

هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی منطقه کلاله، استان گلستان

قمرالدین میرحسینی^۱، رحیم باقری^{۲*}، یعقوب نیک قوجق^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. کارشناس ارشد، شرکت آب منطقه‌ای گلستان، گرگان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۱۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۴/۱۷)

چکیده

منطقه کوهستانی کلاله در شرق استان گلستان واقع شده است. وجود سنگ‌های آهکی کارستی و میانگین بارش سالانه نسبتاً زیاد منطقه سبب شده است که چشمه‌های کارستی بزرگی همچون زاو، آق‌سو و یل چشمه در منطقه به وجود آید. در این تحقیق توسعه کارست در منطقه کلاله و حوضه آبرگیر چهار چشمه نسبتاً بزرگ منطقه براساس فاکتورهای زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی بررسی شده است. در این منطقه سازندهای آهکی لار، تیرگان و مزدوران و سازند شیلی سرچشمه رخنمون داشته است که چشمه‌ها از آنها تخلیه می‌شوند. دو سازند لار و تیرگان در مجاور یکدیگر پتانسیل تشکیل حوضه آبرگیر چشمه بزرگ زاو را داشتند. با بازدید صحرایی و مشاهده عوارض مختلف کارستی همچون گودی مسدود، آبروچاله و درزه و شکستگی‌های مختلف در سازند کارستی لار، حوضه آبرگیر این چشمه در این سازند تشخیص داده شد. نوسانات دبی در چشمه آق‌سو در سازند مزدوران نسبت به تیرگان (یل چشمه بالا) بیشتر است، اما میزان حجم ذخیره آن به دلیل کمی ضخامت سازند، کمتر است. نوع جریان در همه چشمه‌ها از نوع مجرای و افشان است. یل چشمه پایین نیز دبی و نوسانات کم داشته که مشخصه سازندهای شیلی همچون سازند سرچشمه است. همچنین، نتایج بررسی منحنی فرود نشان داد چشمه‌های زاو و یل چشمه بالایی با سه رژیم خطی فرود مختلف، از یک سفره تکامل یافته کارستی تغذیه می‌شود؛ درحالی‌که منحنی فرود آق‌سو و یل چشمه پایینی یک رژیم فرود دارد که می‌تواند به دلیل توسعه کمتر کارست در حوضه آبرگیر باشد. ضریب خشکیدگی این چشمه‌ها نیز نتایج یادشده را تأیید کرده‌اند. همه چشمه‌ها تقریباً منشأ یکسان و تیپ غالب بی‌کربناته-کلسیک دارند. فرایند تبادل یونی مستقیم نیز علاوه بر پدیده انحلال در منطقه تا حدودی رخ داده است. همه چشمه‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت اشباع تا فوق اشباع، ولی نسبت به ژیپس و هالیت تحت اشباع‌اند.

کلیدواژگان: استان گلستان، توسعه کارست، حوضه آبرگیر، چشمه‌های کارستی، منحنی فرود.

مقدمه

حدود ۲۵ درصد از منابع آب‌های زیرزمینی جهان در تشکیلات کارست ذخیره شده اند و به عنوان یکی از منابع مهم تأمین‌کننده نیازهای آبی روی کره زمین شناخته شده‌اند [۱]. در ایران نیز حدود ۱۱ درصد از وسعت کشور را نواحی کارستی تشکیل می‌دهد. آبخوان‌های کارستی، مخازن زیرزمینی به شدت ناهمگنی هستند که سطح ایستایی در این آبخوان‌ها یک سطح پیوسته نیست و شیب منطقه‌ای و محلی دارد [۲].

چشمه‌های کارستی محل تخلیه طبیعی آبخوان‌های کارستی است. در این سیستم‌ها بیشتر مجاری انحلالی در ارتباط با چشمه‌های کارستی است، بنابراین با استفاده از داده‌های سری زمانی تخلیه چشمه‌ها و منحنی فروکش آنها، می‌توان با هزینه بسیار کمی در زمینه خصوصیات سفره آبدار کارستی اظهار نظر کرد و نوع جریان (افشان یا مجرای) سهم هر نوع جریان، نوع و حجم آب ورودی، رژیم تغذیه (بارانی یا برفی) و حتی روند تغذیه یک چشمه کارستی را تعیین کرد [۳-۵]. برای استفاده از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سفره کارستی ابتدا باید تأثیر عوامل خارج از سیستم را روی چشمه حذف و سپس تأثیر عوامل داخلی را بر سفره کارستی بررسی کرد [۲ و ۶]. بنابراین، با بررسی ویژگی‌های هیدروژئولوژی و هیدروشیمیایی چشمه‌های کارستی می‌توان به میزان توسعه کارست در یک ناحیه پی برد [۷]. آبخوان‌های کارستی در مقایسه با آبخوان‌های دیگر شرایط مساعدی را برای تغذیه از خود نشان می‌دهند [۸]. شناخت رفتار هیدروژئولوژیکی لایه‌های آبدار کارستی، تعیین مسیرهای جریان و منشأ تغذیه در سفره‌های کارستی با استفاده از روند تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها، طی چند دهه اخیر، رواج بسیاری داشته است [۹-۱۹]. تعیین مسیر حرکت آب در سفره‌های کارستی بسیار اهمیت دارد و نسبت به محیط‌های دیگر پیچیده‌تر است [۱]. منطقه کوهستانی کلاله در شرق استان گلستان واقع شده است. این منطقه کوهستانی بیشتر از سنگ‌های آهکی کارستی تشکیل شده است. وجود این نوع سنگ‌ها و میانگین بارش سالانه نسبتاً زیاد منطقه سبب شده است که چشمه‌های کارستی بزرگی در منطقه به وجود آید. در این منطقه، چشمه‌های پرآبی همچون زاو، آق‌سو و یل چشمه جریان دارد که منشأ آنها آبخوان‌های کارستی است. در این منطقه تا کنون هیچ

مطالعه‌ای انجام نشده است. در کارهای انجام‌شده در مناطق دیگر معمولاً حوضه آبرگیر بیشتر از طریق بیلان هیدرولوژیکی تعیین شده است و همچنین فقط یک سازند آهکی غالب در منطقه وجود داشته است، اما در منطقه کلاله سازندهای آهکی غالب لار، تیرگان و مزدوران در کنار یکدیگر و در مجاور سازند شیلی سرچشمه قرار گرفته‌اند و وسعت زیادی نیز دارند؛ به طوری که پتانسیل توسعه کارست متفاوتی دارند. چشمه‌هایی که از آنها تخلیه می‌شود، خصوصیات هیدروژئولوژیکی مختلفی دارند. بنابراین، فقط با توجه به مطالعات بیلان، تفکیک حوضه آبرگیر در این منطقه امکان‌پذیر نیست و نیاز به مطالعات تکمیلی همچون مطالعات کارست به‌طور هم‌زمان دارد. همچنین، در این تحقیق پارامترهای مختلف همچون ضریب خشکیدگی و ضریب ذخیره نیز برآورد شده است. بنابراین، هدف اساسی از انجام این تحقیق، مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی، کارست، هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی منطقه برای تعیین حوضه آبرگیر و بررسی توسعه کارست در این سازندهای آهکی است. تا کنون مطالعه‌ای برای بررسی توسعه کارست در این سازندها به‌طور هم‌زمان انجام نشده است.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده در شرق استان گلستان، در منطقه کلاله و بین دو زون البرز شرقی و غرب کپه‌داغ قرار دارد. بیشینه ارتفاع حدود سه هزار متر از سطح دریاست، تاق‌دیس‌های این ناحیه بیشتر روند شمال خاوری-جنوب باختری دارند و یال شمالی کم‌شیب و یال جنوبی آن پرشیب است. مهم‌ترین سازندهای منطقه مطالعه شده به ترتیب از قدیم به جدید شامل سازند آهک-دولومیتی لار، سازند آهکی چمن بید و سازند آهکی مزدوران به سن ژوراسیک، سازندهای آهکی-دولومیتی تیرگان و سازند مارنی سرچشمه به سن کرتاسه و سازند شیلی خانگیران به سن پالئوسن و گسترده‌ترین رسوبات و لس‌های کواترنری هستند [۲۰ و ۲۱] (شکل ۱).

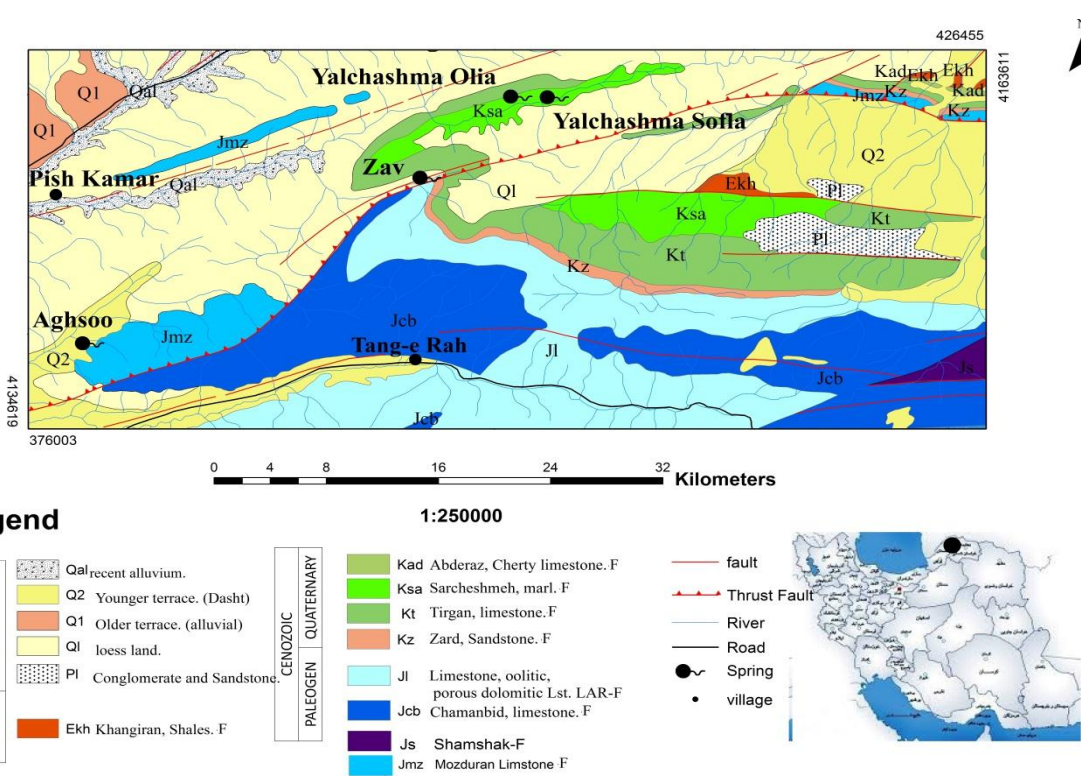
از نظر تکتونیکی گسل‌های متعددی با روند شمال شرق-جنوب غرب سبب به هم‌ریختگی منطقه شده است به طوری که بر اثر عملکرد این گسل‌ها، سیستم درزه‌ها، توسعه یافته و محیط مساعد برای چرخه آب در سنگ‌های کربناته را فراهم آورده است. عملکرد ساختاری و هیدروژئومورفولوژیکی این راندگی، تأثیر مهمی در ظهور چشمه‌های منطقه به خصوص

تغییرات دبی آنها به ترتیب بین ۵۰- ۱۷۰ لیتر بر ثانیه برای یل چشمه پایینی، ۳- ۲۰ لیتر بر ثانیه برای یل چشمه بالایی، ۵۰- ۵۰۰ لیتر بر ثانیه برای چشمه آق سو و ۱۰۰- ۲۵۰۰ لیتر بر ثانیه برای چشمه زاو اندازه گیری شده است.

مواد و روش‌ها

برای محاسبه و تحلیل پارامترهایی همچون، حجم ذخیره دینامیکی چشمه‌ها، زمان مرگ چشمه‌ها، منحنی تاريسمان و ضریب فرود آنها و همچنین مطالعه کیفی چشمه‌های کارستی منطقه، از داده‌های تغییرات آبدهی و کیفی آنها، که معرف خصوصیات کارست آن منطقه است، استفاده شده است.

چشمه زاو ایفا کرده است. به طوری که در برابر آب‌های ورودی از نقاط دور دست به صورت یک سد هیدرولیکی عمل کرده و همچنین جهت جریان عمومی آب‌های زیرزمینی درون حوضه‌ای و برون حوضه‌ای را نیز کنترل می‌کند. بنابراین، منطقه مطالعه شده برای توسعه کارست مساعد بوده و سبب پدیده‌های زمین ریخت‌شناسی کارستی متنوعی نظیر آبروچاله و چشمه شده است. به دلیل مرتفع بودن منطقه، دما به طور معمول کم است. میزان نزولات جوئی بیش از ۵۰۰ میلی‌متر در سال بوده و اغلب ریزش‌های آسمانی به صورت باران و اندکی برف است. منطقه مطالعه شده شامل یک آبخوان کارستی توسعه یافته است که چندین چشمه مهم کارستی (شامل یل چشمه، آق سو و زاو) از آن خارج می‌شود.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده

$$V = \frac{Q_0 \times 86400}{\alpha} \tag{2}$$

$$t = \frac{t \times \log e}{\log \frac{Q_0}{Q_t}} \tag{3}$$

که در این فرمول‌ها، Q_0 دبی اولیه که روی منحنی تاريسمان انتخاب می‌شود، Q_t دبی ثانویه در زمان t ؛ مدت زمان بین دبی اولیه و ثانویه، V : حجم ذخیره

بر اساس مبانی نظری و فرمول‌های هیدرو دینامیکی که مایلت (۱۹۰۵) [۲۲] برای منحنی پس‌روی ارائه کرده است، می‌توان ضریب تخلیه α (معادله ۱)، ذخیره دینامیکی V (معادله ۲) و زمان مرگ چشمه t_0 (معادله ۳) را محاسبه کرد.

$$\alpha = \frac{\log \frac{Q_0}{Q_t}}{. / 4343 (t)} \tag{1}$$

منطقه مطالعه شده پوشش گیاهی و جنگلی دارد، مقدار درصد نفوذ ۴۲ درصد در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان بارش حدود ۵۰۰ میلی‌متر در سال در این منطقه، مقدار مساحت حوضه آبرگیر این چشمه‌ها محاسبه شد. مساحت همه چشمه‌ها در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به وسعت و مساحت رخنمون سازندهای کارستی در منطقه و مساحت‌های به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که منطقه تغذیه این چشمه‌ها در محدوده نزدیک هر چشمه قرار دارد و به احتمال زیاد از تاقدیس‌های مربوط به خود تأمین می‌شود. در این منطقه سازندهای آهکی لار، تیرگان و مزدوران و سازند شیلی سرچشمه رخنمون دارند که چشمه‌ها از آنها تخلیه می‌شوند. منطقه کلاله محل رخنمون دو سازند آهکی لار و تیرگان در کنار یکدیگر است که در دیگر مناطق فقط یکی از دو سازند وجود دارد. این دو سازند از نظر پتانسیل برای توسعه کارست متفاوت‌اند. در این منطقه سازند آهکی مزدوران نیز رخنمون دارد. ابتدا گمان بر این بود که حوضه آبرگیر چشمه‌بزرگ زاو، سازند تیرگان باشد، اما با بررسی بیشتر مشخص شد که این چشمه از سازند کارستی لار تخلیه می‌شود و حوضه آبرگیر آن در این سازند قرار دارد. این چشمه نوسانات زیاد دبی دارد که نتیجه توسعه کارست زیاد در این سازند است، اما چشمه‌های مربوط به سازند تیرگان دبی و نوسانات کمتری نسبت به سازند لار در طی سال دارند. با بازدیدهای صحرائی و بررسی‌های زمین‌شناسی، توسعه کارست در این منطقه بررسی شد. در سازند لار عوارض مختلف کارستی همچون گودی مسدود، آبروچاله و درزه و شکستگی‌های مختلف بر اثر عملکرد گسل‌ها مشاهده شد، اما در محدوده سازند تیرگان عوارض کمتری مشاهده شده و چشمه‌ها بیشتر از مرز لایه‌بندی تخلیه می‌شوند.

دینامیکی و t_0 : مدت زمان تخلیه چشمه با دبی Q_0 هستند. ابتدا با استفاده از بازدیدهای صحرائی و نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ منطقه، نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده با استفاده از نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترسیم شد. سپس، با استفاده از رابطه ۴ مساحت حوضه آبرگیر مورد نیاز برای چشمه کارستی محاسبه شد:

$$A = \frac{Q}{(P \times I)} \quad (4)$$

که در این معادله، A مساحت حوضه آبرگیر چشمه، Q دبی سالانه چشمه، P میزان بارش سالانه و I ضریب نفوذ بارش هستند. با استفاده از روشی که مالیک و وجتکوا (۲۰۱۲) [۲۳] ارائه کرده‌اند درجه توسعه کارست آبخوان‌های کارستی محاسبه شد. در پایان، با ترسیم منحنی تارسمان چشمه‌ها، تعیین حجم ذخیره دینامیکی مخازن، میزان ضریب آلفا و در نهایت بررسی نتایج شیمیایی چشمه‌ها، به تحلیل نتایج به‌دست‌آمده درباره میزان توسعه کارستی منطقه پرداخته شده است.

یافته‌های تحقیق

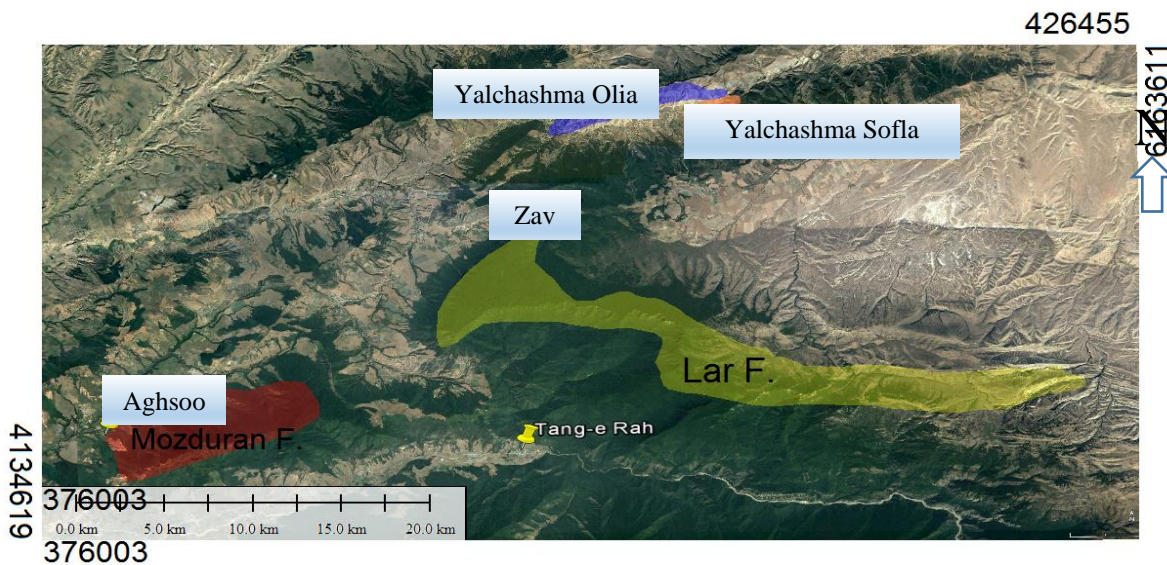
تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی

برای تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی، مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی مورد نیاز است. برای تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی زاو، یل چشمه و آق‌سو در ابتدا با استفاده از عکس‌های هوایی و نقشه‌های زمین‌شناسی محدوده حوضه آبرگیر هر یک از چشمه‌های کارستی مشخص شده است. سپس، با استفاده از مطالعه هیدروژئولوژیکی و بیلان، محدوده‌های پیشنهادی اصلاح شده است.

با توجه به مطالعات انجام‌شده در این زمینه در مناطق مختلف [۲۴-۲۶] و نظر کارشناسی و با توجه به اینکه

جدول ۱. پارامترهای مربوط به تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه مطالعه‌شده

نام چشمه	مساحت حوضه آبرگیر (m^2)	ضریب نفوذ بارش	کل بارش سالانه (m)	حجم آب خروجی سالانه (m^3)
زاو	۸۵	۰/۴۲	۰/۶۵	۲۳۳۰۰۰۰۰
یل چشمه بالا	۱/۲	۰/۴۲	۰/۶۵	۱۳۵۰۰۰
یل چشمه پایین	۹	۰/۴۲	۰/۶۵	۲۱۴۰۰۰۰
آق‌سو	۳۲	۰/۴۲	۰/۶۵	۷۴۰۰۰۰۰



شکل ۲. حوضه آبخیز چشمه‌های کارستی

شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ و جدول ۲، منحنی فرود چشمه‌های زاو و یل چشمه بالا سه زیررژیم خطی با مقادیر کم ضریب α دارند. رابطه منحنی فرود زاو و یل چشمه بالا به ترتیب به صورت

$$Q = 17e^{-0.002t} + 16e^{-0.0033t} + 4e^{-0.0096t} \quad \text{و} \\ Q = 2435e^{-0.0013t} + 1463e^{-0.00194t} + 201e^{-0.007t}$$

محاسبه شده است. براساس روش مایلت ووجتکوا (۲۰۱۲) [۲۲]، درجه توسعه کارست این چشمه‌ها ۲/۷ درصد برآورد شد. در این نوع از آبخوان‌ها درز و شکاف‌های کوچک غلبه دارند. با توجه به ضرایب α این چشمه‌های کارستی که ابتدا کم (ضریب α_1) و افزایش یافته (ضریب α_2) و دوباره کاهش یافته است (ضریب α_3)، می‌توان چنین استنباط کرد که کم‌بودن ضریب α_1 به علت کم‌بودن توسعه کارست در قسمت بالایی آبخوان و همچنین به علت پوشش گیاهی و یک لایه از مواد ریزدانه (مانند لس) و تغذیه ثابت از یک منبع (مانند برف) برای یک دوره است که میزان نفوذ به آبخوان را کاهش داده است. زیادبودن ضریب α_2 را به زهکشی از درز و شکاف‌های بزرگ می‌توان نسبت داد. کاهش دوباره ضریب α_3 زهکشی از خلل و فرج ریز باقی‌مانده است. منحنی فرود یل چشمه پایین و آق‌سو، دارای یک زیر رژیم خطی با مقادیر زیاد ضریب α ، درجه توسعه کارست آن ۲/۳ درصد است و مناطق تکتونیزه گسلی با نفوذپذیری زیاد از مشخصه این نوع از آبخوان‌هاست. رابطه منحنی فرود

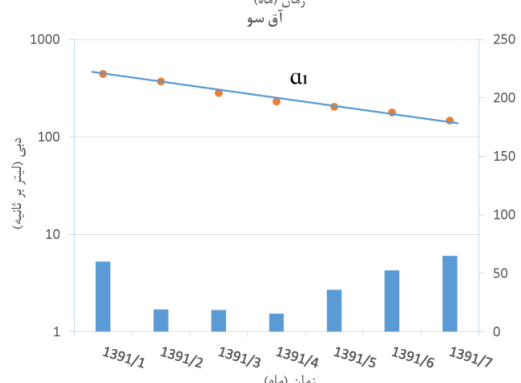
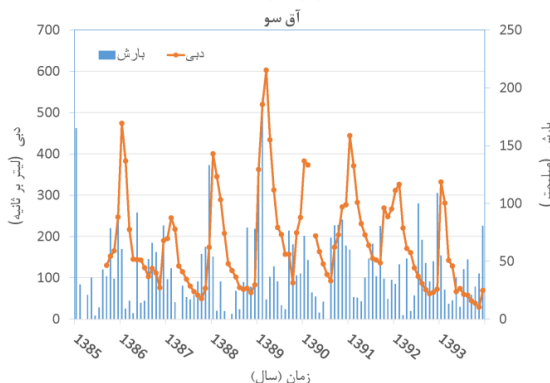
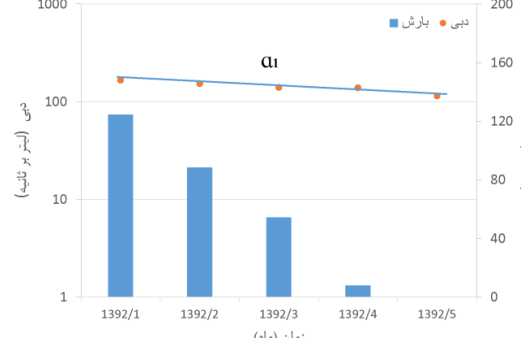
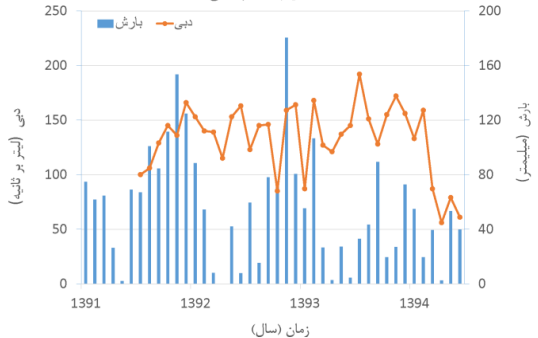
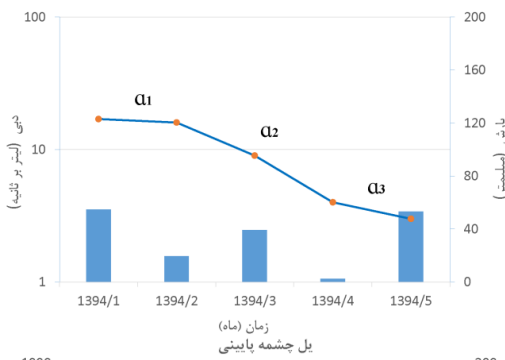
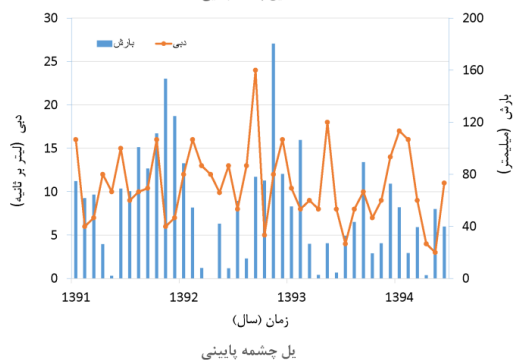
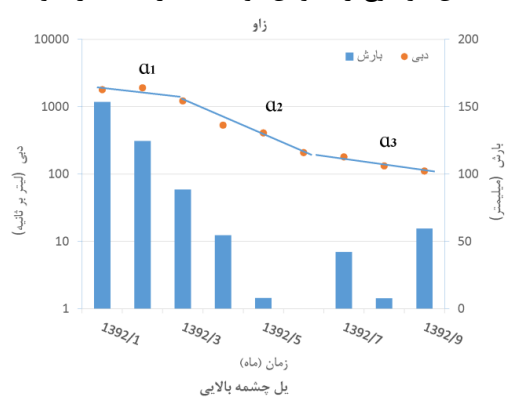
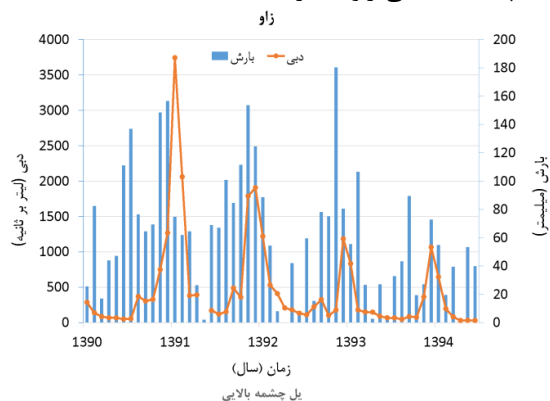
بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که سازند آهکی لار پتانسیل بیشتری برای توسعه کارست دارد و دارای چشمه‌های بزرگ‌تر و حجم ذخیره بیشتر است. نوسانات دبی در چشمه آق‌سو در سازند مزدوران نسبت به تیرگان (یل چشمه بالا) بیشتر است، اما میزان حجم ذخیره آن به دلیل کمی ضخامت سازند، کمتر است. نوع جریان در همه چشمه‌ها از نوع مجرایبی و افشان است. یل چشمه پایین نیز دبی و نوسانات دبی کم دارد که مشخصه سازندهای شیلی است.

هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی

منحنی فرود چشمه‌ها متأثر از وجود شرایط خاص در رژیم تخلیه چشمه‌ها همچون رژیم بارش، لیتولوژی، طرز قرارگیری لایه‌ها و ضخامت آنها، بافت و تخلخل سنگ‌هاست. منحنی فرود در نواحی کمتر توسعه‌یافته کارستی، به طور معمول روند خطی یکنواخت را نشان می‌دهد، اما رفتار هیدروگراف چشمه‌ها در نواحی با کارست توسعه‌یافته، سه ضریب فرود متفاوت را نشان می‌دهند. هرچه میزان ضریب فرود بیشتر باشد، نشان‌دهنده شیب بیشتر آبنمود، فروکشی جریان و در نتیجه بیان‌کننده سرعت تأثیرپذیری دبی جریان از بارش خواهد بود و میزان توسعه کارست در حوضه را نشان می‌دهد [۱۹]. برای ارزیابی تغییرات زمانی دبی چشمه‌های کارستی، هیدروگراف آنها در سال‌های آبی مختلف ترسیم شده است. به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی، منحنی‌های فرود چشمه‌های کارستی ترسیم و در

آبگیر این چشمه‌ها را نشان می‌دهد. در چشمه‌های کارستی یل چشمه بالا، یل چشمه پایین و آق‌سو، نسبت جریان سریع به جریان پایه تقریباً با هم برابر است، که میزان درجه توسعه کارست این چشمه‌های کارستی نسبت به چشمه کاستی زاو کمتر است.

یل چشمه پایین و آق‌سو به ترتیب به صورت $e^{-0.003t}$ و $Q=166$ و $Q=444e^{-0.006t}$ است. نوع جریان در همه چشمه‌ها از نوع مجرای و افشان است. همچنین، در چشمه کارستی زاو جریان سریع نسبت به جریان پایه غلبه دارد، که این موضوع زیادبودن توسعه کارست در حوضه



شکل ۳. هیدروگراف دبی و بارش چشمه‌های زاو، یل چشمه بالا، یل چشمه پایین و چشمه آق‌سو

جدول ۲. مشخصات پارامترهای هیدروژنولوژیکی محاسبه شده در چشمه‌های کارستی منطقه

نام چشمه‌ها	زاو	یل چشمه علیا (بالا)	یل چشمه سفلا (پایین)	آق سو
ضریب فرود (α_1)	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶۱
ضریب فرود (α_2)	۰/۰۱۹۴	۰/۰۲۳۱	-	-
ضریب فرود (α_3)	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹۶	-	-
حجم ذخیره دینامیکی (m^3)	$1/89 \times 10^{11}$	$8/3 \times 10^8$	$4/78 \times 10^9$	$6/28 \times 10^9$
ضریب خشکیدگی (t_0)	۷۶/۶	۶۹/۲	۱۲۲/۷	۱۶۲/۸
درجه کارستی شدن	۲/۷	۲/۷	۲/۳	۲/۳
دبی پایه (%)	۱۶/۵	۴۷	۵۹	۴۸
جریان سریع (%)	۸۳/۵	۵۳	۴۱	۵۲
مشخصه رابطه منحنی فرود	$Q=2435e^{-0.0194t}+1463e^{-0.007t}$	$Q=17e^{-0.02t}+16e^{-0.0231t}+4e^{-0.096t}$	$Q=166e^{-0.02t}$	$Q=444e^{-0.061t}$

ممکن است فقط یک روند را نشان دهند. بنابراین، باید نوع بارش را نیز در تفاسیر در نظر گرفت. در منطقه مطالعه شده میزان برف کم است. بنابراین، کم بودن ضریب فرود می‌تواند به دلیل توسعه کم کارست در برخی مناطق باشد.

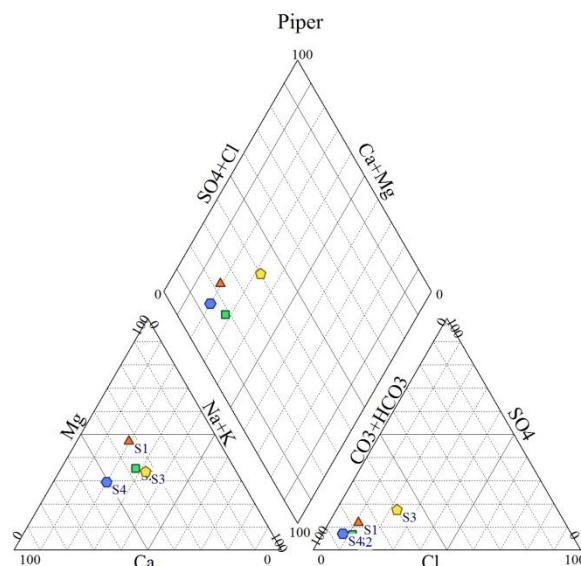
بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها

مقادیر هدایت الکتریکی و pH در چشمه‌ها به ترتیب برابر با ۶۱۰ و ۷/۲۲ در یل چشمه بالا، ۷۷۳ و ۷/۹ در یل چشمه پایین، ۷۲۵ و ۷/۱۷ در چشمه آق سو و ۵۶۶ $\mu\text{mhos/cm}$ و ۸ در چشمه زاو هستند. از کاربردی‌ترین نمودارهایی که برای بررسی تیپ آب استفاده می‌شود، دیاگرام مثلثی پایپر است. شباهت‌ها و تفاوت‌های نمونه‌ها از طریق نمودار پایپر به خوبی مشخص می‌شود زیرا نمونه‌هایی که خصوصیات مشابه دارند به صورت گروهی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. همچنین، از نمودار پایپر برای تعیین تیپ آب، انحلال یا رسوب‌گذاری، اختلاط و تبادل یونی استفاده می‌شود. با توجه به محل قرارگیری نمونه‌های آب چشمه‌های منطقه مطالعه شده در دیاگرام پایپر، تقریباً همه نمونه‌ها غنی از کلسیم، منیزیم و بی‌کربنات هستند و سختی موقت دارند. نمونه‌ها در مثلث آنیون‌ها مقادیر مشابهی دارند، اما نسبت به غلظت کاتیون‌ها پراکندگی نشان می‌دهند که نشان دهنده تفاوت در جنس سازند و یا رخداد پدیده تبادل یونی طی مسیر جریان است (شکل ۴). به‌طور کلی، در این دیاگرام، تقریباً نمونه‌های سازندهای کارستی در نزدیکی یکدیگر پلات شده‌اند و نمونه چشمه یل چشمه پایینی (S_3) به دلیل تخلیه از سازند شیلی سرچشمه کمی انحراف (افزایش کمی یون کلر و سولفات)

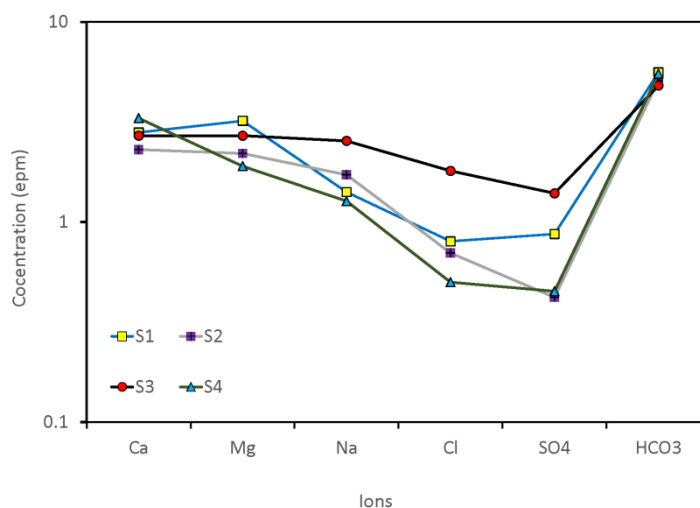
میزان ضریب خشکیدگی (زمان مرگ یا میرایی چشمه) چشمه‌های کارستی زاو و یل چشمه بالا تقریباً هم‌اندازه هستند، و مقدار آنها کم است که نشان دهنده زیاد بودن درجه توسعه کارست در منطقه است و میزان ضریب خشکیدگی یل چشمه پایین و آق سو نسبت به دیگر چشمه‌ها بالاست، که این کم بودن درجه توسعه کارست را نشان می‌دهد. میزان ضریب خشکیدگی یل چشمه نسبت به زاو کمتر است، در حالی که میزان توسعه کارست آن نیز نسبت به زاو کمتر است، که می‌تواند به دلیل تفاوت در مساحت حوضه آبرگیر این چشمه‌ها (شکل ۲ و جدول ۱) باشد. اگر مقایسه‌ای بین محاسبات و هیدروگراف چشمه‌های کارستی زاو و یل چشمه پایین داشته باشیم، مشخص می‌شود که حوضه آبرگیر زاو در مرحله پیشرفته‌تری از تحولات کارستی قرار دارد. برای مثال، دبی متوسط سالیانه زاو برابر با ۷۵۰ لیتر بر ثانیه و دبی متوسط سالیانه یل چشمه پایین ۱۳۷ لیتر بر ثانیه است، حال آنکه حجم ذخیره دینامیکی زاو $1/89 \times 10^{11}$ مترمکعب و حجم ذخیره دینامیکی یل چشمه پایین $4/87 \times 10^9$ مترمکعب است. بنابراین، با فرض اینکه بارش در هر دو منطقه هم‌زمان شروع شود و به پایان برسد، و دیگر چشمه‌ها هیچ تغذیه‌ای نداشته باشند، چشمه کارستی زاو سریع‌تر تخلیه می‌شود که نشان دهنده توسعه بیشتر کارست در این منطقه است. البته، یادآوری این نکته لازم است که در برخی از مناطق که میزان نزولات جوی بیشتر به صورت برف است، تأثیر مشخصی بر روند نزول هیدروگراف و مقدار ضریب فرود می‌گذارد. به‌طوری که با افزایش میزان تغذیه از طریق برف، به دلیل کاهش شدت نفوذ، میزان ضریب فرود کاهش می‌یابد و

است که ناشی از تغذیه از طریق مناطق آهکی است. مقدار یون منیزیم نیز در برخی چشمه‌ها زیاد است که با توجه وجود سازند آهکی-دولومیتی همچون لار و تیرگان قابل انتظار است. سازندهای کربناته در این منطقه در برخی نقاط دولومیتی است. با گذشت زمان و تماس آب با سازندهای مختلف، امکان تغییر ترکیب شیمیایی اولیه آب وجود دارد.

نسبت به بقیه چشمه‌ها دارد. از نمودار شولر به‌منظور بررسی یکسان بودن یا نبودن منشأ نمونه‌ها، بررسی روند مقادیر یون‌های اصلی آب و مقایسه بین نمونه‌ها استفاده می‌شود [۲۷]. با توجه به شکل ۵ همه نمونه‌ها روند یکسانی دارند که نشان‌دهنده منشأ یکسان آب آنهاست. همه نمونه‌ها نسبت به بی‌کربنات غالب هستند و تیپ غالب آب به‌صورت Ca-HCO_3



شکل ۴. نمودار پایپر چشمه‌های آق‌سو (S1)، یل‌چشمه بالایی (S2)، یل‌چشمه پایینی (S3) و زاو (S4)



شکل ۵. نمودار شولر برای چشمه‌های کارستی آق‌سو (S1)، یل‌چشمه بالا (S2)، یل‌چشمه پایین (S3) و زاو (S4)

دیگر سازندهای سدیم‌دار وارد آب شده و به‌عکس کلسیم و منیزیم رسوب کرده و وارد فاز جامد شده و غلظت آنها در آب کم می‌شود. این فرایند به‌طور عکس و یا غیرمستقیم نیز می‌تواند صورت گیرد و سدیم رسوب و کلسیم به محیط محلول آزاد شود [۲۸]. برای بررسی فرایند تبادل یونی

یکی از فرایندهای غالب در طبیعت که با گذشت زمان سبب تغییر ترکیب شیمیایی آب می‌شود، پدیده تبادل یونی است که می‌تواند به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم صورت بگیرد. طی فرایند تبادل یونی، یون سدیم با یون‌های کلسیم و منیزیم تبادل می‌یابد؛ به‌طوری که یون سدیم از مارن‌ها و

یک مول SO_4 به محیط اضافه می‌شود. بنابراین، نسبت $Ca/(Ca+SO_4)$ باید مقدار $0/5$ داشته باشد که در منطقه مطالعه شده این نسبت بیشتر بوده است. دلیل بیشتر بودن این نسبت نیز می‌تواند به منشأ دیگر کلسیم همچون انحلال کربنات‌ها و یا انحلال هم‌زمان کربنات‌ها و ژپس ارتباط داشته باشد، اما با توجه به کم بودن مقدار TDS در نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که انحلال ژپس صورت نگرفته و منشأ یون کلسیم، انحلال کربنات‌هاست. نمایه اشباع (Saturation Index) هر یک از نمونه‌ها نسبت به کانی‌های کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت محاسبه شده و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه نتایج همه نمونه‌ها نسبت به کانی‌های کلسیت و دولومیت اشباع تا فوق اشباع هستند و نسبت به ژپس و هالیت تحت اشباع اند. این نتایج با توجه به اینکه سازندهای عمده در منطقه مطالعه شده آهکی-دولومیتی است، قابل توجیه است.

می‌توان از رابطه بین $Ca+Mg$ در مقابل SO_4+HCO_3 استفاده کرد. منشأ اصلی یون‌های کلسیم و منیزیم، انحلال کربنات‌ها و ژپس است. بنابراین، با رسم این دو نسبت به یکدیگر می‌توان بیان کرد که انحراف از خط ۱:۱ در این گراف می‌تواند دلیل بر افزایش و یا کاهش غلظت این کاتیون‌ها طی فرایند تبادل یونی باشد. زیرا اگر فقط عامل انحلال کربنات‌ها و ژپس منشأ اصلی بودند، باید همه نمونه‌ها روی خط قرار می‌گرفتند. درباره نمونه‌های منطقه مطالعه شده می‌توان بیان کرد که پدیده تبادل یونی مستقیم در منطقه رخ داده است. طی این پدیده غلظت یون سدیم در آب افزایش و به تبع غلظت کلسیم و یا منیزیم کاهش یافته است. البته، این فرایند عامل اصلی در منطقه نیست و به مقدار کمی رخ داده است. نسبت $Na/(Na+Cl)$ بیشتر از $0/5$ است که افزایش غلظت سدیم طی فرایند تبادل کاتیونی را نشان می‌دهد. طی انحلال ژپس یک مول Ca و

جدول ۳. نمایه اشباع کلسیت (SI_c)، دولومیت (SI_d)، ژپس (SI_g) و هالیت (SI_h) در نمونه آب چشمه‌های منطقه

نام محل نمونه برداری	SI_h	SI_g	SI_d	SI_c
آق‌سو	-۷/۴۶	-۱/۷۱	۰/۵۷	۰/۱۵
یل چشمه بالایی	-۷/۶۰	-۱/۹۹	۰/۴۲	۰/۱۵
یل چشمه پایینی	-۷/۰۳	-۱/۴۵	۱/۷۱	۰/۸۲
زاو	-۷/۸۸	-۱/۸۳	۲/۰۸	۱/۰۹

نتیجه‌گیری

چشمه‌های کارستی منطقه کلاله دارای تغییرات دبی بین ۵۰-۱۷۰ لیتر بر ثانیه برای یل چشمه پایینی، ۳-۲۰ لیتر بر ثانیه برای یل چشمه بالایی، ۵۰-۵۰۰ لیتر بر ثانیه برای چشمه آق‌سو و ۱۰۰-۲۵۰۰ لیتر بر ثانیه برای چشمه زاو هستند. نوع جریان در همه چشمه‌ها از نوع مجرای و افشان است. مقادیر هدایت الکتریکی و pH در چشمه‌ها به ترتیب برابر با ۶۱۰ و ۷/۲۲ در یل چشمه بالا، ۷۷۳ و ۷/۹ در یل چشمه پایینی، ۷۲۵ و ۷/۱۷ در چشمه آق‌سو و $566 \mu\text{mhos/cm}$ و ۸ در چشمه زاو هستند. ابتدا گمان بر این بود که حوضه آبرگیر چشمه بزرگ زاو، سازند تیرگان باشد. با وجود عوارض مختلف کارستی همچون گودی مسدود، آبروچاله و درزه و شکستگی‌های مختلف در سازند کارستی لار، حوضه آبرگیر چشمه بزرگ زاو در این سازند تشخیص داده شد. نوسانات دبی در چشمه سازند مزدوران (آق‌سو) نسبت به تیرگان (یل چشمه بالا) بیشتر است، اما

میزان حجم ذخیره آن به دلیل کمی ضخامت سازند، کمتر است. نوع جریان در همه چشمه‌ها از نوع مجرای و افشان است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که سازند آهکی لار نسبت به سازند مزدوران پتانسیل بیشتری برای توسعه کارست دارد و دارای چشمه‌های بزرگ‌تر و حجم ذخیره بیشتر است. بر اساس منحنی فرود و ضریب آلفای چشمه‌ها چنین استنباط می‌شود که زاو و یل چشمه بالایی از یک بستر تکامل یافته کارستی تغذیه می‌شود. این در حالی است که منحنی فرود آق‌سو و یل چشمه پایینی با روند تقریباً یکنواخت نزولی است که توسعه کمتر کارست را در حوضه آبرگیر نشان می‌دهد. بررسی ضریب فرود باید با نوع بارش انجام شود. به طوری که همیشه ضریب فرود کمتر دلیل بر توسعه کارست کم نیست و می‌تواند به دلیل بارش برف باشد. به طوری که با افزایش میزان تغذیه از طریق برف، به دلیل کاهش شدت نفوذ، میزان ضریب فرود کاهش می‌یابد و ممکن است فقط یک روند را نشان دهند. بنابراین، نوع

- geography research quarterly journal. 2015;47(3):333-346.[Persian].
- [9]. Bagheri R. Leakage potential in Seymarreh dam site. MSc thesis. 1nd ed. Shiraz: Shiraz University; 2007 [Persian].
- [10]. Mohammadi-Behzad H, Cherchi GH, Kalantari N. Assessing the hydrogeological behavior of Sabz-Abad karstic spring, north of Khozestan province. *Advanced applied geology journal*. 2014;15(5):10-19.[Persian].
- [11]. Bagheri R, Raeisi E, Zare M, Mohamadi Z, Bahadori F. The source of karstic springs in east part of Ravandi Anticline using ^2H - ^{18}O , hydrochemistry, and water budget. *Proceeding of 11th symposium of geology society of Iran*. 2007;4-6; Mashhad.[Persian].
- [12]. Bagheri R, Raeisi E, Zare M, Mohamadi Z. Leakage potential in Seymareh dam site. *The 26th symposium on geosciences*. 2008;17-19; Tehran.[Persian].
- [13]. Mohammadi Z, Bagheri R, Jahanshahi R. Hydrogeochemistry and geothermometry of Chagal thermal springs, Zagros region, Iran. *Geothermics*. 2010;(39):242-249.
- [14]. Ahmed M. Lineament as groundwater exploration guides in hard-rock terranes of arid regions. *Canadian journal of remote sensing*. 1996;22(1):108-116.
- [15]. Li Sh, Zhang Q, Su M, Wang Z, Wang S. Predicting geological hazards during tunnel construction. *Journal of hard rock mechanics and geotechnical engineering*. 2010;2(3):232-242.
- [16]. Ashjari J. In influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. PhD thesis. 1nd ed. Shiraz: Shiraz University; 2007.
- [17]. Kukacka M. Self-organization for the detection of local features. *The 9th proceedings of contributed papers*. 2009;62-67; Prague.
- [18]. Kovacs A. A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. *Journal of hydrology*. 2005;303(1-4):152-160.
- [19]. Karimi H. Characterising the main karst aquifers of the Alvand 12- basin, northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach. *Hydrogeology journal*. 2005;13(5-6):787-799.
- [20]. Alavi M. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its pro-foreland evolution. *American journal of science*. 2004;304(1):1-20.
- [21]. Stocklin J, Setudehnia A. *Stratigraphic lexicon of Iran*. 1nd ed. Iran: Geological survey of Iran; 1977.
- بارش نیز در رفتار منحنی فرود مؤثر است. چشمه‌های کارستی نشان‌دهنده میزان توسعه کارست سفره‌ها هستند. بنابراین، با استفاده از داده‌های سری زمانی تخلیه چشمه‌ها و منحنی فروکش آنها، با هزینه بسیار کمی می‌توان در زمینه خصوصیات سفره آبدار کارستی اظهار نظر کرد. برای تعیین حوضه آبرگیر علاوه بر استفاده از معادله بیلان، باید بررسی زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی کارست نیز انجام شود.
- قدردانی**
- از شرکت آب منطقه‌ای گلستان به دلیل در اختیار قراردادن اطلاعات اولیه و همچنین از دانشگاه صنعتی شاهرود به دلیل فراهم کردن امکانات لازم طی انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.
- منابع**
- [1]. Ford D, Williams P. *Karst geomorphology and hydrogeology*. 2nd ed. England: John Wiley & Sons, Ltd; 2007.
- [2]. Raeisi E, Karami GH. The governing factors of the physicochemical characteristics of Sheshpeer karst spring, Iran. *Carbonate and evaporates*. 1996;11(2):162-169.
- [3]. Karimi H. Hydrogeological investigation of Mogermoon and Sar-Asiab karstic springs. *Proceeding of 9th symposium of geology society of Iran*. 2005;149-157; Tehran.[Persian].
- [4]. Maghsoodi M, Karimi H, Safari H, Chahar-Rahi Z. Evaluating the karst development in Prav-Biseton region. *Physical geography research quarterly journal*. 2009;69(8):51-65.[Persian].
- [5]. Karami GH. Hydrogeological and hydrochemical assessment of karstic springs in Palangan and Zar Ab region report. 1nd ed. Kurdistan: Kurdistan regional water authority; 2011.[Persian].
- [6]. Padilla A, Pulido-Bosch A, Mangin A. Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring. *Ground water journal*. 1994;32(2):267-277.
- [7]. White WB. Groundwater flow in karstic aquifers. In: Delleur JW, editor. *The handbook of groundwater engineering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 1998.p.1-47.
- [8]. Bagheri S, Yamani M, Jafar-Bigloo M, Karimi H, Moghimi A. The assessing of karst development and hydrodynamic characteristics of karstic aquifers in Alvand region. *Physical*

- [22]. Maillet E. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. 1nd ed. Paris: Hermann; 1985.
- [23]. Malik P, Vojtkova S. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow condition in closely spaced karstic springs. Environmental earth sciences. 2012;65(8):2245-2257.
- [24]. Karami GH, Bagheri R, Rahimi F. Determining the groundwater potential recharge zone and karst springs catchment area: Saldoran region, western Iran. Hydrogeology journal. 2016;24(8):1981-1992.
- [25]. Bagheri R, Jafari H, Momeni AA, Bagheri F. Analysis of karst spring recession curves, west of Iran. Arabian journal of geosciences. 2016;1(19):731-743.
- [26]. Allocca V, Manna F, Vita PD. Estimating annual groundwater recharge coefficient for karst aquifers of the southern Apennines (Italy). Hydrology and earth system science. 2014;18:803-817.
- [27]. Todd DK, Mays LW. Groundwater hydrology. 3rd ed. New York: John Wiley; 2005.
- [28]. Hem JD. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 1nd ed. New York: United State geological survey; 1970.