



تأثیر نشت گاز دی‌اکسید کربن بر تحرک پذیری عناصر نادر در آبخوان‌های آبرفتی بخش شمالی استان همدان

بهزاد دلخواهی^۱، حمیدرضا ناصری^{۲*}، محمد نخعی^۳، فرشاد علیجانی^۴

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲- استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳- استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی
۴- استادیار گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
* نویسنده مسئول: nassery@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۰۹

چکیده

نشت گاز دی‌اکسید کربن با منشأ طبیعی از طریق چاه‌های آب به داخل چهار آبخوان آبرفتی همدان، رزن، کیمجان و چهاردولی در استان همدان، علاوه بر کاهش حدود یک واحدی pH و تغییر قابل ملاحظه پارامترهای فیزیکوشیمیایی و عناصر محلول، سبب افزایش غلظت عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی شده است. به منظور بررسی اثرات نشت دی‌اکسید کربن بر تحرک پذیری عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی، از ۱۹ حلقه چاه آب و یک چشمه هیدروترمال در مهر ماه ۱۳۹۷ نمونه‌برداری شد. عناصر نادری که مقدارشان در آب‌های گازدار افزایش یافته است بر اساس همبستگی با یون Cl به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل عناصر As, B, Li, Rb, Cs, Sr و V می‌باشد که در ارتباط با اختلاط آب‌های هیدروترمال شور و غنی از دی‌اکسید کربن با آب‌های منطقه می‌باشند. منشأ عناصر گروه دوم که شامل Al, Cr, Cu, Ba, Ni و Zn می‌باشند هوازدگی مواد داخل آبخوان است. عناصر نادر Hg, Se و Sn فاقد همبستگی با یون Cl می‌باشند و غلظت آن‌ها در آب‌های گازدار کاهش یافته است. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کاهش اثرات نشت دی‌اکسید کربن در آزادسازی عناصر نادر به داخل آبخوان شامل ظرفیت بالای خنثی‌کنندگی pH در مواد تشکیل دهنده آبخوان و گاز زدایی دی‌اکسید کربن از آب‌های گازدار در نزدیک سطح زمین و در نتیجه رسوب کانی‌های ثانویه می‌باشد. با این وجود، غلظت عناصر As, Mn, Fe و Hg و B در آب‌های گازدار همچنان بالاتر از حداکثر مجاز در استانداردهای سازمان بهداشت جهانی و ملی برای آب شرب است.

واژه‌های کلیدی: آب‌های هیدروترمال شور، ظرفیت خنثی‌کنندگی pH، گاز زدایی دی‌اکسید کربن، نشت دی‌اکسید کربن.

مقدمه

آب‌های گازدار با منشأ ماگمایی و عمیق، می‌توانند در طول گسل‌ها به سمت آبخوان‌های بالایی مهاجرت کرده و از طریق انحلال سنگ‌های میزبان حاوی عناصر نادر و یا دفع سطحی^۲ عناصر نادر موجود در سطح کانی‌ها، موجب افزایش غلظت آن‌ها در آب زیرزمینی شوند (آبیدوی و داس، ۲۰۱۸). کیم و همکاران، (۲۰۱۹). همچنین، عناصر نادر می‌توانند به صورت محلول در شورابه‌های غنی از دی‌اکسید کربن با منشأ عمیق، به داخل

انتشار طبیعی گاز دی‌اکسید کربن از داخل گوشته و یا نشت آن از مخزن‌های عمیق زیرزمینی در پروژه‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن^۱ (CCS) به داخل آبخوان، سبب کاهش pH و در نتیجه افزایش انحلال عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی می‌شود (آگنلی و همکاران، ۲۰۱۸). به عبارت دیگر،

² Desorption

¹ Carbon dioxide capture and storage

انسانی و حیوانی شده است (شکل ۱). منشأ گاز دی‌اکسید کربن و سایر گازهای خروجی از طریق چاه‌های آب و چشمه‌های منطقه، مربوط به فرآیندهای هیدروترمال بعد از فرورانش نفوتتیس به زیر بخش ایرانی صفحه اوراسیا می‌باشد (امیری و همکاران، ۲۰۱۷، روشنگ و همکاران، ۲۰۱۸). تاکنون مطالعات متعددی درباره منشأ عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی انجام شده است (اصغری مقدم و آدی گزل پور، ۱۳۹۵، نجاتی جهرمی و همکاران، ۱۳۹۶، فخری و همکاران، ۱۳۹۵، حسن‌زاده و عباس نژاد، ۱۳۹۷، رضوانی و همکاران، ۱۳۹۲). هدف اصلی در این مطالعه، علاوه بر منشأ عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی گازدار، بررسی نقش عواملی است که می‌تواند سبب کاهش اثرات نشت گاز دی‌اکسید کربن بر انحلال‌پذیری و آزادسازی عناصر نادر به داخل آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه شوند.

آبخوان‌های کم‌عمق راه پیدا کنند (کیتینگ و همکاران، ۲۰۱۰، کاروالو و همکاران، ۲۰۰۷، لوتر و همکاران، ۲۰۱۵، ویگلی و همکاران، ۲۰۱۳). تأثیر نشت گاز دی‌اکسید کربن بر انحلال و تحرک پذیری^۳ عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی تابع یکسری عواملی است که عبارتند از (۱) واکنش‌های مرتبط با خنثی‌سازی^۴ pH مانند انحلال کانی‌های کربناته، (۲) رقیق‌شدگی و اختلاط آب‌های اشباع از دی‌اکسید کربن با آب‌های فاقد گاز، (۳) وجود عناصر نادر در کانی‌های آبخوان و (۴) خروج عناصر نادر از آب به صورت رسوب کانی‌های ثانویه (کیتینگ و همکاران، ۲۰۱۰، ژنگ و همکاران، ۲۰۰۹). نشت گاز دی‌اکسید کربن از طریق چاه‌های آب در آبخوان‌های همدان، رزن، کمیجان و چهاردولی در استان همدان، علاوه بر افزایش شوری و تغییر رنگ و مزه آب زیرزمینی، سبب خوردگی پمپ و منصوبات چاه‌های بهره‌برداری، صدمه به محصولات کشاورزی و کاهش راندمان آن‌ها و حتی بروز تلفات



شکل ۱- اثرات نشت گاز دی‌اکسید کربن در منطقه مورد مطالعه. الف) ممنوعیت تردد در مجاورت مکان‌های نشت متمرکز گاز دی‌اکسید کربن در روستای همه کسی رزن. ب) خوردگی شدید و سوراخ‌شدگی لوله جدار در چاه‌های گازدار. ج) یک مزرعه سیب زمینی در دشت چهاردولی که با آب گازدار آبیاری شده است. د) یک مزرعه سیب زمینی در دشت چهاردولی که با آب فاقد گاز آبیاری شده است. فاصله چاه‌های گازدار و فاقد گاز مورد استفاده در دو مزرعه تنها ۴۵۰ متر می‌باشد.

⁴ pH buffering

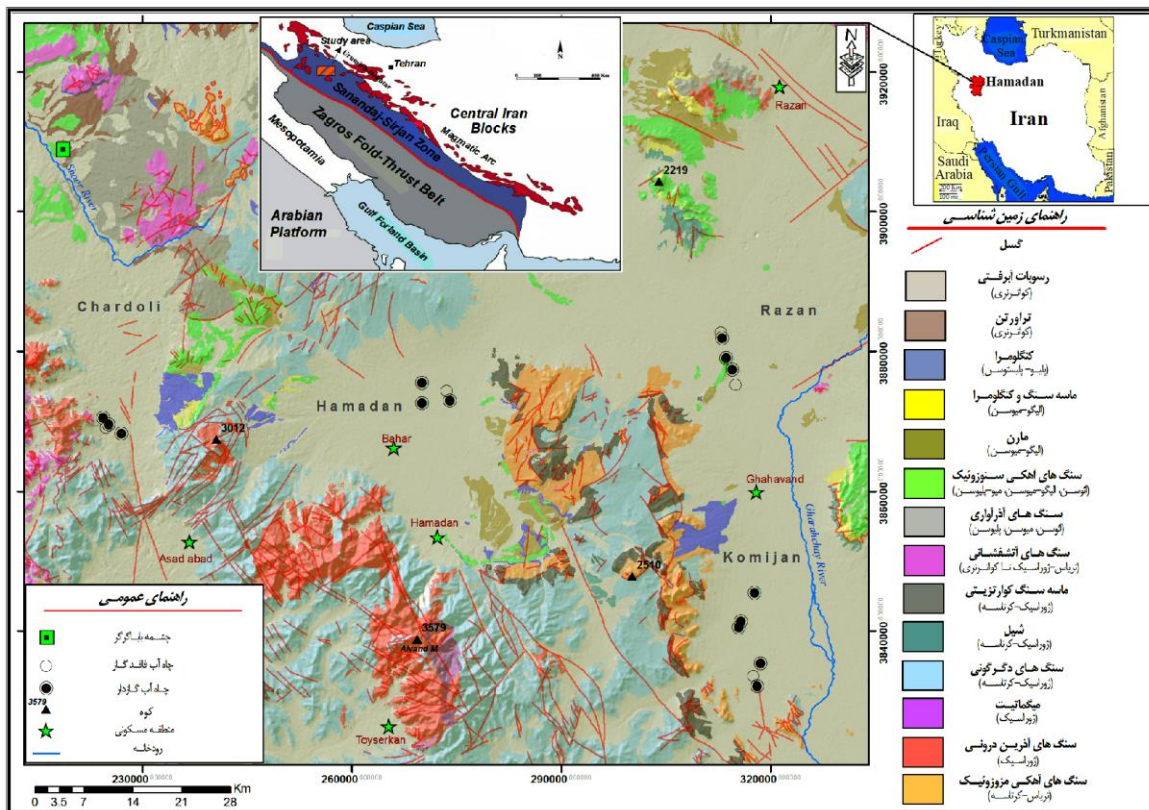
³ Mobility

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی

پایانی-کرتاسه آغازین سبب دگرگونی شدید سنگ‌های قدیمی و خروج منطقه از آب شده است (وجود کنگلومرای قاعده‌ای کرتاسه). پیدایش سنگ‌های دگرگونی درجه پائین (شیست همدان) و تشکیل دیوریت سیونیت آلموقولاق همدان مرتبط با این فاز کوهزایی است. ماگماتیسم و دگرگونی کرتاسه پایانی-پالئوسن (فاز کوهزایی لارامید) نیز سبب دگرگونی سنگ‌های آهکی کرتاسه و نفوذ توده گرانیتوئیدی الوند به داخل سنگ‌های ژوراسیک شده است. سنگ‌های دگرگونی مجاورتی مانند هورنفلس، اسکارن، شیست لکه دار و میگماتیت محصول نفوذ همین سنگ‌های آذرین درونی به داخل سنگ میزبان می‌باشند (شکل ۲). جوان‌ترین فاز چین‌خوردگی در دوره پلیوسن اتفاق افتاده و شکل کنونی منطقه را به وجود آورده است.

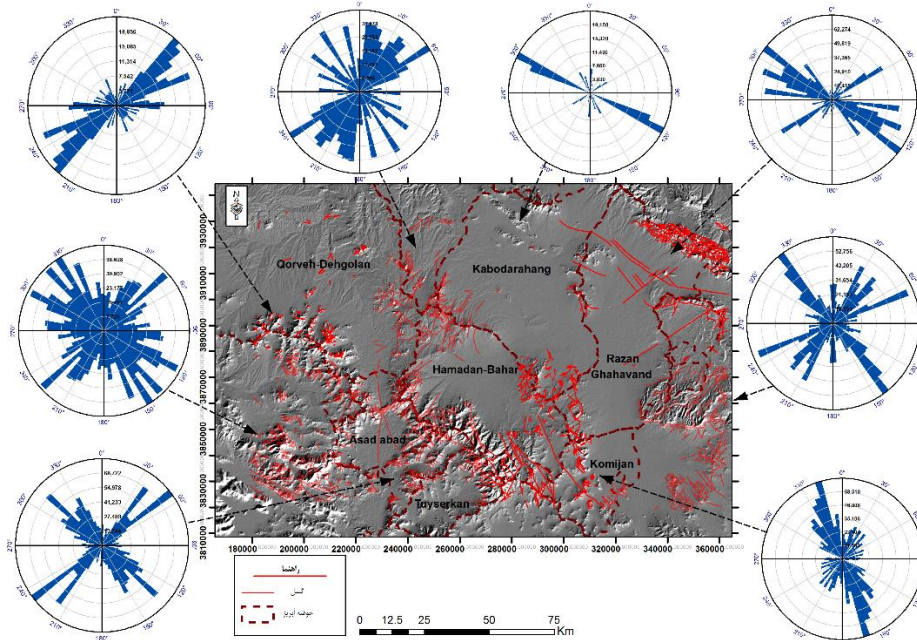
منطقه مورد مطالعه با وسعت حدود ۶۲۰۰ کیلومترمربع در نیمه شمالی استان همدان و محدوده‌های مطالعاتی همدان-بهار، رزن-قهاوند، کميجان و چهاردولی واقع شده است. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی کمر بند تکتونیکی و دگرگونی سنندج-سیرجان قرار دارد. به همین دلیل، بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه را سنگ‌های حاصل از دگرگونی ناحیه‌ای (شیست همدان) و حرارتی (شیست لکه‌دار، هورنفلس، مرمر، اسکارن و میگماتیت) می‌پوشانند (شکل ۲). عملکرد دو فاز کوهزایی مهم در منطقه مورد مطالعه قابل شناسایی می‌باشد. فاز کوهزایی سیمیرین پسین در ژوراسیک



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه.

جنوب غربی احتمالاً مربوط به فازهای کوهزایی قدیمی تر می باشند. سیستم گسل ها و درز و شکستگی منطقه می تواند نقش مؤثری در تغذیه آبخوان های آهکی و سازند سخت و احتمالاً انتقال سیالات با منشأ عمیق (ناشی از فعالیت های ماگمایی و گرمایی) به نواحی کم عمق و سطح زمین ایفا کنند. سنگ های آهکی تبلور مجدد یافته، مرمرهای دولومیتی شده و انواع شیست ها با سن تریاس-ژوراسیک، قدیمی ترین سازندهای زمین شناسی دارای رخنمون در منطقه می باشند. همچنین توده های آذرین نفوذی مانند باتولیت الوند (فاز کوهزایی کرتاسه-پالئوسن)، سنگ های آهکی ضخیم لایه کرتاسه، سنگ های آهکی-مارنی سازند قم (الیگو-میوسن) و تراورتن ها از جمله سایر سازندهای زمین شناسی مهم در منطقه می باشند.

همچنین فعالیت های ماگمایی اوایل کواترنر موجب پوشش وسیعی از یک پهنه بازالتی و آذرآواری مربوط به پلیستوسن در بخش های غربی منطقه مورد مطالعه شده است. با توجه به فعال بودن منطقه به لحاظ تکتونیکی، گسترش گسل های کوچک و بزرگ و شکستگی ها که گاهی درازای آن ها به چندین کیلومتر می رسد از شاخص های زمین شناسی منطقه به حساب می آید و به همین دلیل ارتباط واحدهای رسوبی به طور معمول گسله است. در شکل ۳ دیاگرام گل سرخی و موقعیت گسل های منطقه نشان داده شده است. بر این اساس، راستای عمومی گسل های اصلی شمال غربی-جنوب شرقی و شمال شرقی-جنوب غربی می باشد. گسل ها و شکستگی های با روند شمال غربی-جنوب شرقی هم راستا با زون سندج-سیرجان و در ارتباط با فاز کوهزایی لارامید می باشند. ولی گسل های با روند شمال شرقی-



شکل ۳- دیاگرام گل سرخی و موقعیت گسل های منطقه مورد مطالعه.

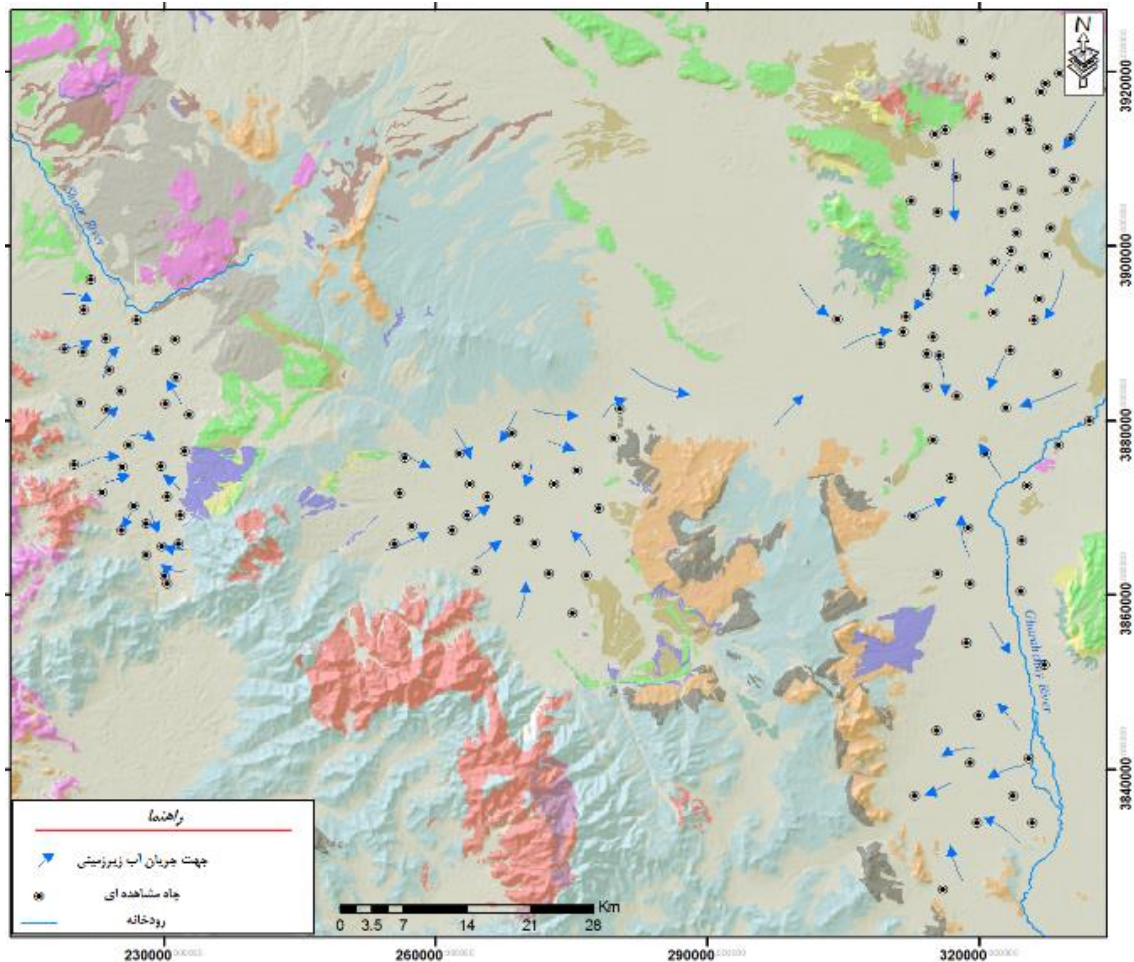
مورد مطالعه بین کمتر از ۵۰ متر تا بیش از ۲۵۰ متر می باشد. سنگ کف آبخوان های آبرفتی در دشت چهاردولی و بخش های وسیعی از دشت همدان از نوع شیست های تیره با سن ژوراسیک می باشد، ولی در بخش های شرقی منطقه مورد مطالعه

هیدروژئولوژی

بهره برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از طریق حفر چاه در آبخوان های آبرفتی و آهکی (سازند قم) صورت می گیرد. عمق چاه های حفر شده در چهار آبخوان آبرفتی

به واسطه توسعه درز و شکستگی‌های فراوان، از نفوذپذیری بالایی برخوردار هستند و هر جا که از درصد ناخالصی‌های مارنی کاسته شده است، شرایط لازم جهت تشکیل آبخوان کارستی به وجود آمده است (حوالی روستای همه کسی در دشت رزن). به استثناء اطراف روستای همه کسی در محدوده رزن-قهاوند که عوارض مشخصه مناطق کارستی به وضوح قابل مشاهده است در اکثر نواحی مورد بررسی کارست ایجاد شده از نوع کارست مدفون بوده که توسط ضخامت قابل توجهی از رسوبات آبرفتی پوشانده شده است. در شکل ۴ جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی مورد مطالعه نشان داده شده است (مهندسین مشاور رهاب سازه تدبیر، ۱۳۹۳؛ شرکت آب منطقه‌ای همدان، ۱۳۹۰، ۱۳۹۳ و شرکت آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۳).

(دشت‌های رزن و کمیجان)، سنگ‌های آهک تیره کرتاسه و سنگ‌های آهکی- مارنی الیگو- میوسن، سنگ کف آبخوان‌های آبرفتی را تشکیل می‌دهند. آبدهی چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان‌های آبرفتی بین کمتر از ۰/۵ لیتر در ثانیه تا بیش از ۷۰ لیتر در ثانیه متغیر است. در بخش‌هایی از دشت‌های رزن و کمیجان، چاه‌هایی که به سنگ کف آهکی برخورد کرده‌اند از آبدهی بیشتری برخوردار می‌باشند. بر اساس نتایج آزمایش پمپاژ، ضریب قابلیت انتقال در آبخوان آبرفتی همدان بین کمتر از ۵۰ تا ۶۸۰ مترمربع بر روز، در آبخوان رزن بین ۵۰ تا ۱۲۰۰ مترمربع بر روز، در آبخوان کمیجان بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ مترمربع بر روز و در آبخوان چهاردولی بین ۴۰۰ تا حداکثر ۱۵۰۰ مترمربع بر روز می‌باشد. سنگ‌های آهکی الیگو-میوسن (سازند قم)



شکل ۴- جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی منطقه مورد مطالعه.

نمونه‌برداری و آنالیز

آبخوان‌های آبرفتی، در بررسی عوامل مؤثر بر اثرات نشت دی‌اکسید کربن بر قابلیت تحرک فلزات در آب‌های زیرزمینی ضروری است، تعداد ۴۰ نمونه رسوب از اعماق مختلف چاه‌های در حال حفر در چهار دشت موردنظر و ۱۰ نمونه سنگ از سازندهای زمین‌شناسی احاطه کننده دشت‌ها در طول انجام این مطالعه، جمع‌آوری و مورد آنالیز XRD قرار گرفت.

پارامترهای فیزیکوشیمیایی (شامل دما، کل مواد جامد محلول، pH و اکسیژن محلول) با استفاده از دستگاه مالتی پارامتر قابل حمل شرکت WTW مدل ۳۳۲۰ در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد. آنالیز کاتیون‌ها، عناصر نادر و آنیون‌ها به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های ICP-OES، ICP-MS و IC در آزمایشگاه‌های موسسه ارزیابی زیست محیطی و تحقیقات آب و موسسه تحقیقات آب کاتالان واقع در شهر بارسلونا، کشور اسپانیا، انجام شد. دقت آنالیز تمامی یون‌های اصلی برابر با $\pm 2\%$ می‌باشد. آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات در همان روز نمونه‌برداری در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای همدان و با روش تیتراسیون با اسید نیتریک ۰/۰۱ نرمال آنالیز شد. همچنین نمونه‌های رسوب در آزمایشگاه XRD سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران و با استفاده از دستگاه Inel مدل EQUINOX 3000 مورد آنالیز قرار گرفتند.

نتایج و بحث

کانی‌شناسی

در جدول ۱ متوسط ترکیب کانی‌شناسی آبخوان‌های آبرفتی در چهار دشت مورد مطالعه ارائه شده است. بر این اساس، ترکیب کانی‌شناسی مواد تشکیل دهنده آبخوان‌های آبرفتی منطبق بر سازندهای زمین‌شناسی احاطه کننده دشت‌ها می‌باشد. بطوریکه کانی‌های کوارتز، موسکویت، اورتوکلاز و آل بیت جزء کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های آذرین و دگرگونی پیرامون دشت‌ها می‌باشند. همچنین کانی‌های کربناته کلسیت و دولومیت در ارتباط با سنگ‌های کربناته کرتاسه و الیگو-میوسن هستند.

به منظور انجام این مطالعه، از آب تعداد ۱۹ حلقه چاه بهره‌برداری، شامل ۱۴ حلقه چاه گازدار و ۵ حلقه چاه فاقد گاز و یک چشمه هیدروترمال (چشمه باباگرگر) در مهر ماه ۱۳۹۷ نمونه‌برداری گردید. موقعیت نمونه‌های برداشت شده در شکل ۲ نشان داده شده است. محل نمونه‌های آب به‌گونه‌ای انتخاب شده است تا در نواحی گازدار شده هر کدام از چهار دشت مورد مطالعه، حداقل از یک چاه گازدار و یک چاه فاقد گاز به عنوان شاهد وضعیت هیدروشیمی عمومی آبخوان نمونه‌برداری شود. چشمه باباگرگر به عنوان نماینده و بزرگ‌ترین منبع آبی هیدروترمال با منشأ ماگمایی در منطقه، به منظور مقایسه ترکیب شیمیایی و بررسی ارتباط آن با چاه‌های گازدار، مورد نمونه‌برداری قرار گرفت. علاوه بر این، به منظور تکمیل نمونه‌های شاهد، از نتایج آنالیز شیمیایی تعداد ۴۰ حلقه چاه انتخابی کیفی که توسط شرکت آب منطقه‌ای همدان (به عنوان منابع انتخابی کیفی) در مهر ماه ۱۳۹۶ نمونه‌برداری شده است نیز استفاده شد. برای نمونه‌برداری آب از بطری‌های پلی‌اتیلنی ۵۰ میلی‌لیتری استفاده شد. از محل هر چاه انتخابی، دو نمونه آب شامل یک نمونه برای آنالیز آنیون‌ها و دیگری برای کاتیون‌ها و فلزات نادر جمع‌آوری شد. نمونه‌های مربوط به هر دو بطری، با استفاده از فیلترهای سرسنگی ۰/۴۵ میکرون، فیلتر شدند و به نمونه‌های آب مربوط به کاتیون‌ها و فلزات نادر، به منظور تثبیت غلظت یون‌ها، اسید نیتریک اضافه شد. همچنین از بطری‌های پلی‌اتیلنی یک لیتری برای نمونه‌برداری جهت آنالیز یون‌های کربنات و بی‌کربنات محلول در آب‌های زیرزمینی استفاده شد. نمونه‌ها قبل از انجام آنالیز در دمای کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. علاوه بر جمع‌آوری نمونه‌های آب، پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب شامل درجه حرارت، pH، کل مواد جامد محلول^۵ (TDS) و اکسیژن محلول^۶ (DO) نیز در محل هر چاه اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه شناخت ترکیب کانی‌شناسی مواد تشکیل دهنده

⁶ Dissolved oxygen

⁵ Total dissolved solids

کانی‌های ثانویه نیز عمدتاً شامل کانی‌های کلریت و هماتیت می‌باشند که از هوازدگی شیمیایی کانی‌های موجود در سنگ‌های آذرین و دگرگونی به وجود آمده‌اند. طبق جدول ۱، به‌استثنا آبخوان چهاردولی، کلسیت به‌طور متوسط حدود ۲۷ تا ۳۰ درصد

جدول ۱- درصد وزنی متوسط کانی‌های تشکیل دهنده آبخوان‌های همدان، رزن، چهاردولی و کمبجان.

کانی	همدان	رزن	کمبجان	چهاردولی
کوارتز	40	30	34	38
کلسیت	27	27	30	15
موسکویت	20	24	21	20
آلبیت	13	9	8	20
اورتوکلاز	-	7	5	5
کانی‌های ثانویه	-	3	2	2

پارامترهای فیزیکو شیمیایی و یون‌های اصلی

۲۰۱۵). این در حالی است که مقدار SiO_2 در آب‌های زیرزمینی گازدار بیش از مقدار معمول و بین ۱۳/۳ تا ۴۳/۴ میلی‌گرم بر لیتر (با متوسط ۲۷/۵ میلی‌گرم بر لیتر) است. در خصوص یون‌های فرعی آهن (Fe) و منگنز (Mn)، در تمامی نمونه‌های گازدار، غلظت Fe بیشتر از حداکثر مطلوب برای مصارف شرب می‌باشد (استاندارد ۱۰۵۳، ۱۳۸۸). همچنین در ۳۶ درصد از نمونه‌های گازدار، غلظت منگنز بیشتر از حداکثر مجاز جهت مصارف شرب است (استاندارد ۱۰۵۳، ۱۳۸۸). با توجه به بالا بودن غلظت یون‌های Fe و Mn و غلظت متوسط نسبتاً کم اکسیژن محلول (۱/۲ میلی‌گرم بر لیتر)، به نظر می‌رسد یک شرایط احیایی با شدت متوسط^۸ در بخش‌های گازدار آبخوان‌های مورد مطالعه حاکم می‌باشد (هنسلو، ۱۹۹۵). به منظور شناخت بهتر تأثیر نشت گاز بر پارامترهای شیمیایی آب‌های زیرزمینی، میانگین هر یک از پارامترهای شیمیایی در نمونه‌های گازدار با نمونه‌های فاقد گاز در هر آبخوان مقایسه گردید و نمودار میله‌ای درصد تغییرات پارامترهای شیمیایی ترسیم شد. شکل ۵ درصد تغییرات pH، TDS و غلظت یون‌های اصلی در نمونه‌های آب گازدار را نشان می‌دهد. بر این اساس، به‌استثنای یون سولفات در آبخوان‌های همدان، رزن و کمبجان، غلظت سایر یون‌های اصلی

در جدول ۲ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب برای یون‌های اصلی و فرعی و پارامترهای فیزیکو شیمیایی ارائه شده است. بر این اساس، pH نمونه‌های گازدار بین ۵/۹ تا ۷/۳ می‌باشد که بیانگر شرایط خنثی تا کمی اسیدی است. فشار جزئی دی‌اکسید کربن (P_{CO_2}) در اتمسفر در حدود $10^{-3.7/4.3}$ بار^۷ می‌باشد. همچنین فشار جزئی دی‌اکسید کربن در آب زیرزمینی معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بزرگ‌تر از فشار جزئی دی‌اکسید کربن در اتمسفر می‌باشد (مکفرسون، ۲۰۰۹). در آبخوان‌های مورد مطالعه، فشار جزئی دی‌اکسید کربن محاسبه شده برای نمونه‌های آب گازدار بین $10^{-0.34}$ تا $10^{-1.52}$ بار است که در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیشتر از فشار جزئی دی‌اکسید کربن اتمسفر می‌باشد. با این وجود، هیچ‌گونه ناهنجاری حرارتی در آب‌های گازدار مشاهده نمی‌شود (۱۲/۵ تا ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد). در میان یون‌های اصلی، کاتیون‌های کلسیم (Ca) و سدیم (Na) و آنیون بی‌کربنات (HCO_3) دارای غلظت بیشتری نسبت به سایر یون‌ها در آب‌های گازدار می‌باشند. در مورد سیلیس (SiO_2)، مقدار معمول آن در آب‌های زیرزمینی بین ۱ تا ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و به‌طور متوسط ۱۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (هم، ۱۹۸۵؛ خان و همکاران،

⁸ Mildly reducing condition

⁷ Bar

و TDS در آب‌های زیرزمینی گازدار نسبت به آب‌های فاقد گاز منطقه افزایش یافته است. بیشترین افزایش غلظت مربوط به یون Na در آبخوان چهاردولی است (بیش از ۱۹۰۰ درصد) و کمترین آن مربوط به یون K در آبخوان همدان می‌باشد (۳ درصد). همچنین طبق شکل ۵، از میان آبخوان‌های مورد مطالعه، بیشترین تأثیر نشت دی‌اکسیدکربن بر کیفیت آب، در آبخوان چهاردولی و کمترین تأثیر در آبخوان همدان رخ داده است. طبق جدول ۱، کمترین میزان کلسیت مربوط به آبخوان چهاردولی است (۱۵ درصد) که باعث می‌شود تا این آبخوان از ظرفیت خنثی‌کنندگی pH کمتری نسبت به سایر آبخوان‌ها برخوردار باشد. همان‌طوری که انتظار می‌رود، بر اثر نشت گاز دی‌اکسید کربن به داخل آبخوان‌ها، pH آب‌های زیرزمینی کاهش یافته است، ولی میزان کاهش اندک pH (۱۰ درصد در آبخوان‌های چهاردولی و کمیجان، ۱۲ درصد در آبخوان رزن و ۱۷ درصد در آبخوان همدان)، متناسب با افزایش قابل ملاحظه غلظت یون‌ها و TDS نمی‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد بخش عمده افزایش یون‌های محلول در آب‌های گازدار، مربوط به منشأ دیگری مانند آب‌های شور و لب شوری است که همراه با گاز دی‌اکسید کربن از اعماق به داخل آبخوان‌های مورد مطالعه صعود نموده‌اند (در هر صورت بخشی از افزایش غلظت یون‌ها، همچنان مربوط به افزایش هوازدگی مواد آبخوان بر اثر کاهش pH آب می‌باشد).

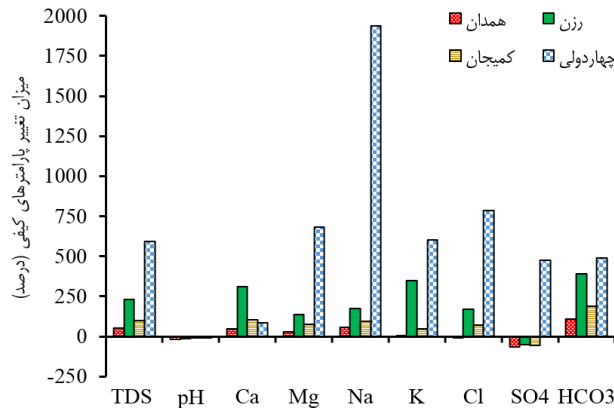
جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب برای یون‌های اصلی و فرعی و پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده در مهر ماه ۱۳۹۷

(فشار جزئی دی‌اکسید کربن بر حسب bar، درجه حرارت بر حسب °C و بقیه پارامترهای کیفی بر حسب mg/l).

شماره نمونه ^۱	آبخوان	pH	TDS	T	DO	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	SiO ₂	Fe	Mn	log(P _{CO2})
WH-G1	همدان	6.50	1620.30	16.70	1.50	202.06	84.41	116.79	1.16	1098.30	59.29	58.22	28.73	1.01	0.68	-0.54
WH-G2	همدان	5.94	701.40	15.10	1.95	102.39	27.10	53.12	0.88	457.63	29.86	30.43	27.06	2.14	0.44	-0.35
WH-G3	همدان	6.43	1067.30	12.50	1.20	123.29	55.45	114.38	1.98	579.66	53.84	138.74	16.42	1.55	0.11	-0.76
WH-B4	همدان	7.49	1109.40	13.90	8.31	114.62	79.73	107.49	2.39	549.15	88.81	167.18	15.49	0.01	0.07	-1.84
WR-G1	رزن	6.60	3272.40	17.90	1.04	418.14	89.72	395.48	2.33	1952.54	141.46	272.79	26.80	5.31	0.09	-0.40
WR-G4	رزن	6.47	2670.10	18.80	1.14	329.82	76.23	329.06	2.12	1464.40	115.63	352.86	19.20	2.25	0.05	-0.39
WR-G5	رزن	6.91	5835.30	18.40	0.86	657.84	212.56	683.26	17.56	3355.92	93.43	814.66	13.27	14.27	0.15	-0.46
WR-B2	رزن	7.33	1664.90	16.70	5.53	97.32	37.99	380.72	0.96	732.20	181.67	233.97	15.99	0.05	0.02	-1.55
WR-B3	رزن	7.55	1749.70	16.00	5.97	114.02	58.42	353.20	1.42	793.22	202.47	226.98	14.75	0.03	<0.01	-1.74
WK-G1	کمیجان	7.28	1334.40	18.50	0.80	76.52	40.55	269.14	0.48	671.18	131.42	145.24	19.57	3.79	0.06	-1.52
WK-G3	کمیجان	6.47	1986.00	20.50	0.36	266.58	78.05	176.52	1.32	1342.37	35.04	86.05	29.01	6.41	0.85	-0.41
WK-G4	کمیجان	6.47	2406.30	20.70	0.28	334.22	83.79	212.90	2.57	1586.44	61.11	125.32	32.21	7.51	0.08	-0.34
WK-G5	کمیجان	6.53	4490.20	18.40	1.46	359.18	164.60	738.38	3.45	1952.54	140.70	1131.28	25.51	4.41	0.06	-0.34
WK-G6	کمیجان	6.78	2264.10	20.40	4.30	314.36	84.78	205.46	2.19	1464.40	65.82	126.98	31.05	1.63	0.02	-0.68
WK-B2	کمیجان	7.83	877.80	18.30	6.45	88.21	28.65	142.63	0.79	427.12	60.19	130.34	17.45	0.09	0.01	-2.26
WC-G1	چهاردولی	6.78	3121.30	18.10	0.04	167.89	247.86	363.94	1.81	2013.55	81.41	244.78	34.54	5.47	2.72	-0.57
WC-G2	چهاردولی	6.89	1895.40	17.30	1.14	131.40	68.37	315.82	6.90	1159.32	51.01	162.61	37.69	1.29	0.87	-0.90
WC-G4	چهاردولی	6.73	1815.60	17.60	0.11	4.31	105.48	334.94	1.62	1220.34	45.02	103.97	43.38	1.59	1.44	-0.72
WC-B4	چهاردولی	7.92	344.30	16.30	8.82	59.29	12.87	13.93	0.22	244.07	5.02	8.91	23.32	0.02	0.01	-2.58
SP-G1	باباگرگر	6.88	25433.90	16.50	1.02	436.69	122.13	7038.00	759.00	5979.65	108.07	10990.43	60.12	24.88	0.11	-0.27

^۱ نمونه آب گازدار (G) و فاقد گاز (B).

^۲ با استفاده از نرم افزار PHREEQC محاسبه شده است.



شکل ۵- میزان تغییر پارامترهای کیفی در آب‌های زیرزمینی بر اثر نشت گاز.

عناصر نادر

ملی شماره ۱۰۵۳ (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۸) می‌باشد.

علاوه بر هوازنگی سنگ‌های محتوی این عناصر، فعالیت‌های هیدروترمال، شورابه‌ها، فاضلاب‌های صنعتی، معدنی و شهری، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی مورد استفاده در فعالیت‌های کشاورزی از جمله منابع طبیعی و بشرزاد مشترک برای عناصر فوق‌الذکر در آب‌های زیرزمینی می‌باشند (سازمان زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷، هنسلو، ۱۹۹۵، کوچکدان و همکاران، ۲۰۱۵، رون اسکرافت و همکاران، ۲۰۰۴، نگرل، ۲۰۰۴، شانکار و همکاران، ۲۰۱۴، ساها و همکاران، ۲۰۱۹، اکدال، ۲۰۰۹). از طرفی پویا بودن منطقه مورد مطالعه به لحاظ تکتونیکی و فعالیت‌های هیدروترمال از جمله وجود گسل‌های فراوان و گسترش سنگ‌های دگرگونی (شکل‌های ۲ و ۳)، وجود چشمه‌های تراورتن ساز ترموژنیک (مانند چشمه‌های باباگرگر و گاور گلی در شمال و شمال غربی منطقه) و کانسارهای فلزی هیدروترمال (مانند کانسار ساریگونی)، احتمال منشأ زمین‌زاد عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی منطقه را تقویت می‌کند. با این وجود، افزایش غلظت عناصر نادر در آب‌های گازدار می‌تواند ناشی از دو عامل افزایش هوازنگی کانی‌های موجود در آبخوان و یا انتقال این عناصر از طریق آب‌های شور اشباع از گاز دی‌اکسید کربن به داخل آبخوان باشد.

عناصر نادر غالباً در سیلیکات‌ها حضور دارند ولی با کانی‌های کربناته و تبخیری نیز می‌توانند در ارتباط باشند (دین، ۱۹۷۸، فاسوینکل و همکاران، ۲۰۱۳، اکبری و همکاران، ۱۳۹۸). حضور عناصر نادر در آب زیرزمینی توسط هوازنگی کانی‌ها و چندین فرآیند ژئوشیمیایی مانند تبادل یونی، انحلال-رسوبگذاری، جذب و دفع سطحی و واکنش‌های بیولوژیکی کنترل می‌شود (مورا و همکاران، ۲۰۱۷، ژوراولف و همکاران، ۲۰۱۶). در جدول ۳ نتایج آنالیز عناصر نادر در نمونه‌های آب مورد مطالعه ارائه شده است. بر این اساس، غلظت اکثر عناصر نادر، به‌استثنای Hg، Se و Sn در نمونه‌های آب گازدار نسبت به نمونه‌های فاقد گاز افزایش یافته است. ضمن اینکه غلظت عناصر نادر Hg، Sr و Li در نمونه‌های فاقد گاز مورد بررسی بیش از مقدار معمول این عناصر در آب‌های طبیعی است (هنسلو، ۱۹۹۵، نگرل، ۲۰۰۴، اکدال، ۲۰۰۹). از میان عناصر نادر موجود در آب‌های گازدار، غلظت عناصر B (۳۴۰ تا بیش از ۱۲۰۰۰ میکروگرم بر لیتر)، Sr (۴۷ تا بیش از ۴۷۳۰۰ میکروگرم بر لیتر) و Li (۲۲ تا ۱۱۱۲ میکروگرم بر لیتر) بیشتر از بقیه می‌باشد. همچنین مقدار برخی از عناصر نادر موجود در آب‌های گازدار مورد بررسی شامل عناصر B، As، Hg و Al بیشتر از حداکثر مجاز این عناصر طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO، ۲۰۱۷) و استاندارد

جدول ۳- نتایج آنالیز عناصر نادر در نمونه‌های آب گازدار و فاقد گاز در چهار آبخوان مورد مطالعه (تمام غلظت‌ها بر حسب $\mu\text{g/l}$).

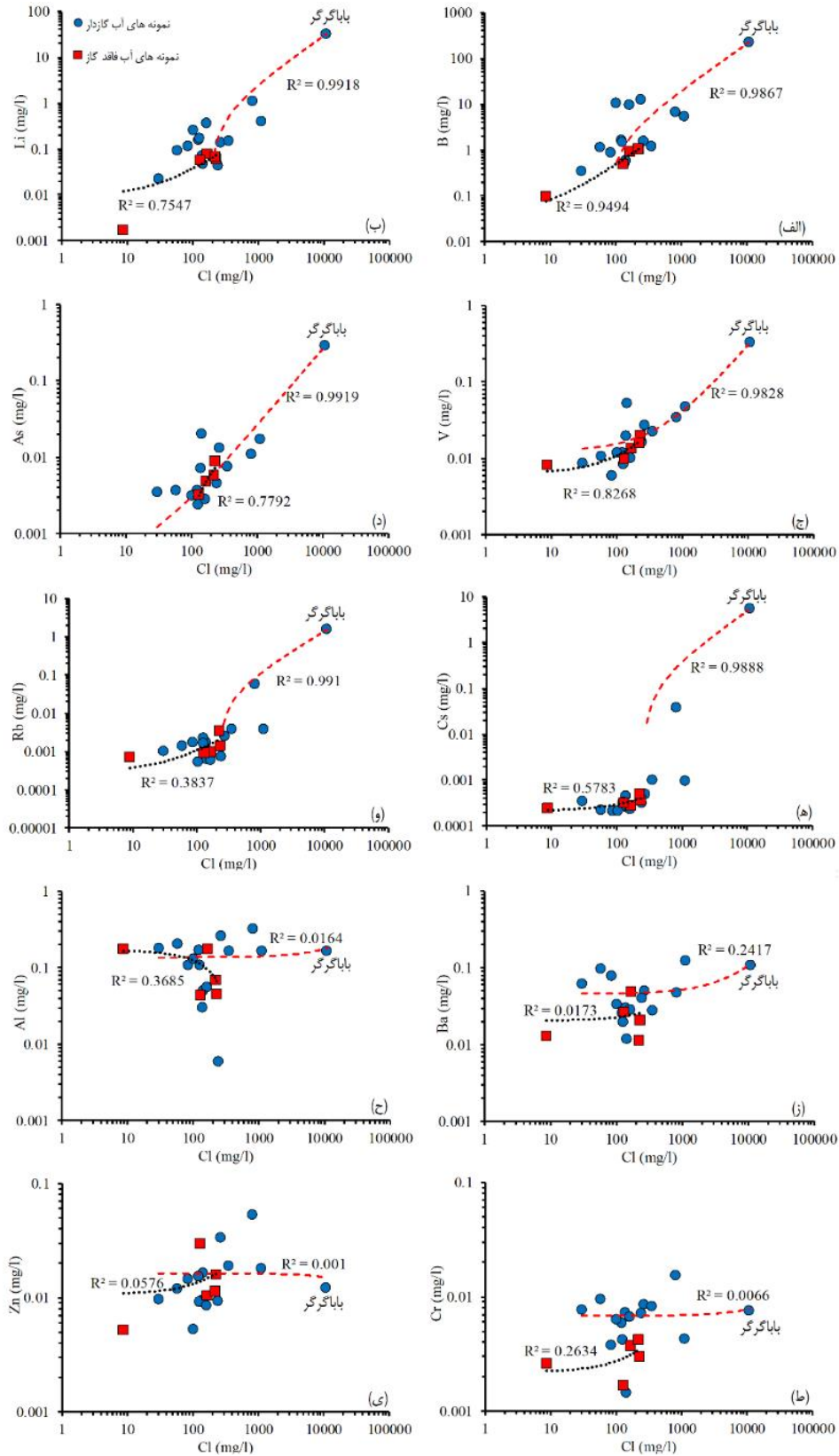
شماره نمونه ^۱	آبخوان	Li	B	Sr	As	Hg	V	Al	Ba	Zn	Rb	Cs	Cd	Pb	Cr	Ni	Se	Cu	Sn
WH-G1	همدان	92.00	1124.00	3268.00	3.70	13.80	10.60	202.00	96.00	11.90	1.40	0.22	<0.10	0.63	9.52	28.40	2.99	1.20	14.80
WH-G2	همدان	22.00	340.00	1249.00	3.50	3.00	8.60	179.00	61.20	9.60	1.00	0.34	<0.10	<0.50	7.69	24.80	2.75	1.60	33.30
WH-G3	همدان	71.00	509.00	2085.00	7.20	50.00	19.60	30.00	30.30	9.50	1.71	0.44	<0.10	2.06	7.21	19.50	3.64	1.27	33.10
WH-B4	همدان	76.00	913.00	2488.00	4.80	4.00	13.40	175.00	48.40	10.30	0.97	0.28	<0.10	1.19	3.74	20.00	6.64	1.09	60.70
WR-G1	زن	136.00	1541.00	3911.00	13.00	7.00	27.10	256.00	50.00	33.60	2.55	0.50	<0.10	1.06	8.57	49.50	8.39	16.04	90.80
WR-G4	زن	150.00	1214.00	3728.00	7.50	1.80	22.50	163.00	28.00	18.80	3.89	0.98	<0.10	1.24	8.23	39.80	8.81	2.32	29.20
WR-G5	زن	1112.00	6599.00	3933.00	11.00	9.00	34.20	316.00	46.80	52.50	57.30	38.20	<0.10	0.70	15.20	69.30	3.63	1.95	60.90
WR-B2	زن	60.00	1051.00	1816.00	8.80	13.00	19.40	45.00	20.70	15.90	1.39	0.36	<0.10	<0.50	2.98	17.10	14.58	2.46	42.60
WR-B3	زن	67.00	1036.00	2470.00	5.80	1.32	16.00	69.00	11.30	11.30	3.49	0.49	<0.10	<0.50	4.20	17.60	9.90	1.68	59.00
WK-G1	کمیجان	47.00	582.00	876.00	20.00	2.00	52.00	50.00	11.90	16.40	0.62	0.25	0.17	0.61	1.44	48.40	5.18	1.79	49.50
WK-G3	کمیجان	113.00	886.00	2627.00	<2.00	1.70	6.00	107.00	77.90	14.40	1.74	0.21	<0.10	<0.50	3.75	46.10	2.72	1.15	33.60
WK-G4	کمیجان	155.00	1598.00	2112.00	3.70	7.50	11.90	169.00	25.70	15.20	2.21	0.33	<0.10	<0.50	5.90	48.10	5.39	1.44	65.90
WK-G5	کمیجان	399.00	5304.00	5322.00	17.00	7.80	46.70	166.00	123.00	18.00	3.88	0.97	<0.10	0.51	4.26	48.40	8.21	2.95	36.00
WK-G6	کمیجان	174.00	1458.00	2586.00	2.40	3.30	8.40	107.00	19.60	9.20	1.64	0.27	<0.10	<0.50	4.20	56.80	4.83	1.75	72.80
WK-B2	کمیجان	55.00	489.00	1051.00	3.20	9.00	9.80	44.00	26.00	29.60	0.93	0.32	1.35	0.52	1.68	16.00	5.73	1.40	<2.00
WC-G1	چهاردولی	43.00	12608.00	2479.00	4.50	1.50	16.20	6.00	39.80	9.40	0.75	0.32	<0.10	0.63	7.12	27.10	4.12	1.72	29.70
WC-G2	چهاردولی	366.00	9482.00	961.00	2.80	5.00	10.20	55.00	28.10	8.50	0.61	0.23	<0.10	0.50	6.65	19.40	1.62	2.18	78.50
WC-G4	چهاردولی	250.00	10359.00	47.00	3.10	24.00	11.70	130.00	33.20	5.30	0.55	0.21	<0.10	0.71	6.30	20.60	1.01	1.77	<2.00
WC-B4	چهاردولی	1.70	95.00	349.00	<2.00	38.00	8.10	173.00	12.70	5.20	0.70	0.24	<0.10	<0.50	2.60	8.50	1.03	0.35	50.20
SP-G1	باباگرگر	32290.00	226200.00	7486.00	286.00	4.40	329.00	166.00	107.00	12.20	1541.00	5325.00	<0.10	<0.50	7.50	13.00	18.70	9.05	152.00
	WHO	-	2400.00	-	10.00	6.00	-	-	1300.00	-	-	-	3.00	10.00	50.00	70.00	40.00	2000.00	-
	ISIRI	-	500.00	-	10.00	6.00	100.00	200.00	700.00	-	-	-	3.00	10.00	50.00	70.00	10.00	2000.00	-

^۱ نمونه آب گازدار (G) و فاقد گاز (B).

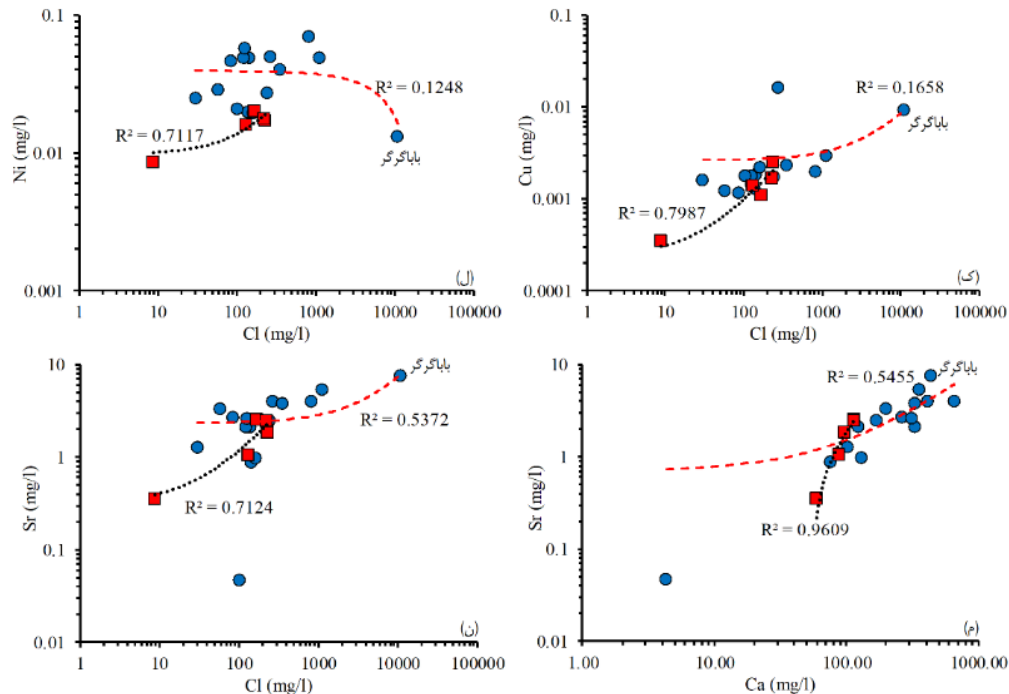
گازدار، فاقد همبستگی با یون Cl می‌باشند. به عبارت دیگر، افزایش غلظت آن‌ها در آب‌های گازدار ارتباطی با نفوذ آب‌های شور گازدار به داخل آبخوان ندارد و احتمالاً ناشی از انحلال و هوازدگی مواد تشکیل دهنده آبخوان می‌باشد. یکی از روش‌های تشخیص آب‌های هیدروترمال و عمیق از آب‌های زیرزمینی کم عمق که از نفوذ آب باران تغذیه می‌شوند، اندازه‌گیری میزان عنصر Cs محلول در آن‌ها است. بطوریکه آب‌های هیدروترمال دارای بالاترین غلظت و آب‌های با تغذیه سطحی، محتوی کمترین میزان سزیم می‌باشند (ماتوران و همکاران، ۲۰۱۴). در چشمه باباگرگر که یک چشمه هیدروترمال شور می‌باشد (با TDS بیش از ۲۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، بالاترین میزان Cs برابر با ۵۳۲۵ میکروگرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. در حالی که در چاه‌های آب فاقد گاز (با TDS بین ۳۴۴ تا ۱۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر)، مقدار این عنصر کمتر از ۰/۵ میکروگرم بر لیتر می‌باشد. در نمونه آب چاه‌های گازدار نیز مقدار Cs مابین دو مقدار فوق‌الذکر است که می‌تواند بیانگر اختلاط آب‌های شور و گازدار عمیق محتوی عناصر نادر (مانند Cs) با آب‌های زیرزمینی مورد مطالعه باشد.

در شکل ۶ همبستگی عناصر نادر با یون Cl نشان داده شده است. بر این اساس، عناصر نادری که مقدار آن‌ها در آب‌های گازدار افزایش یافته است به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل عناصر Li, B, As, Rb, Cs, V و Sr می‌باشد. این عناصر دارای همبستگی قوی با یون Cl می‌باشند و عمدتاً میزان این همبستگی در آب‌های گازدار نسبت به آب‌های فاقد گاز افزایش یافته است.

این بدان معنی است که عناصر این گروه احتمالاً از طریق آب‌های شور عمیق که غنی از دی‌اکسید کربن هستند به داخل آب‌های زیرزمینی منطقه منتقل شده‌اند. البته در مورد Sr علی‌رغم وجود همبستگی مثبت با یون Cl، از میزان همبستگی آن در آب‌های گازدار نسبت به آب‌های فاقد گاز کاسته شده است (شکل ۶-ن). شکل ۶-م نشان می‌دهد که افزایش Sr در آب‌های گازدار تنها مربوط به آب‌های شور نفوذ کرده به داخل آبخوان نبوده بلکه بخشی از آن، با توجه به ارتباط تنگاتنگ فلزات قلیایی خاکی با یکدیگر، در ارتباط با یون کلسیم و فرآیند انحلال و رسوب‌گذاری کربنات‌ها به ویژه کانی کلسیت می‌باشد. گروه دوم شامل عناصر Al, Ba, Zn, Cu, Cr و Ni می‌باشند. عناصر این گروه در آب‌های



شکل ۶- بررسی همبستگی عناصر نادر با یون Cl در نمونه‌های آب فاقد گاز و گازدار منطقه مورد مطالعه.



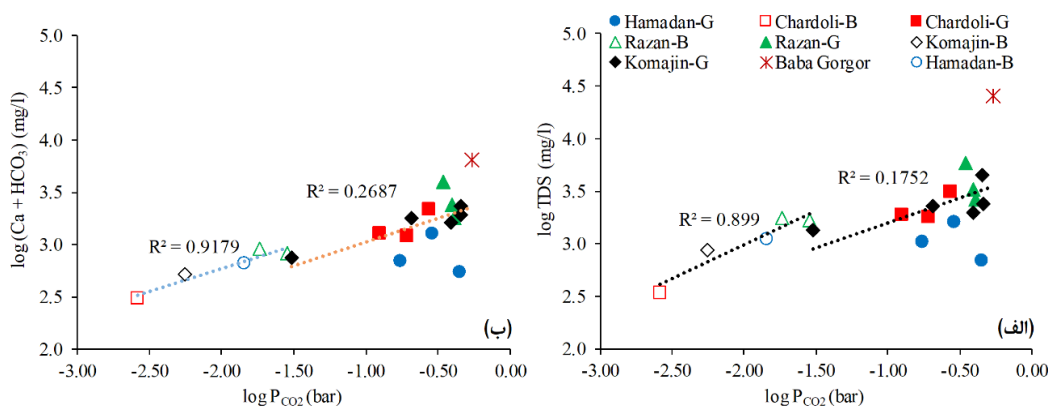
ادامه شکل ۶. عوامل مؤثر بر اثرات نشت دی‌اکسید کربن بر تحرک پذیری عناصر نادر

موجود در آبخوان را فراهم می‌کنند. بدیهی است هرچه میزان دی‌اکسید کربن محلول در آب تغذیه‌کننده آبخوان بیشتر باشد انحلال مواد تشکیل دهنده آبخوان بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان غلظت مواد محلول در آب افزایش می‌یابد. بر این اساس، شکل ۷ نشان می‌دهد که در نمونه‌های آب فاقد گاز، به دلیل انحلال و هوازدگی مواد آبخوان، TDS و غلظت یون‌های اصلی دارای همبستگی مستقیم (مثبت) با فشار جزئی دی‌اکسید کربن (P_{CO_2}) می‌باشند. اما در مورد نمونه‌های آب گازدار، علیرغم افزایش غلظت اکثر یون‌ها و TDS نسبت به نمونه‌های معمولی، همبستگی آن‌ها با فشار جزئی دی‌اکسید کربن به شدت کاهش یافته است (شکل ۷). در واقع، ظرفیت بالای خنثی‌کنندگی pH در آبخوان‌های مورد مطالعه، مانع از کاهش قابل ملاحظه pH آب بر اثر نشت دی‌اکسید کربن شده است. بنابراین، به نظر می‌رسد شوری و غلظت بالای یون‌های اصلی در آب‌های زیرزمینی گازدار منطقه، تنها ناشی از هوازدگی کانی‌های موجود در آبخوان نبوده و احتمالاً بخش عمده آن از طریق آب‌های شور و عمیق گازدار

یکی از عوامل مؤثر بر اثرات نشت دی‌اکسید کربن به داخل آبخوان، میزان خاصیت خنثی‌کنندگی pH در مواد تشکیل دهنده آبخوان می‌باشد. به‌طور کلی، نشت گاز دی‌اکسید کربن به داخل آبخوان، از طریق تولید اسید کربنیک (H_2CO_3)، سبب کاهش pH آب زیرزمینی می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۹). بر اساس نتایج به دست آمده، pH آب‌های زیرزمینی گازدار در مقایسه با آب‌های زیرزمینی فاقد گاز در منطقه مورد مطالعه، به‌طور متوسط تنها یک واحد کاهش یافته است (جدول ۲). همچنین بر اساس نتایج آزمایش XRD، کانی‌های کربناته کلسیت و دولومیت در میان کانی‌های اصلی تشکیل دهنده آبخوان‌های آبرفتی منطقه قرار دارند (جدول ۱). بنابراین، آبخوان‌های مورد مطالعه سیستم‌هایی با خاصیت خنثی‌کنندگی بالا می‌باشند. آب باران و سایر جریان‌های سطحی نفوذ کرده به داخل خاک، پس از انحلال گاز دی‌اکسید کربن تولید شده در منطقه خاک (ناشی از تنفس ریشه گیاهان و تجزیه مواد آلی)، نهایتاً به سطح ایستابی رسیده و اسید کربنیک لازم جهت هوازدگی و انحلال کانی‌های

اثرات نشت دی‌اکسید کربن بر کیفیت آب و کاهش pH می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۵).
در منطقه مورد مطالعه، نشت گاز دی‌اکسید کربن به داخل آبخوان‌های آبرفتی، صرفاً از طریق چاه‌های بهره‌برداری و به صورت متمرکز (نقطه‌ای) انجام می‌شود. همچنین، در جدول ۴ بر اساس گرادیان و هدایت هیدرولیکی متوسط در نواحی گازدار آبخوان‌های آبرفتی مورد مطالعه، جریان متوسط آب زیرزمینی برآورد شده است.

نفوذ کرده به داخل آبخوان تأمین می‌شود. عامل دیگری که می‌تواند بر اثرات نشت دی‌اکسید کربن بر کیفیت آب‌های زیرزمینی تأثیر بگذارد، اختلاط و رقیق‌شدگی آب‌های گازدار با آب‌های منطقه (فاقد گاز) می‌باشد.
اگر مکانیسم نشت دی‌اکسید کربن به داخل آبخوان از نوع انتشاری باشد و میزان جریان آب زیرزمینی از میزان نشت گاز به داخل آبخوان بیشتر باشد، در این صورت اختلاط و رقیق‌شدگی آب زیرزمینی گازدار با آب‌های منطقه باعث کاهش



شکل ۷- ارتباط فشار جزئی دی‌اکسید کربن با (الف) TDS و (ب) $(Ca + HCO_3)$ در نمونه‌های آب فاقد گاز (B) و گازدار (G) چهار آبخوان مورد مطالعه. کاهش همبستگی P_{CO_2} با TDS و یون‌های اصلی در نمونه‌های آب گازدار، بیانگر ظرفیت خنثی‌کنندگی pH بالای مواد آبخوان می‌باشد.

جدول ۴- جریان متوسط آب زیرزمینی در پیرامون چاه‌های گازدار بر اساس گرادیان هیدرولیکی حاصل از نقشه تراز آب زیرزمینی و هدایت

هیدرولیکی حاصل از آزمایش‌های پمپاژ و دانه‌بندی رسوبات آبخوان

جریان آب زیرزمینی (m/day)	گرادیان هیدرولیکی	هدایت هیدرولیکی (m/day)	آبخوان
0.11	0.009	12	همدان
0.18	0.012	15	چهاردولی
0.7	0.014	5	رزن
0.06	0.007	8	کمیجان

اصلی و فرعی در چاه‌های گازدار و نزدیک‌ترین چاه‌های فاقد گاز واقع در پیرامون آن‌ها، نشان می‌دهد که ظرفیت خنثی‌کنندگی pH بسیار بالای آبخوان‌ها، از گسترش هاله آلودگی و آب‌های گازدار به سمت پایین دست جریان جلوگیری کرده و تنها منطقه محدودی در اطراف چاه‌های گازدار به صورت محلی تحت تأثیر اثرات نشت گاز قرار می‌گیرد (جدول ۵).

بر این اساس، علیرغم عدم اندازه‌گیری میزان نشت گاز دی‌اکسید کربن از طریق چاه‌های گازدار به داخل آبخوان، سرعت جریان آب زیرزمینی در مناطق گازدار (۰/۰۶ تا ۰/۱۸ متر بر روز) به اندازه‌ای کم است که به نظر نمی‌رسد بتواند سبب ترقیق و کاهش اثرات نشت گاز بر شیمی آب زیرزمینی شود. با این وجود، اختلاف زیاد فشار جزئی دی‌اکسید کربن و غلظت اکثر یون‌های

جدول ۵- مقایسه ترکیب شیمیایی آب در چاه‌های گازدار با نزدیک‌ترین چاه‌های فاقد گاز در چهار آبخوان مورد مطالعه (P_{CO_2} بر حسب bar و

غلظت یون‌ها بر حسب mg/l).

نمونه ^۱	فاصله (m)	TDS	pH	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	log (P_{CO_2})
WH-G3	-	1067.30	6.43	123.29	55.45	114.38	1.98	579.66	53.84	138.74	-0.76
WH-B2	376	492.70	7.51	3.30	3.00	1.70	0.02	4.50	2.00	1.40	-2.14
WC-G4	-	1815.60	6.73	4.31	105.48	334.94	1.62	1220.34	45.02	103.97	-0.72
WC-B4	585	344.30	7.92	59.29	12.87	13.93	0.22	244.07	5.02	8.91	-2.58
WR-G1	-	3272.40	6.60	418.14	89.72	395.48	2.33	1952.54	141.46	272.79	-0.40
WR-B2	880	1664.90	7.33	97.32	37.99	380.72	0.96	732.20	181.67	233.97	-1.55
WK-G5	-	4490.20	6.53	359.18	164.60	738.38	3.45	1952.54	140.70	1131.28	-0.34
WK-B3	325	1447.20	7.15	7.90	5.60	8.60	0.05	11.10	4.50	6.20	-1.39

۱ نمونه آب گازدار (G) و فاقد گاز (B).

کربن، pH آب افزایش یافته و در نتیجه فلزات نادر به صورت کانی‌های ثانویه کربناته و اکسید آهن رسوب می‌کند. این پدیده به صورت تشکیل رسوبات آهنی و اکسی-هیدروکسیدهای قرمز رنگ آهن در دهانه لوله‌های آبد و مسیر انتقال آب چاه‌های گازدار در منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص است. به منظور بررسی دقیق‌تر این پدیده، از رسوبات تشکیل شده در دهانه یکی از چاه‌های گازدار واقع در دشت رزن نمونه‌برداری (نمونه WR-G5) و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. در جدول ۶ نتایج آنالیز عناصر نادر در رسوب و آب چاه گازدار مذکور ارائه شده است. بر این اساس، نسبت غلظت فلزات به یون کلر در نمونه رسوب بین ۲۴ برابر (Hg/Cl) تا حدود ۴۰ هزار برابر (Al) بیشتر از این نسبت در نمونه آب چاه مورد نظر می‌باشد. این اختلاف زیاد در نسبت فلزات نادر، بیانگر رسوب بخش قابل ملاحظه‌ای از فلزات محلول در آب بر اثر پدیده گاز زدایی دی‌اکسید کربن و افزایش pH آب خروجی از چاه می‌باشد. در واقع، گاز زدایی دی‌اکسید کربن، باعث کاهش اثرات نشت دی‌اکسید کربن بر تحرک پذیری عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی گازدار منطقه مورد مطالعه شده است.

یکی دیگر از عواملی که می‌تواند بر اثرات نشت گاز دی‌اکسید کربن در تحرک پذیری عناصر نادر تأثیرگذار باشد وجود عناصر نادر در کانی‌های داخل آبخوان می‌باشد (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۹). به دلیل گسترش سنگ‌های آذرین و دگرگونی، وجود فعالیت‌های هیدروترمال و معادن سولفید فلزی (مانند معدن طلای ساریگونی و تعدادی معدن آهن) در منطقه مورد مطالعه، غلظت برخی از عناصر نادر مانند جیوه، لیتیوم و استرانسیوم در آب‌های زیرزمینی بالاتر از مقدار معمول در آب‌های طبیعی است که این مسئله تأثیر نشت دی‌اکسید کربن بر تحرک پذیری این عناصر در آب‌های زیرزمینی منطقه را با مشکل مواجه می‌کند. در چنین مواقعی استفاده از مطالعات ایزوتوپی می‌تواند راهگشا باشد. زمانی که آب زیرزمینی اشباع از گاز به سمت سطح زمین صعود می‌کند (یا پمپاژ می‌شود)، بر اثر کاهش فشار هیدرواستاتیک، از میزان انحلال گاز دی‌اکسید کربن در داخل آب کاسته شده و پس از اینکه فشار جزئی دی‌اکسید کربن به بیشتر از فشار هیدرواستاتیک رسید، آب به حالت فوق اشباع نسبت به گاز می‌رسد. در چنین حالتی بر اثر گاز زدایی دی‌اکسید

جدول ۶- مقایسه نتایج آنالیز عناصر نادر در نمونه آب چاه WR-G5 و رسوب تشکیل شده در سر چاه (بر حسب ppm).

عنصر	Hg	As	Cs	Rb	Mn	Fe	Zn	Pb	Cu	Cr	Cd	Ba	Al
آب	0.009	0.01	0.04	0.06	0.15	14.27	0.05	<0.009	<0.009	0.02	<0.009	0.05	0.32
رسوب	0.22	16.2	7.4	27.8	258	47800	62.8	7.2	15.4	16	0.2	136	13100
(Element/Cl)W ¹	1.1×10^{-5}	1.4×10^{-5}	4.7×10^{-5}	7.4×10^{-5}	2.0×10^{-4}	1.8×10^{-2}	6.4×10^{-5}	$< 1.0 \times 10^{-5}$	$< 1.0 \times 10^{-5}$	1.9×10^{-5}	$< 1.0 \times 10^{-5}$	5.7×10^{-5}	4.0×10^{-4}
(Element/Cl)S	2.7×10^{-4}	2.0×10^{-2}	9.1×10^{-3}	3.4×10^{-2}	3.2×10^{-1}	5.9×10^1	7.7×10^{-2}	8.8×10^{-3}	1.9×10^{-2}	2.0×10^{-2}	2.5×10^{-4}	1.7×10^{-1}	1.6×10^1

۱ نسبت عنصر بر کلراید برای آب (W) و رسوب (S).

نتیجه‌گیری

دو فرآیند اصلی باعث کاهش اثرات نشت گاز دی‌اکسید کربن بر آزادسازی عناصر نادر به داخل آب‌های زیرزمینی مورد مطالعه شده است. (۱) ظرفیت بالای خنثی‌کنندگی pH در مواد تشکیل دهنده آبخوان، از کاهش قابل ملاحظه pH و در نتیجه گسترش وسیع آب‌های گازدار در اطراف چاه‌های نشت کننده جلوگیری می‌کند. اختلاف زیاد فشار جزئی دی‌اکسید کربن و غلظت عناصر نادر در چاه‌های گازدار و چاه‌های فاقد گاز پیرامون آن‌ها شاهدهی بر این فرآیند است. (۲) گاز زدایی دی‌اکسید کربن از آب‌های گازدار در نزدیکی سطح زمین (ناشی از کاهش فشار هیدرواستاتیک)، سبب خروج عناصر نادر از آب بر اثر رسوب کانی‌های ثانویه کربناته و اکسی-هیدروکسیدهای آهن می‌شود. با این وجود، غلظت برخی از عناصر مانند Fe، Mn، As، Hg و B در آب‌های گازدار همچنان بالاتر از حداکثر مجاز در استانداردهای سازمان بهداشت جهانی و ملی برای آب شرب است.

منابع

اصغری مقدم، ا.، آدی گوزل پور، ع.، ۱۳۹۵. بررسی غلظت آلومینیوم، آهن، منگنز، کروم و کادمیوم در آب‌های زیرزمینی دشت اشنویه. اکوئیدرولوژی، جلد ۳، شماره ۲، ۱۷۹-۱۶۷.

اکبری، ف.، باقری، ر.، ندری، آ.، ۱۳۹۸. هیدروژئوشیمی و پایش کیفی تالاب کارستی- گچی برمشور در استان خوزستان. هیدروژئولوژی، جلد ۴، شماره ۱، ۶۹-۵۴.

حسن‌زاده، ب.، عباس نژاد، ا.، ۱۳۹۷. فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی بخش میانی دشت نوق (غرب استان کرمان). هیدروژئولوژی، جلد ۳، شماره ۲، ۵۸-۴۶.

نشت گاز دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های هیدروترمال به داخل آبخوان آبرفتی دشت‌های همدان، رزن، کمیجان و چهاردولی در استان همدان، سبب افزایش غلظت اکثر یون‌های اصلی، فرعی و عناصر نادر در آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که دو مکانیسم اصلی باعث افزایش غلظت عناصر نادر در آب‌های گازدار می‌شود. در مکانیسم اول، عناصر نادر همراه با آب‌های شور اشباع از دی‌اکسید کربن، بر اثر ادامه حفاری چاه‌های بهره‌برداری به داخل سنگ کف (سوراخ شدن سنگ پوش مارنی یا شیستی مخزن آهکی دی‌اکسید کربن)، به داخل آبخوان آبرفتی بالایی راه پیدا کرده‌اند. بر اثر این مکانیسم، تحرک پذیری و غلظت عناصر نادر As، B، Li، Rb، Cs و Sr افزایش یافته است. همبستگی قوی این عناصر با یون Cl، عدم تناسب میزان کاهش pH آب‌های زیرزمینی گازدار شده با میزان افزایش غلظت مواد محلول در آن‌ها و مقایسه مقدار Cs محلول در چشمه هیدروترمال باباگرگر با آب‌های زیرزمینی فاقد گاز و گازدار مورد مطالعه از جمله شواهد وجود مکانیسم اول در آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه می‌باشند. در مکانیسم دوم، غلظت عناصر نادر Al، Ba، Zn، Cr، Ni و Cu بر اثر کاهش pH در آب‌های زیرزمینی گازدار شده و افزایش انحلال و هوازدهی کانی‌های موجود در آبخوان‌های مورد مطالعه افزایش یافته است. عدم همبستگی عناصر گروه دوم با یون Cl، نشان دهنده عدم ارتباط منشأ آن‌ها با عناصر گروه اول می‌باشد.

- Carvalho, M.R., Nunes, J.C., Acciaoli, M.H., 2007. Trace elements in groundwater of active stratovolcanoes in S. Miguel Island (Azores). XV week and VI Iberian congress of geochemistry.
- Dean, W.E., 1978. Trace and minor elements in evaporites, In: W.E. Dean, & B.C. Schreiber (Eds.), Marine Evaporites, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course 4, 86-104.
- Ekdahl, E., 2009. Groundwater information sheet, Mercury. Groundwater Ambient Monitoring and Assessment program (GAMA).
- Fusswinkel, T., Wagner, T., Wenzel, T., 2013. Evolution of unconformity-related Mn-As-Fe vein mineralization, Sailauf (Germany): Insight for major and trace elements in oxide and carbonate minerals. *Ore Geology Reviews*, 50, 28-51.
- Hem, J.D., 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3rd ed. US Geological Survey Water-Supply Paper 2254: University of Virginia, Charlottesville, United States. p 69-73.
- Hounslow, A.W., 1995. Water quality data, Analysis and Interpretation., 1st ed. CRC Press: Boca Raton, Florida, United States, 63-177.
- Keating, E.H., Fessenden, J., Kanjorski, N., Koning, D.J., Pawar, R., 2010. The impact of CO₂ on shallow groundwater chemistry: observations at a natural analog site and implications for carbon sequestration. *Environmental Earth Sciences*, 60, 521-536.
- Khan A., Umar R., Khan H.H., 2015. Significance of silica in identifying the processes affecting groundwater chemistry in parts of Kali watershed. Central Ganga Plain, India. *Applied Water Science*, 5, 65-72.
- Kim, D.Y., Jeong, C.H., Park, B.J., Ki, M.S., Shin, M.S., Lee, S.H., 2019. Numerical Study on Gaseous CO₂ Leakage and Thermal Characteristics of Containers in a Transport Ship. *Applied Sciences*. 9(12), 1-12.
- Kochkodan, V., Darwish, N.B., Hilal, N., 2015. The Chemistry of Boron in Water. In *Boron Separation Processes*. Elsevier Inc, 35-63.
- Lawter, A.R., Qafoku, N.P., Shao, H., Bacon, D.H., Brown C, F., 2015. Evaluating impacts of CO₂ and CH₄ gas intrusion into an unconsolidated aquifer: fate of As and Cd. *Frontiers in Environmental Science*, 49(3), 225-238.
- Macpherson, G.L., 2009. CO₂ distribution in groundwater and the impact of groundwater extraction on the global C cycle. *Chemical Geology*, 264(1-4), 328-336.
- Mathurin, F.A., Drake, H., Tullborg, E.L., 2014. High cesium concentrations in groundwater in the upper 1.2 km of fractured crystalline rock – Influence of groundwater origin and secondary minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132, 187-213.
- Mora, A., Mählknecht, J., Rosals-Lagarde, L., 2017. Assessment of major ions and trace elements in groundwater supplied to the Monterrey metropolitan area, Nuevo León, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(8), 394-409.
- Négre, P., Giraud, E.P., Widory, D., 2004. Strontium isotope geochemistry of alluvial groundwater: a tracer for groundwater resources characterization. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 959-972.
- Ravenscroft, P., McArthur, J.M., 2004. Mechanism of regional enrichment of groundwater by boron: the examples of دفتر مطالعات پایه منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۰. گزارش توجیهی تمدید ممنوعیت محدوده مطالعاتی کمیجان، ۷۶ صفحه.
- دفتر مطالعات پایه منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان، ۱۳۹۰. گزارش توجیهی تمدید ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت رزن قهاوند، ۱۰۵ صفحه.
- دفتر مطالعات پایه منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان، ۱۳۹۳. گزارش توجیهی تمدید ممنوعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی همدان-بهار، ۷۳ صفحه.
- رضوانی، م.، قربانیان، ا.ع.، نوجوان، م.، صهبا، م.، ۱۳۹۲. ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین (کادمیوم، کبالت، سرب، روی و منگنز) در آبخوان اشتهارد. علوم و مهندسی محیط زیست، جلد ۱، شماره ۱، ۱۳-۲۱.
- فخری، م.س.، اصغری مقدم، ا.، برزگر، ر.، کاظمیان، ن.، نجیب، م.، ۱۳۹۵. بررسی منشأ برخی فلزات سنگین در آب زیرزمینی آبخوان دشت مرند با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره. دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۲/۲، ۲۵۳-۲۳۷.
- موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، استاندارد ملی شماره ۱۰۵۳، ۱۳۸۸. آب آشامیدنی - ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، ۲۶ صفحه.
- مهندسين مشاور رهاب سازه تدبير، ۱۳۹۳. گزارش مطالعات تمدید ممنوعیت دشت چهاردولی، ۱۳۶ صفحه.
- نجاتی جهرمی، ز.، ناصری، ح.ر.، نخعی، م.، علیجانی، ف.، ۱۳۹۶. ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان ورامین از نظر قابلیت شرب: آلودگی با فلزات سنگین. سلامت و محیط زیست، جلد ۱۰، شماره ۴، ۵۷۲-۵۵۹.
- Abidoye, L.K., Das, D.B., 2018. Carbon Capture, Utilization and Sequestration, Chapter 9, Tracking CO₂ migration in storage aquifer. Intech Open Press: London, United Kingdom, 145-162.
- Agnelli, M., Grandia, F., Soler, D., Sainz-Garcia, A., Brusi, D., Zamorano, M., Mencio, A., 2018. Metal release in shallow aquifers impacted by deep CO₂ fluxes. *Energy Procedia*, 146, 38-46.
- Amiri, M., Ahmadi Khalaji, A., Tahmasbi, Z., Santos, J.F., Zarei Sahamieh, R., Zamanian, H., 2017. Geochemistry, petrogenesis, and tectonic setting of the Almogholagh batholith in the Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 113-133.

- Prospects for Future Supply. Professional Paper 1802-K., U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 862p.
- Wigley, M., Kampman, N., Chapman, H.J., Dubacq, B., Bickle, M.J., 2013. In situ redeposition of trace metals mobilized by CO₂-charged brines. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 14, 1321-1332.
- World Health Organization., 2017. Guidelines for drinking-water quality, 4th ed. WHO: Geneva, Switzerland, 155-442.
- Zheng, L., Apps, J.A., Zhang, Y., 2009. On mobilization of lead and arsenic in groundwater in response to CO₂ leakage from deep geological storage. *Chemical Geology*, 268, 281-297.
- Zheng, L., Spycher, N., Varadharjan, C., 2015. On the mobilization of metals by CO₂ leakage into shallow aquifers: exploring release mechanisms by modeling field and laboratory experiments. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 5, 403-418.
- Zhuravlev, A., Berto, M., Arabadzi, M., Gabrieli, J., Turetta, C., Cozzi, G., Barbante, C., 2016. Trace and rare-earth elements in natural groundwaters: weathering effect of water-rock interaction. *International Journal of Environmental Research*, 10, 561-574.
- Bangladesh and Michigan, USA. *Applied Geochemistry*, 19, 1413-1430.
- Roshanak, R., Moore, F., Zarasvandi, A., Keshavarzi, B., Gratzner, R., 2018. Stable isotope geochemistry and petrography of Qorveh-Takab travertines in northwest Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, 111, 64-74.
- Saha, R., Dey, N.C., Rahman, M., Bhattacharya, P., Rabbani, G.H., 2019. Geogenic arsenic and microbial contamination in drinking water sources: exposure risks to the coastal population in Bangladesh. *Frontiers in Environmental Science*, 57(7), 63-75.
- Shankar, S.H., Shanker, U., Shikha., 2014. Arsenic contamination of groundwater: a review of sources, prevalence, health risks, and strategies for mitigation. *The Scientific World Journal*, Article ID 304524, 18 p.
- USGS., 2007. Evaluation of Ground-Water and Boron Sources by Use of Boron Stable-Isotope Ratios, Tritium, and Selected Water-Chemistry Constituents near Beverly Shores, Northwestern Indiana. *Scientific Investigations Report Series 2007-5166*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 46p.
- USGS., 2017. Lithium, Chapter K of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and