

جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای شماره ۳، تابستان ۱۳۹۱

وصول مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۱۳

تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۶/۹

صفحات: ۶۱ - ۷۴

ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعه فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین، غرب ایران

دکتر غلامرضا خانلری^۱، علی اکبر مومنی^۲

چکیده

منطقه گرین در زون زاگرس رورانده و در مرز استان‌های همدان و لرستان قرار دارد. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی وضعیت گسترش کارست و پتانسیل آن از منظر ژئومورفولوژی و هیدروژئولوژی می‌باشد. تکنویزه شدن شدید در این منطقه و گسترش سنگ-های کربناته انحلال پذیر، باعث شده تا کارستی شدن گسترش قابل ملاحظه‌ای داشته و پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست نظیر دولین، کارن، غار و چشمه‌های کارستی مانند چشمه گاماسیاب در این منطقه شکل بگیرد. به منظور ارزیابی وضعیت هیدروشیمی آبخوان منطقه، از نتایج آنالیز ۲۶ چشمه استفاده شده است. آنالیز نمونه‌های آب نشان می‌دهد که تیپ آب موجود در اکثر چشمه‌های منطقه به صورت بیکربنات کلسیم-منیزیم بوده که با تیپ آب آبخوان‌های کارستی مطابقت دارد. ارزیابی نمایه‌های اشباع کلسیت و دولومیت نشان می‌دهد که منطقه نسبت به این دو کانی تحت اشباع بوده و آب زیرزمینی مسیر زیادی را طی نکرده و به تکامل ژئوشیمیایی نرسیده است. همچنین بر اساس نتایج آزمایش ردیابی، سرعت متوسط جریان آب زیرزمینی در مناطقی که ماده رنگی ردیابی شده است، در محدوده سرعت حرکت آب در نواحی توسعه یافته کارستی قرار دارد و نشان دهنده حاکم بودن رژیم جریان مجرای می‌باشد. کلید واژگان: کارست، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی، هیدروشیمی، نمایه‌های اشباع.

مقدمه

واژه کارست در اصطلاح فنی به پدیده خوردگی و انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر، به‌ویژه سنگ‌های کربناته (آهکی و دولومیتی) و تخییری اطلاق می‌گردد. این پدیده موجب افزایش تخلخل در سنگ شده و شرایط هیدرولوژی و سیمای متمایزی را برای سرزمین‌های کارستی در بر دارد. به طور کلی رفتار و ساختار کارست را می‌توان از چند منظر مورد بررسی قرار داد. کارست را می‌توان منبع مناسبی برای تأمین آب در نظر گرفت. سرزمین‌های کارستی آب آشامیدنی ۲۵ درصد از جمعیت جهان را تأمین می‌کنند (فورد و ولیامز، ۲۰۰۷: ۱). در مدیترانه و قسمت‌های جنوب شرقی آسیا، آبخوان‌های کارستی اصلی‌ترین منابع تأمین آب شرب را تشکیل می‌دهند (کریستوف، ۲۰۰۸: ۲۰۳). بسیاری از شهرها و روستاهای مناطق غربی کشور نظیر استان‌های شیراز، کرمانشاه و مناطق وسیعی از ایلام، لرستان و کردستان از منابع آب کارست تغذیه می‌کنند. این جنبه از پدیده کارست توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است (افراسیابان، ۲۰۰۷: ۶۷۴؛ رئیسی، ۲۰۰۸: ۶۳؛ فورد و ولیامز، ۲۰۰۷: ۲۰۰۷؛ میلانویچ، ۱۹۸۱). از منظر خطرات کارست باید به عملکرد مهندسی این پدیده توجه نمود. به هنگام احداث سازه‌هایی نظیر سد و تونل در مناطق کارستی، مسأله فرار آب از سد و هجوم آب به داخل تونل از جمله چالش‌هایی است که مهندسان با آن روبرو هستند (میلانویچ، ۲۰۰۴: قبادی و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۲۰؛ کریمی و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۷۰؛ محمدی و رئیسی، ۲۰۰۷: ۳۰۵). محیط‌های کارستی خاستگاه کانسارهای فلزی و غیر فلزی زیادی هستند که عمدتاً به صورت پلاس در این محیط‌ها انباشته شده است. همچنین بیش از ۵۰ درصد از نفت و گاز دنیا از سنگ‌های کربناته استخراج می‌شود که با پدیده کارستی شدن ارتباط دارد (طاهری و رئیسی، ۱۳۸۹: ۴). کارست از نظر فرهنگی نیز اهمیت دارد. غارها به

عنوان یکی از مهمترین پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست، پناهگاه انسان‌های اولیه بوده است. بعدها از غارها برای ایجاد معابد و پرستشگاه‌ها بخصوص در جوامع هند و بودایی استفاده گردید. امروزه جاذبه گردشگری سرزمین‌های کارستی از ویژگی‌های مهم این مناطق محسوب می‌گردد. به عنوان مثال از غار-های قوری‌قلعه (روانسر) و علیصدر (همدان) می‌توان به عنوان جاذبه‌های ژئوتوریسمی مرتبط با کارستی شدن نام برد که هر ساله میزبان هزاران گردشگر داخلی و خارجی هستند.

رخنمون سازندهای کارستیک ۲۰ درصد از سطح قاره‌ها را فرا گرفته است (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷: ۵). یازده درصد از مساحت ایران را سازندهای کارستی پوشانیده (افراسیابان، ۱۳۷۲: ۱۲۷) که این مقدار در ناحیه زاگرس به ۲۳ درصد می‌رسد (اشجاری و رئیسی، ۲۰۰۶: ۱۱۹). اهمیت پدیده کارست و ذخایر کارستی موجب شد تا در سه دهه گذشته توجه ویژه‌ای به این پدیده گردد که از آن جمله می‌توان به تأسیس مرکز ملی مطالعات و تحقیقات کارست ایران در شیراز و ایجاد دفتر مطالعات و تحقیقات کارست غرب کشور در کرمانشاه اشاره کرد.

کوه گرین از رشته کوه‌های مهم غرب ایران است که بیشتر مساحت آن در شمال استان لرستان و بخشی نیز در استان‌های همدان و کرمانشاه قرار دارد. منطقه مورد مطالعه از غرب به دلفان، از شمال به شهرستان نهاوند، از شرق به شهرستان بروجرد و از جنوب به شهرستان الشتر محدود می‌شود. سراب‌های فراوانی نظیر گاماسیاب، کهمان، ونایی و ... در پای این کوه وجود دارند که آب آشامیدنی و آب مورد نیاز کشاورزی دشت سیلاخور، نهاوند، نورآباد و الشتر را تأمین و رودهای دز و گاماسیاب را تغذیه می‌کنند. هدف از این مطالعه، ارزیابی وضعیت گسترش پدیده کارست و نقش لیتولوژی و تکتونیک در روند تکاملی

ژوراسیک تا کواترنر) در منطقه برونزد داشته باشند (شکل ۱). گسل‌های موجود در منطقه شامل گسل‌های تراستی اصلی منطقه که شاخه‌ای از راندگی اصلی زاگرس است، و گسله‌های امتداد لغز مرتبط با گسل جوان زاگرس هستند که دارای شیب زیادی می‌باشند (بهیاری و محجل، ۱۳۸۷: ۴۷۹). از نظر ژئومورفولوژی به علت عملکرد گسل‌های تراستی، این منطقه را می‌توان به دو بخش کوهستان و دشت تقسیم نمود. واحدهای زمین‌شناسی موجود در منطقه از نظر هیدروژئولوژیکی به صورت نفوذپذیر، نیمه نفوذپذیر تا نفوذناپذیر تقسیم می‌شوند.

واحدهای نفوذپذیر

بیش از ۹۰ درصد منطقه مورد مطالعه از سنگ‌های کربناته (ژوراسیک تا میوسن) تشکیل شده است. این سنگ‌ها به دلیل عملکرد شدید تکنونیک، بشدت خرد شده و تخلخل ثانویه بالایی دارند. بیشترین وسعت سنگ‌های کربناته مربوط به سنگ‌های دولومیتی و آهک‌های ژوراسیک پایینی است که معادل دولومیت-های سازند نیریز و کربنات‌های سازند سورمه می‌باشند. این دو واحد توسط کمربندی از رادیولاریت از یکدیگر جدا شده‌اند. دامنه شمالی کوه گرین به طور کلی از سنگ‌های آهکی اولیگوسن-میوسن تشکیل شده است. این واحدها شامل دو بخش OML و OMm می‌باشند. بخش OML عمدتاً از دولومیت‌های ضخیم لایه خاکستری، سنگ آهک و میان‌لایه‌های سنگ آهک مارنی و مارن تشکیل شده است. بخش OMm بالاترین واحد لیتولوژی اولیگوسن-میوسن است که دارای لیتولوژی آهکی، آهک مارنی با میان‌لایه‌های ماسه سنگی می‌باشد. این بخش از ضخامت بیش از ۱۰۰۰ متر تشکیل شده و در راستای گسله زاگرس در کنار سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی کرتاسه قرار گرفته است (موسیوند، ۱۳۸۵: ۲۳-۱۹) (اشکال ۱ و ۸).

این پدیده، به‌ویژه از دیدگاه هیدروژئولوژی و ژئومورفولوژی در منطقه کارستی گرین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در چهار بخش مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی، تحلیل‌های نرم افزاری و جمع‌بندی و نتیجه‌گیری انجام گردید. مطالعات کتابخانه‌ای شامل گردآوری کلیه اطلاعات موجود از منطقه شامل نقشه زمین‌شناسی، نتایج آنالیزهای هیدروشیمی برخی از چشمه‌های موجود و نتایج ردیابی انجام شده در منطقه بوده است. مطالعات میدانی، بازدیدهای صحرایی از منطقه مورد نظر، نمونه‌برداری از برخی چشمه‌ها به منظور آنالیز هیدروشیمی و صورت‌برداری از پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست موجود در منطقه را شامل می‌شود. برای این منظور، ابعاد و شکل هندسی این پدیده‌ها مشخص شد و چگونگی ارتباط آنها با سیستم‌های ناپیوستگی ارزیابی گردید. در بخش آنالیز نرم افزاری ابتدا با استفاده از نرم افزار AqQA تیپ آبی ۲۶ چشمه مورد مطالعه مشخص شده و فرایندهای ژئوشیمیایی آبخوان کارستیک بررسی گردید. سپس با استفاده از نرم افزار PHREEQC، اقدام به تهیه نمایه‌های اشباع کلسیت و دولومیت گردید و نقشه توزیع آنها در منطقه به صورت نقشه پهنه بندی با استفاده از نرم افزار ArcGIS تهیه شد. نهایتاً بر اساس نتایج به دست آمده از سه مرحله قبلی، وضعیت کارستی شدن منطقه و سیستم حاکم بر جریان هیدروژئولوژیکی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت.

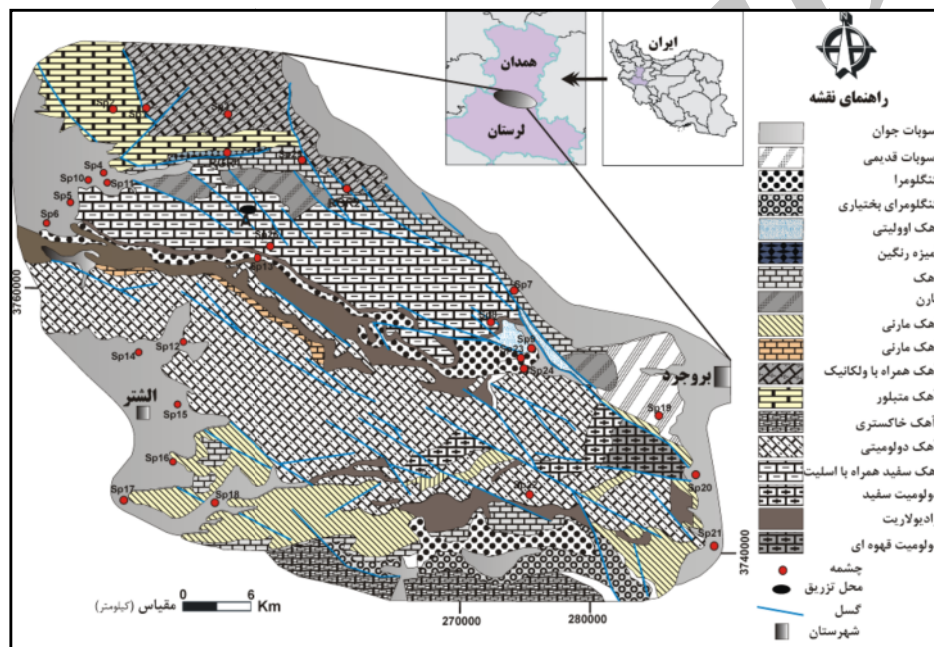
زمین‌شناسی

محدوده مورد مطالعه در مرز زون سنندج-سیرجان و زاگرس مرتفع (کمربند تراستی زاگرس) قرار دارد و همبری بیش از ۹۰ درصد از واحدها، نتیجه گسلش یا روراندگی است. عملکرد این گسل‌ها باعث شده که واحدهای مربوط به دوران‌های مختلف (تریاس-

هیدروژئولوژیکی مشابه با آنها دارد. در واقع این واحدها به عنوان یک سری موانع هیدروژئولوژیکی عمل می‌نمایند و باعث جدایش حوضه آبریز چشمه‌ها می‌گردند. با توجه به این که منطقه شدیداً خرد شده است، به دلیل عملکرد شکستگی‌های موجود در این سنگ‌ها، واحدهای ذکر شده در مناطق خرد شده به صورت نیمه نفوذپذیر عمل می‌نمایند.

واحدهای نیمه نفوذپذیر و نفوذناپذیر

مهمترین واحد نفوذناپذیر رادیولاریت‌ها هستند که عمدتاً در راستای گسله سراسری زاگرس پدیدار شده‌اند. آمیزه رنگین که سنگ‌های تشکیل دهنده آن عبارتند از گابرو، هارزبورژیت و شیل‌های سیلیسی-رادیولاریتی، از واحدهای نفوذناپذیری است که رخنمون زیادی ندارد. علاوه بر واحدهای ذکر شده، مارن‌های ائوسن و الیگو-میوسن نیز مشخصات



شکل ۱: نقشه زمین شناسی و موقعیت منطقه مورد مطالعه (برگرفته از وزارت نیرو، ۱۳۸۴: ۱۵)

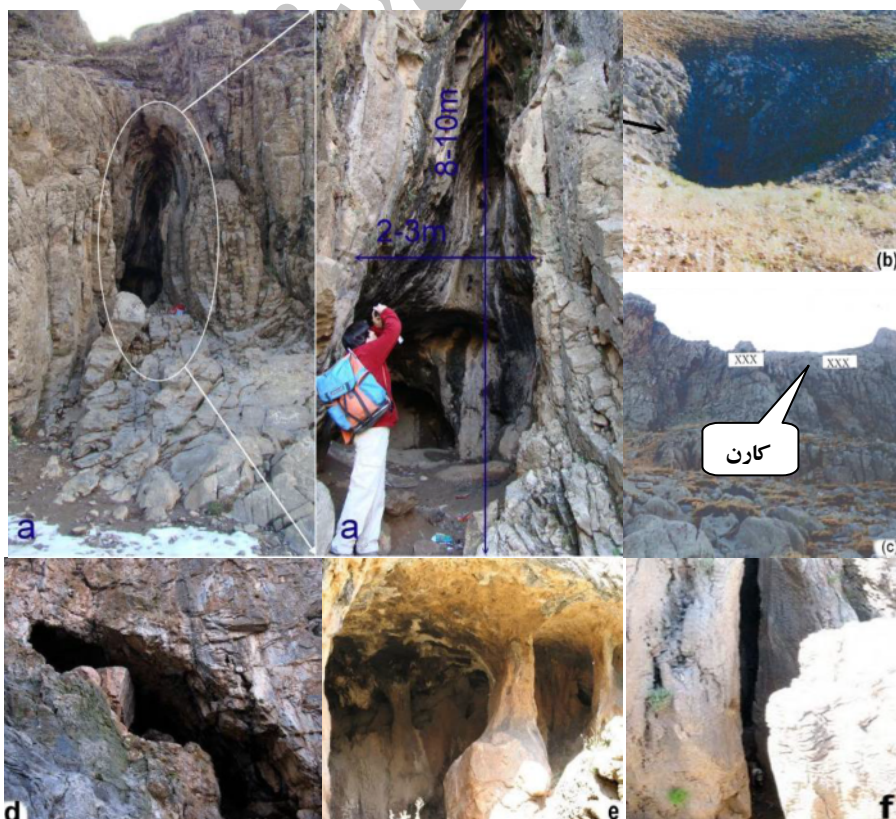
۱۳۸۶: ۱۱۲). چشم‌اندازهای کارستی در منطقه مورد مطالعه، حاصل دخالت مشترک فرایندهای مورفودینامیک درونی و بیرونی در طی زمان است. از جمله مهمترین عوامل درونی مؤثر در شکل‌زایی پدیده‌های کارستی، تکتونیک شکننده و حضور سنگ‌های کربناته می‌باشد. در واقع وجود تکتونیک فعال در منطقه که موجب گسترش شکستگی شده و همچنین گسترش سنگ‌های انحلال پذیر آهکی و دولومیتی در منطقه، باعث گسترش پدیده‌های کارستی مانند فروچاله، کارن، اشکال برجی، دره‌های خشک، چاه‌های

ژئومورفولوژی کارست

نتیجه عمل کارستی شدن ایجاد یک مورفولوژی یا زمین ریخت‌شناسی ویژه است که مناطق کارستی را از نواحی غیر کارستی جدا می‌کند. پدیده‌های کارستیک سطحی و زیر سطحی کلیدی برای درک طبیعت و ژنز سیستم‌های کارستی می‌باشند (آنسال و سلیک، ۲۰۰۸: ۲۶۸). در واقع بین ژئومورفولوژی کارست و تکامل آن ارتباط نزدیکی وجود دارد، به طوری که فراوانی و گسترش پدیده‌های مورفولوژی کارست، از گسترش کارست در ناحیه حکایت دارد (قبادی،

تأثیر سیستم‌های ناپیوستگی بوده است. وجود این حفرات بزرگ نیز تأییدی بر گسترش پدیده کارستی شدن در این سنگ‌ها می‌باشد. فروچاله‌های موجود در اثر ریزش سقف مجاری کارستی ایجاد شده است. این فروچاله‌ها عمدتاً در قسمت‌های مرتفع کوه‌گرین مشاهده می‌شوند و در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های اصلی تشکیل شده‌اند (شکل ۲b). کارن‌ها به طور کلی در راستای مه‌درزه‌ها به وجود آمده و ژرف‌اند (تا بیشتر از ۱ متر) و از پدیده‌های عمومی در این سنگ‌ها می‌باشند (شکل ۲c). چاه‌های کارستی موجود تقریباً قائم‌اند و عمدتاً عمق آنها از ۵ تا ۸ متر تغییر می‌کند. شیارهای انحلالی بزرگ که عمدتاً در راستای درزه‌های کششی شکل گرفته‌اند، در بسیاری از قسمت‌های منطقه مورد مطالعه مشهود هستند (شکل ۲f). ارزیابی‌های انجام شده نشان می‌دهد که از لحاظ شرایط ژئومورفولوژی، کارست موجود در منطقه از نوع انتقالی است.

کارستی و غارها شده است. مؤثرترین عوامل بیرونی در شکل‌زایی کارست، اقلیم، ارتفاع، شیب، و زمان است. غارها شاخص‌ترین اشکال تحول کارست محسوب می‌شوند و ابعاد هندسی و شکل آنها به میزان تحول کارست وابسته است. در سنگ‌های کربناته موجود در محدوده مورد مطالعه، غارها گسترش قابل ملاحظه‌ای دارند. با وجود این، اکثر این غارها به دلیل قرار گرفتن در کوهستان‌های بلند و پرشیب و یا بسته شدن دهانه آنها به وسیله واریزه‌ها ناشناخته مانده‌اند. از مهمترین غارهای موجود در این منطقه می‌توان غار گاماسیاب را نام برد که در گذشته محل خروج چشمه کارستی گاماسیاب بوده است. این غار هم‌اکنون خشک و دارای عرض ۲-۳ متر و ارتفاع ۸-۱۰ متر است و به طور بسیار مشخصی حفره‌های انحلالی در آن دیده می‌شود (شکل ۲a). نمونه‌های دیگری از حفرات غار مانند در شکل ۲d,e نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲d دیده می‌شود، شکل‌گیری این حفرات تحت



شکل ۲: پدیده‌های کارستی موجود در منطقه (a) غار گاماسیاب، (b) فروچاله‌های موجود در کوه‌گرین، (c) کارن، (d,e) حفرات بزرگ غار مانند، (f) شیار انحلالی

چشمه‌های کارستی

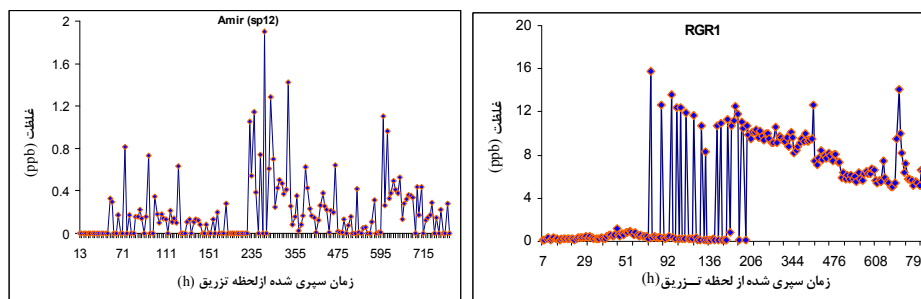
چشمه‌های پر آب از دیگر سیمای راج در مناطق کارستیک هستند که در منطقه مورد مطالعه به فراوانی یافت می‌شوند. در این بخش با استفاده از نتایج تست ردیابی و تجزیه و تحلیل نتایج هیدروشیمی چشمه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه، به بررسی وضعیت کارست در منطقه پرداخته می‌شود.

ردیابی

به کار بردن مواد ردیاب برای مطالعه آب‌های زیرزمینی به صورت افزودن مواد ردیاب به آب از یک نقطه و مشاهده آن در نقطه دیگر، همواره ابزاری مفید در تحقیقات هیدروژئولوژیکی بوده است. اطلاعات حاصل از انجام دقیق مطالعات ردیابی می‌تواند ارتباط بین مناطق تغذیه و تخلیه مختلف مانند چشمه‌ها و چاه‌ها را مشخص سازد. به منظور بررسی و تعیین چگونگی ارتباط هیدرولیکی چشمه‌های موجود در منطقه و پتانسیل فرار آب بعد از ساخت سد گرین واقع در چند صد متری پایین دست چشمه گاماسیاب، یک مرحله عملیات ردیابی انجام شد. برای انجام عملیات ردیابی مقدار ۱۰ کیلوگرم ماده رنگی اورانین در یک آبفروچاله واقع در محلی موسوم به گوماهی (شکل ۱) تزریق شده است.

از منابع آب موجود در محدوده مورد مطالعه، تنها از چشمه‌های گاماسیاب، امیر، کهمان، سفید، چناره، زلزله، کیوار و گمانه‌های RGR1 و RGR2 نمونه‌برداری صورت گرفته شده است. آنالیزها نشان می‌دهد

که ردیاب تنها در چشمه امیر و گمانه‌های حفاری شده تشخیص داده شده است (وزارت نیرو، ۱۳۸۴: ۱۳-۲۱) (شکل ۳). عدم ظهور ردیاب در چشمه‌های دیگر دلیل قطعی مبنی بر عدم ارتباط هیدرولیکی بین نقطه تزریق با این چشمه‌ها نیست، بلکه دلایل مختلف از جمله این که مقدار ردیاب کم برآورد شده و بیش از حد رقیق شده و یا وجود یک تخلیه دور از انتظار، در برآورد نادرست میزان ردیاب مؤثر بوده است. با وجود این ظهور ردیاب در گمانه‌های حفر شده و چشمه امیر ارتباط هیدرولیکی را با محل تزریق تأیید می‌کند. زمان ظهور اولین ردیاب در چشمه امیر ۵۸ ساعت بعد از تزریق است که با توجه به این زمان، حداکثر سرعت جریان برابر ۵/۷۴ سانتیمتر بر ثانیه به دست می‌آید (وزارت نیرو، ۱۳۸۴: ۲۳). همان طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، منحنی مربوط به این چشمه سه قله رنگ دارد که نشان دهنده سه مسیر مختلف حرکت آب است. بررسی‌های انجام شده بر روی نتایج به دست آمده از آمایش ردیابی انجام شده نشان می‌دهد که با توجه به زمان متوسط انتقال، سرعت متوسط جریان ۱/۶ سانتیمتر بر ثانیه است که در محدوده سرعت حرکت آب در نواحی توسعه یافته کارستی قرار دارد و نشان دهنده حاکم بودن سیستم جریان مجرای می‌باشد. در واقع شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در کوه گرین، مجاری مناسبی را برای جریان آب به وجود آورده‌اند و نقش مهمی در گسترش پدیده کارستی شدن و ایجاد جریان مجرای در این ناحیه بر عهده دارند.



شکل ۳: منحنی غلظت زمان در چشمه امیر و گمانه RGR1

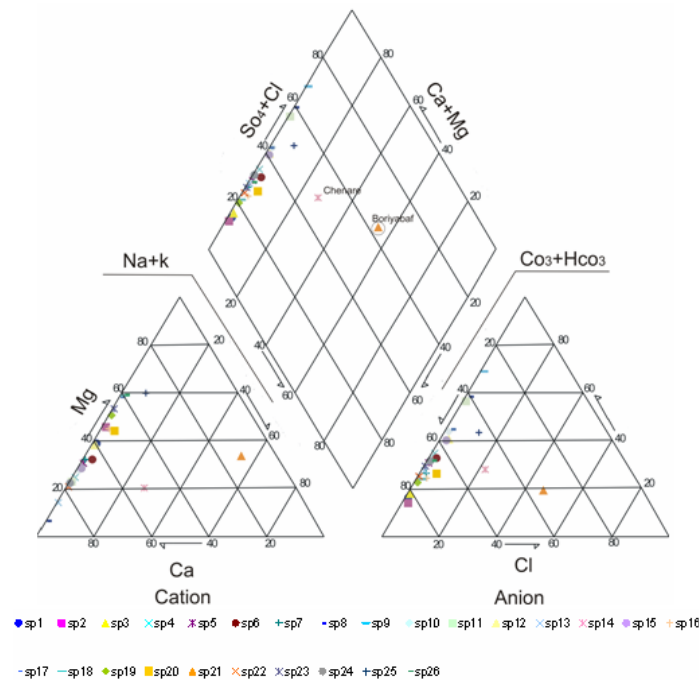
هیدروشیمی منابع آب موجود

طی سه دهه گذشته، مطالعات زیادی به منظور تعیین مشخصات آبخوان کارستی با استفاده از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها انجام شده است (رئیزی و همکاران، ۱۹۹۳: ۱۷-۱۸). داده‌های هیدروشیمیایی به دست آمده از آبخوان، می‌تواند برای تفسیر سیر تکاملی آبخوان به کار گرفته شود. برای بررسی خصوصیات هیدروشیمی چشمه‌های موجود در کوه گرین از نتایج آنالیز موجود (آذر ماه ۸۳) استفاده شده است (جدول ۱). همچنین برای تعیین چگونگی ارتباط لایه‌های آبدار و تعیین رخساره و تیپ آبی چشمه‌ها، نمودار پایپر ترسیم گردید (شکل ۴). محدوده هدایت الکتریکی آب‌های کارستی معمولاً کمتر از ۵۰۰ میکروموس بر سانتیمتر است (کریمی و توکلی، ۱۳۸۶: ۳۱۶). همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد، تمام چشمه‌های مذکور مشخصات

آبخوان کارستی دارند. از منظر آنیونی در اکثر چشمه‌های منطقه یون بیکربنات آنیون غالب است به طوری که این چشمه‌ها از نظر تیپ آبی، بیکربناته محسوب می‌شوند. با وجود این در چشمه‌های سفید، ونایی و کیوار، آنیون غالب سولفات و در چشمه بوریاباف آنیون غالب کلر است و دارای تیپ آبی کلروره می‌باشد. از منظر کاتیونی به جز چشمه بوریاباف با کاتیون غالب سدیم و رخساره سدیک، بقیه چشمه‌ها کاتیون غالب کلسیم و منیزیم و رخساره کلسیک و منیزیک است. در واقع وجود کلسیت و دولومیت در گستره مورد بررسی، باعث شده تا این کانی‌ها در تماس با آب‌های غنی از CO_2 حل شوند. لذا تیپ و رخساره آبی اکثر چشمه‌ها به صورت بیکربنات کلسیک و منیزیک است. نکته حائز اهمیت کم بودن میزان مواد محلول در این چشمه‌ها است که نشان دهنده نزدیکی محل تغذیه و تخلیه می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات فیزیکوشیمیایی چشمه‌های موجود در محدوده مورد بررسی در آذر ماه ۱۳۸۳ (وزارت نیرو، ۱۳۸۴)

Spring name	code	EC ($\mu s/cm$)	pH	Q (l/s)	meq/l						
					HCO ₃	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg
Taf	Sp1	183	7.21	20	2.74	0.04	0.54	0.04	0	1.84	1.2
Banafshe	Sp2	256	7.4	67	3.7	0.1	0.62	0.05	0	2.32	2
Gerdekane	Sp3	188	7.39	32	3	0.04	0.66	0.04	0	2.16	1.36
Dogh	Sp4	182	6.53	15	2.2	0.04	1.2	0.03	0	2.4	0.8
Niyaz	Sp5	187	6.43	494	2.48	0.04	1.12	0.03	0	2.32	1.04
Tajamir	Sp6	189	7.06	138	2.28	0.1	1.16	0.11	0	2.24	1.12
Kartil	Sp7	148	6.25	436	2.36	0.08	0.88	0.02	0	2	0.96
Sefid	Sp8	130	6.67	143	1.04	0.04	1.52	0.01	0	2.24	0.16
Vennai	Sp9	157	7.3	760	0.96	0.04	2.22	0.02	0	2.4	0.72
Zelzele	Sp10	179	6.3	37	2.12	0.06	1.7	0.03	0	2.48	0.96
Kivar	Sp11	169	6.26	28	1.44	0.04	1.92	0.02	0	2.4	0.72
Amir	Sp12	181	6.77	251	2.38	0.14	1.72	0.05	0	2.4	1.52
Khasan	Sp13	136	6.05	158	2.22	0.04	0.86	0.01	0	2.4	0.4
Chenare	Sp14	278	6.1	179	2.7	1.2	1.52	1	0.5	2.88	1.12
Sorkhe	Sp15	171	5.85	28	1.82	0.08	1.28	0.04	0	2.16	0.88
Papi	Sp16	220	6.27	71.2	3.18	0.16	1.08	0.11	0	2.24	1.92
Siyahposh	Sp17	256	6.4	43.5	2.46	0.1	2.08	0.011	0	2.16	3.04
Honam	Sp18	189	6.26	244	2.88	0.08	0.94	0.04	0	1.52	2.24
Chenarestan	Sp19	185	6.6	295	3.36	0.06	1	0.03	0	1.92	2
Keyvare	Sp20	170	6.47	259	2.88	0.26	1.12	0.18	0	1.84	1.6
Boriyabaf	Sp21	471	7.07	80	3.6	4.96	2.04	5.25	0.2	1.2	3.36
Absarde	Sp22	138	7.13	450	2.6	0.02	0.88	0.02	0	2.4	0.64
Chole	Sp23	181	6.74	650	2.42	0.02	1.02	0.01	0	1.6	1.84
Khosravi	Sp24	232	6.32	283	2.16	0.04	1.02	0.01	0	2.48	0.72
Gamasiyab	Sp25	151	7.5	1713	1.58	0.44	1.55	0.3	0	1.2	2.24
Kahman	Sp26	163	6.65	1030	2.62	0.08	1.26	0.05	0	1.44	2.16

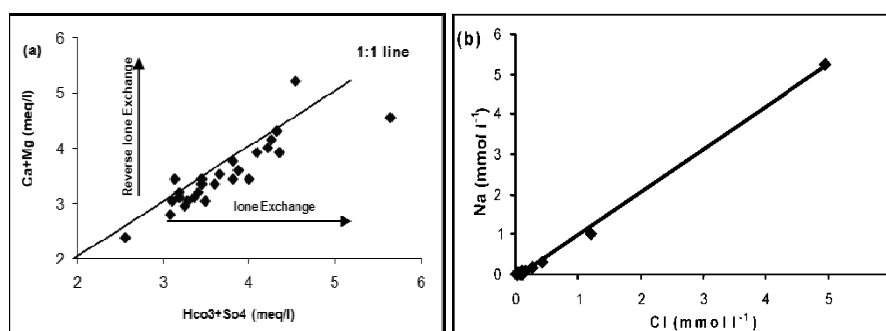


شکل ۴: نمودار پایپر منابع آب محدوده مورد مطالعه

فرایندهای ژئوشیمیایی منابع آب

در ارزیابی فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان کارستی منطقه از نمودارهای دو متغیره استفاده شده است. آنالیز آماری نشان می‌دهد که ارتباط مؤثری بین برخی از نمودارهای دو متغیره وجود دارد. برای بررسی وضعیت تبادل یونی از نمودار دو متغیره $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ در مقابل $(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$ استفاده شده است (شکل ۵a). خط ۱:۱ نشان دهنده فرایندهای انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس است. نمونه‌های واقع در امتداد خط ۱:۱ که دارای مقادیر کمتر از 10 meq/l هستند، نشان دهنده انحلال کلسیت و دولومیت در منطقه است و نیز این که انحلال ژپس وجود ندارد. نمونه‌هایی که در زیر و بالای خط ۱:۱ قرار دارند، به ترتیب تبادل یونی و

تبادل یونی معکوس را متحمل شده‌اند. همان طور که در شکل (۵a) دیده می‌شود، به جز چشمه‌های سیاهپوش و گاماسیاب که در بالای خط ۱:۱ قرار دارند، بقیه چشمه‌ها یا بر روی این خط و یا در زیر آن قرار دارند و متحمل تبادل یونی شده‌اند. در این دو چشمه به دلیل رخداد تبادل یونی معکوس، یون کلسیم جانشین یون سدیم شده و باعث می‌شود آب سخت‌تر گردد. رابطه سدیم با کلر برای تشخیص مکانیسم شوری به کار می‌رود (سامی، ۱۹۹۲: ۳۲؛ دیکسون و چیسول، ۱۹۹۲: ۳۱۴؛ مگاریتز و همکاران، ۱۹۸۱: ۶۰۴). همان طور که در شکل ۵b دیده می‌شود، این دو یون کاملاً در ارتباط با یکدیگر هستند و غلظت پایین آن احتمالاً ناشی از تبخیر و ناخالصی-های موجود در کانی‌ها و پرکننده درزه‌ها است.

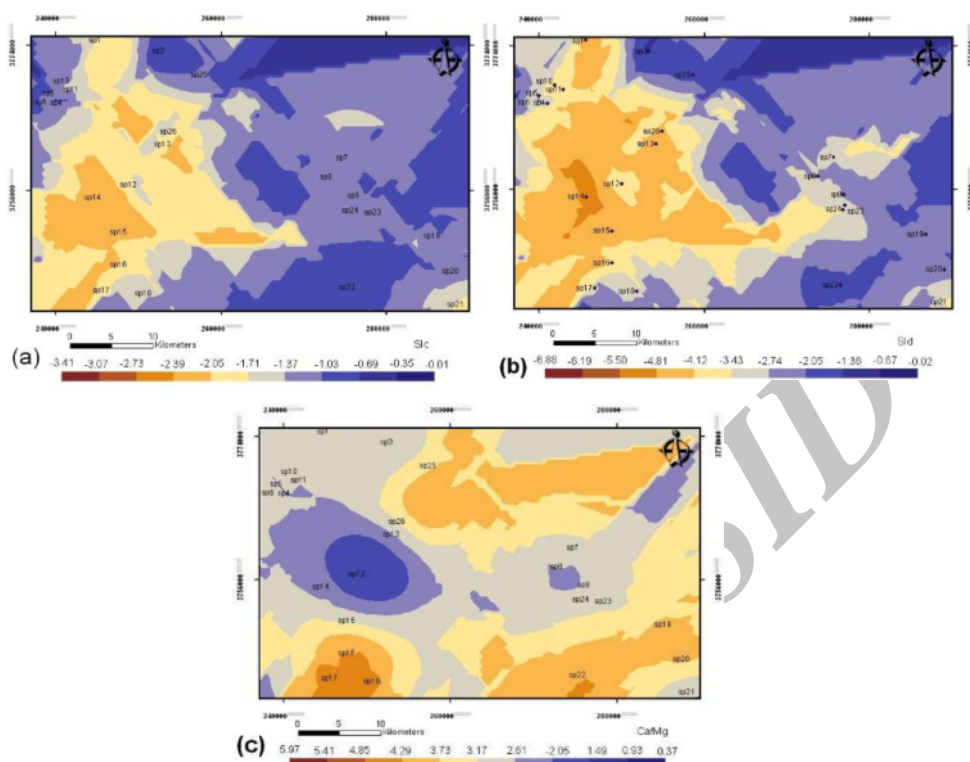


شکل ۵: نمودار دومتغیره فرایندهای ژئوشیمیایی در منطقه

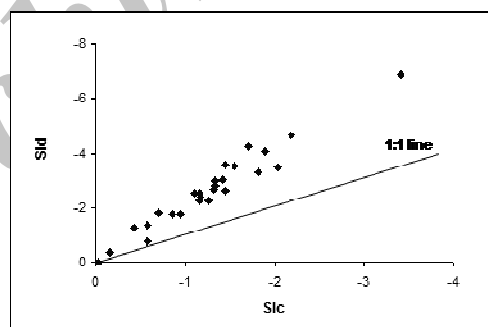
طی نکرده و به تکامل ژئوشیمیایی نرسیده است. به منظور پی بردن به جنس غالب محیطی که آب زیرزمینی در آن جریان دارد، از نسبت مولار یون کلسیم به منیزیم ($M_{Ca^{2+}}/M_{Mg^{2+}}$) استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این نسبت به طور متوسط ۲ می‌باشد که بیانگر تأمین آب چشمه‌ها از سازندهایی با ترکیب آهک دولومیتی و دولومیت است و پراکندگی این شاخص در منطقه با لیتولوژی موجود همخوانی دارد (شکل ۶c). همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، تأثیر انحلال دولومیت بر هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی بیشتر از انحلال کلسیت می‌باشد و این امر با فرایند دولومیتیزاسیون در توافق است.

نمایه‌های اشباع

برای شناسایی عوامل مؤثر بر هیدروشیمی آب زیرزمینی و تعیین تعادل آب در آبخوان، استفاده از مقادیر نمایه‌های اشباع کانی‌های مختلف و بررسی روابط بین آنها بسیار مفید است (کلانتری وهمکاران، ۱۳۸۶: ۳۴۳-۳۴۷؛ آپلو و پوستما، ۱۹۹۶: ۳۶۷؛ جلالی، ۱۴۸۵: ۲۰۰۹). به همین منظور، با توجه به لیتولوژی غالب در منطقه، با استفاده از کد کامپیوتری PHREEQC، اقدام به تهیه نمایه‌های اشباع کلسیت و دولومیت گردیده که توزیع آنها در منطقه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل (a,b) دیده می‌شود، آبخوان نسبت به این دو نمایه تحت اشباع تا اشباع می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که آب زیرزمینی مسیر زیادی را



شکل ۶: نقشه هم‌پتانسیل برای (a) نمایه SIC با تابع بهینه Exponential - (b) نمایه SIC با تابع بهینه Spherical - (c) نسبت مولار کلسیم به منیزیم با تابع بهینه Gaussian



شکل ۷: نمودار نمایه اشباع کلسیت در مقابل دولومیت

جریان خطی آب، در میان شکستگی‌هایی که دهانه کمتر از ۱ سانتیمتر دارند، وجود دارد. در این رژیم تعداد چشمه‌ها زیاد و میزان آب‌دهی آنها کم است. جریان افشان به طور نسبتاً یکنواختی از سفره تغذیه می‌شود و تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن خیلی کم است. به دلیل عدم گسترش کارست و مجاری کارستی در این سیستم جریان، پدیده‌های ژئومورفیک کارست در حوضه آبریز این چشمه‌ها

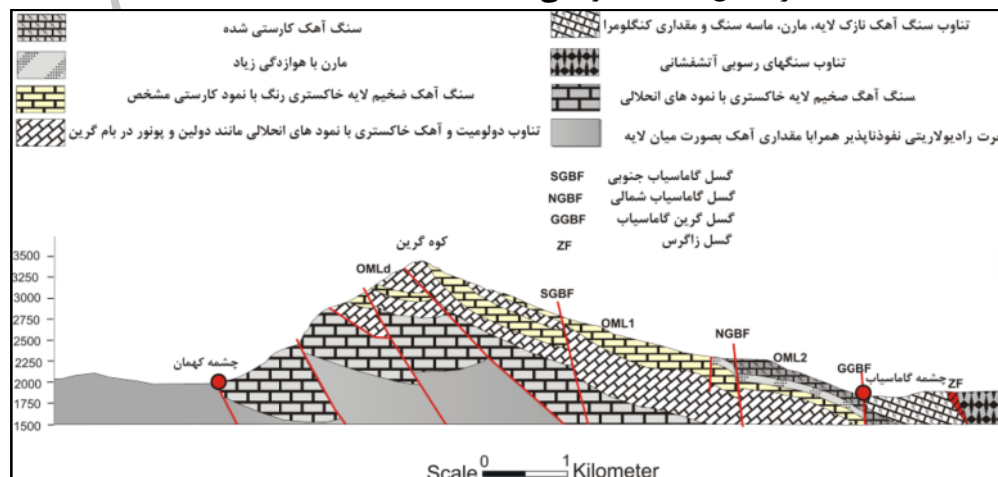
سیستم جریان حاکم بر چشمه‌ها و عوامل مؤثر بر آن

یک سفره کارستی به سه رژیم افشان، مجرای و مرکب رده‌بندی می‌شود (ASTM، ۱۹۹۵: ۱۴-۱۷، لاموریگس و لاموریکس، ۲۰۰۷: ۶۸۶؛ اتکینسون، ۱۹۹۷: ۱۰۱-۱۰۳؛ رئیسی و کرمی، ۱۹۹۷: ۱۱۲؛ ورتینگتون، ۱۹۹۱: ۱۸۷-۱۸۴). در یک سیستم افشان

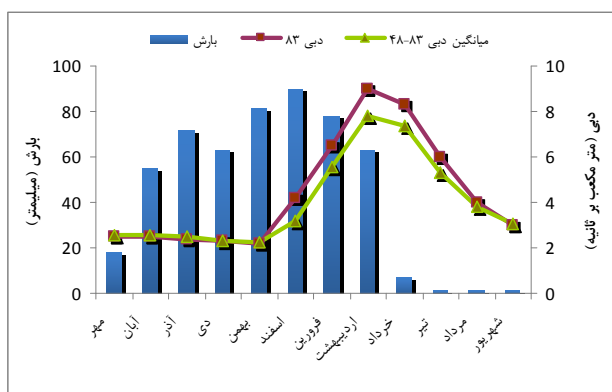
قرار گرفته و شکستگی و درز و شکاف‌های بسیاری در آن ایجاد شده که نقش مؤثری در ورود، ذخیره و گسترش مجاری کارست دارند و اغلب باعث پیدایش پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارستی شده‌اند. با وجود این در چشمه‌هایی که مکانیسم درز و شکافی دارد و با آبدهی پایینی همراه هستند، سیستم جریان غالب افشان تا مجرای می‌باشد. همچنین رده‌بندی کارست موجود در منطقه از منظر تکتونیکی، به صورت کارست کوهزایی خرد شده ارزیابی گردیده است.

در شکل ۹ رابطه بین بارش و تخلیه در طول یک سال آبی برای چشمه گاماسیاب نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، بین حداکثر بارش و حداکثر تخلیه یک اختلاف زمانی تقریباً ۲ ماهه وجود دارد. علت اصلی این اختلاف زمانی، نوع بارش است. با توجه به این که بارندگی در این منطقه غالباً به صورت برف است و مدتی طول می‌کشد تا این برف‌ها ذوب گردند، این تأخیر زمانی بین حداکثر بارش و حداکثر تخلیه به وجود آمده است. از طرفی بخشی از سیستم تغذیه به صورت افشان است و قسمتی از این تأخیر زمانی، ناشی از این رژیم جریان می‌باشد. با وجود این، تغییرات شدید دبی طی سال آبی و آبدهی بالای این چشمه نشان دهنده رژیم مجرای غالب بر سیستم تغذیه این چشمه است زیرا تخلیه زیاد چشمه، نیاز به وجود جریان‌های مجرای برای تأمین این حجم از آب دارد.

رخمون چندانی ندارند. جریان آشفته در میان مجاری با بازشدگی بیشتر از ۱ سانتیمتر جریان دارد و آب زیرزمینی از طریق یک چشمه بزرگ تخلیه می‌شود. ضریب هدایت ویژه و دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در سیستم مجرای یکنواخت نیست. سیستم مجرای از طریق فروچاله‌ها و درزه‌های انحلالی موجود در سنگ برهنه تغذیه می‌شود (ورتینگتون، ۲۰۰۷: ۵۳؛ رئیسی و همکاران ۲۰۰۳: ۱۶-۱۷). سیستم جریان کاملاً افشان یا کاملاً مجرای به‌ندرت در طبیعت وجود دارد و معمولاً رژیم غالب در طبیعت ترکیبی از این دو سیستم است. با وجود این، جریان مجرای را می‌توان به عنوان شاخص جریان موجود در یک کارست بالغ معرفی کرد. مطابق بررسی‌های انجام شده در منطقه مورد مطالعه، ۱۶ چشمه سازوکار گسلی و ۱۰ چشمه مکانیسم درز و شکافی دارند. در واقع گسل‌های موجود در منطقه زهکش‌های اصلی را تشکیل داده و عمدتاً جریان آب در راستای این گسل‌ها تخلیه می‌شوند (شکل ۸). میزان باز شدگی درزه‌های غالب در منطقه کمتر از ۱ سانتیمتر است. با وجود این، حضور شکستگی‌های بزرگ، درزه‌های انحلال یافته و گسترش گسل‌ها با شیب زیاد به دلیل قرار گرفتن در زون تراستی باعث شده تا در نواحی گسله و خرد شده، بخش عمده‌ای از جریان در این مجاری حرکت کند و سیمای رژیم مجرای غالب‌تر گردد. در واقع لایه‌های کربناته موجود در محدوده مورد مطالعه شدیداً تحت تأثیر تنش‌های تکتونیکی



شکل ۸: تأثیر لیتولوژی و گسل در روند حرکت آب زیرزمینی و نحوه زهکشی



شکل ۹: رابطه بین تغییرات میزان آبدهی و بارش در طی سال آبی برای چشمه گاماسیاب

نتیجه گیری

با توجه به ارزیابی‌های به عمل آمده از منطقه مورد مطالعه، نتایج زیر به دست آمده است:

۱- ژئومورفولوژی کارست در منطقه گسترش دارد و بر اساس رده‌بندی به لحاظ ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه از نوع کارست انتقالی و همچنین از دیدگاه تکتونیکی در رده کارست کوهزایی خرد شده می‌باشد.

۲- گسل‌ها زهکش‌های اصلی چشمه‌ها هستند و نقش بارزی در افزایش نفوذپذیری، ذخیره آب و توسعه کارست در منطقه دارند.

۳- بر اساس نتایج آزمایش ردیابی سرعت متوسط جریان آب زیرزمینی در بخش‌هایی که ماده رنگی ردیابی شده است، ۱/۶ سانتیمتر بر ثانیه است که در محدوده سرعت حرکت آب در نواحی توسعه یافته کارستی قرار دارد و نشان دهنده حاکم بودن سیستم جریان مجرای می‌باشد.

۴- با توجه به آنالیز هیدروشیمی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه، تیپ آب اکثر چشمه‌ها عموماً با تیپ آب آبخوان‌های کارستی مطابقت دارد و به صورت بیکربنات کلسیک-منیزیک است.

۵- میزان مواد محلول در چشمه‌ها پایین است که نشان دهنده نزدیکی محل تغذیه با محل تخلیه می‌باشد.

۶- منشأ کلسیم و منیزیم موجود در این چشمه‌ها ناشی از انحلال کلسیت و دولومیت است و در اکثر چشمه‌ها تبادل کاتیونی انجام شده است.

۷- برآورد نمایه‌های اشباع کلسیت و دولومیت نشان می‌دهد که منطقه نسبت به این دو نمایه تحت اشباع می‌باشد و آب زیرزمینی به تکامل ژئوشیمیایی نرسیده است. همچنین تأثیر انحلال دولومیت بر هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی بیشتر از انحلال کلسیت می‌باشد.

منابع و مأخذ

- ۱- افراسیابان، احمد (۱۳۷۲). مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی، کرمانشاه-تهران.
- ۲- بهیاری، مهدی و محمد محجل (۱۳۸۷). پیدایش ساختارهای Pop up ترفشارشی در زون برخوردی نئوتتیس: مطالعه موردی کوه‌های گرین در باختر ایران. دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. جلد اول.
- ۳- قبادی، محمد حسین (۱۳۸۶). زمین‌شناسی مهندسی کارست، همدان: انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، چاپ اول.
- ۴- طاهری، کمال و عزت اله رئیسی (۱۳۸۹). منابع کارست ایران، مقدمه‌ای بر یک مفهوم. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.

- abutment of the Shahid Abbaspour dam, southern Iran. Eng Geol. 82.
- 18- Karimi, H. Keshavarz, T. Mohammadi, Z. Raeisi, E (2007). Potential leakage at the Khersan 3 Dam Site, Iran: a hydrogeological approach. Bull Eng Geol Environ. 66.
 - 19- Lamoreaux, P.E. Lamoreaux, J (2007) Karst: the foundation for concepts in hydrogeology. Bull Eng Geol Environ, 51.
 - 20- Magaritz, M. Nadler, A. Koyumdjisky, H. Dan, N (1981) The use of Na/Cl ratio to trace solute sources in a semiarid zone. Water Resour Res, 17.
 - 21- Milanovic, PT (1981). Karst hydrogeology. Water Resources Pubs, Fort Collins, Colo.
 - 22- Milanovic, PT (2004). Water resources engineering in karst. CRC.
 - 23- Mohammadi Z, Raeisi E (2007). Hydrogeological uncertainties in delineation of leakage at karst dam sites, the Zagros Region, Iran. Journal of Cave and Karst Studies. 69(3).
 - 24- Raeisi, E. Pezeshkpoure, P. Moore, F (1993) Characteristics of karst aquifer as indicated temporal changes of the spring's physico-chemical parameters. International journal of science, Shiraz University, 17(1).
 - 25- Raeisi, E. Karami, G. H (1997) Hydrochemographs of Bergan karst spring as indicators of aquifer characteristics. Cave and karst science, 59(3).
 - 26- Raeisi, E, Karimi, H, Zare, M (2003) Hydrodynamic behavior of the Gilan karst spring, west of the Zagros. Iran. Cave and karst science, 3(1).
 - 27- Raeisi, E, (2008) Groundwater storage calculation in karst aquifers with alluvium or No-flow boundaries. Cave and karst science, 63(3).
 - 28- Sami K (1992) Recharge mechanisms and geochemical processes in a semi-arid sedimentary basin, Eastern cape, South Africa. Journal of Hydrology, 139.
 - 29- Unsal, N, Celik, M (2008) Hydrochemistry along the flow path of a confined aquifer, Duzce plain, north western Turkey. Bull Eng Geol Environ, 67.
 - 30- Worthington, S.R.H (1991) Karst hydrogeology of the Canadian rocky mountains. Ph.D thesis, McMaster University, USA.
 - 31- Worthington, S.R.H (2007) Ground-water residence time in unconfined carbonate aquifers. Journal of cave and karst studies, 69(1).
- ۵- کریمی، حاجی و محسن توکلی (۱۳۸۶). بررسی منشأ آب‌های ظاهر شده در تونل آب‌بر نیروگاه سیمره، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد دوم.
 - ۶- کلانتری، نصرالله؛ رحیمی، محمدحسین و چرچی، عباس (۱۳۸۶). «استفاده از دیاگرام‌های ترکیبی، تحلیل عاملی و نمایه‌های اشباع در ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت‌های زویرچری و خهران»، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد دوم.
 - ۷- موسیوند، محمد صادق (۱۳۸۵). «بررسی زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد گرین نهاوند»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا.
 - ۸- وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای غرب، (۱۳۸۴). «گزارش مطالعات ردیابی طرح سد مخزنی گرین»، مهندسین مشاور گمانه کاو.
- 9- Afrasiabian, A (2007). The importance of protection and management of karst water as drinking water resource in Iran, Environ. Geol. 52.
 - 10- Appelo, C.A.J. Postma D (1996) Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Rotterdam.
 - 11- Ashjari, J. Raeisi, E (2006). Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. Cave and karst science, 68(3).
 - 12- Atkinson, T. C (1997) Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills. Journal of Hydrology, 35.
 - 13- ASTM. (1995) ASTM D5717-95 Standard guide for design of groundwater monitoring system in karst and fractured rock aquifers. The American society for testing and materials.
 - 14- Christophe, J. G. Darnault (2008). Karst aquifer: hydrogeology and exploitation, overexploitation and contamination of shared groundwater resource. NATO Science for peace and security series.
 - 15- Dixon W, Chiswell B (1992) The use of hydrochemical sections to identify recharge areas and saline intrusions in alluvial aquifers, southeast Queensland, Australia. Journal of Hydrology, 130.
 - 16- Ford D.C, Williams PW (2007) Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, London
 - 17- Ghobadi M.H., Khanlari, G.R., Djalaly, H (2005) Seepage problems in the right