

تعیین منشا و سازوکارهای تشکیل چشمه‌های گوگردی و آبگرم تاقدیس سیاهکوه، جنوب غرب ایران، با استفاده از خصوصیات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی

صادق علیمرادی^۱، حمیدرضا ناصری^{۲*}، فرشاد علیجانی^۳ حاجی کریمی^۴

۱- دانشجوی دکتری دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۳- استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۴- استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

*نویسنده مسئول: h-nassery@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱

چکیده

چشمه‌های گوگردی و آبگرم دهلران و دویرج با مشخصات فیزیکوشیمیایی متفاوت از تاقدیس سیاهکوه واقع در شمال شهر دهلران، جنوب غربی استان ایلام تخلیه می‌شوند. به منظور تعیین مشخصات چشمه‌های گوگردی و آبگرم تاقدیس سیاهکوه بررسی‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی، هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی انجام گرفت. پایش آبدهی، دما، اسیدیت، میزان گاز سولفید هیدروژن و اکسیژن محلول در محل و آنالیز شیمی یون‌های اصلی در آزمایشگاه به مدت یک سال به طور ماهانه انجام گردید. سنجش ایزوتوپ‌های پایدار دوتریوم (^2H)، اکسیژن ۱۸ (^{18}O) و سولفور ۳۴ (^{34}S) در دو دوره خشک و مرطوب به منظور تعیین منشا آبها انجام شد. نمودارهای ترکیبی هیدروژوشیمی به منظور شناسایی فرآیندهای هیدروژوشیمی غالب استفاده شد. ژئوترموتری مبتنی بر هیدروژوشیمی به منظور تعیین دمای مخزن و روابط بین ایزوتوپ‌های پایدار با خط آب جوی محلی و جهانی به منظور تعیین منشاء آب چشمه‌ها انجام گردید. در نهایت با جمع‌بندی یافته‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی مدل مفهومی سازوکار چشمه‌ها ارائه شد. بررسی زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی نشان داد که گسل‌های عمیق موجود در تاقدیس سیاهکوه باعث ارتباط هیدرولیکی سازندهای کارستی ایلام و سروک با سازند تبخیری قدیمی و زیرین شده‌اند. دمای بالای چشمه‌ها به دلیل گردش عمیق آب‌های نفوذی حاصل از ریزش‌های جوی در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها می‌باشد. بررسی‌های ژئوترموتری سیلیس دمای مخزن چشمه‌های گوگردی دهلران و دویرج را به ترتیب حدود 70°C و 38°C نشان داد. منشاء گاز سولفید هیدروژن (H_2S) چشمه‌ها، فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات تشخیص داده شد. علیرغم وجود شورابه‌ها در میدان‌های نفتی و گازی در منطقه، نسبت‌های Na/Cl ، SO_4/Cl و TDS/Br نیز نشان داد که شوری آب چشمه‌های گوگردی دویرج و دهلران انحلال سازندهای تبخیری می‌باشد. آنالیز ایزوتوپ پایدار گوگرد ۳۴ نیز منشاء سولفات موجود در آب چشمه‌ها را سازندهای تبخیری نشان داد. آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار دوتریم و اکسیژن ۱۸ منشاء چشمه‌های آبگرم و گوگردی دهلران و دویرج را ریزش‌های جوی منطقه تعیین نمود. واژه‌های کلیدی: احیاء سولفات، ایزوتوپ‌های پایدار، چشمه گوگردی و آبگرم، دهلران، هیدروژئوشیمی.

مقدمه:

چشمه آبگرم به چشمه‌هایی گفته می‌شود که درجه حرارت آن ۵ یا ۶ درجه بالاتر از درجه حرارت محیط اطراف می‌باشد. منشاء دمای آب چشمه‌های آبگرم فعالیت‌های ولکانیکی، گرا دیان زمین‌گرایی

چشمه‌های گوگردی حاوی گاز سولفید هیدروژن (H_2S) می‌باشند. منشاء سولفید هیدروژن فعالیت‌های ولکانیکی، شورابه‌های نفتی، احیاء باکتریایی سولفات^۱ و احیاء ترموشیمیایی سولفات^۲ می‌باشد.

² - Thermochemical sulfate reduction

¹ - Bacterial sulfate reduction

جوی عنوان نموده و ارتفاع منطقه تغذیه را ۱۳۵۰ تا ۱۷۵۰ متر تخمین زده‌اند.

درخصوص منشاء چشمه‌های آبگرم ایران نیز تاکنون مطالعاتی توسط محققین مختلف انجام شده است. کریمی و مر (۲۰۰۸) چشمه‌های آبگرم اهرم، میراحمد و گرو را در استان بوشهر مطالعه کرده و بر اساس آنالیز شیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار منشاء این چشمه‌ها را نزولات جوی تشخیص داده‌اند. محمدی و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی هیدروژئوشیمی و ژئوترموتری چشمه چنگال دو سیستم هیدروژئولوژی را شناسایی کردند. آبخوان کم عمق و دیگری سیستم ژئوترمال عمیق که به واسطه آب‌های جوی تغذیه می‌شود. آنها چشمه چنگال را متأثر از اختلاط آب ژئوترمال و آبخوان کم عمق و همچنین سازندهای کربناته و تبخیری منطقه تشخیص داده‌اند. محمدزاده و کاظمی (۲۰۱۵) نیز عمق و دمای چشمه‌های گرمایی ایوب پیغمبر و شفا در شمال شرق ایران را با استفاده از ژئوترموتری و ایزوتوپ‌های پایدار ^2H و ^{18}O بررسی کرده و عمق مخزن را حدود ۴ تا ۵ کیلومتر و دمای مخزن را کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی گراد تعیین کردند. رفیق دوست و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعات ژئوشیمی و ژئوترموتری چشمه‌های تنگ بیجار، منشاء چشمه آبگرم این منطقه را اختلاط آب‌های جوی با شورابه‌های نفتی نسبت داده‌اند. کریمی و همکاران (۲۰۱۷) نیز چشمه‌های آبگرم سمنان را بررسی کرده و منشاء آب این چشمه‌ها را یکسان تشخیص داده و علت دمای متفاوت را به مسیرهای جریان مختلف و مکانیسم سرد شدن متفاوت نسبت داده‌اند.

با توضیحات فوق، محققین مختلف از روش‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی جهت بررسی و مطالعه منشاء چشمه‌ها استفاده نموده‌اند. با توجه به اینکه تاکنون درخصوص چشمه‌های گوگردی و آبگرم تاقدیس سیاهکوه مطالعاتی صورت نگرفته، لذا در این پژوهش تحلیل‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپ‌های پایدار به عنوان ابزاری جهت شناسایی منشاء و سازوکار تشکیل چشمه‌های آبگرم و گوگردی دهلران و دوبرج به کار گرفته شد و مدل مفهومی تشکیل چشمه‌ها ارائه گردید.

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

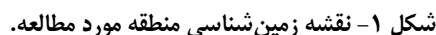
تاقدیس سیاهکوه در شمال شهر دهلران در جنوب غربی استان ایلام و در غرب کشور ایران واقع شده است. چشمه‌های گوگردی و آبگرم دهلران و دوبرج به ترتیب در مناطق میانی یال جنوبی و پلانژ شرقی تاقدیس سیاهکوه ظاهر شده‌اند (شکل ۱). دسترسی آسان،

با گردش عمیق آب، فعل و انفعالات فیزیکوشیمیایی، واپاشی رادیواکتیو و فعالیت‌های تکنیکی می‌باشد. معمولاً چشمه‌های آبگرم شوری و هدایت الکتریکی بالایی دارند.

یکی از روش‌های مطالعه چشمه‌های گوگردی و آبگرم، روش هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان منشاء آب و شوری این چشمه‌ها، اختلاط احتمالی، عمق گردش آب، دمای آب در مخزن چشمه و همچنین منشاء سولفات و سولفید هیدورژن را تعیین نمود. جهت تشخیص منابع شوری تاکنون از روشهای متعددی استفاده شده است. تعدادی از محققین نسبت‌هایی نظیر K/Na ، $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ ، Na/Cl ، Ca/Cl ، Mg/Cl ، SO_4/Cl ، K/Cl ، $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{SO}_4$ و SO_4/TDS پیشنهاد داده‌اند (ریشتر و کریتر، ۱۹۹۳). نسبت Na/Cl به خصوص در غلظت‌های بالای کلرید برای تشخیص شورابه‌های حاصل از انحلال هالیت از شورابه‌های نفتی استفاده شده است (لئونارد و وارد، ۱۹۶۲). ریتنهاوس (۱۹۶۷) نسبت TDS/Br را جهت تشخیص شورابه‌های نفتی از انحلال هالیت استفاده نمود. با توجه به اختلاف نسبت Br/Cl در شورابه‌های نفتی و شورابه‌های ناشی از انحلال هالیت از این نسبت نیز جهت تشخیص منشاء شوری استفاده شده است (وایت مور و پولاک، ۱۹۷۹؛ کریتر و همکاران، ۱۹۹۰؛ ریشتر و همکاران، ۱۹۹۰).

بررسی‌های ایزوتوپی نیز جهت تعیین منشاء چشمه‌ها کاربرد فراوانی دارد. زگا و همکاران (۲۰۱۵) چشمه‌های کارستی سولفیدی موجود در آبخوان دولومیتی در شرق اسلونی را بررسی کرده و با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و دوتریم منشاء سولفید چشمه‌ها را به پی سنگ آتشفشانی آبخوان دولومیتی نسبت دادند. تیان و همکاران (۲۰۱۸) سیستم ژئوترمال ریکیگ در هیمالیای شرقی را بررسی کرده و با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار ^2H و ^{18}O منشاء تغذیه را بارش و ذوب برف کوه‌های اطراف پیشنهاد داده و دمای مخزن را با استفاده از ژئوترموترهای شیمیایی ۲۰۰ تا ۲۲۵ درجه سانتی گراد تخمین زده‌اند. آوسار و همکاران (۲۰۱۶) ویژگی‌های هیدرووشیمی و ایزوتوپی آب‌های ژئوترمال منطقه موگلا در جنوب غربی ترکیه را بررسی کرده و با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار ^2H و ^{18}O اختلاط آب دریا در آب‌های ساحلی با آب‌های جوی را اثبات نموده و دمای مخزن را با محاسبات ژئوترموتری بین ۳۰ تا ۱۶۴ درجه سانتی گراد پیشنهاد داده‌اند. پاسوان اوغلو و چلیک (۲۰۱۸) منطقه ژئوترمال کزلی چاحمام را با استفاده از مطالعات ایزوتوپی بررسی کرده و منشاء آب‌های ژئوترمال را گردش عمیق آب‌های

تاق‌دیس سیاه‌کوه در تقسیمات واحدهای ساختمانی ایران در زاگرس چین‌خورده واقع شده است. محور تاق‌دیس سیاه‌کوه توسط گسل‌هایی که عمود بر امتداد محور تاق‌دیس بوده، قطع گردیده است. این گسل‌ها باعث جابجایی امتداد محور تاق‌دیس سیاه‌کوه شده‌اند به طوری که روند کلی چین‌های زاگرس که شمال غربی - جنوب شرقی بوده، در این تاق‌دیس مشاهده نمی‌شود. بر اساس نقشه زمین‌شناسی سازندهایی که در منطقه رخمون دارند به ترتیب سن شامل سروک، سورگاه، ایلام، گورپی، پابده، آسماری، گچساران، آغاچاری و بختیاری می‌باشند (شکل ۱). لیتولوژی سازندهای منطقه مورد مطالعه عمدتاً شیلی (سازندهای گرو، سورگاه، گورپی و پابده)، آهکی (سازندهای سروک، ایلام، و آسماری)، تخییری (سازندهای



14

محدود می‌شود. چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج به ترتیب از سازندهای آهکی ایلام-سروک و آسماری سرچشمه می‌گیرند. چشمه گوگردی دهلران دارای آبدهی متوسط سالانه حدود ۳۰۰ لیتر بر ثانیه بوده، لذا با توجه به آبدهی بالای این چشمه، به جزء سازندهای آهکی کارستی سروک و ایلام هیچ کدام از سازندهای تاقدیس سیاهکوه توانایی تشکیل این چشمه‌ها را ندارند. آبدهی چشمه گوگردی دوبرج حدود ۵۰ لیتر بر ثانیه بوده و از سازند آسماری تخلیه می‌گردد.

سازندهای آهکی سروک و ایلام قسمت‌های مرکزی تاقدیس سیاهکوه را تشکیل می‌دهد و به دلیل مقاومت نسبتاً زیاد، معمولاً برجسته بوده و ارتفاعات این تاقدیس را تشکیل می‌دهند. سازند سروک با سازند ایلام اغلب یک واحد هیدروژئولوژی نفوذپذیر را تشکیل داده که توسط واحدهای هیدروژئولوژی شیلی نفوذناپذیر گرو در زیر و گورپی در بالا محدود می‌شود. سازند آهکی آسماری نیز یک واحد هیدروژئولوژی نفوذپذیر را تشکیل داده که بین سازند مارنی-شیلی پابده در زیر و سازند تبخیری-مارنی گچساران در بالا



شکل ۲- تصویری از عملکرد گسل‌های رانده مناطق مرکزی تاقدیس سیاهکوه (تکرار سازند سروک و رخنمون سازندهای گرو و گوتینا).

جهت آنالیز آنیون برم انجام گرفت. نمونه‌ها در ظروف پلی اتیلن ۳۵۰ میلی لیتری که قبلاً با آب نمونه ۳ بار شستشو داده شده بود، جمع‌آوری گردید. آنیون‌ها توسط واحد آزمایشگاه شرکت آب منطقه ای ایلام آنالیز گردید. نمونه‌ها جهت آنالیز کاتیون‌ها و سیلیس با استفاده از فیلتر سلولزی ۰/۴۵ میکرومتر فیلتر گردید. نمونه‌های فیلتر شده توسط اسید نیتریک غلیظ تا pH کمتر از ۲ اسیدی گردید. آنالیز نمونه‌ها جهت تعیین میزان کاتیون‌ها و سیلیس توسط آزمایشگاه شرکت زراآزما به روش ICP-MS و یون برم به روش کروماتوگرافی یونی انجام گرفت. آنالیز نمونه‌ها جهت تعیین میزان ایزوتوپ‌های پایدار توسط آزمایشگاه دانشگاه واترلو^۴ کشور کانادا صورت گرفت. برای آنالیز ایزوتوپ سولفور نمونه‌های آب از طریق فیلتر استات سلولز ۴۰ میکرومتر فیلتر گردید و ۵ میلی لیتر محلول کلرید باریم (BaCl₂) ۱ مولار و ۱ میلی لیتر اسید کلریدریک ۱ مولار به منظور ته نشینی سولفات به صورت سولفات باریم (BaSO₄) اضافه گردید. به دلیل عدم انجام مطالعات ایزوتوپ‌های

روش کار

به منظور بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی چشمه‌های گوگردی تاقدیس سیاهکوه، چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج به مدت یک سال (مهر سال ۹۶ تا شهریور سال ۹۷) به طور ماهانه پایش گردید. پایش چشمه‌ها شامل؛ اندازه‌گیری آبدهی، دما، اسیدیته، میزان گاز سولفید هیدروژن و اکسیژن محلول و نمونه برداری جهت آنالیز شیمیایی بوده است. اندازه‌گیری میزان گاز سولفید هیدروژن، دما، هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول و pH در محل با دستگاه‌های قابل حمل انجام گرفت. میزان گاز سولفید هیدروژن با استفاده از تیتراسیون ید (گیگنباخ و همکاران، ۱۹۸۸) اندازه‌گیری گردید. نمونه‌برداری جهت تعیین میزان کاتیون و آنیون‌های اصلی به طور ماهانه، جهت آنالیز میزان سیلیس به صورت فصلی (چهار بار در سال) و جهت تعیین میزان ایزوتوپ‌های پایدار دوتریم (²H)، اکسیژن ۱۸ (¹⁸O) و گوگرد ۳۴ (³⁴S) به صورت دوره‌ای (فصل خشک و فصل تر) انجام گرفت. همچنین نمونه برداری تکمیلی

⁴ - Waterloo

مورد مطالعه به منظور شناسایی سازوکارهای تعادلات و تفریق ایزوتوپی به منظور شناسایی منشأ آب چشمه‌ها انجام شده است. در نهایت با جمع بندی یافته‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی، و ایزوتوپی مدل تفهیمی سازوکار تشکیل چشمه‌های آب گرم و گوگردی تاقدیس سیاهکوه ارایه شده است.

نتایج و بحث

مشخصات فیزیکوشیمیایی

نتایج اندازه گیری پارامترهای صحرایی و آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج در جدول های ۱ و ۲، آنالیز ایزوتوپی چشمه‌ها در جدول ۳ و آنالیز ایزوتوپی باران استان ایلام در جدول ۴ آورده شده است. با توجه جدول های ۱ و ۲ چشمه‌های گوگردی آبگرم دهلران و دوبرج از نظر مشخصاتی نظیر میزان آبدی، دما و میزان املاح با هم متفاوت بوده و مهمترین وجه تشابه آنها وجود گاز سولفید هیدروژن (H_2S) و فقدان اکسیژن محلول (DO) می‌باشد. گاز سولفید هیدروژن باعث ایجاد بوی تخم مرغ گندیده ناشی از آزاد شدن این گاز در هوای اطراف چشمه‌ها می‌شود. میزان املاح چشمه گوگردی دهلران بسیار کمتر از چشمه گوگردی دوبرج بوده به طوری که هدایت الکتریکی این چشمه بین ۸۴۸۰ تا ۸۸۴۰ و هدایت الکتریکی چشمه دوبرج بین ۳۹۲۰۰ تا ۴۶۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر می‌باشد. دمای آب چشمه گوگردی دهلران بیشتر از چشمه دوبرج بوده، به طوری که دمای آب این چشمه حدود $41^{\circ}C$ و دمای آب چشمه دوبرج حدود $30^{\circ}C$ است. میزان گاز سولفید هیدروژن در چشمه‌های گوگردی دوبرج و دهلران نیز به ترتیب حدود ۱۸۰ و ۱۳۰ میلی گرم در لیتر می‌باشد. متوسط آبدی چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج به ترتیب حدود ۳۰۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد.

همچنین بر اساس میزان آنیون‌ها و کاتیون‌ها، تیپ آب چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج کلروره سدیک می‌باشد. با توجه به اینکه این چشمه‌ها از واحدهای هیدروژئولوژیکی ایلام- سروک و آسماری سرچشمه می‌گیرند تیپ آب کلروره سدیک نشان دهنده انحلال هالیت در سازندهای تبخیری و یا یک منبع شوری دیگر از جمله اختلاط با شورابه های نفتی می‌باشد.

پایدار 2H و ^{18}O در ریزش‌های جوی استان ایلام، تعداد ۹ نمونه آب باران در نقاط مختلف استان جمع آوری و توسط آزمایشگاه دانشگاه اتاوا^۵ کشور کانادا آنالیز گردید. با توجه به انطباق خط محلی ریزش‌های جوی^۶ (LMWL) در استان ایلام با خط بارش مدیترانه شرقی^۷ (EMWL) به یک بار آنالیز نمونه‌های بارش استان اکتفا گردید.

به منظور تفسیر فرآیندهای مؤثر بر کیفیت شیمیایی از نمودارهای ترکیبی استفاده گردید. نمودارهای ترکیبی از طریق تعیین رابطه بین پارامترهای آنالیز نمونه های آب ترسیم می گردند. مهمترین کاربرد نمودارهای ترکیبی شناخت فرآیندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت آب های زیرزمینی می باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ میزر، ۲۰۰۳). نمودارهای ترکیبی Na در مقابل Cl، Ca در مقابل SO_4 ، Ca در مقابل HCO_3 ، Ca+Mg در مقابل HCO_3 ، Ca+Mg در مقابل SO_4+HCO_3 ، Ca+Mg-HCO₃-SO₄ در مقابل Na+K-Cl جهت بررسی تعادلات یونی مورد استفاده قرار گرفته است.

جهت تخمین دمای مخزن چشمه‌های گوگردی و آبگرم دهلران و دوبرج از روش ژئوترمومتری استفاده گردید. تخمین دمای مخزن بر اساس حالیت پذیری کانی‌های خاص مانند کانی‌های سیلیسی که توسط دما کنترل می‌شود و همچنین واکنش‌های تبدیلی کاتیون در کانی‌های معین که توسط دما و شرایط احیایی کنترل شده، پایه گذاری شده است (چاندرا سخرام و بوندسکو، ۲۰۰۸). ژئوترمومترهای کاتیونی بر اساس واکنش‌های تبادلی کاتیونی با استفاده از ثابت های تعادلی وابسته به دما توسعه پیدا کرده اند. مهمترین این واکنش‌ها تبادلی کاتیون بین فلدسپات‌های سدیم و پتاسیم دار می‌باشند. با توجه به عدم کانی‌های فلدسپاتی در منطقه مورد مطالعه، ژئوترمومتری کاتیونی برای منطقه مورد مطالعه صادق نیست، لذا ژئوترمومتری چشمه‌های گوگردی و آبگرم دهلران و دوبرج بر اساس سیلیس انجام شده است.

نمودار رابطه دوتریم (2H) در مقابل اکسیژن ^{18}O در نمونه‌های آب باران استان ایلام تهیه و خط ریزش‌های جوی ایزوتوپ‌های پایدار استان ایلام نسبت به خط جهانی ریزش‌های جوی ایزوتوپ-های پایدار ترسیم شده است. نمودارهای روابط ایزوتوپی چشمه‌های

⁷ - Global Meteoric Water Line

⁵ - Ottawa

⁶ - Local Meteoric Water Line

جدول ۱- نتایج اندازه گیری و آنالیز شیمیایی چشمه گوگردی آبگرم دهلران.

زمان نمونه برداری	Q (lit/s)	T (°C)	EC (μs/cm)	pH	mg/l			meq/l						
					TDS	H ₂ S	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
مهر ۹۶	266	40.8	8470	6.92	5675	*	*	8.7	64	12.5	19	7.1	57.1	1.3
آبان ۹۶	272	41	8480	6.4	5681	130	22.89	8.5	64.2	12.6	19.1	7.2	57.3	1.1
آذر ۹۶	263	41.4	8570	6.3	5742	*	*	9.3	65.1	12.6	19.2	7.4	58.6	1.1
دی ۹۶	245	*	8590	6.45	5755	140	*	9.5	65.3	12.5	19.4	7.5	59.2	1.04
بهمن ۹۶	300	*	8350	6.34	5594	*	*	8.3	63.8	12.1	18.8	7.1	56.8	1
اسفند ۹۶	311	41.1	8540	6.44	5722	*	24.22	8.2	65.6	12.5	18.9	7.31	57.5	1.6
فروردین ۹۷	370	41.1	8680	6.4	5815	127	*	9.5	66.3	12.8	20	8.1	58.1	1.04
اردیبهشت ۹۷	360	40.8	8650	6.47	5796	136	23.79	8	66.5	12.7	19.2	7.4	58.2	1.64
خرداد ۹۷	375	41.4	8475	6.27	5678	*	*	8.1	64.5	12.5	19.2	7.3	57.4	1.05
تیر ۹۷	296	41.5	8840	6.85	5923	*	*	8.1	66.7	13.5	20.3	8.5	58.5	1.96
مرداد ۹۷	305	*	8690	6.46	5822	130	15.62	8.1	66.8	12.6	19.3	7.5	58.5	1.67
شهریور ۹۷	295	41.1	8730	6.88	5849	*	*	9.1	67	12.6	19.4	7.6	58.7	1.6

CO₃⁻²=0 DO=0

جدول ۲- نتایج اندازه گیری و آنالیز شیمیایی چشمه های گوگردی آبگرم دویرج.

زمان نمونه برداری	Q (lit/s)	T (°C)	EC (μs/cm)	pH	mg/l			meq/l						
					TDS	H ₂ S	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
مهر ۹۶	50	*	43800	6.07	29346	*	*	10.5	364.1	65	54.8	19.5	365.1	0.73
آبان ۹۶	50	29.7	40000	6.09	26800	*	26.1	10.2	342.2	52.5	45.5	15.1	343.5	0.85
آذر ۹۶	60	29.6	45700	6.09	30619	180	*	11.8	383.5	65	56.5	20.5	383.2	0.99
دی ۹۶	65	*	44200	6.04	29614	*	*	10.6	371.5	61.3	49.8	19.5	371.2	0.68
بهمن ۹۶	60	29.6	45900	6.23	30753	170	*	9.7	381.7	69.6	59.1	21.2	380.6	0.67
اسفند ۹۶	70	*	43100	6.12	28877	*	28.62	10.3	365.3	66.4	55.5	20.2	366.1	0.81
فروردین ۹۷	65	29.5	44800	6.31	30016	161	*	12.8	369.3	67.5	57.2	22.5	367.1	1.85
اردیبهشت ۹۷	75	*	39200	6.18	26264	175	24.71	8.3	342.4	50.4	42.6	13.7	343.1	0.64
خرداد ۹۷	60	*	40300	6.29	27001	187	*	8.1	343.5	51.4	43.5	13.8	344.1	1.8
تیر ۹۷	45	30.5	44100	6.14	29547	221	*	9.8	369.4	65.5	56.2	20.1	368.4	1.6
مرداد ۹۷	25	30.8	45700	6.22	30619	*	16.45	10.1	381	66.4	56.8	20.2	381.3	0.73
شهریور ۹۷	15	31.6	46000	6.15	30820	*	*	10	381	68.7	58.3	21.3	379.5	1.98

CO₃⁻²=0 DO=0

جدول ۳- نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های آب باران استان ایلام.

نام محل	ارتفاع از سطح دریا (m)	VSMOW ‰	
		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
صالح آباد	660	-4.46	-14.83
ایلام	1400	-5.35	-21.36
دره شهر	665	-0.19	22.11
آبدانان	890	-4.39	-14.40
گنجوان	750	-1.69	7.45
زرین آباد	750	-0.92	12.90
بدره	1060	-5.01	-17.73
ملکشاهی	1330	-4.02	-5.36
دهلران	220	1.33	17.74

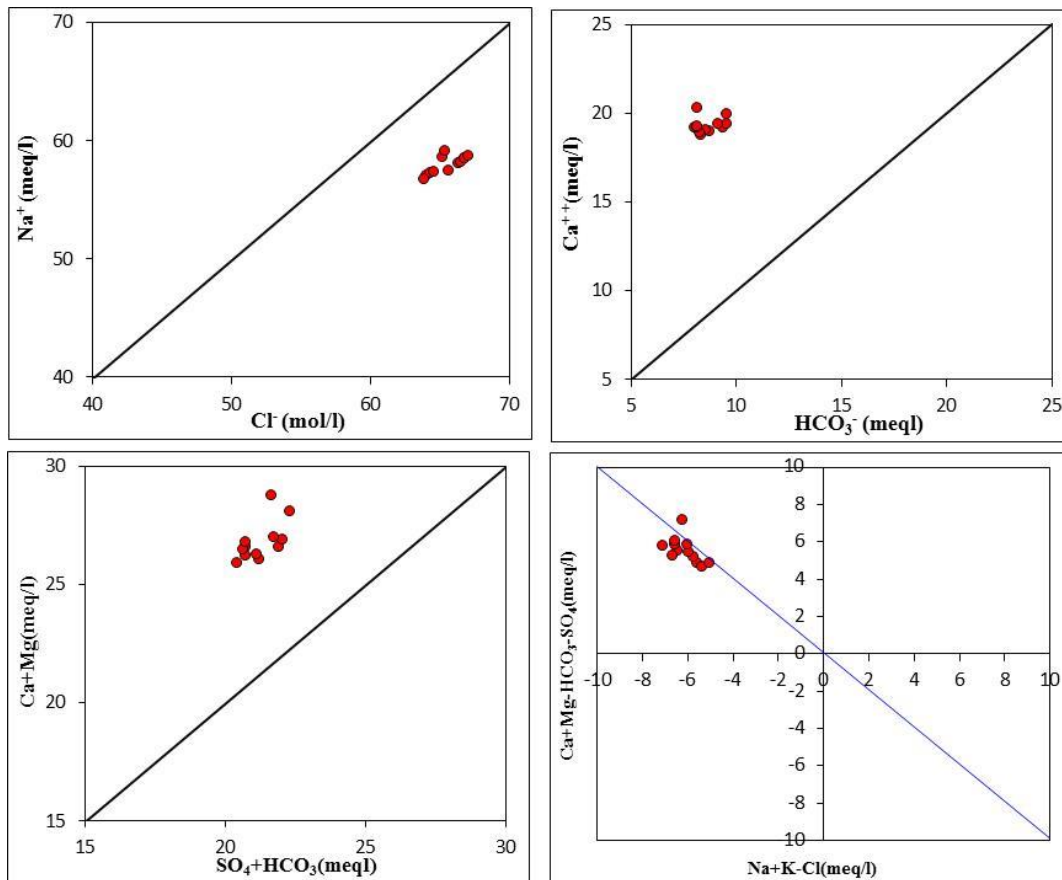
جدول ۴- نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های آب چشمه‌های گوگردی.

دوره	نام چشمه	VSMOW ‰ & VCDT ‰		
		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{34}\text{S}$
فصل تر	دهلران	-5.26	-22.22	30.00
	دویرج	-4.23	-14.00	27.90
فصل خشک	دهلران	-5.17	-22.39	30.22
	دویرج	-3.75	-12.90	*

$\text{SO}_4 + \text{HCO}_3$ چشمه گوگردی دهلران پراکنش نقاط را در بالاتر از خط تعادلی واقع شده، فرآیند غالب تبادل کاتیونی معکوس می‌باشد. نمودار $\text{Ca} + \text{Mg} - \text{HCO}_3 - \text{SO}_4$ در مقابل $\text{Na} + \text{K} - \text{Cl}$ تبادلات یونی سدیم، کلسیم، منیزیم، بی کربنات و سولفات را نشان می‌دهد. در صورتی که پراکندگی نمونه‌ها به صفر نزدیک باشند، تبادل یونی صورت نگرفته و هالیت، دولومیت و ژپس انحلال یافته‌اند. واقع شدن نمونه‌ها در بالا و سمت چپ نشان دهنده فرآیند تبادل یونی معکوس و در پایین و سمت راست فرآیند تبادل یونی مستقیم می‌باشد. در نمودار $\text{Ca} + \text{Mg} - \text{HCO}_3 - \text{SO}_4$ در مقابل $\text{Na} + \text{K} - \text{Cl}$ چشمه گوگردی دهلران پراکنش نقاط را در بالا و سمت چپ بوده، لذا فرآیند تبادل یونی معکوس غالب می‌باشد.

نمودارهای ترکیبی

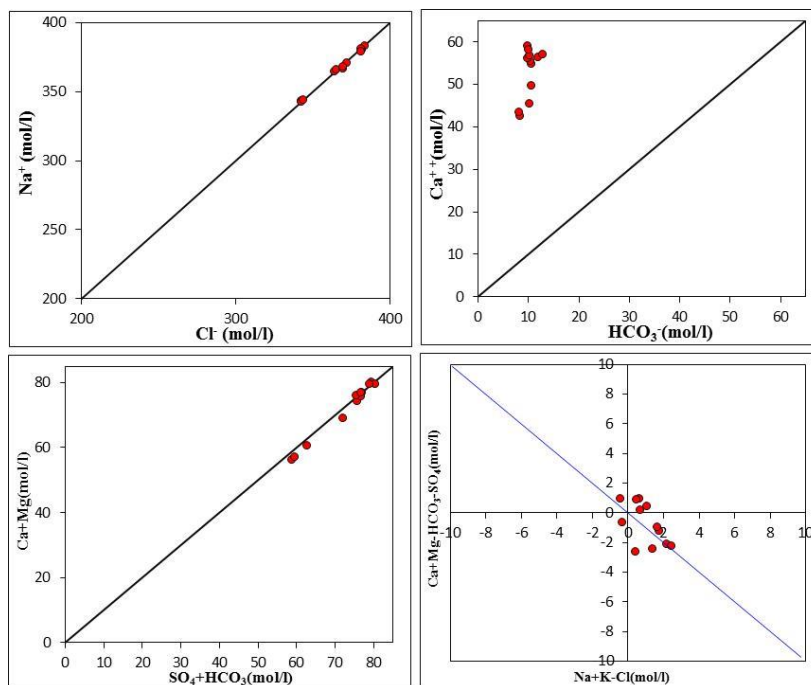
نمودار Na در مقابل Cl چشمه گوگردی دهلران (شکل ۳) نشان می‌دهد که پراکنش نقاط در زیر خط تعادل (۱:۱) بوده به عبارت دیگر یون کلر غلظت بیشتری نسبت به سدیم داشته که نشانگر فرآیند تبادل کاتیونی معکوس و یا ورود یون کلر از منابع دیگر غیر از انحلال هالیت است. در نمودار Ca در مقابل HCO_3 پراکنش نقاط بالاتر از خط تعادلی بوده که نشان دهنده ورودی کلسیم از منابع دیگر به جزء انحلال کربنات‌ها و یا تبادل کاتیون معکوس می‌باشد. نمودار $\text{Ca} + \text{Mg}$ در مقابل $\text{SO}_4 + \text{HCO}_3$ خط تعادل همزمانی فرآیند انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در نمودار $\text{Ca} + \text{Mg}$ در مقابل



شکل ۳- نمودارهای Na در مقابل Cl، Ca در مقابل HCO_3 ، Ca+Mg در مقابل SO_4+HCO_3 و Ca+Mg-HCO₃-SO₄ در مقابل Na+K-Cl چشمه گوگردی دهلران.

کاهش یون های کلسیم و منیزیم نسبت به مجموع یون های سولفات و بی کربنات ممکن است به دلیل ته نشینی کلسیت و دولومیت باشد. در نمودار $\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$ در مقابل $\text{Na}+\text{K}-\text{Cl}$ پراکندگی نمونه ها نزدیک به صفر و پایین سمت راست می باشند. پراکندگی نزدیک صفر انحلال هالیت، دولومیت و ژپس و پایین سمت راست فرآیند تبادل یونی مستقیم را نشان می دهد. معمولاً تبادل کاتیون مستقیم در اثر نفوذ آب شور به آب های شیرین صورت می گیرد. این پدیده در مورد منطقه مورد مطالعه صدق نمی کند، بنابراین کاهش میزان کلسیم و منیزیم به نسبت به مجموع یون های سولفات و بی کربنات به دلیل ته نشینی کلسیت و دولومیت می باشد.

نمودار Na در مقابل Cl چشمه گوگردی دویرج (شکل ۴) نشان می دهد که پراکندگی نقاط تقریباً بر روی خط تعادل (۱:۱) بوده به عبارت دیگر یون های کلر و سدیم نسبت های برابر داشته که نشانگر انحلال هالیت است. در نمودار Ca در مقابل HCO_3 پراکنش نقاط بالاتر از خط تعادلی بوده که نشان دهنده ورودی کلسیم از انحلال انیدریت و ژپس و یا تبادل کاتیون معکوس می باشد. با توجه به اینکه در نمودار Ca+Mg در مقابل SO_4+HCO_3 چشمه گوگردی دویرج پراکندگی نقاط در مجاورت و اندکی پایین تر از خط تعادلی واقع شده، فرآیند غالب انحلال کلسیت، دولومیت و انیدریت می باشد.

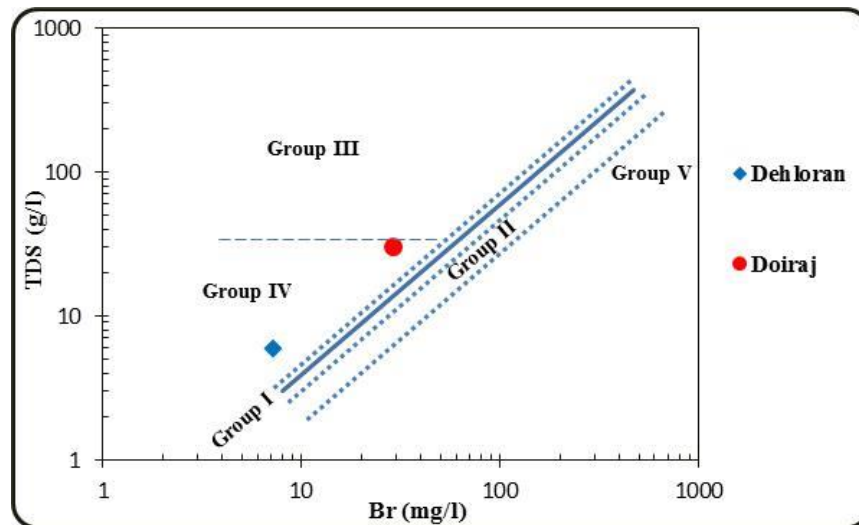


شکل ۴- نمودارهای Na در مقابل Cl، Ca در مقابل HCO_3 ، Ca+Mg در مقابل HCO_3 ، Ca+Mg-HCO₃-SO₄ در مقابل Na+K-Cl چشمه گوگردی دوبرج.

تعیین منشأ شوری چشمه‌ها

یکی از ساده‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌ها جهت تشخیص منشأ شوری حاصل از انحلال هالیت از شورابه‌های نفتی نسبت Na/Cl است. نسبت مولار Na/Cl نزدیک به ۱ بیانگر منشأ شوری از هالیت بوده، در صورتی که این نسبت از یک کمتر باشد منشأ شوری شورابه‌های نفتی می‌باشد. این روش به خصوص در غلظت‌های بالای کلرید مفید بوده و استفاده از این روش در صورتی که $(\text{Na}+\text{Cl})/\text{TDS} \geq 0.64$ (پیشنهاد شده است) (ریشر و کریتر، ۱۹۹۳) نمودار رابطه Na به Cl برای چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج ترسیم گردید (شکل‌های ۳ و ۴). نسبت Na/Cl چشمه دوبرج حدود ۱ بوده و تقریباً بر روی خط انحلال هالیت منطبق بوده، لذا منشأ شوری آب این چشمه انحلال هالیت موجود در سازندهای تبخیری می‌باشد. نسبت Na/Cl چشمه دهلران برابر ۰/۸۹ می‌باشد. با توجه به این که $(\text{Na}+\text{Cl})/\text{TDS}$ چشمه آبگرم دهلران کمتر از ۰/۶۴ بوده، لذا استفاده از نسبت Na/Cl برای تشخیص شوری حاصل از انحلال هالیت از شورابه‌های نفتی صحیح نمی‌باشد. کاهش میزان یون سدیم نسبت به یون کلر به دلیل تبادل کاتیون با کانی‌های

رسی می‌باشد (شکل ۳). با توجه به بررسی‌های صحرایی، تبخیری‌های موجود در هسته تاقدیس سیاهکوه حاوی مقادیر زیادی رس می‌باشند. نسبت سولفات به کلر (SO_4/Cl) نیز می‌تواند جهت تشخیص شورابه‌های نفتی از انحلال هالیت استفاده گردد. شورابه‌های نفتی اغلب نسبت SO_4/Cl خیلی کمی (کمتر از ۰/۰۱) دارند (وایت مر، ۱۹۹۵). نسبت SO_4/Cl چشمه‌های گوگردی دوبرج و دهلران به ترتیب حدود ۰/۱۸ و ۰/۱۹ بوده، بنابراین منشأ شوری این چشمه‌ها انحلال هالیت در سازندهای تبخیری می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی و تشخیص شورابه‌های نفتی از انحلال هالیت نمودار رابطه مواد کل جامد محلول و یون برم می‌باشد (ریتنهوس، ۱۹۶۷). غلظت کم یون برم همراه با میزان TDS بالا نشان دهنده انحلال هالیت بوده که آب‌های این دسته در گروه III (شورابه‌های حاصل از انحلال هالیت) واقع می‌باشند. در نمودار نسبت TDS در مقابل Br چشمه‌های گوگردی دوبرج و دهلران (شکل ۵) در گروه III و IV واقع شده که در گروه آب‌های حاصل از انحلال هالیت و یا آب‌های رقیق شده حاصل از انحلال هالیت می‌باشند.



شکل ۵- نمودار رابطه TDS به Br چشمه‌های آبگرم و گوگردی استان ایلام بر اساس ریتنهوس ۱۹۶۷، گروه I و II اختلاط با آب دریا، گروه III شورابه‌های حاصل از انحلال هالیت، گروه IV آب‌های حاصل از اختلاط با شورابه‌های انحلال هالیت و گروه V شورابه‌های عمیق

دهلران بوده، به عبارت دیگر آب چشمه گوگردی دویرج اسیدی‌تر می‌باشد. میزان pH بر حلالیت سیلیس تأثیر داشته به طوری که سیلیس در محیط‌های اسیدی‌تر بیشتر حل می‌گردد (لانگ مویر، ۱۹۹۷). همچنین میزان دما در مخزن چشمه دهلران با استفاده از سیلیس کلسدونی برابر $34/9^{\circ}\text{C}$ تخمین زده شده که با توجه به دمای مظهر چشمه (41°C)، این میزان صحیح نمی‌باشد. با توضیحات فوق محاسبات ژئوترموتری چشمه‌های دویرج و دهلران دارای خطا بوده، لیکن به نظر می‌رسد با استفاده از ژئوترموتر کوارتز دمای مخزن چشمه گوگردی دهلران حدود 70°C و با استفاده از ژئوترموتر کلسدونی دمای مخزن چشمه گوگردی دویرج برابر حدود 38°C معقول می‌باشد.

ژئوترموتری

دمای مخزن چشمه‌های دویرج و دهلران با استفاده از ژئوترموتر سیلیس تخمین گردید و نتایج در جدول ۵ آورده شد. بر اساس ژئوترموتری سیلیس میزان دما در مخزن چشمه گوگردی دویرج بیش از مخزن چشمه گوگردی دهلران می‌باشد، در صورتی که دمای آب در مظهر چشمه گوگردی دهلران و دویرج به ترتیب حدود 41°C و 31°C است. به عبارت دیگر دمای آب چشمه دهلران حدود 10°C گرم‌تر می‌باشد. احتمالاً تخمین دمای بیشتر در مخزن چشمه دویرج نسبت به چشمه دهلران صحیح نبوده و ناشی از حلالیت بیشتر سیلیس متأثر از pH می‌باشد. با توجه به جدول‌های ۱ و ۲ میزان pH چشمه گوگردی دویرج کمتر از pH چشمه گوگردی

جدول ۵- تخمین دمای مخزن ژئوترمال چشمه‌های دویرج و دهلران با استفاده از ژئوترموتر سیلیس ($^{\circ}\text{C}$)

نام چشمه	دمای میانگین چشمه	Quartz (no steam loss)	Quartz (max. steam loss)	Chalcedony
دویرج	31	70.4	75.1	38.6
دهلران	41	66.9	72.0	34.9

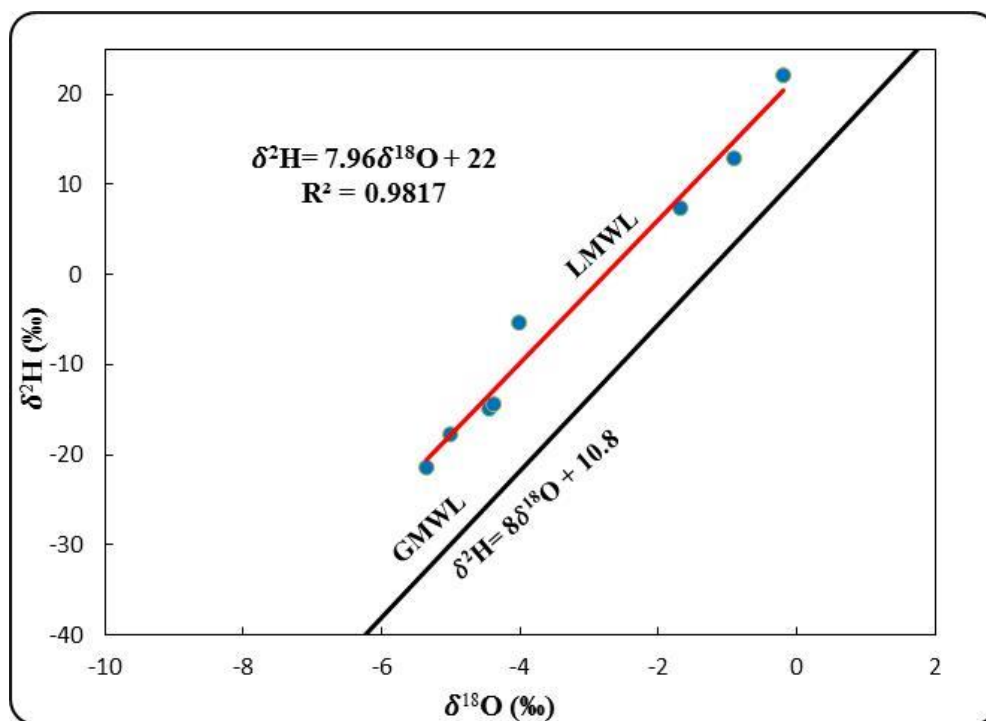
جهانی ریزش‌های جوی ایزوتوپ‌های پایدار انحراف داشته و منطبق بر خط ریزش‌های جوی مدیترانه شرقی (کلارک، ۲۰۱۵) می‌باشد:

$$\delta^2\text{H} = 7.99\delta^{18}\text{O} + 22$$

[رابطه ۱]

ایزوتوپ‌های پایدار

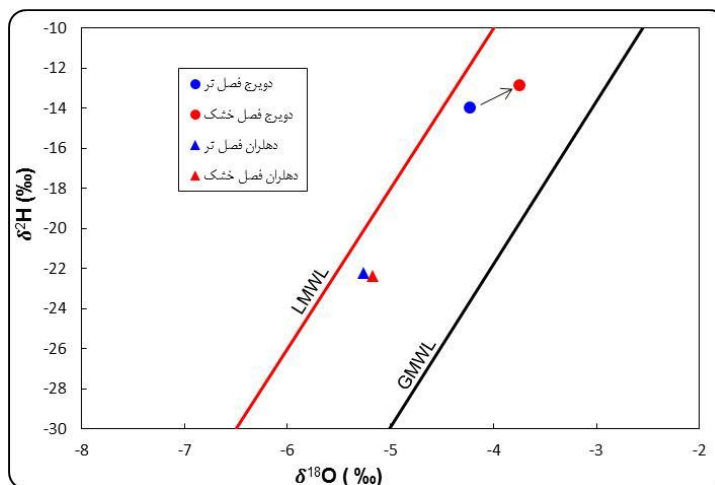
نمودار رابطه دوتریم (^2H) در مقابل اکسیژن ^{18}O در نمونه‌های آب باران استان ایلام (شکل ۶) نشان می‌دهد که خط محلی ریزش‌های جوی ایزوتوپ‌های پایدار استان ایلام نسبت به خط



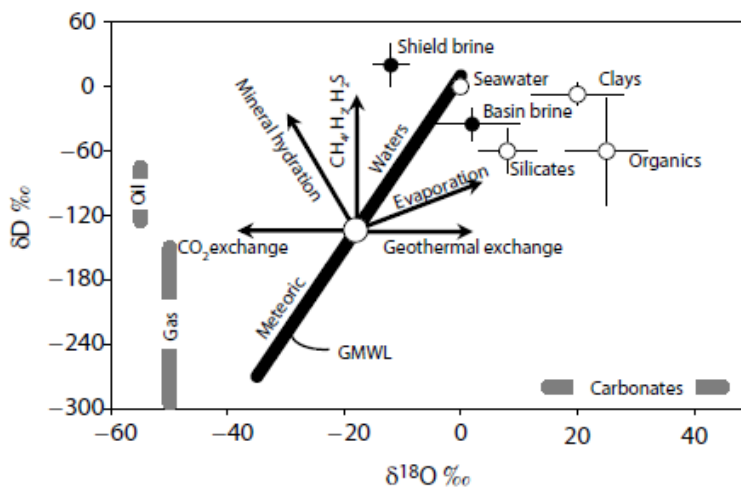
شکل ۶- نمودار رابطه ^2H در مقابل ^{18}O در ریزش‌های جوی استان ایلام.

(۱۹۸۲). علاوه بر تبادل ایزوتوپ با سنگ مخزن که فقط ^{18}O در آب چشمه‌ها نسبت به ریزش‌های جوی غنی می‌گردد، میزان ^2H و ^{18}O در چشمه دوبرج در فصل خشک بیشتر بوده که نشان می‌دهد آب‌های جوی تغذیه‌کننده آبخوان این چشمه‌ها قبل از نفوذ متأثر از تبخیر بوده است. با توجه به واقع شدن چشمه گوگردی دوبرج و دهلران در یک منطقه آب و هوایی، عدم تغییر محسوس ترکیب ایزوتوپی آب چشمه گوگردی دهلران در فصل‌های تر و خشک احتمالاً به دلیل گردش عمیق‌تر آب این چشمه و اختلاط آب‌های تغذیه‌کننده در فصول تر و خشک می‌باشد. با این حال در بر روی نمودار سازوکارهای تبادل و تعدیل ترکیب ایزوتوپی آب‌های جوی (شکل ۸)، نمونه‌های آب چشمه‌های دهلران و دوبرج با اندکی تغییر در سمت راست خط ریزش‌های جوی محلی واقع شده، لذا منشأ آب چشمه‌های گوگردی ریزش‌های جوی می‌باشد.

ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب چشمه‌های گوگردی آبگرم دهلران و دوبرج در فصل‌های تر و خشک در نمودار رابطه ^2H در مقابل ^{18}O (شکل ۷) نشان می‌دهد که ایزوتوپ‌های پایدار ^{18}O و ^2H در آب این چشمه‌ها با اندکی تغییر در سمت راست خط محلی ریزش‌های جوی (LMWL) واقع می‌باشد. به عبارت دیگر میزان ^{18}O آب چشمه‌ها نسبت به ^{18}O آب باران غنی شده است. غنی‌شدگی ایزوتوپ‌های پایدار ^2H و ^{18}O آب چشمه‌ها نسبت به ریزش‌های جوی به دلیل تبخیر ریزش‌های جوی قبل از نفوذ عمقی و فرایند تبادل در سیستم ژئوترمال می‌باشد. در یک سیستم ژئوترمال مقداری از ^{18}O از سنگ به آب و مقداری از ^{16}O از آب به سنگ منتقل می‌شود و با توجه به اینکه مقدار کمی هیدروژن در سنگ وجود دارد، تغییر چندانی در میزان دوتریم ایجاد نمی‌شود. بنابراین آب از نظر ایزوتوپی ^{18}O سنگین‌تر می‌شود و به دلیل تبادل ایزوتوپ با سنگ مخزن انحراف پیدا می‌کند (کلارک، ۲۰۱۵؛ درور،

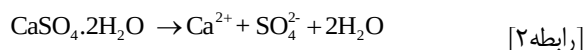


شکل ۷- نمودار رابطه دوتریم (^2H) در مقابل اکسیژن ۱۸ (^{18}O) چشمه‌های گوگردی دوبرج و دهلران



شکل ۸- سازوکارهای تبادل و تعدیل ترکیب ایزوتوپی آبهای جوی (کلارک، ۲۰۱۵). تبادل ژئوترمال و تبخیر در چشمه‌های گوگردی دوبرج و دهلران (شکل ۷) مشاهده می‌گردد.

منشاء یون سولفات انحلال کانی‌های سولفات تریپس و انیدریت یا اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت می‌باشد (کلارک، ۲۰۱۵):



انحلال تریپس



انحلال انیدریت



اکسیداسیون پیریت

میزان گوگرد ۳۴ در چشمه‌های گوگردی دوبرج حدود ۲۸ ‰ و در چشمه گوگردی دهلران حدود ۳۰ ‰ می‌باشد. گاز H_2S در چشمه‌های گوگردی در اثر فرآیند احیاء یون سولفات توسط باکتری ها ایجاد می‌شود. از آنجایی که پیوند شیمیایی ایزوتوپ سنگین تر گوگرد (^{34}S) نسبت به ایزوتوپ سبک تر گوگرد (^{32}S) قوی تر بوده، لذا باکتری های احیاء کننده سولفات ترجیح می‌دهند سولفات حاوی ایزوتوپ سبک تر را احیاء نمایند. بنابراین میزان ایزوتوپ سنگین گوگرد در آب غنی تر می‌گردد (کلارک، ۲۰۱۵). با توضیحات فوق مقادیر ^{32}S در چشمه‌های گوگردی مندرج در جدول ۴ بیشتر از مقادیر واقعی می‌باشند.

چشمه گوگردی دوبرج نسبت به چشمه گوگردی دهلران نظرات فوق را تأیید می‌کند.

سازندهای شیلی گرو، سورگاه، پابده و گورپی در استان ایلام حاوی مواد آلی بوده، لذا مواد آلی مورد نیاز واکنش فوق از سازندهای شیلی تأمین می‌گردد. به عنوان مثال محبوبي پور و همکاران (۲۰۱۶) با مطالعه نمونه های خردۀ حفاری از سازند گرو در چاههای اکتشافی نفت با استفاده از تکنیک‌های ژئوشیمیایی پیرولیز راک-اول^۹، کروماتوگرافی گازی (GC) و کروماتوگرافی گازی- طیف سنجی جرمی (GC-MS) میانگین کل کربن آلی در سازند شیلی گرو بین ۰/۵ تا ۴/۹۵ درصد محاسبه کرده اند. کبرایی و همکاران (۲۰۱۷) نیز میزان مواد آلی در سازند گرو در خردۀ های حفاری چاه های نفت تاقیدیس دهلران با استفاده از روشهای پیرولیز راک-اول، کروماتوگرافی گازی (GC) و کروماتوگرافی گازی- طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) بین ۰/۴۴ تا ۰/۷۳ درصد محاسبه نموده اند. مشهدی و همکاران (۲۰۱۵) نیز با استفاده از روش پیرولیز راک-اول میزان کربن آلی در سازند گورپی را بین ۰/۳۴ تا ۱/۹۵ درصد تعیین کرده اند.

مدل مفهومی چشمه‌های گوگردی تاقیدیس سیاهکوه

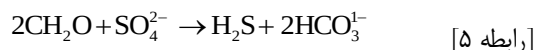
همان گونه که ذکر شد واحدهای هیدروژئولوژیکی ایلام-سروک و آسماری در تاقیدیس سیاهکوه آبخوان‌های کارستی تشکیل داده که چشمه‌های آبگرم و گوگردی دهلران و دوبرج از این واحدهای هیدروژئولوژیکی سرچشمه می‌گیرند. با توجه به بررسی های میدانی به عمل آمده به استثنای چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج چشمه قابل توجهی از تاقیدیس سیاهکوه ظاهر نشده است. لذا خروجی آب زیرزمینی کارستی این تاقیدیس چشمه‌های گوگردی دهلران و دوبرج می‌باشند. چشمه گوگردی دهلران از واحد هیدروژئولوژی ایلام-سروک تاقیدیس سیاهکوه سرچشمه می‌گیرد. گسل‌های عمیق در مناطق مرکزی تاقیدیس سیاهکوه باعث ارتباط هیدرولیکی سازندهای آهکی کارستی سروک و ایلام با سازندهای تبخیری زیرین شده‌اند (شکل ۲). لذا آب‌های موجود در آبخوان کارستی واحد هیدروژئولوژی ایلام-سروک از طریق گسل‌های مذکور به سازند تبخیری زیرین (گوتینا) نفوذ کرده و انحلال این تبخیری‌ها باعث افزایش شوری آب‌های نفوذی می‌گردد. چشمه گوگردی دوبرج از سازند آسماری سرچشمه می‌گیرد و با توجه به اینکه سازند آسماری در تاقیدیس سیاهکوه دارای بخش تبخیری

با اندازه‌گیری ایزوتوپ سولفور ^{34}S در آب می‌توان منشأ سولفات و سولفید را تعیین نمود. سولفات حاصل از انحلال ژئیس و انیدریت از لحاظ ^{34}S غنی بوده و مقدار $\delta^{34}\text{S}$ مثبت می‌باشد، در صورتی که سولفات حاصل از اکسیداسیون سولفیدها نظیر پیریت از ^{34}S تهی بوده و مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ منفی است (کلارک، ۲۰۱۵). بالا بودن ایزوتوپ ^{34}S در چشمه‌های گوگردی دهلران (۳۰٪) و دوبرج (۲۸٪) نشان می‌دهد که سولفات این چشمه‌ها از انحلال تبخیری‌های حاوی ژئیس و انیدریت حاصل شده است.

منشاء گاز سولفید هیدروژن

منشاء گاز سولفید هیدروژن (H_2S) می‌تواند فعالیت‌های ولکانیکی، احیاء باکتریایی سولفات (BSR) و احیاء ترموشیمیایی سولفات (TSR) باشد. با توجه به عدم فعالیت ولکانیکی در زون زاگرس منشأ گاز سولفید هیدروژن چشمه‌های گوگردی از فعالیت ولکانیکی منتفی است. احیاء باکتریایی سولفات و احیاء ترموشیمیایی سولفات در دو رژیم دمایی منحصر به فرد رخ می‌دهند، به طوری که احیاء باکتریایی سولفات در دمای 0°C (صفر) شروع شده و تا حدود دمای 80°C – 60°C ادامه دارد، در صورتی که ظهور احیاء ترموشیمیایی سولفات در دمای بین 100°C تا 140°C درجه سانتیگراد می‌باشد (مایکل، ۲۰۰۱). با استفاده از روش ژئوترموتری سیلیس دمای مخزن چشمه دهلران حدود 70°C و چشمه دوبرج حدود 38°C تخمین گردید، بنابراین منشأ گاز سولفید هیدروژن این چشمه‌ها احیاء باکتریایی سولفات می‌باشد.

گونه‌های سولفور غیرآلی در اکسیداسیون مواد آلی توسط باکتریها، به عنوان الکترون گیرنده عمل می‌کنند. در این فرآیند سولفور به سولفید احیاء می‌گردد. این واکنش به عنوان احیاء متجانس^۸ توصیف می‌گردد (کلارک، ۲۰۱۵؛ لانگ مویر، ۱۹۹۷).



باکتری‌های درگیر در این فرآیند گونه *Desulfovibrio* یا گونه *Desulfotomaculum* هستند که هتروتروف بوده و آنها مواد آلی را به عنوان مبدل انرژی لازم دارند (لانگ مویر، ۱۹۹۷).

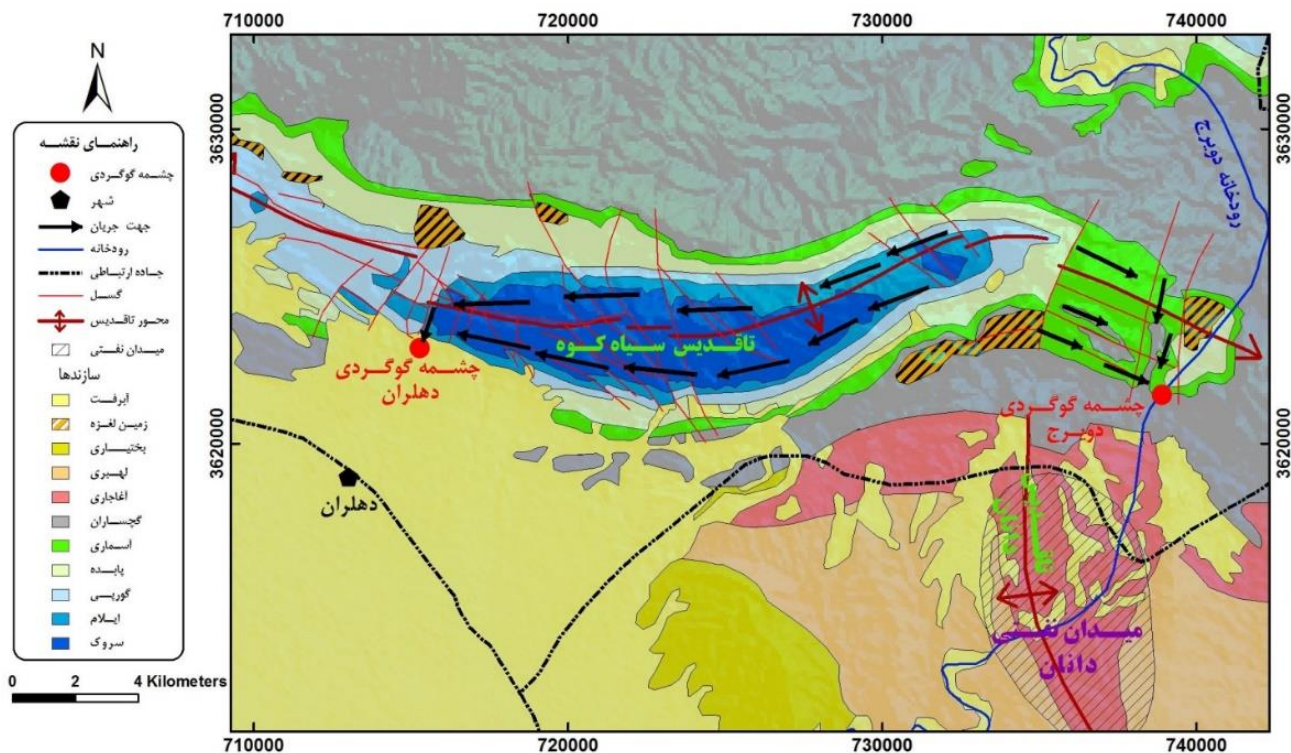
بالا بودن یون بی‌کربنات در آب چشمه‌های گوگردی دوبرج و دهلران (جدول‌های ۱ و ۲) واکنش فوق را تأیید می‌کند. میزان یون بی‌کربنات در چشمه گوگردی دوبرج بیش از چشمه گوگردی دهلران بوده، لذا فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات در چشمه دوبرج از چشمه دهلران بیشتر می‌باشد. بالا بودن گاز سولفید هیدروژن در

⁹ - Rock-Eval pyrolysis

⁸ - Assimilatory

در جهت شمال غربی-جنوب شرقی بوده که در محل چشمه گوگردی دوبرج ظاهر می‌شود. با توجه به گسترش و ضخامت بیشتر واحد هیدروژئولوژیکی ایلام-سروک نسبت به واحد هیدروژئولوژیک آسماری، میزان آبدهی چشمه گوگردی دهلران از آبدهی چشمه گوگردی دوبرج خیلی بیشتر است. با توجه به وجود گسل‌های عمیق در تاق‌دیس سیاهکوه گردش عمقی آب‌های نفوذی باعث گرم شدن آب متأثر از گرادیان زمین گرمایی شده، لذا چشمه گوگردی دهلران دمای بالایی دارد (حدود 41°C).

کله‌ر بوده، لذا منشاء شوری این چشمه انحلال بخش تبخیری کله‌ر می‌باشد. مدل مفهومی چشمه‌های گوگردی و آبگرم تاق‌دیس سیاهکوه به صورت طرح شماتیک و جهت جریان زیرزمینی در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به این شکل جریان آب زیرزمینی واحد هیدروژئولوژیک ایلام-سروک در جهت شرقی-غربی و به موازات محور تاق‌دیس سیاهکوه بوده و در نهایت به صورت یک جریان متمرکز از طریق گسل‌های موجود در محل چشمه گوگردی دهلران تخلیه می‌گردد. همچنین تخلیه واحد هیدروژئولوژیک آسماری در پلانژ شرقی تاق‌دیس سیاهکوه



شکل ۹- مدل مفهومی (طرح شماتیک و جهت جریان زیرزمینی) چشمه‌های گوگردی و آبگرم تاق‌دیس سیاهکوه.

زیرین شده، لذا انحلال تبخیری‌ها باعث افزایش شوری و گردش عمیق آب باعث بالا رفتن دمای آب‌های نفوذی می‌شود. دمای بالا و شرایط بی‌هوای ناشی از گردش عمیق آب در آبخوان چشمه‌ها، باعث فعالیت باکتری‌های احیاء کننده سولفات شده و با تجزیه مواد آلی گاز سولفید هیدروژن تولید می‌کنند. در نمودار Na/Cl چشمه گوگردی دوبرج پراکندگی نقاط بر روی خط تعادل بوده که نشانگر انحلال هالیت است. در نمودار Na مقابل Cl چشمه گوگردی دهلران پراکنش نقاط در زیر خط تعادل بوده که نشانگر فرایند تبادل کاتیون معکوس و یا ورود یون کلر از

نتیجه گیری

سازندهای آهکی آسماری، ایلام و سروک در تاق‌دیس سیاهکوه آبخوان‌های کارستی تشکیل داده و چشمه‌های گوگردی دهلران با میانگین آبدهی حدود ۳۰۰ لیتر بر ثانیه و دوبرج با میانگین آبدهی حدود ۵۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب در مناطق میانی و پلانژ شرقی این تاق‌دیس ظاهر شده است. چشمه گوگردی دوبرج از سازند آسماری و چشمه گوگردی دهلران از سازندهای ایلام و سروک سرچشمه می‌گیرد. گسل‌های عمیق موجود در تاق‌دیس سیاهکوه باعث ارتباط هیدرولیکی آبخوان‌های کارستی با سازندهای تبخیری

- Latium region, Italy. *Appl. Geochem.* 3: 475–486.
- Goldscheider, N., Madl-Szonyi, J., Eross A, Schille, 2010. Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Hydrogeology Journal* 18: 1303-1318.
- Hounslow, A.W., 1995. *Water Quality Data. Analysis and Interpretation*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA 397pp.
- Karimi, H. and Moore, F. 2008. The source and heating mechanism for the Ahram, Mirahmad and Garu thermal springs, Zagros Mountains, Iran. *Geothermics journal*. 37: 442-450.
- Karimi, S., Mohammadi, Z., Nozar Samani, N., 2017. Geothermometry and circulation depth of groundwater in Semnan thermal springs, Northern Iran. *Environ Earth Sci.* 76:659 – 667.
- Kempe, A.L.W., Thode, H.G., 1968. The mechanism of bacterial reduction of sulfate and sulfite from isotope fractionation studies. *Geochim. Cosmochim. Acta* 32: 71–91.
- Kobraei, M., Rabbani, A. and Taati, F., 2017. Source rock characteristics of the Early Cretaceous Garau and Gadvan formations in the western Zagros Basin–southwest Iran. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* December 2017, Volume 7, Issue 4, pp 1051–1070.
- Kompani-Zare, M., Moore, F., 2001. Chemical thermometry and origin of the Dalaki mineral springs, Boshehr Province, Iran. *J. Hydrol. (NZ)* 40: 189–204.
- Langmuir, D., 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice-Hall, 600P
- Machel, H.G., 2001. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights. *Sedimentary Geology*. 140: 143-175
- Mahbobipour, H., Kamali, M. R., Solgi, A., 2016. Organic geochemistry and petroleum potential of Early Cretaceous Garau Formation in central part of Lurestan zone, northwest of Zagros, Iran. *Marine and Petroleum Geology*
- Mashhadi, Z. S., Rabbani, A. R., Kamali, M. R., Mirshahani, M., Khajehzadeh, A., 2015. Burial and thermal maturity modeling of the Middle Cretaceous–Early Miocene petroleum system, Iranian sector of the Persian Gulf. *Petroleum Science*. 12(3): 367–390
- Mazor, E., 2003. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. CRC Press. 460 pp
- Mohammadi, Z., Bagheri, R., Jahanshahi, R., 2010. *Hydrogeochemistry and geothermometry of*
- منابع دیگر غیر از انحلال هالیت است. در نمودار $Ca+Mg$ در مقابل SO_4+HCO_3 چشمه گوگردی دهلران نیز پراکنش نقاط را در بالاتر از خط تعادلی واقع شده که فرآیند تبادل کاتیونی معکوس را تأیید می‌کند. در نمودار $Ca+Mg$ در مقابل SO_4+HCO_3 چشمه گوگردی دوبرج پراکنش نقاط در مجاورت خط تعادلی واقع شده که فرآیند انحلال کلسیت، دولومیت و انیدریت را نشان می‌دهد. علیرغم وجود میدان‌های نفتی در منطقه مورد مطالعه، نسبت‌های SO_4/Cl ، Na/Cl ، نمودار ریتنهوس (نسبت TDS در مقابل Br) نشان می‌دهد که شوری آب این چشمه‌ها با شورابه‌های نفتی منطقه ارتباطی ندارد. بررسی ایزوتوپ‌های پایدار 2H و ^{18}O منشاء آب چشمه‌ها را از نزولات جوی نشان می‌دهد. مطالعات ایزوتوپی با استفاده از سولفور ۳۴ منشاء سولفات این چشمه‌ها را انحلال سازندهای تبخیری نشان می‌دهد. منشاء گاز سولفید هیدروژن فعالیت باکتری-های احیاء کننده سولفات می‌باشد.
- منابع
- مطیعی، ه.، ۱۳۷۲. زمین‌شناسی ایران- چینه‌شناسی زاگرس. سازمان زمین‌شناسی کشور. ۵۳۶ ص.
- ناصری، ح. ر.، محمدرزاده، ح.، سلامی، ه.، ۱۳۹۲. بررسی منشاء سولفات در تعدادی از چشمه‌های گوگردی زاگرس چین خورده با استفاده از ایزوتوپ سولفور (^{34}S). نخستین همایش ملی کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار، دانشگاه فردوسی مشهد.
- Avsar, O., Kurtulus, B., Gürsu, S., GencaliogluKus, G., Kacaroglu, F., 2016. Geochemical and isotopic characteristics of structurally controlled geothermal and mineral waters of Mugla (SW Turkey). *Geothermics journal*. 64: 249–265.
- Chandrasekharam, D. and Bundschuh, J., 2008. *Low-Enthalpy Geothermal Resources for Power Generation*. CRC Press LLC, Taylor & Francis Group.
- Clark, I. D., 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. Taylor & Francis Group, LLC, 456 p.
- Clark, I. D., and Fritz, P., 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 328 p.
- Drever, J.I., 1982. *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice-Hall, Inc
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim et Cosmochim. Acta*. 52: 2749–2765.
- Giggenbach, W.F., Minissale, A.A., Scandiffio, G., 1988. Isotopic and chemical assessment of geothermal potential of the Colli Albani area,

- geochemical techniques. The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology
- Rittenhouse, G., 1967. Bromine in oilfield-field waters and its use in determining possibilities of origin of these waters. *Am Assoc Petr Geol Bull.* 51: 2430–2440.
- Tian, J., Pang, Z., Guo, Q., Wang, Y., Li, J., Huang, T., Kong, Y., 2018. Geochemistry of geothermal fluids with implications on the sources of water and heat recharge to the Rekeng high-temperature geothermal system in the Eastern Himalayan Syntax. *Geothermics journal.* 74: 321-332.
- Wang, L., Wang, Y., Xu, C., An, Z., Wang, S., 2011. Analysis and evaluation of the source of heavy metals in water of the River Changjiang. *Environmental Monitoring and Assessment.* 173(1-4): 301-313.
- Whittemore, D.O., 1995. Geochemical differentiation of oilfield and gas brine from other saltwater sources contaminating water resources: case studies from Kansas and Oklahoma. *Environ. Geosci.* 2: 15-31.
- Zega, M., Rozic, B., Gabersek, M., 2015. Mineralogical, hydrogeochemical and isotopic characteristics of the Zveplenic sulphide karstic spring (Trebusa Valley, NW Slovenia). *Environmental Earth Sciences.*
- Changal thermal springs, Zagros region, Iran". *Geothermics.* 39: 242-249
- Mohammadzadeh, H. and Kazemi, M. 2015. Geothermal reservoir characteristics (T and depth) of Ayub peighambar and Shafa hot springs using geothermometers and environmental 2H and 18O isotopes, International symposium on isotope hydrology, 11-15 May 2015 Vienna, Austria
- Pasvanoğlu, S., Çelik, M., 2018. A conceptual model for groundwater flow and geochemical evolution of thermal fluids at the Kızılcahamam geothermal area, Galatian volcanic Province. *Geothermics journal.* 71: 845-856.
- Rafighdoust, Y., Eckstein, Y., Moussavi Harami, R., Mahmudy Gharaie, M. H., Griffith, E., Mahboubi, A., 2015. Isotopic analysis, hydrogeochemistry and geothermometry of Tang-Bijar oilfield springs, Zagros region, Iran. *Geothermics journal.* 55: 696-704.
- Richter, B., Kreitler, C., Bledsoe, W., 1993. *Geochemical Techniques for Identification Source of Groundwater Salinization.* CRC Press, New York, NY, USA, 272 pp.
- Richter B., Kreitler C., 1993. *Geochemical Techniques for identifying sources of ground-water salinization.* CRN Press Inc, Florida
- Richter, B., Kreitler C., 1991. *Identification of sources of ground-water salinization using*