ca-HCO_3 می‌باشد. بالا بودن فشار دی‌اکسیدکربن و خروج آن از ترکیب آب چشمه‌ها باعث شده که چشمه‌های آهک‌ساز منطقه، توانایی نهشته‌گذاری بالایی داشته و باعث شکل‌گیری ترورتن‌های تیپ شکاف پشته با ارتفاع و گسترش نسبتاً زیاد شوند. نتایج حاصل از بررسی ژئوشیمیایی عناصر موجود در ترکیب رسوبات اطراف چشمه‌ها نشان می‌دهد که همبستگی بین CaO با SiO_2 ، Al_2O_3 ، TiO_2 ، Fe_2O_3 منفی، Ba ، Sr با CaO مثبت و SiO_2 و Fe_2O_3 ارتباط مستقیم بوده لذا بر این اساس چشمه‌ها از نوع ترموژنیک با منشأ سیالات گرمایی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: ترورتن، چشمه، ژئوشیمی، ماکو، هیدروژئوشیمیایی.

مقدمه

مایر، ۱۹۹۷؛ جمعدار و همکاران، ۱۳۹۹). ترورتن و توف جزو سنگ‌های کربناتی قاره‌ای با منشأ آب شیرین بوده که از چشمه‌های آب سرد و گرم رسوب می‌کنند. عوامل مختلفی از قبیل عوامل زیستی (میکروارگانیسم‌های فتوسنتز کننده)، غیر زیستی (تعویض یونی، محلولیت و هوازدگی) و همچنین فرآیند تبخیر موجب خروج گاز CO_2 در نتیجه اشباع شدن آب از ترکیبات بیکربناته و رسوب این‌گونه از کربنات‌ها می‌شود (چاپزولی و همکاران، ۲۰۱۴؛ کانله اوپولوس، ۲۰۱۶؛ موثق و

شیمی آب چشمه‌ها منعکس‌کننده تأثیر متقابل آب زیرزمینی بر روی سنگ‌های مسیر نفوذ و خروج آب از درون آبخوان می‌باشد. میزان انحلال کانی‌ها در آب، واکنش بین آب و سنگ، زمان ماندگاری، دما، تبخیر و فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها و به‌خصوص در چشمه‌های فعال آهک‌ساز به‌شمار می‌آیند (هم، ۱۹۷۰؛ لانگ

و همکاران، ۲۰۱۶؛ پورقازی و همکاران، ۱۳۹۳؛ بیرالوند و همکاران، ۱۳۹۸؛ تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۸ اشاره کرد.

مواد و روش‌ها منطقه مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در شمال غرب ایران، شمال استان آذربایجان غربی و در نزدیکی شهرستان ماکو واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از نقطه نظر تقسیمات زمین‌شناسی ایران واحدهای زمین‌ساختی مختلف، در زون افیولیتی و آمیزه رنگین شمال غرب کشور و یا زون ماکو-تبریز واقع شده است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱) و مطالعات صحرایی در مناطق اطراف چشمه‌های آهک‌ساز با نهشته‌ای تراورتن به ترتیب زمانی، واحد کربناته هم‌ارز سازند روته، سنگ آهک خاکستری و شیل‌های خاکستری تیره تا سیاه‌رنگ با درون‌لایه‌های سنگ آهکی تریاس، آهک‌های متراکم کرتاسه، واحدهای کنگلومرا، آهک و شیلی سازند قم، کنگلومرا و ماسه سنگ‌های میوسن، کنگلومرای پلیوسن، گدازه‌های بازالتی، تراورتن و رسوبات آبرفتی مربوط به کواترنری رخنمون دارند. در اطراف ماکو و شهرستان شوط، چشمه‌های آهک‌ساز با آب سرد و گاهی گرم به همراه نهشته‌هایی گسترده از تراورتن دیده می‌شوند که این نهشته‌ها نتیجه فعالیت چشمه‌های فعال امروزی و یا چشمه‌های قدیمی‌تری هستند که اکنون خشک شده‌اند. بیشتر این چشمه‌ها و نهشته‌های تراورتن عمدتاً در راستای گسل‌های موجود در منطقه جای گرفته‌اند که عمدتاً این گسل‌ها دارای روند شمال غربی-جنوب شرقی و شمالی-جنوبی می‌باشند (شکل ۲). در سازندهای سخت منطقه مورد مطالعه پیرومتری وجود ندارد لذا چشمه‌ها تنها منابع موجود به‌منظور بررسی تغییرات آب این سازندها می‌باشند. با توجه به این‌که تأمین بخشی از آب مورد نیاز کشاورزی منطقه از طریق چشمه‌های تراورتن‌ساز صورت می‌گیرد و از طرفی نقش این چشمه‌ها در فرآیند نهشت تراورتن و تأثیر ترکیب شیمیایی آب‌ها بر روی تغییر رنگ تراورتن‌ها باعث شده که مطالعه خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های منطقه

همکاران، ۱۳۹۷؛ روشنک و همکاران، ۲۰۱۸). منشأ آب چشمه‌های آهک‌سازی که در اطراف آنها رسوبات تراورتن ته-نشست می‌کند عمدتاً متئوژنیک^۱ (جوی) و یا ترموژنیک^۲ می‌باشد. در آب‌های با منشأ متئوژنیک میزان TDS و غلظت اکثر یون‌ها پایین بوده و یون‌های اصلی بیکربنات و کلسیم می‌باشد. برخی از آب‌های تراورتن‌ساز متئوژنیک دارای pH بالا و DIC پایینی هستند که این آب‌ها هیدروکسید کلسیم می‌باشند. در این آب‌ها مقدار دی‌اکسیدکربن پایین بوده و مقدار آن کمتر از ۱ میلی‌مول بر لیتر می‌باشد. منشأ آب‌های ترموژنیک عمدتاً آب‌های جوی هستند که به عمق نفوذ کرده و گرم شده‌اند ولی علاوه بر این منشأ، آب‌های فسیل^۲، آب‌های ماگمایی و دگرگونی نیز می‌تواند منشأ آب‌های ترموژنیک باشند ولی مقدار این آب‌ها خیلی کم می‌باشد. در این نوع آب‌ها میزان CO₂، P_{CO2} و غلظت عناصر فرعی (از قبیل Li, As, F, Fe, Mn, Si و B) نسبت به آب‌های متئوژیک بالا است (لبتارد، ۲۰۱۴؛ کالس و همکاران، ۲۰۱۵؛ استهانس و همکاران، ۲۰۱۷). وجود عناصر موجود در آب چشمه‌های آهک‌ساز می‌تواند بر روی نهشته‌های تراورتن تأثیر گذارد. به‌عنوان مثال وجود عناصری از قبیل استرانسیوم (Sr) و منیزیم (Mg) می‌تواند بر روی میزان انحلال و ساختار کلسیت یا آراگونیت موثر باشد. و نیز وجود برخی عناصر فرعی از قبیل P, Mn, Co, Cu و Zn می‌تواند بر روی بافت و رشد تراورتن‌ها موثر باشد.

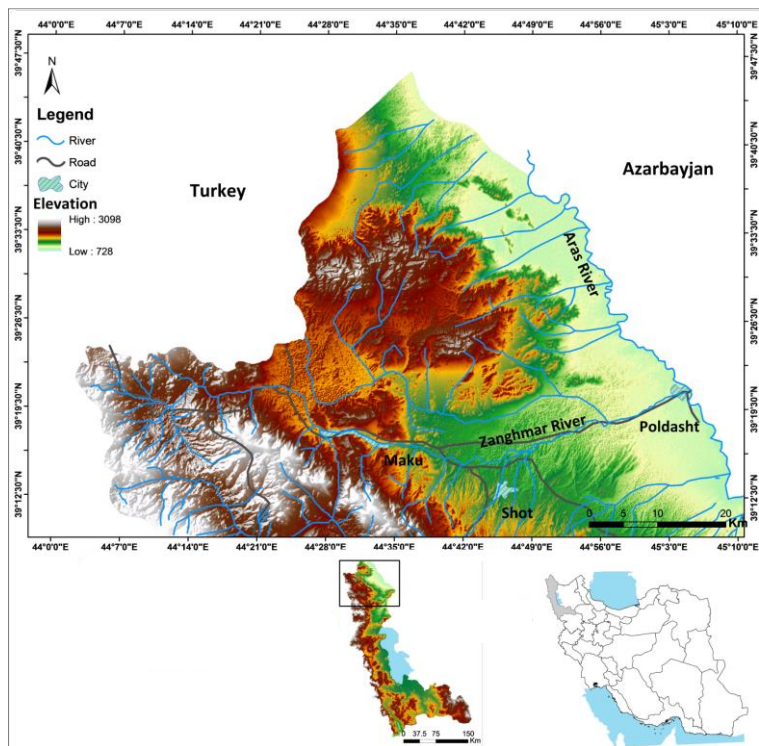
مطالعات متعددی در خصوص ویژگی‌های هیدروشیمیایی و منشأ آب چشمه‌ها و نقش آن‌ها در نهشت تراورتن در دنیا صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات الگارا و همکاران، ۲۰۰۳؛ دیلسیز و همکاران ۲۰۰۴؛ والیتا و همکاران ۲۰۰۸؛ استا و همکاران، ۲۰۱۷؛ کلاز و همکاران، ۲۰۱۷؛ لی یو و همکاران، ۲۰۲۰؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰ اشاره کرد. در ایران در خصوص چشمه‌های تراورتن‌ساز مطالعات محدود بوده که از آن جمله می‌توان به مطالعات منصوری دانشور و پورعلی، ۲۰۱۵؛ شریفی

³ Connate water

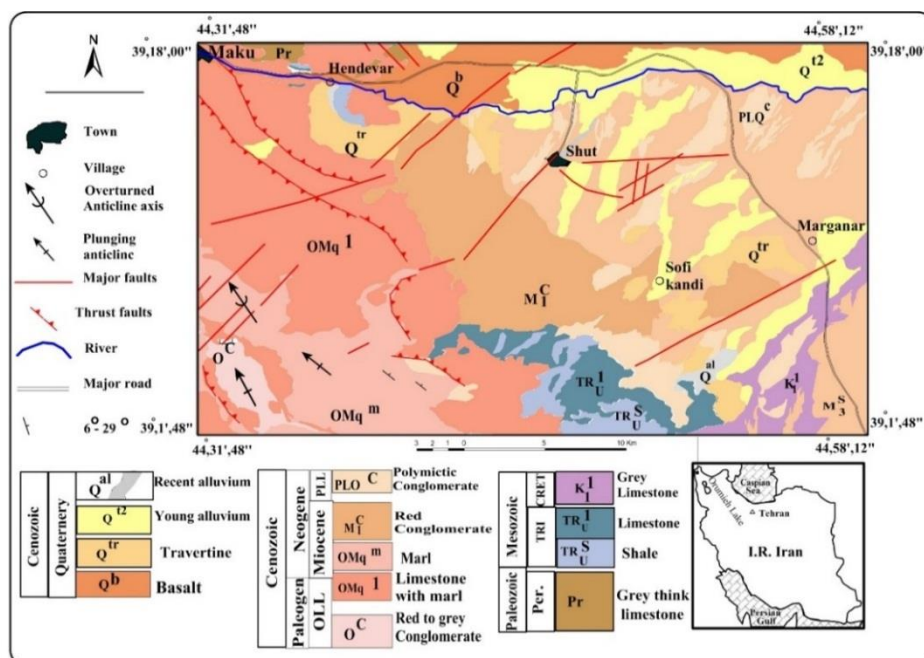
¹ Meteogenic

² Thermogenic

و تعیین منشأ آب این چشمه‌ها حائز اهمیت باشد. لذا بر این اساس در این پژوهش، به ارزیابی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی، تغییرات ترکیب شیمیایی و منشأ آب چشمه‌ها از طریق نمونه‌برداری از آب، رسوبات ته‌نشستی و واحدهای سنگی اطراف چشمه‌ها پرداخته شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ماکو).

آب چشمه‌ها، فشار جزئی گاز دی‌اکسیدکربن (P_{CO_2}) در آب چشمه‌ها از طریق رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$SI = CO_2(eq) - CO_2(free) \quad (1)$$

که در این رابطه SI عبارت است از شاخص اشباع آب نسبت به دی‌اکسیدکربن، $CO_2(eq)$ عبارت است از دی‌اکسیدکربن تعادلی برحسب میلی‌گرم در لیتر، $CO_2(free)$ عبارت است از گاز کربنیک آزاد به‌دست آمده از دی‌گرام هالوپو-دوین برحسب میلی‌گرم در لیتر. برای مقادیر SI بزرگتر از صفر، چشمه دارای پتانسیل تراورتن‌زائی، کوچکتر از صفر، چشمه فاقد پتانسیل تراورتن‌زائی بوده و اگر SI معادل صفر باشد آب چشمه از نظر شیمیایی پایدار تلقی می‌گردد (کمار و همکاران، ۲۰۰۹).

نتایج و بحث

خصوصیات هیدروژئوشیمی، منشأ و قابلیت نسبی تراورتن‌زایی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

اندازه‌گیری دمای آب در محل چشمه‌های منطقه مورد-مطالعه نشان داد که دمای آب بین ۵۸-۱۱ درجه‌سانتی‌گراد متغیر بوده و بر اساس رده‌بندی از نظر درجه‌حرارت، اکثر چشمه‌ها جزو چشمه‌های سرد و گرم محسوب می‌شوند. رنج دمایی چشمه‌های آبگرم منطقه بین ۳۰ تا ۳۴ درجه‌سانتی‌گراد، چشمه‌های آب سرد بین ۱۱ تا ۲۰ درجه‌سانتی‌گراد می‌باشد. از چشمه‌های مورد مطالعه فقط یک نمونه دارای دمایی در حدود ۵۸ درجه‌سانتی‌گراد بوده که این چشمه در گروه چشمه‌های خیلی گرم قرار می‌گیرد.

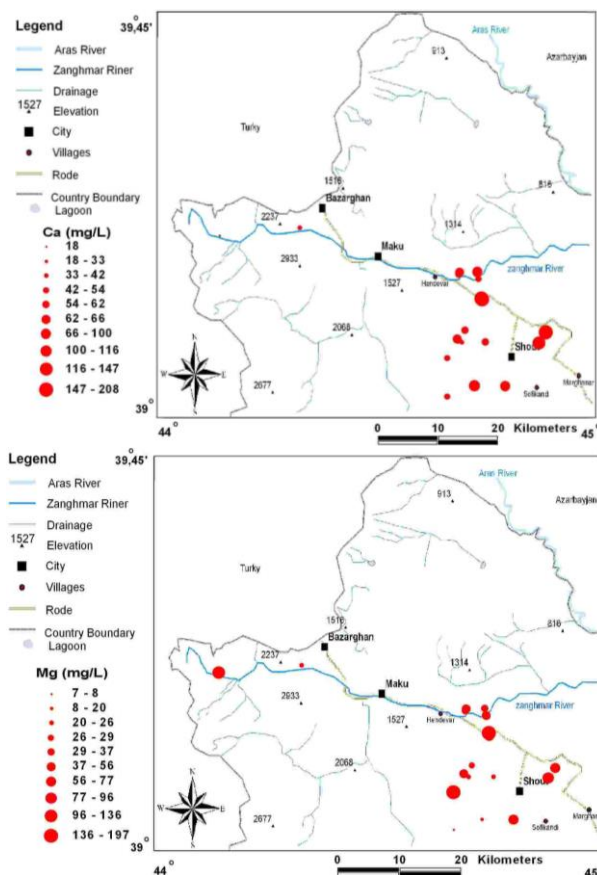
بر اساس نتایج حاصل از آنالیز نمونه آب چشمه‌ها غلظت یون کلسیم موجود در ترکیب آب چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه بین ۱۸ تا ۲۰۸ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌کند و در چشمه‌های مهم آهک‌ساز مقدار آن ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. همچنین بررسی غلظت یون منیزیم موجود در ترکیب آب چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که غلظت این یون بین ۷ تا ۱۶۹ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌کند و در چشمه‌های مهم آهک‌ساز مقدار آن ۱۴۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (شکل ۳). با توجه به غلظت کلسیم و منیزیم سختی کل نمونه آب‌ها بین ۱۶۵ تا ۱۰۵۰ میلی‌گرم بر لیتر معادل کربنات کلسیم تغییر

در این مطالعه به‌منظور بررسی کمی و کیفی چشمه‌های آهک‌ساز منطقه، ابتدا اقدام به بررسی شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها گردید. سپس از آب چشمه‌های گرم و سرد انتخابی، تعداد ۱۴ نمونه در تابستان ۱۳۹۵ تهیه گردید. پارامترهای pH، EC و T توسط دستگاه پرتابل در محل چشمه‌ها اندازه‌گیری شد و جهت آنالیز شیمیایی و تعیین غلظت عناصر در ترکیب آب‌ها، نمونه‌های تهیه شده به شرکت معدنی زرازا ارسال گردید. در این مطالعه به‌منظور بررسی ژئوشیمی رسوبات و نهشته‌های اطراف چشمه‌ها، تعداد ۶ نمونه از رسوبات ته‌نشستی در اطراف چشمه‌ها تهیه و به آزمایشگاه جهت آنالیز و تعیین عناصر موجود در ترکیب آنها به روش ICP-MS ارسال گردید. همچنین به‌منظور بررسی کانی‌شناسی و پتروگرافی تراورتن‌های اطراف چشمه‌ها، تعداد ۲۳ نمونه سنگی با رنگ، بافت، ساخت و ترکیب متفاوت برداشت و مقطع نازک میکروسکوپی از آنها تهیه گردید. در این مطالعه از نتایج آنالیز تعداد ۱۲ نمونه‌های سنگی تراورتن در معادن فعال منطقه که به‌روش XRD, XRF صورت-گرفته بود جهت بررسی‌های ژئوشیمیایی استفاده شد.

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها، خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب چشمه‌ها از طریق بررسی غلظت یون‌ها و تغییرات آنها، نسبت‌های یونی، محاسبه شاخص اشباعیت برای کانی‌های مختلف مورد-ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی و ارزیابی شاخص اشباعیت آب چشمه‌ها نسبت به کانی‌های کربناته (کلسیت، دولومیت، آراگونیت)، کانی‌های سولفات (ژیپس و انیدرید) و گاز دی‌اکسید کربن از نرم‌افزار هیدروژئوشیمیایی PHREEQC استفاده گردید.

یکی از خواص قابل‌توجه چشمه‌های معدنی که نسبت به آهک، فوق‌اشباع هستند قابلیت تراورتن‌زائی آنها می‌باشد که این قابلیت می‌تواند از طریق محاسبه فشار جزئی گاز دی‌اکسیدکربن (P_{CO_2}) و شاخص اشباعیت نسبت به دی‌اکسید کربن مورد ارزیابی قرار گیرد. بر این اساس، برای محاسبه شاخص اشباعیت گاز دی‌اکسیدکربن از نرم‌افزار هیدروژئوشیمیایی PHREEQC استفاده شد و به‌منظور بررسی قابلیت انحلال و قدرت تهاجمی

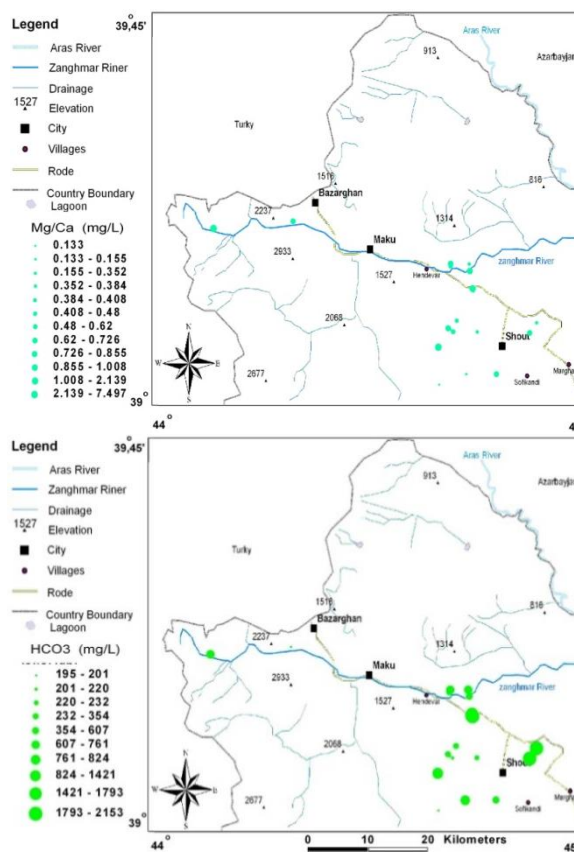
آنیونی و کاتیونی آب اکثر چشمه‌ها عمدتاً به صورت $r > r K^+$ و $Na^+ > rMg^{2+} > rCa^{2+}$ و $rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^-$ می‌باشد. بر اساس غلظت یون‌ها، در ۶۲ درصد از نمونه‌ها کاتیون غالب Ca، در ۲۸ درصد از نمونه‌ها کاتیون غالب Mg و در ۱۰ درصد از نمونه‌ها کاتیون غالب Na بوده و در تمامی نمونه‌ها آنیون غالب HCO_3^- می‌باشد. لذا بر این اساس و با توجه به موقعیت نمونه‌های در دیارگام پایپر (شکل ۴) تیپ آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه عمدتاً از نوع بی‌کربنات کلسیک ($Ca-HCO_3$) بوده و در برخی بیکربنات منیزیک می‌باشد.



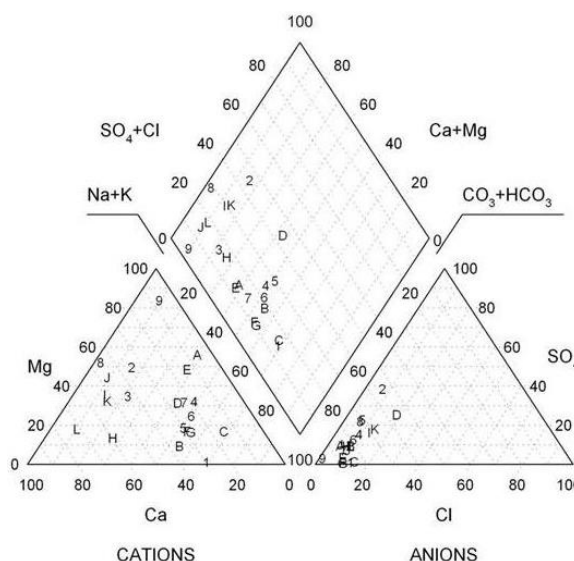
می‌کند و در چشمه آهک‌ساز مقدار آن ۸۲۰ میلی‌گرم بر لیتر معادل کربنات کلسیم می‌باشد. بررسی نسبت مولی Ca/Mg موجود در ترکیب آب چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که این نسبت بین ۰/۱ تا ۴/۵ متغیر بوده و در چشمه‌های آهک‌ساز مهم مقدار آن بین ۰/۱ تا ۱/۷ می‌باشد. بر اساس مقادیر به دست آمده از این نسبت در برخی نمونه‌ها سنگ مخزن آهک ناخالص بوده و در چشمه‌های تراورتن‌ساز نواحی شوط، مرگنلر، هندور و دیگر نواحی مقدار این نسبت کمتر از ۱ بوده و فقط در چشمه‌های آبگرم ناحیه شوط مقدار این نسبت به ۱/۷ می‌رسد. نسبت کمتر از یک نشان دهنده تصاعد دی‌اکسید-کربن آزاد از محلول و انجام فرآیند رسوب‌زایی در آب است که منجر به زایش کلسیت، آراگونیت یا تراورتن گردیده است. در شکل ۳ مقادیر نسبت منیزیم به کلسیم آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

یون بیکربنات آنیون اصلی موجود در ترکیب آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه بوده که مقدار آن بین ۱۹۵ تا ۲۱۵۳ با متوسط ۸۷۸ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌نماید. مقدار این یون در آب چشمه‌های مربوط به ناحیه شوط و مرگنلر بیش از سایر مناطق بوده که این امر به دلیل تأثیر انحلال واحدهای کربنات می‌باشد (شکل ۳). میزان Cl در آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه بین ۶ الی ۲۱۳ با متوسط ۶۷ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بوده و در طول مسیر جریان مقادیر این یون از منطقه تغذیه به طرف منطقه تخلیه افزایش می‌یابد. بر اساس تقسیم‌بندی آب‌ها بر مبنای غلظت کلر اکثر این آب‌ها در گروه آب‌های شور قرار می‌گیرند. بررسی غلظت این آنیون در ترکیب آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه نشان داد که مقدار این پارامتر در آب چشمه‌های مربوط به ناحیه شوط زیاد بوده که این امر به دلیل تأثیر انحلال بخش مارنی و گچی واحدهای سنگی میوسن و سازند قم به سن الیگومیوسن و تأثیر آن بر روی کیفیت آب تغذیه‌ای به سفره آب زیرزمینی می‌باشد. غلظت SO_4 در آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه بین ۹ تا ۲۱۵ میلی‌گرم بر لیتر با مقدار متوسط ۶۳ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌نماید. بررسی تواتر یونی آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که تواتر

منشأ آب چشمه‌های آهک‌ساز که در اطراف آنها رسوبات تراورتن ته‌نشست می‌کند عمدتاً متئوژنیک (جوی) یا ترموژنیک می‌باشد. کلسیم کاتیون اصلی آب‌های تراورتن‌ساز غیر شور می‌باشد که تقریباً میانگین این یون در آب‌های متئوژنیک ۳/۰۷ میلی‌مول بر لیتر می‌باشد و مقدار آن به‌ندرت کمتر از ۱ میلی‌مول بر لیتر است. یون کلسیم به‌وسیله یون‌های دیگری مثل یون منیزیم حاصل از انحلال دولومیت یا کلسیت منیزیم بالا، که در سیستم دی‌اکسیدکربن حاصل شده‌اند بلانس می‌شود (آقازاده و همکاران، ۱۳۸۷). یون منیزیم در آب‌های آهک‌ساز تابعی از یون کلسیم بوده و مقدار آن معمولاً کمتر از ۱ میلی‌مول بر لیتر می‌باشد و میانگین جهانی آن در آب‌های متئوژنیک ۰/۳۲ میلی‌مول بر لیتر و نسبت مولی Mg/Ca کمتر از ۰/۲۵ می‌باشد. در آب‌های با منشأ ترموژنیک عمدتاً غلظت CO_2 و PCO_2 نسبت به آب‌های متئوژنیک بالا می‌باشد (علی‌مرادی و همکاران، ۱۳۹۹). بر اساس نتایج حاصل از آنالیز نمونه آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه، میانگین مقادیر درجه‌حرارت آب چشمه‌ها ۲۰ درجه‌سانتی‌گراد، اسیدیته ۶/۹، کل کربن غیر آلی ۹/۴ میلی‌مول بر لیتر، فشار جزئی گاز دی‌اکسیدکربن ۱۹ درصد (۰/۲ اتمسفر)، کلسیم ۲/۱۵ میلی‌مول بر لیتر، منیزیم ۲/۵۷ میلی‌مول بر لیتر و نسبت منیزیم به کلسیم ۱/۱۶ می‌باشد. مقایسه نتایج به‌دست آمده در این تحقیق بر اساس پارامترهای T ، pH ، DIC ، PCO_2 ، Mg و Ca با نتایج انواع آب‌های تشکیل دهنده تراورتن‌ها که بر اساس موارد مشابه در نقاط مختلف دنیا (جدول ۱) به‌دست آمده، نشان می‌دهد که تمامی چشمه‌های آبگرم و نیز بیشتر چشمه‌های آب سرد منطقه مورد مطالعه، با آب‌های متئوژنیک و در برخی از نمونه‌ها با آب‌های ترموژنیک هم‌خوانی دارد. مقادیر محاسباتی مقدار شاخص اشباعیت برای کانی‌های کربناته کلسیت، دولومیت و آراگونیت نشان داد که مقدار این شاخص برای کانی کلسیت بین ۰/۰۷ تا ۲/۱۳، دولومیت ۰/۰۲ تا ۴/۲ و آراگونیت ۰/۷- تا ۱/۹۹ تغییر می‌کند که نشان دهنده فوق‌اشباع تا اشباع بودن آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه نسبت به کانی‌های کربناته می‌باشد. بر این اساس انحلال سنگ‌های کربناته توسط آب زیرزمینی زیاد بوده لذا باعث شده غلظت یون‌های



شکل ۳- مقادیر غلظت یون‌های Ca ، Mg ، HCO_3 و نسبت Mg/Ca در آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه.



شکل ۴- موقعیت آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه بر روی دیاگرام پایپر.

کلسیم و بیکربنات در آب افزایش یابد و همچنین مثبت بودن شاخص اشباعیت کانی‌های کربناته نشان می‌دهد که زمان ماندگاری آب در داخل سفره نیز زیاد بوده است. مقدار شاخص اشباعیت برای کانی ژیبس بین ۱/۳۹- تا ۳/۱۴- و انیدرید بین ۱/۶۱- تا ۳/۳۶- تغییر می‌کند که نشان دهنده تحت‌اشباع بودن آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه نسبت به کانی‌های سولفات می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر آماری برخی پارامترها در آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه و مقایسه آن با انواع آب های تشکیل دهنده تراورتن ها.

پارامتر	متئوژنیک	متئوژنیک-فوق اشباع	ترمئوژنیک	مقدار در آب چشمه‌های آهک‌ساز منطقه مورد مطالعه
میانگین	۱۰/۱ (۷۱)	۳۳/۲ (۷)	۴۳/۶	۲۰
T(°C)	میانه	۲۹/۴	۴۵/۰	۶
دامنه تغییرات	۴/۲- ۲۴/۳	۲۰/۶- ۵۰	۶- ۷۸	۱۱-۵۸
میانگین	۷/۳۹ (۱۲۲)	۶/۹۷ (۶)	۶/۳۹ (۴۴)	۶/۹
pH	میانه	۷/۲۶	۶/۴۷	۶/۹
دامنه تغییرات	۶/۹- ۸/۱۵	۶/۵- ۷/۷۹	۵/۸- ۹	۶- ۸/۳
میانگین	۵/۲۲ (۸۹)	۳/۸۲ (۷)	۳۳/۶ (۴۸)	۱۴/۴
DIC mmol L ⁻¹	میانه	۴/۸۹	۲۶/۸	۹/۴
دامنه تغییرات	۱/۴۸- ۱۳/۸	۱/۷۳- ۵/۵	۵/۲- ۹۷	۳/۲- ۳۵/۳
میانگین	۱/۰۲ (۷۰)	۲/۳۷ (۶)	۴۶/۰ (۲۸)	۱۹
PCO ₂ Vol%	میانه	۰/۶۳	۳۹/۷	۵
دامنه تغییرات	۰/۱- ۷/۸	۰/۳- ۹	۰/۸- ۱۳۹	۰/۳- ۷۵
میانگین	۳/۰۷ (۱۰۷)	۸/۹۶ (۸)	۸/۹ (۵۲)	۲/۱۵
Ca mmol L ⁻¹	میانه	۲/۳۳	۸/۰	۱/۵
دامنه تغییرات	۰/۸۶- ۱۵/۲	۲/۳- ۱۳/۳	۰/۰۱- ۲۳/۷	۰/۴۵- ۵/۲
میانگین	۰/۶۹ (۷۵)	۲/۹۱ (۸)	۴/۰۷ (۴۷)	۲/۵۷
Mg mmol L ⁻¹	میانه	۰/۴۴	۳/۵۰	۲/۱۴
دامنه تغییرات	۰/۰۰۱- ۲/۷۴	۰/۲۹- ۵/۹	۰/۴۴- ۱۴/۳	۰/۳- ۸/۲
میانگین	۰/۲۹ (۷۲)	۰/۳۷ (۸)	۰/۵۴ (۴۴)	۱/۱۶
Mg/Ca	میانه	۰/۱۶	۰/۴۳	۰/۵۷
دامنه تغییرات	۰/۰۰۱- ۱/۳۷	۰/۲۴- ۰/۵۴	۰/۰۸- ۲/۶	۰/۱۳- ۷/۴۹

بررسی‌ها نشان می‌دهد که چشمه‌های منطقه مورد مطالعه از نوع کربناته آهک‌ساز بوده و بر اساس رابطه این چشمه‌ها با ساختارهایی زمین‌شناسی عمدتاً از نوع گسلی و کنتاکتی می‌باشند. به‌نظر می‌رسد که چشمه‌های آهک‌ساز منطقه، با آب سرد و گرم و نهشته‌های تراورتن فراورده‌شان، در امتداد گسل‌های منطقه، از بخش‌های نسبتاً ژرف زمین بالا آمده‌اند و فراورده آمیختن آب سفره‌های زیرزمینی با گازها و بخارهای ماگمایی‌اند. فراوانی گاز CO₂ در اکثر آب چشمه‌ها و وجود گاز H₂S در برخی از آنها این ارتباط و تأثیرات را نشان می‌دهد. در این مطالعه به‌منظور بررسی پتانسیل نسبی تراورتن‌زایی چشمه‌ها از فشار دی‌اکسیدکربن و شاخص اشباعیت نسبت به آن استفاده شد. نتایج حاصل از محاسبه مقدار فشار دی‌اکسیدکربن (PCO₂) در آب چشمه‌ها نشان داد که مقدار آن بین ۰/۰۳ تا ۰/۷۵ اتمسفر با میانگین ۰/۲ اتمسفر تغییر می‌کند. در چشمه‌های آهک‌ساز گرم و سرد منطقه مورد مطالعه مقدار فشار دی‌اکسید-کربن به‌دلیل تجزیه مواد آلی و فعالیت‌های بیولوژیکی خیلی زیادتر از مقدار آن در اتمسفر بوده و نشان می‌دهد چنین آب‌هایی قابلیت انحلالی بالائی دارند و خروج گاز دی‌اکسیدکربن از ترکیب

اشکال ساخت حفره‌دار، ساخت موج‌نقشی، ساخت نواری، ساخت نواری-موجی و غیره اشاره کرد. همچنین در اکثر نمونه‌ها لامیناسیون دیده می‌شود که حضور لامیناسیون در تراورتن ناشی از رشد متناوب فصلی و روزانه می‌باشد (شکل ۶). در منطقه مورد مطالعه اکثر چشمه‌های آهک‌ساز با آب سرد و گاه‌گرم همراه با نهشته‌هایی گسترده از تراورتن عمدتاً در راستای گسل‌ها دیده می‌شوند که این نهشته‌ها حاصل فعالیت چشمه‌های موجود و یا چشمه‌های قدیمی تر هستند که اکنون خشک شده‌اند.

بر اساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی صورت گرفته، در بیشتر تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه تخلخل از نوع تخلخل‌های تحت کنترل فابریک بوده که از مهمترین این نوع تخلخل‌ها می‌توان به تخلخل‌های نوع بین بلورین و فنسترال و تا حدودی حفره‌ای اشاره کرد و به‌طور متوسط مقدار آن بین ۵ تا ۱۵ درصد تغییر می‌کند ولی در برخی نمونه‌ها که به دلیل قدرت انحلالی آب تخلخل نوع حفره‌ای شکل گرفته، درصد تخلخل به ۲۵ درصد نیز می‌رسد. نتایج حاصل از مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شده از تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه نشان داد که فابریک عمدتاً میکرایتی بوده و در برخی جاها سیمان اسپارایتی در فضای خالی رشد کرده که این امر باعث کاهش میزان تخلخل شده است. میان لایه‌هایی از جنس آراگونیت در اکثر نمونه‌ها دیده می‌شود که آراگونیت‌ها عمدتاً دارای فابریک شعاعی و نیز بلورهای منشوری کشیده می‌باشند. کنتاکت میان لایه‌های آراگونیتی با لایه میکرایتی کاملاً مشخص و به شکل مضرس می‌باشد که محل این کنتاکت در برخی نمونه‌ها توسط اکسیدهای آهن پر شده است. سیمان اسپارایتی از نوع درشت‌بلور موزائیکی شکل‌دار بوده و به‌نظر می‌رسد که سیمانی شدن یک فرآیند ثانویه می‌باشد. در تعداد کمی از نمونه‌ها و در برخی جاها به مقدار خیلی کم سیمان ژیبسی نیز در فضای خالی رشد کرده است. آثار فسیلی و دولومیتی شدن مشاهده نمی‌شود و تخلخل اولیه عمدتاً پر شده و تخلخل ثانویه عمدتاً از نوع فنسترال بوده که معمولاً بین ۱۵-۵ درصد تغییر می‌کند. آثار دیاژنز متئوریک در بعضی مقاطع به‌صورت رشد دوباره و

این آب‌ها باعث ته‌نشست مواد محلول در آب و تشکیل نهشته‌های تراورتن گردیده است. بر اساس نتایج حاصله، مقدار شاخص اشباعیت نسبت به گاز دی‌اکسیدکربن بین ۱/۱۸ تا ۰/۱۶- تغییر می‌کند. در اکثر چشمه‌های آهک‌ساز منطقه مورد مطالعه و چشمه‌هایی که در اطراف آنها رسوبات تراورتن ته‌نشست شده بود مقادیر این شاخص بزرگتر از صفر و در حد صفر محاسبه گردید که این امر نشان دهنده پتانسیل این چشمه‌ها برای تراورتن‌زایی و رسوب و ته‌نشست نهشته‌های تراورتن در اطراف خود می‌باشد. توضیح اینکه در برخی از چشمه‌های منطقه مورد مطالعه مقدار این شاخص کمتر از صفر بوده که مشاهدات صحرایی نیز عدم تراورتن‌زایی این چشمه‌ها را تأیید می‌کرد.

مورفولوژی، ژئوشیمی و خصوصیات کانی‌شناسی رسوبات و نهشته‌های تراورتن اطراف چشمه‌ها

بر اساس بررسی‌های صحرایی صورت‌گرفته، نهشته‌های تراورتن در منطقه ماکو عمدتاً از نوع شکاف-پشته^۴ می‌باشند. پشته‌های تراورتن در منطقه ماکو مانند مناطق دیگر شمال غرب کشور از جمله منطقه آذرشهر، دارای ارتفاع زیاد و گسترش نسبتاً زیاد می‌باشند، به‌طوری‌که ارتفاع برخی از پشته‌های تراورتن تیپ شکاف-پشته در منطقه به بیش از ۵۰ متر می‌رسد. که ارتفاع زیاد آنها نشان دهنده شدت فرآیند رسوبگذاری تراورتن و در نتیجه شدت فعالیت‌های تکتونیکی در عهد حاضر می‌باشد (شکل ۵). شکل‌گیری تراورتن‌های منطقه بدین صورت است که آب‌های اشباع از کربنات کلسیم از شکاف مرکزی بالا آمده و موجب رسوب تراورتن در دیواره شکاف و نیز طرفین آن می‌شود و در نتیجه یک پشته خطی ایجاد می‌شود که در بعضی موارد کمی انحنادار هستند در جایی که نرخ جریان آب بالا آمده از شکاف مرکزی زیاده بوده، پشته ایجاد شده ارتفاع کم و عرض زیاد دارد و در محلی که نرخ جریان آب کم بوده رسوبگذاری تراورتن در اطراف شکاف مرکزی بیشتر و در نتیجه ارتفاع پشته زیاد و عرض آن کم می‌باشد. در سنگ‌های تراورتن پیرامون چشمه‌های فعال یا خشک شده در منطقه مورد مطالعه ساخت‌های ویژه‌ای دیده می‌شود که از مهمترین آنها می‌توان به

⁴ Fissure-Ridges

میکریتی شدن بلورهای اسپاریت به چشم می خورد. سیمان نوع فرینج که از سوزن های ریز آراگونیت تشکیل شده گاهاً به چشم می خورد. آثار دولومیتی شدن و آثار فسیلی از خرده های گیاهی و احتمالاً جلبک و آثار اووئید دیده می شود.



شکل ۵- پشته های تراورتن تیپ شکاف- پشته در منطقه منطقه مورد مطالعه.



شکل ۶- رسوبات ته نشست شده در اطراف چشمه های آهک ساز فعال منطقه مورد مطالعه.

نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه های برداشت از رسوبات و واحدهای سنگی (تراورتن) اطراف چشمه های منطقه مورد مطالعه نشان می دهد که اکثر عناصر در ترکیب تراورتن ها منطقه مورد مطالعه موجود بوده و مقایسه آن با مقادیر این عناصر در ترکیب انواع مختلف تراورتن های نقاط مختلف دنیا از جمله پاموکال ترکیه (دیلسیز و همکاران، ۲۰۰۴)، میسوتومی ژاپن و ترمیسان گیووانی ایتالیا اشاره کرد (پنتکاست، ۲۰۰۵)، شمال شرق ایران (منصوری دانشور و پورعلی، ۲۰۱۵)، مصر (کانلو

استرانسیوم بالا در سر چشمه‌ها دیده می‌شود. بررسی مقادیر عنصر آهن در ترکیب نهشته‌های ته‌نشست شده در اطراف چشمه‌های تراورتن‌ساز و در ترکیب تراورتن‌های منطقه نشان می‌دهد که متوسط مقدار اکسید این عنصر (Fe_2O_3) ۱/۸ درصد بوده و در نهشته‌های ته‌نشست شده بین ۰/۴-۲/۶ درصد و در تراورتن‌ها در حدود ۱/۵۴ درصد تغییر می‌کند. مقادیر منگنز در تراورتن‌ها متفاوت بوده و بررسی مقادیر این عنصر در ترکیب نهشته‌های ته‌نشست شده در اطراف چشمه‌های تراورتن‌ساز و در ترکیب تراورتن‌های منطقه نشان می‌دهد که مقدار متوسط اکسید این عنصر (MnO) در حدود ۰/۲۵ درصد می‌باشد و در نهشته‌های ته‌نشست شده ۰/۰۳ درصد و کمتر از آن و در تراورتن‌ها در حدود ۰/۰۳ درصد می‌باشد. در جدول ۲ مقادیر پارامترهای آماری مربوط به نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت از منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

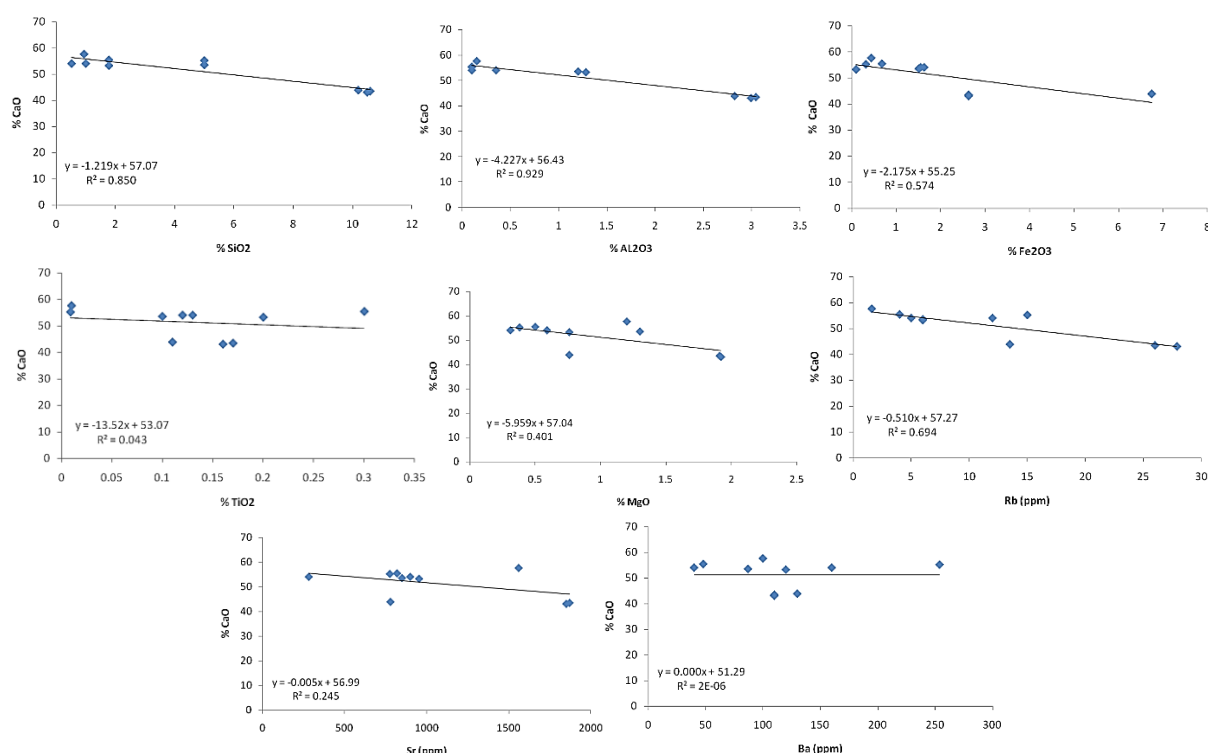
پولوس و همکاران، (۲۰۱۶)، شمال شرق اسپانیا (استا و همکاران، ۲۰۱۷)، غرب چین (لی یو و همکاران، ۲۰۱۹) و شمال غرب ایران (تقی پور و همکاران، ۱۳۹۸) نشان می‌دهد که مقادیر عناصر موجود در ترکیب تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه بیشتر با تراورتن‌های نوع ترموزنیک مطابقت دارد. بررسی مقادیر عنصر استرانسیوم در ترکیب تراورتن‌ها و در رسوبات ته‌نشست شده در اطراف چشمه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقدار متوسط آن ۱۱۰۹ میلی گرم بر لیتر بوده به طوری که مقدار آن در نهشته‌های ته‌نشست شده در حدود بین ۱۸۷۰-۱۵۶۰ میلی گرم بر لیتر و در تراورتن‌ها (واحدهای سنگی) در حدود ۲۸۳ میلی گرم بر لیتر تغییر می‌کند. در آب‌های گرمابی غالباً مقدار استرانسیوم بالاست به طوری که آراگونیت می‌تواند شامل میزان بالای استرانسیوم باشد. در تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه نیز مقدار استرانسیوم بالا بوده و تغییر آراگونیت به کلسیت به واسطه چرخش آب‌های جوی به ته‌نشینی کلسیت با درصد استرانسیوم پایین منجر گردیده است. در طول این تغییر کلسیت با

جدول ۲- مقادیر پارامترهای آماری مربوط به نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت از منطقه مورد مطالعه.

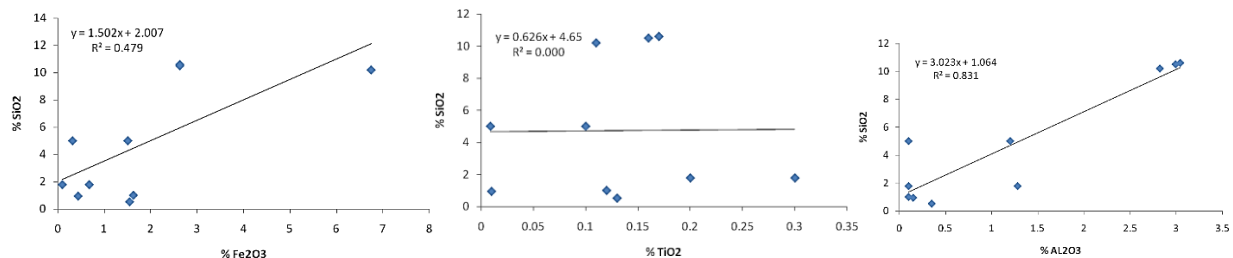
درصد اکسیدها و غلظت عناصر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	غلظت عناصر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
AL ₂ O ₃ (%)	۰/۱	۳/۰۴		۱/۲۷۷	۱/۰۵	Ce (ppm)	۱/۱	۱۱/۲	۷/۴۳	۳/۱۷	۰/۴۲
CaO(%)	۴۳	۵۷/۶	۵۱/۳	۵/۵۹۸۲	۱/۱۰۹	Co (ppm)	۰/۸	۵/۹	۲/۶	۲/۱۵	۰/۸۲
Cr ₂ O ₃ (%)	۰	۱/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳۲	۰/۳۵	Cs (ppm)	۰/۳	۱۰/۶	۶/۵۵	۴/۸۹	۰/۷۴
F ₂ O ₃ (%)	۰/۰۹	۶/۷۴	۱/۸۱	۱/۹۵	۱/۰۷۵	Cu (ppm)	۱	۳۰	۱۶/۱	۱۲	۰/۷۴
K ₂ O(%)	۰/۰۱	۰/۶۸	۰/۲۳	۰/۲۸	۱/۲	Dy (ppm)	۰/۱	۱/۳۶	۰/۷۹	۰/۵۲	۰/۶۵
MgO(%)	۰/۳۱	۱/۹۲	۰/۹۶	۰/۵۹۴۸	۰/۶۱	Er (ppm)	۰/۰۷	۰/۷۸	۰/۴۷	۰/۲۹	۰/۶۲
MnO(%)	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۵۷	EU (ppm)	۰/۰۵	۰/۲۹	۰/۲	۰/۱۱	۰/۳۵
Na ₂ O(%)	۰/۰۱	۰/۵	۰/۱۷	۰/۱۷	۱/۰۱	Ga (ppm)	۰/۱	۵	۳	۲/۱	۰/۶۹
P ₂ O ₅ (%)	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۵۲	Gd (ppm)	۰/۰۸	۱/۲۶	۰/۸۱	۰/۵	۰/۶۲
SiO ₂ (%)	۰/۵۲	۱۰/۶	۴/۷۳	۴/۲۳	۰/۸۹	Hf (ppm)	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰	۰
TiO ₂ (%)	۰/۰۰۹	۰/۳	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۶۵	Ho (ppm)	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۵۴
Ba (ppm)	۴۰	۲۵۴	۱۱۵/۹	۶۰/۳۳	۰/۵۲	La (ppm)	۳/۵	۹	۶/۵۸	۲/۲۹	۰/۳۴
Nb (ppm)	۳	۹	۵/۱۵	۱/۷۱	۰/۳۳	Lu (ppm)	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۱۰۸	۰/۰۳	۰/۳۶
Sr (ppm)	۲۸۳	۱۸۷۰	۱۱۰۹	۵۷۸/۶	۰/۵۲	Mo (ppm)	۰/۲	۲	۰/۷۲	۰/۷۳	۱/۰۲
Y (ppm)	۵	۷	۵/۴	۰/۸۹	۰/۶۹	Nb (ppm)	۰/۵	۹	۳/۳	۳/۳	۱/۰۰۲
Zn (ppm)	۵	۴۴	۲۱/۶	۱۴/۹	۰/۶۹	Nd (ppm)	۰/۴	۵	۳/۸۵	۲/۱۶	۰/۶
Zr (ppm)	۱۰	۳۲	۲۴/۱	۸/۸۹	۰/۳۶	Ni (ppm)	۶	۴۶	۲۳/۴	۱۳/۸	۰/۵۸
Ag (ppm)	۱/۰	۰/۳	۰/۲	۰/۰۹	۰/۴۶	Pr (ppm)	۰/۱	۱/۳	۰/۸۹	۰/۵۵	۰/۶۱
Yb (ppm)	۰/۱	۰/۷	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۵۵						

است. میزان اکسید سیلیس با افزایش سرعت و میزان تشکیل تراورتن و فاصله گرفتن از سنگ بستر کاهش می‌یابد. بررسی مقادیر اکسید کلسیم نسبت به اکسید سیلیس نشان می‌دهد که در تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه بین این دو اکسید رابطه معکوس ($r = -0.85$) وجود داشته به‌طوری‌که با افزایش اکسید کلسیم میزان اکسید سیلیس به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد (شکل ۷). مقادیر اکسیدهای تیتانیوم و آلومینیم با اجزای تخریبی همچون ذرات سیلیس و خانواده رس‌ها کنترل می‌شود. بررسی ارتباط همبستگی بین این دو اکسید با اکسید کلسیم نشان می‌دهد که در تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه بین اکسید کلسیم با آلومینوم یک رابطه کاملاً معکوس ($r = -0.92$) وجود داشته و بین اکسید کلسیم با اکسید تیتانیوم نیز تقریباً رابطه معکوس ($r = -0.4$) وجود دارد (شکل ۸).

در این مطالعه به‌منظور بررسی رابطه همبستگی بین عناصر اصلی و فرعی موجود در ترکیب تراورتن‌ها و رسوبات ته‌نشستی در اطراف چشمه‌های تراورتن‌ساز بین اکسیدهای عناصر اصلی و فرعی مطالعات آماری دو متغیره صورت گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بین اکسید کلسیم با اکسیدهای آلومینوم، سیلیس، تیتانیوم و آهن تقریباً یک همبستگی منفی و بین اکسید کلسیم با عناصر باریم و تقریباً با استرانسیوم یک همبستگی مثبتی وجود دارد و نیز بین اکسید سیلیس با اکسیدهای آهن و آلومینوم یک ارتباط مستقیمی وجود دارد (شکل ۷). بر این اساس همزمان با ته‌نشست آراگونیت عناصر باریم و استرانسیوم به‌دلیل تشابه زیاد با کلسیم می‌توانند وارد ساختار آراگونیت شوند. میزان بالای متوسط باریم در این رسوبات نشانگر ارتباط آنها با منابع آذرین و آب‌های زیرزمینی مرتبط با این منابع است. میزان بالای میزان مس و روی تأییدی بر ترموژن بودن احتمالی رسوبات تراورتن



شکل ۷- رابطه همبستگی بین اکسید کلسیم با اکسید عناصر سیلیسیوم، آلومینوم، تیتانیوم، آهن و منیزیم و عناصر استرانسیوم، روبیدیم و باریم موجود در ترکیب تراورتن‌ها و رسوبات ته‌نشستی در اطراف چشمه‌های تراورتن‌ساز منطقه مورد مطالعه.



شکل ۸- رابطه همبستگی بین اکسید سیلیسیوم با اکسید عناصر آهن، آلومینیوم و تیتانیوم موجود در ترکیب تراورتن‌ها و رسوبات تهنشتی در اطراف چشمه‌های تراورتن‌ساز منطقه مورد مطالعه.

نتیجه‌گیری

صفر و در حد صفر بوده که این امر نشان دهنده پتانسیل این چشمه‌ها برای تراورتن‌زایی و رسوب و تهنشت نهشته‌های تراورتن در اطراف خود می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که رخنمون‌های تراورتن منطقه ماکو حاصل فعالیت چشمه‌های موجود و یا چشمه‌های قدیمی‌تر که اکنون خشک شده‌اند بوده و از نظر شکل از نوع شکاف پشته با ارتفاع و گسترش نسبتاً زیاد و مربوط به زمان کوتاه‌تری می‌باشند. در بیشتر تراورتن‌های منطقه مورد مطالعه تخلخل از نوع تخلخل‌های تحت کنترل فابریک و عمدتاً از نوع تخلخل بین بلورین و فنسترال و تا حدودی حفره‌ای می‌باشد. نتایج مطالعات میکروسکوپی نشان داد که در تراورتن‌های منطقه فابریک عمدتاً میکرایتی و میکرواسپارایتی بوده و در برخی جاها سیمان اسپارایتی در فضای خالی رشد کرده که این امر باعث کاهش میزان تخلخل شده است. شواهد پتروگرافی و ژئوشیمیایی نشان می‌دهد بین اکسیدکلسیم با اکسیدهای آلومینیوم، سیلیس، تیتانیوم و آهن تقریباً یک همبستگی منفی و بین اکسید کلسیم با عناصر باریم و تقریباً با استرانسیوم یک همبستگی مثبتی وجود داشته و نیز بین اکسید سیلیس با اکسیدهای آهن و آلومینیوم یک ارتباط مستقیمی وجود دارد که بر این اساس منشأ آنها جوی و نیز از نوع ترموژنیک باشد.

سپاسگزاری

این مطالعه نتیجه طرح تحقیقاتی مصوب به شماره ۵۱۰۳۳۸۸۱۱۳۰۰۳ دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه بوده که بدین وسیله از آن واحد به‌خاطر حمایت مالی و معنوی تقدیر و تشکر می‌شود. همچنین از آقایان مهندس پیمان محمدی بهجو،

بررسی‌ها نشان می‌دهد که چشمه‌های منطقه مورد مطالعه از نوع کربناته آهک‌ساز بوده و بر اساس رابطه این چشمه‌ها با ساختارهایی زمین‌شناسی عمدتاً از نوع گسلی و کنتاکتی می‌باشند. چشمه‌های آهک‌ساز منطقه، توانایی نهشته‌گذاری بالایی داشته که افزایش دما، آشفته‌گی آب، کاهش فشار CO_2 و فتوسنتز گیاهی، از عوامل اصلی خروج دی‌اکسیدکربن از آب و نهشته‌گذاری عناصر کربناته بوده است. بررسی‌ها نشان داد که تیپ آب چشمه‌های آهک‌ساز و گرم منطقه مورد مطالعه عمدتاً بیکربناته کلسیک بوده و با توجه به مقادیر نسبت مولی منیزیم به کلسیم عمدتاً سنگ مخزن آهک ناخالص می‌باشد. مقادیر محاسباتی مقدار شاخص اشباعیت نشان داد که برای آب اکثر چشمه‌ها نسبت کانی‌های کربناته کلسیت، دولومیت و آراگونیت فوق‌اشباع تا اشباع و نسبت به کانی‌های سولفات زینس و انیدرید تحت‌اشباع می‌باشد. لذا بر این اساس انحلال سنگ‌های کربناته توسط آب زیرزمینی به‌دلیل در دسترس بودن و زمان ماندگاری زیاد، میزان انحلال زیاد بوده و باعث شده غلظت یون‌های کلسیم و بیکربنات در آب افزایش یابد. مقادیر محاسباتی مقدار فشار دی‌اکسیدکربن نشان داد که مقدار این پارامتر در چشمه‌های آهک‌ساز گرم و سرد منطقه مورد مطالعه خیلی زیادتر از مقدار آن در اتمسفر بوده و نشان می‌دهد چنین آب‌هایی قابلیت انحلالی بالایی دارند که خروج گاز دی‌اکسیدکربن از ترکیب این آب‌ها باعث تهنشت مواد محلول در آب و تشکیل نهشته‌های تراورتن گردیده است. همچنین مقدار شاخص اشباعیت آب اکثر چشمه‌های آهک‌ساز و چشمه‌هایی که در اطراف آنها رسوبات تراورتن تهنشت شده نسبت به گاز دی‌اکسیدکربن بزرگتر از

خصوصیات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپ. هیدروژئولوژی، دوره ۵، شماره ۲، ۱۶-۳۱.

موثق، ل.، زرینی، غ.، قیامی راد، م.، ۱۳۹۷. بررسی کیفیت فیزیکی، شیمیایی و میکروبی حوضچه‌های شنای چشمه‌های آبگرم مشکین شهر. هیدروژئولوژی، دوره ۳، شماره ۱، ۶۰-۶۸.

نصر اصفهانی، ع. و رئیس، م.، ۱۳۸۷. پترولوژی تراورتن‌های جنوب میلajرد شمال غرب اصفهان. مجله علوم پایه دانشگاه اصفهان، جلد ۳۴، شماره ۵، ۱۶۱-۱۷۶.

Algarraa, A.M., Martin, M., Andreoc, B., Julia, R., Gomez, C., 2003. Sedimentary patterns in perched spring travertines near Granada (Spain) as indicators of the paleohydrological and paleoclimatological evolution of a karst massif. *Sedimentary Geology*, 161, 217-228.

Asta, M.P., Auque, L.F., Sanz, F.J., Gimeno, M.J., Acero, P., Blasco, M., Alix, A.G., Gomez, J., Huertas, A.D., Mandado, J., 2017. Travertines associated with the Alhama-Jaraba thermal waters (NE, Spain): Genesis and geochemistry. *Sedimentary Geology*, 347, 100-116.

Capezzuoli, E., Gandin, A., Pedley, M., 2014. Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art. *Sedimentology*, 61, 1-21.

Claes, H., Soete, J., Van Noten, K., El Desouky, H., Marques Erthal, M., Vanhaecke, F., Özkul, M., Swennen, R., 2015. Sedimentology, three-dimensional geobody reconstruction and carbon dioxide origin of Pleistocene travertine deposits in the Ballık area (south-west Turkey). *Sedimentology*, 62, 1408-1445.

Claes H., Marques Erthal M., Soete J., Özkul M., Swennen R., 2017. Shrub and pore type classification: Petrography of travertine shrubs from the Ballık-Belevi area (Denizli, SW Turkey). *Quat Int*, 437, 147-163.

Dilsiz, C., Marques, J.M., Carreira, P.M., 2004. The impact of hydrological changes on travertine deposits related to thermal springs in the Pamukkale area (SW Turkey). *Environmental Geology*, 45, 808-817.

Hem, J.D., 1970. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. US Geo. Survey, Water-Supply, 1473, 363p.

Kanellopoulos, Ch., Lamprinou, V., Mitropoulos, P., Voudouris, P., 2016. Thermogenic travertine deposits in thermopylae hot springs (Greece) in association

دکتر سولدوزی و دکتر موسی باقری به‌خاطر همکاری در مطالعات صحرایی، نمونه برداری، آنالیز و تفسیر مقاطع میکروسکوپی تشکر می‌شود.

منابع

آقازاده، ن.، اصغری مقدم، ا.، ۱۳۸۷. ارزیابی هیدروژئوشیمیایی آبهای زیرزمینی منطقه سلماس و تعیین کیفیت آنها برای مصارف مختلف. مجله علوم پایه دانشگاه اصفهان، جلد ۳۴، شماره ۵، ۷۹-۹۸.

امینی آذر، ر. و عباسی، س.، ۱۳۸۲. نقشه مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی ماکو. سازمان زمین شناسی کشور.

باباخانی، ع. و امینی، م.، ۱۳۷۰. چشمه‌های تراورتن ساز تکاب. مجله علوم زمین، دوره ۱، شماره ۲، ۵۰-۵۹.

بیرالوند، م.، محجل، م.، قاسمی، م.، ۱۳۹۸. نقش زمین‌ساخت و ماگماتیسم در تکامل تراورتن‌های تخت سلیمان، شمال باختر ایران. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، دوره ۲۸، شماره ۱۱۲، ۸۰-۷۱.

پور قاضی، ج.، گنجعلی، س.، موذن، م.، ستوهیان، ف.، ۱۳۹۳. بررسی توانمندی‌های محیطی شهرستان آذرشهر به‌عنوان دومین ژئوپارک ایران، فصلنامه انسان و محیط‌زیست، دوره ۱۲، شماره ۴ (پیاپی ۳۱)، ۱-۱۱.

تقی‌پور، ک.، خطیب، م.م.، هیهات، م.ر.، ناعظی هیر، ع.، شبانیان، ا.، ۱۳۹۸. نقش کنترل کننده‌های ساختاری در هیدروژئوشیمی چشمه‌های تراورتن‌ساز منطقه آذرشهر، شمال غرب ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۵۲، ۱۰۵-۱۲۱.

جمعدار، م.، سرائی تبریزی، م.، یوسفی، ح.، ۱۳۹۹. پتانسیل‌یابی میزان کارستی شدن چشمه‌ها از منظر هیدروژئوشیمیایی در محدوده مطالعاتی هشتگرد. هیدروژئولوژی، دوره ۵، شماره ۲، ۱۱۳-۱۲۶.

علیمرادی، ص.، ناصری، ح.، علیجانی، ف.، کریمی، ح.، ۱۳۹۹. تعیین منشأ و سازوکارهای تشکیل چشمه‌های گوگردی و آبگرم تاق‌دیس سیاهکوه، جنوب غرب ایران، با استفاده از

- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (ver.2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geol. Surv. Water-Resources Investigation Report 99-4259, Washinton DC.
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Trans., Am. Geophysic.Union, 25, 914-923.
- Roshanak, R., Moore, F., Zarasvandi, A., Keshavarzi, B., & Gratzner, R., 2018. Stable isotope geochemistry and petrography of the Qorveh-Takab travertines in northwest Iran, Austrian Journal of Earth Sciences, 111(1): 64-78.
- Sharifi R., Moore F., Mohammadi Z., Keshavarzi B., 2016. Estimation of deepwater temperature and hydrogeochemistry of springs in the Takab geothermal field, West Azerbaijan, Iran. Environ Monit Assess, 188(1): 1-20.
- Vylita, T., Zak, K., 2008. Travertine deposits of the Karlovy Vary thermal water system. Environ Geol., 58(8): 1639-1644.
- with cyanobacteria microflora. Carbonates and Evaporates, 31(3), 239-248.
- Langmuir, D., 1997. Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall, Inc., 601 p.
- Lebatard A.E, Alçiçek M.C, Rochette P., et al. 2014. Dating the Homo erectus bearing travertine from Kocabaş (Denizli, Turkey) at least 1.1 Ma. Earth Planet Sci Lett, 390, 8-18.
- Li X., Huang X., Liao X., Zhang Y., 2020. Hydrogeochemical characteristics and conceptual model of the geothermal waters in the xianshuihe fault zone, Southwestern China. Int J Environ Res Public Health, 17(2), 500-5014.
- Liu, H. Zhou, X., Zhang, Y., Wang, M., Tan, M., Hai, K., Yu, M., Huo, D., 2020. Hydrochemical characteristics of travertine-depositing hot springs in western of Yunnan, China. Quaternary International, 547, 63-74.
- Mansouri Daneshvar, M.R., Pourali, M., 2015. Hydrogeochemical and geomorphological investigation of travertine deposition in the Garab Spring region, NE Iran. Sustain. Water Resource Management. 1, 253-262.