

## مقایسه هیدروژئوشیمی و هیدروژئولوژی سازندهای آسماری و سروک به عنوان مخزن چشمه‌های کارستی بزرگ زاگرس در شمال شرق خوزستان

صغری فرهادی<sup>۱</sup>، فرشاد علی‌جانی<sup>۲\*</sup>، حمیدرضا ناصری<sup>۳</sup>، حسن دانشیان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴- دکتری هیدروژئولوژی، سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

\* نویسنده مسئول: [f\\_alijani@sbu.ac.ir](mailto:f_alijani@sbu.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

### چکیده

رشته‌کوه زاگرس در ایران دربرگیرنده چشمه‌های کارستی با آبدهی بالا و دائمی می‌باشد به طوری که چشمه‌های بزرگ ایران از آهک‌های این رشته‌کوه تخلیه می‌شوند. سازندهای آسماری و سروک در زاگرس مخزن چشمه‌های با آبدهی بالا را تشکیل می‌دهند. در این مقاله هیدروشیمی و هیدروژئولوژی ۸ دهنه چشمه بزرگ با دبی میانگین بیشتر از ۱٫۵ مترمکعب در ثانیه (در بازه زمانی فروردین ۹۷ تا آذر ۹۸) واقع در شمال شرق استان خوزستان که از سازندهای کارستی سروک و آسماری تخلیه می‌شوند، مقایسه گردیده است. در ابتدا موقعیت چشمه‌های کارستی بزرگ ایران بر اساس اطلاعات موجود مشخص گردیده و محل مظهر آنها در ارتباط با توزیع سنگ‌های کارستی و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) و همچنین ارتباط دبی میانگین چشمه‌ها با تراز ارتفاعی و هدایت الکتریکی بررسی شده است. نمودار پاپیر جهت تعیین تیپ و رخساره آب چشمه‌ها و نسبت‌های یونی و نمایه‌های اشباع جهت شناسایی شدت انحلال سنگ‌های کربناتی و زمان ماندگاری آب در سیستم کارستی استفاده شده است. تیپ غالب آب‌ها بی‌کربنات-کلسیک می‌باشد و در برخی چشمه‌های آسماری تغذیه از سازند گچساران موجب تفاوت تیپ گردیده است. عدم تغییر زیاد نسبت منیزیم به کلسیم در طول زمان در چشمه‌های سروک بیانگر زیاد بودن زمان ماندگاری آب در سیستم کارستی و پایداری جریان است. برای بررسی خصوصیات سیستم جریان آب زیرزمینی در چشمه‌های کارستی مورد بررسی، هیدروگراف دبی و بارش ماهانه در دوره فروردین ۱۳۹۷ تا آذرماه ۱۳۹۸ ترسیم گردیده است. جداسازی جریان پایه از سریع به روش حداقل محلی انجام گرفته است. چشمه‌های بزرگ سروک و آسماری مورد بررسی که دبی بالاتری دارند (از جمله براهیم مردون، چالسه سربازار، سبزآب و بی‌بی ترخون) حوضه آبرگیر بزرگ و جریان پایدار دارند. با توجه به هیدروگراف‌ها، غالب چشمه‌ها جریان پایه بیشتر از جریان سریع دارند و تاقدیس کی‌نو به‌عنوان غنی‌ترین آبخوان با حداکثر ذخیره دینامیک زاگرس می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** چشمه کارستی بزرگ، خوزستان، زاگرس، هیدروشیمی، هیدروگراف.

Chen et al. (2017) Williams, 2007). بر اساس نظر

### مقدمه

حدود ۲۰ درصد سطح قاره‌ها را سنگ‌های دارای پتانسیل ۱۴ درصد سطح زمین شامل سنگ‌های کربناته کارستی شده کارستی شدن به خود اختصاص داده است (Ford and است و در برخی کشورهای خاورمیانه و آسیای مرکزی این

الکتریکی و دبی چشمه‌ها، سیستم‌های کارستی را به ۴ دسته مجرای، مجرای-افشان، افشان و افشان نوع گیتزبورگ تقسیم‌بندی نموده‌اند. براساس مطالعات آن‌ها، ضریب تغییرات چشمه‌های با سامانه مجرای بزرگ‌تر از ۱۵۰ درصد، چشمه‌های مجرای-افشان، بزرگ‌تر از ۴۰ درصد، چشمه‌های افشان کمتر از ۳۰ درصد و افشان نوع گیتزبورگ با تغییرات کم برآورد شده است. مطالعاتی در خصوص چشمه‌های کارستی بزرگ زاگرس صورت گرفته است از جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد. (Milanovic'and Aghili (1990) چشمه‌های کارستی منطقه کازرون واقع در جنوب ایران را بررسی کرده‌اند. آبخوان-های کارستی منطقه مذکور عمدتاً در سازند آسماری و به-صورت محدود در سازند سروک می‌باشد. چشمه ساسان بزرگ‌ترین چشمه منطقه مورد مطالعه با دبی میانگین ۶/۳ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. در سال ۲۰۰۹ دبی آن ۱/۱ مترمکعب در ثانیه بوده است. سایر چشمه‌های مهم منطقه مورد نظر شامل دادین (۴/۴ مترمکعب در ثانیه) و سراب شیر (۱/۲ مترمکعب در ثانیه) و چشمه آبگیر (۱/۲ مترمکعب در ثانیه) می‌باشد. باقری و همکاران (۱۳۹۷) به مطالعه چشمه-های کارستی تاق‌دیس سالدوران (چشمه‌های پیر غار، سراب باباحیدر، پیر غار و باغ رستم) واقع در استان چهارمحال و بختیاری پرداخته‌اند. دبی چشمه‌های مزبور در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ ترتیب برابر با ۱/۹، ۳ و ۰/۹۸ مترمکعب در ثانیه بوده است. با توجه به نتایج رابطه بین دبی و هدایت الکتریکی معکوس بوده، جریان غالب در منطقه مجرای و تغییرات قابل توجه دبی با هدایت الکتریکی بیانگر توسعه‌یافتگی زیاد کارست در منطقه بوده است. کریمی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی چشمه ریجاب واقع در استان کرمانشاه پرداخته‌اند. میانگین دبی چشمه مزبور در سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ برابر با ۲/۳ مترمکعب در ثانیه بوده است و از سازند آهکی آسماری تخلیه می‌گردد. ایشان بر اساس هیدروگراف چشمه و تغییرات زمانی هدایت الکتریکی، شاخص اشباع کلسیت و دولومیت، آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی نتیجه گرفته‌اند که سیستم جریان مجرای-افشان می‌باشد. همچنین مشخص گردید که بیش از نیمی از حوضه آبگیر چشمه خارج از مرزهای حوضه آبگیر سطحی قرار گرفته است. میانگین دبی این چشمه در سال ۱۳۹۹ حدود ۵ تا ۷ مترمکعب در ثانیه بوده است. مالی و

سنگ‌های کربناته کارستی، ۲۵ درصد سطح زمین را پوشانده-اند. آبخوان‌های کارستی معمولاً منابع آب زیرزمینی غنی و فراوانی فراهم می‌کنند، به‌طوری‌که منبع ارزشمندی برای صنایع و کشاورزی محسوب می‌گردند. در حال حاضر ۲۵ درصد جمعیت جهان برای تأمین آب شرب از منابع آب کارستی استفاده می‌نمایند (Ford and Gillison, 2004; Bakalowicz, 2005; Williams, 2007;). از جمله، در مدیترانه و قسمت‌های جنوب‌شرقی آسیا، آبخوان‌های کارستی اصلی-ترین منابع تأمین آب شرب محسوب می‌گردند (Christophe, 2008). به عقیده (Bakalowicz et al. (2008) بزرگ‌ترین چشمه‌های کارستی جهان در کشورهای مدیترانه‌ای و خاورمیانه واقع می‌باشند که می‌توان چشمه‌های دومانلی ترکیه (۵۰ مترمکعب در ثانیه)، رأس‌العین سوریه (۳۸/۷ مترمکعب در ثانیه)، عین‌الزکرا لبنان (۱۲/۹ مترمکعب در ثانیه)، و فیغه سوریه (۷/۵ مترمکعب در ثانیه) را نام برد. تقریباً ۱۱ درصد مساحت ایران را سازندهای کربناته تشکیل می‌دهند که ۵۵ درصد آن در رشته‌کوه‌های زاگرس واقع می‌باشد (ناصری، ۱۳۷۰). در بسیاری از مناطق کشور از جمله شیراز، کرمانشاه، ایلام، خوزستان، چهارمحال و بختیاری، لرستان و کردستان از منابع آب کارستی استفاده می‌گردد (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴). چشمه‌های کارستی محل تخلیه طبیعی آبخوان‌های کارستی بوده و ویژگی مشترک آنها ارتباط بین بارش و میزان جریان خروجی از آنها می‌باشد. ارتفاع ظهور چشمه‌های کارستی بیانگر سطح اساس فرسایش در سیستم کارستی بوده و آبدهی و خصوصیات هیدروژئولوژیکی آنها وابسته به فاکتورهایی مانند حوضه آبگیر، توان بازایی آبخوان، تخلخل مؤثر، لیتولوژی و غیره می‌باشد. در واقع چشمه‌ها بیانگر ظرفیت ذخیره دینامیک آبخوان کارستی می‌باشند و اطلاعات مهمی در خصوص فرایندهای هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی به‌ویژه در سیستم‌های با جریان پیچیده ارائه می‌نمایند (Manga, 2001). Zöhl (1960) و Gams (1966) اولین افرادی بودند که تغییرات شیمیایی چشمه‌ها را به نوع جریان آب زیرزمینی مرتبط دانسته‌اند. White (1998) بر اساس رفتار چشمه‌ها، جریان‌های کارستی را به دو نوع مجرای و افشان تقسیم نموده است. Jacobson and Longmuir (1974) بر اساس تغییرات هدایت

به‌غیراز حوضه کارستی کمرون وجود دارد که رفتارهای هیدروژئولوژیکی چشمه سبزآب را کنترل می‌کند. کلانتری و روحی (۲۰۱۸) با بررسی هیدروگراف چندساله چشمه برم جمال با سنگ مخزن آسماری و دبی میانگین  $1/3$  مترمکعب در ثانیه به این نتیجه رسیدند که سیستم جریان غالب در آبخوان آن افشان می‌باشد. کریمی وردنجانی و همکاران (۱۳۹۲) با بررسی‌های هیدروژئولوژی، زمین‌شناسی و هیدروشیمیایی نشان دادند که عمده آبدهی چشمه سوسن در تقادیس کی‌نو با دبی میانگین  $24$  مترمکعب در ثانیه به‌عنوان بزرگ‌ترین چشمه ایران، مربوط به جریان پایه است. طول زیاد تقادیس مخزن باعث گردیده که در تمام طول سال شاخص اشباع کلسیت بالاتر از یک (فوق اشباع) باشد. لذا همان‌گونه که ذکر گردید مطالعات نقطه‌ای و پراکنده‌ای در خصوص چشمه‌های کارستی بزرگ زاگرس واقع در شمال شرق استان خوزستان صورت گرفته است ولی مطالعه‌ای که موقعیت مکانی توزیع همه چشمه‌های بزرگ شمال شرق خوزستان را در مقایسه با یکدیگر و سایر چشمه‌های بزرگ ایران نشان دهد انجام نشده است. لذا هدف اصلی این مقاله ارائه توزیع مکانی چشمه‌های بزرگ کارستی ایران واقع در رشته‌کوه زاگرس و بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمی چشمه‌های واقع در شمال شرق خوزستان بر مبنای پارامترهای فیزیکی-شیمیایی اندازه‌گیری شده در سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ می‌باشد.

### مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال شرق استان خوزستان شامل گستره‌ای از زون زاگرس چین‌خورده می‌باشد. روند عمومی ساختارهای این منطقه تقریباً شمال غربی-جنوب شرقی است و در آن رسوبات پالئوزوئیک، مزوزوئیک و تریسیری به‌طور هم‌شیب روی هم قرار دارند. این رسوبات پوشش‌های حاشیه قاره‌ای مشرق پلاتفرم عربستان را تشکیل می‌دهند که در پلیوسن تغییر شکل یافته و چین‌خورده‌اند. ژئومرفولوژی محدوده مورد مطالعه عمدتاً تحت تأثیر عملکرد گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها و تابع فرسایش و رسوبگذاری در حوضه‌ها می‌باشد. چین‌های منطقه مورد مطالعه از راستای شمال‌غرب-جنوب شرق چین‌خوردگی‌های زاگرس تبعیت

محمدی (۱۳۹۳) با بررسی هیدروگراف چشمه‌های پیرغار و دیمه در استان چهارمحال و بختیاری به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به پایین‌تر بودن شاخص جریان پایه و درصد بیشتر مشارکت آب جدید در چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه احتمالاً سیستم آبخوان چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه دارای سهم جریان مجرای بیشتری بوده و از درجه کارستی شدن بیشتری برخوردار است. رحمتی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه پرداخته‌اند. با بررسی چشمه‌های بیستون و گزنهله (میانگین دبی به ترتیب  $3/3$  و  $4/4$  مترمکعب در ثانیه) در منطقه پراو-بیستون و چشمه قره‌بلاغ (میانگین دبی  $1/9$  مترمکعب در ثانیه) در منطقه پاطاق بر اساس داده‌های دبی و بارش بیست‌ساله مشخص نمودند که توسعه‌یافتگی منطقه بیستون-پراو نسبت به منطقه پاطاق بیشتر است و واکنش هیدرولوژیکی آبخوان منطقه بیستون-پراو توسعه‌یافته‌تر از آبخوان منطقه پاطاق است.

چشمه‌های استان خوزستان نیز به‌صورت موردی توسط برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته است. کلانتری و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی چشمه بی‌بی ترخون به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چشمه‌های کارستی خوزستان با استفاده از هیدروگراف پرداخته‌اند. در سال ۱۳۸۷ متوسط دبی این چشمه  $1/5$  مترمکعب در ثانیه و متوسط هدایت الکتریکی آن  $1000$  میکروموس بر سانتی‌متر بوده است. نتایج حاصل از هیدروگراف چشمه کارستی در سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ نشان داد که آبخوان کارستی تغذیه‌کننده چشمه دارای رژیم جریان افشان کاذب بوده و از ذخیره قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار است. زارعی و همکاران (۱۳۹۶) با بررسی هیدروگراف ۱۰ ساله از ۸۳ تا ۹۳ چشمه بی‌بی ترخون و بررسی تأثیر نوسانات اقلیمی بر دبی آن پرداخته‌اند. حمیدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی چشمه دره اناری با دبی متوسط  $2/8$  مترمکعب در ثانیه پرداخته‌اند. نتایج مطالعه آنها نشان داده است که رژیم جریان غالب آبخوان چشمه کانالی-انتشاری است. محمدی بهزاد و همکاران (۱۳۹۴) رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی سبزآب یکی از بزرگ‌ترین چشمه‌های کارستی استان خوزستان را بررسی کرده‌اند. ایشان با توجه به هیدروگراف سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ نتیجه گرفته‌اند که منابع تغذیه‌کننده دیگری

تبخیری گچساران شامل انیدریت، هالیت و مارن یک واحد سنگی با رفتار شکل‌پذیر است.

در راستای بررسی‌های هیدروشیمی و دستیابی به نحوه تغییرات کیفیت منابع آبی و مسیرهای جریان، در دو دوره‌تر (فروردین ۹۸) و خشک (مهر ۹۸) از چشمه‌ها نمونه‌برداری گردیده و آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی آنالیز شده‌اند. در هر مرحله نمونه‌برداری پارامترهای pH، دما و هدایت الکتریکی آب با دستگاه قابل حمل Hach HQ40 در محل اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. نمونه‌برداری آب چشمه‌ها دقیقاً در مظهر خروجی چشمه‌ها تحت فشار طبیعی اتمسفر انجام شده و بلافاصله با فیلتر ۰/۴۵ میکرون فیلتره شده است. غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها با روش یون کروماتوگرافی و بی‌کربنات نیز به روش تیتراسیون پتانسیومتری تعیین گردیده است. جهت محاسبه شاخص اشباع (SI) کلسیت و دولومیت نمونه‌های آب از برنامه PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999) استفاده گردیده است (جدول ۱).

به‌منظور ترسیم هیدروگراف، دبی چشمه‌ها به‌صورت ماهانه از فروردین ۹۷ تا آذر ۹۸ اندازه‌گیری گردیده است. تغییرات آبدهی چشمه‌های کارستی تحت‌تأثیر عواملی از قبیل میزان بارش و شدت آن، وسعت و نوع سازند کارستی، درجه کارست-شدگی و مساحت حوضه آبخیز آن می‌باشد. شکل هیدروگراف چشمه‌ها بازتاب پاسخ آبخوان در برابر تغذیه است. به‌ویژه شکل منحنی فرود اطلاعات مهم و بامعنی از ذخیره و خصوصیات ساختاری سیستم تأمین‌کننده آب چشمه و عملکرد زهکش-های سیستم کارستی را فراهم می‌کند (Kresic and Bonacci, 2010). آنالیزهای کیفی منحنی فرود چشمه‌های کارستی توسط Mailliet (1905) آغاز گردیده است که با استفاده از تابع نمایی ساده بیان نموده است (رابطه ۱).

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1)$$

که در آن  $Q_t$  آبدهی چشمه در طول دوره  $t-t_0$  (برحسب مترمکعب در ثانیه)،  $Q_0$  آبدهی چشمه در زمان  $t$  (برحسب مترمکعب در ثانیه)،  $t_0$  زمان شروع تخلیه آب از آبخوان،  $\alpha$  ضریب الگوی تخلیه آبخوان یا ضریب فروکش (برابر با شیب خط منحنی نیمه‌لگاریتمی دبی در برابر زمان)،  $e$  پایه لگاریتم طبیعی می‌باشد.

می‌کند. امتداد سطح محوری این چین‌ها در جهت شمال غرب-جنوب شرق است.

مهم‌ترین گسل‌های ناحیه‌ای شامل گسل اصلی زاگرس، گسل جبهه کوهستان (M.F.F) و گسل‌های راستالغز راست‌بر ایذه و چپ بر بالارود هستند که از گسل‌های اصلی و بنیادین در کمربند زاگرس چین‌خورده ایران به‌حساب می‌آیند. این سامانه‌های گسلی، نقش اساسی در ایجاد پیچیدگی‌های زمین‌شناسی ساختمانی و چینه‌شناسی محدوده مورد مطالعه ایفا نموده‌اند. نقش زون برشی ایذه و گسل خوردگی‌ها و شکستگی‌های طولی و عرضی مرتبط با آن در توسعه کارست-های منطقه حائز اهمیت بوده است به‌عنوان مثال موجب ظهور چشمه‌های پرآب همچون چشمه چالسه سوسن شده است. راندگی سرخبود نیز یکی از راندگی‌های مهم محدوده مطالعاتی است که مهم‌ترین نقش هیدروژئولوژیکی این راندگی، ظهور چشمه‌های آرپناه در یال جنوبی تاقدیس سرخبود می‌باشد. گسل چاله‌منار با روند شمال غرب-جنوب شرق و شیبی به سمت شمال شرق سبب تشکیل چشمه دائمی و پر آب دره اناری در مسیر خودش شده است. راندگی مفارون با راستای شمال غرب-جنوب شرق در محدوده ظهور چشمه چالسه سربازار و چشمه براهیم مردون سربازار واقع شده است. در راستای این راندگی سنگ‌های آهکی ایلام-سروک بر روی سازندهای پایده-گورپی رانده شده‌اند. گسل‌های پنهان اندیکا و پایده به‌ترتیب در افزایش آبدهی چشمه‌های سبزاب و بی‌بی ترخون نقش دارند. سازندهای کارستی مهم منطقه مورد مطالعه سروک، آسماری و گچساران می‌باشد. چشمه‌های کارستی مورد مطالعه از سازندهای آسماری (الیگوسن-میوسن) و سروک (آلبین-سانتوین) تخلیه می‌گردند. سازند سروک شامل ۷۰۰ تا ۴۵۰ متر آهک‌های ضخیم لایه خاکستری، آهک هوازده قرمز رنگ و آهک برشی است که بین دو سازند شیلی کژدمی در زیر و گورپی در بالا محاط شده است. سازند آهکی آسماری شامل آهک‌های متوسط تا ضخیم لایه کرم‌رنگ با ضخامت حدود ۳۰۰ متر است و به‌دلیل جنس خود دارای حالتی خشن بوده و به‌صورت یک واحد آهکی صخره‌ساز رخنمون دارد و نیز به‌دلیل فرسایش‌پذیری کم در طبقات ارتفاعی بالا زیر سازند گچساران رخنمون می‌یابد. سازند

جدول ۱- مشخصات آنالیز هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه‌های بزرگ شمال شرق خوزستان در فصل تر (فروردین ۹۸) و خشک (مهر ۹۸)، علامت اختصاری، دبی، شاخص اشباع کلسیت و دولومیت محاسبه شده.

نام چشمه	مختصات UTM		تراز مظهر متر	علامت اختصاری	زمان	ت <sub>۱</sub> m <sup>۳</sup> /s	TDS mg/l	EC μS/cm	pH	meq/L								
	X	Y								Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SI c	SI d
سبزآب	۳۵۴۶۲۸۷	۳۶۸۲۴۲	۳۷۰	As1	فروردین ۹۸	۱۷	۳۰۱	۴۷۷	۷/۶	۱/۲۹	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۰۱	۲/۸۳	۰/۱۸۵	۰/۹۴	۰/۱۶	۰/۱۵
					مهر ۹۸	۱۲	۳۹۴	۶۲۱	۷/۷	۳/۱	۱/۵۸	۱/۱	۰/۰۲	۳/۶۸	۱/۱۸	۰/۹۵	۰/۳۶	۰/۵۷
بی‌بی ترخون	۳۵۷۴۶۸۶	۳۴۲۷۳۱	۴۰۹	As2	فروردین ۹۸	۷/۶	۲۸۱	۴۶۰	۷/۲	۲/۹۵	۱/۱۱	۰/۵۴	۰/۰۱	۳/۵۳	۰/۵۶	۰/۴	۰/۳۴	۰/۳۴
					مهر ۹۸	۴/۸	۶۴۶	۱۰۰۸	۷/۶	۷/۱۸۵	۱/۷۳	۳/۷	۰/۰۵	۳/۹۸	۲/۱	۰/۴۷	۰/۷	۰/۷
اناری	۳۵۷۶۷۹۹	۳۷۳۹۸۲	۵۷۰	As3	فروردین ۹۸	۴/۵	۲۴۷	۴۰۵	۷/۶	۳/۱۲	۱/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۱	۳/۹۸	۰/۲۶	۰/۳	۰/۱۶	۰/۱۶
					مهر ۹۸	۲/۲	۳۱۱	۴۹۱	۷/۶	۳/۴۹	۱/۴۱	۰/۱۴	۰/۰۱	۴/۸۶	۰/۳	۰/۴۹	۰/۶۷	۰/۶۷
برم جمال	۳۴۷۱۷۰۳	۳۸۹۷۶۴	۴۹۰	As4	فروردین ۹۸	۳/۲	۱۵۴۸	۲۳۱۰	۷/۴	۱۲/۷۸	۳/۸۸	۷/۰۱	۰/۰۲	۳/۳	۶/۶۴	۱۳/۰۲	۰/۸۴	۱/۲۶
					مهر ۹۸	۲/۸	۱۶۵۹	۲۳۰۰	۷/۹	۱۱/۷۳	۳/۹۳	۷/۴۵	۰/۰۲	۳/۰۹	۷/۰۱	۱۲/۱	۰/۴۱	۰/۳۵
براهیم مردون	۳۵۷۷۹۹۵	۳۸۴۰۰۹	۷۰۶	S1	فروردین ۹۸	۲۲	۲۳۹	۳۹۲	۷/۵	۳/۳۴	۰/۵۷	۰/۰۹	۰/۰۱	۳/۲۳	۰/۱	۰/۶۹	۰/۱۷	۰/۳۸
					مهر ۹۸	۱۲	۳۵۵	۵۷۳	۷/۶	۴/۵۷	۰/۷۸	۰/۲۷	۰/۰۱	۳/۰۷	۰/۳	۲/۳۶	۰/۳۲	۰/۱۰
چالشه سربازار	۳۵۷۷۷۶۸	۳۸۴۳۰۵	۶۹۰	S2	فروردین ۹۸	۱۱	۲۴۲	۳۸۴	۴/۶	۳/۳۵	۰/۵	۰/۱	۰/۰۱	۳/۲۸	۱	۰/۴۹	۰/۲۱	۱/۱۵
					مهر ۹۸	۱۱/۵	۳۵۲	۵۶۸	۷/۱	۴/۶	۰/۷۲	۰/۲۴	۰/۰۲	۳/۰۹	۰/۲۷	۲/۳۷	۰/۳۰	۱/۰۳
چالشه سوسن ایذه	۳۵۴۲۱۱۶	۳۸۹۰۹۴	۶۲۰	S3	فروردین ۹۸	۲/۵	۲۵۵	۴۱۸	۷/۱	۳/۲۳	۰/۷۵	۰/۳۳	۰/۰۱	۳/۵۲	۰/۳	۰/۳۵	۲/۴۴	۴/۲۲
					مهر ۹۸	۱/۷	۲۴۳	۴۰۵	۷/۵	۲/۸۸	۰/۷	۰/۳	۰/۰۳۸	۳/۴۱	۰/۲۹	۰/۳	۲/۷	۴/۶۴
آبشار آرپناه	۳۵۹۱۱۷۹	۳۴۴۲۲۳	۹۵۰	S4	فروردین ۹۸	۳	۲۸۰	۴۵۹	۷	۳/۹۶	۰/۷۷	۰/۰۸	۰/۰۱	۳/۴۲	۰/۰۶	۰/۳۳	۰/۷۱	۰/۷۱
					مهر ۹۸	۱/۲	۲۴۳	۵۴۵	۷/۶	۴/۴۹	۰/۸۹	۰/۱۶	۰/۰۳	۳/۱۷	۰/۰۷	۲/۳۷	۰/۳۸	۰/۱۵

نسبت دبی ماکزیمم به دبی مینیمم و ضریب تغییرات دبی برای ارزیابی توسعه کارست در حوضه آبخیز چشمه‌ها استفاده شده است.

### نتایج

موقعیت قرارگیری چشمه‌های بزرگ ایران با دبی میانگین بالای یک مترمکعب در ثانیه بر اساس مقالات منتشر شده و آمار شرکت مدیریت منابع آب ایران در ارتباط با توزیع سنگ-های کارستی (شکل ۱ الف) و مدل ارتفاعی رقومی (شکل ۱ ب) نشان می‌دهد که تمرکز چشمه‌های بزرگ کارستی ایران در ارتفاعات رشته‌کوه زاگرس می‌باشد. با بررسی ارتباط دبی چشمه‌های بزرگ زاگرس با تراز مظهر و همچنین هدایت الکتریکی (شکل ۲) مشخص شده است که با افزایش تراز مظهر، دبی چشمه‌ها روند کاهشی داشته و همچنین ارتباط بین دبی و هدایت الکتریکی چشمه‌ها نیز معکوس می‌باشد یعنی با افزایش دبی، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد.

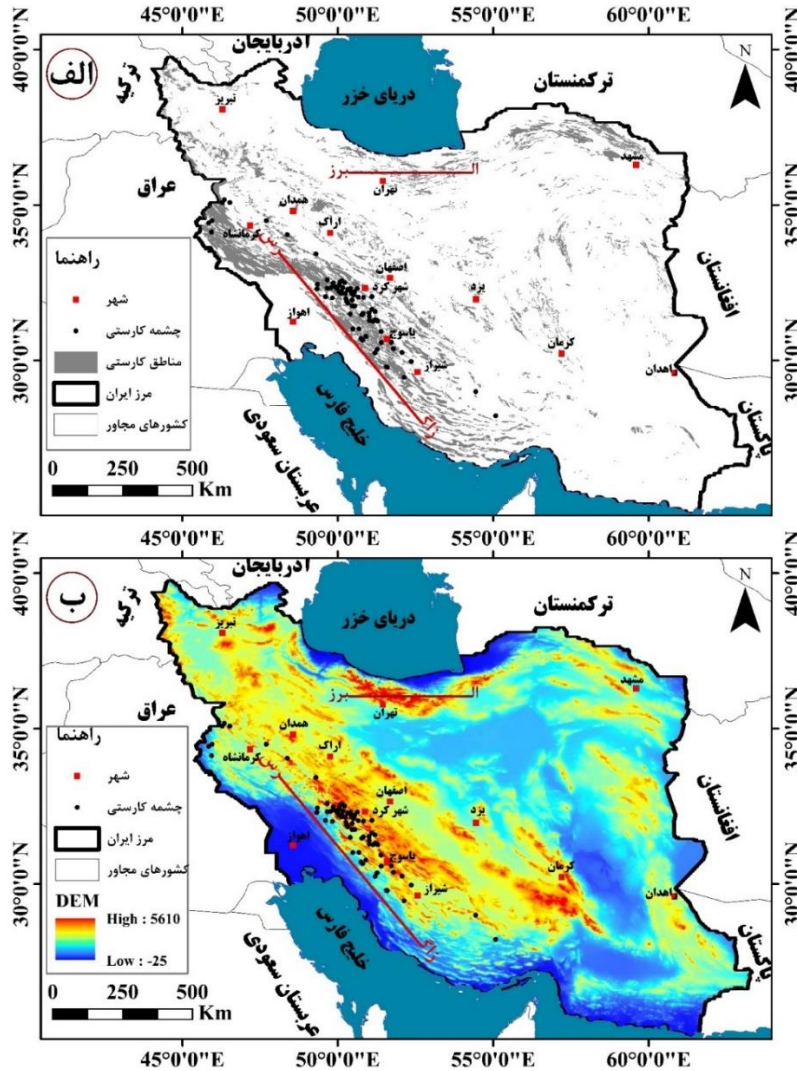
مقدار  $\alpha$  با رابطه زیر محاسبه می‌گردد و متأثر از خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان به‌ویژه تخلخل مؤثر و قابلیت انتقال آبخوان می‌باشد. هرچه  $t$  کوچک و  $\alpha$  بزرگ باشد، نشان‌دهنده تخلیه سریع از مجاری کارستی و ذخیره کم آب زیرزمینی است و بالعکس اگر  $\alpha$  کوچک و  $t$  بزرگ باشد نشان‌دهنده تخلیه خیلی آهسته بوده و احتمالاً آبخوان کارستی به‌صورت شبکه‌ای از شکاف‌ها و حفرات به‌هم‌پیوسته با ضریب ذخیره خیلی بالا است (Kova'cs, 2005). ضریب فروکش بیانگر نحوه تخلیه آبخوان می‌باشد و به‌صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{\log Q_2 - \log Q_1}{0.4343 (t_2 - t_1)} \quad (2)$$

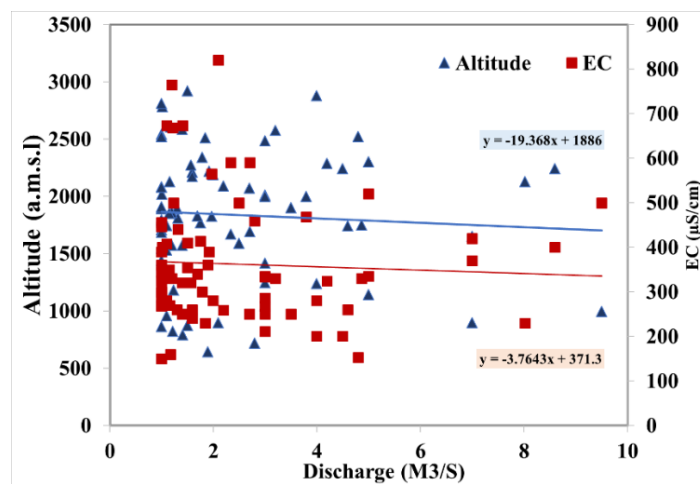
حجم ذخیره دینامیک آبخوان با رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$V_0 = \frac{86400 \times Q_0}{\alpha} \quad (3)$$

برای بررسی خصوصیات سیستم جریان آب زیرزمینی در چشمه‌های کارستی بزرگ شمال شرق خوزستان، با استفاده از نرم‌افزار Hydro Office جداسازی جریان پایه از سریع به روش حداقل محلی (Local Minimum Method) انجام گرفته است.



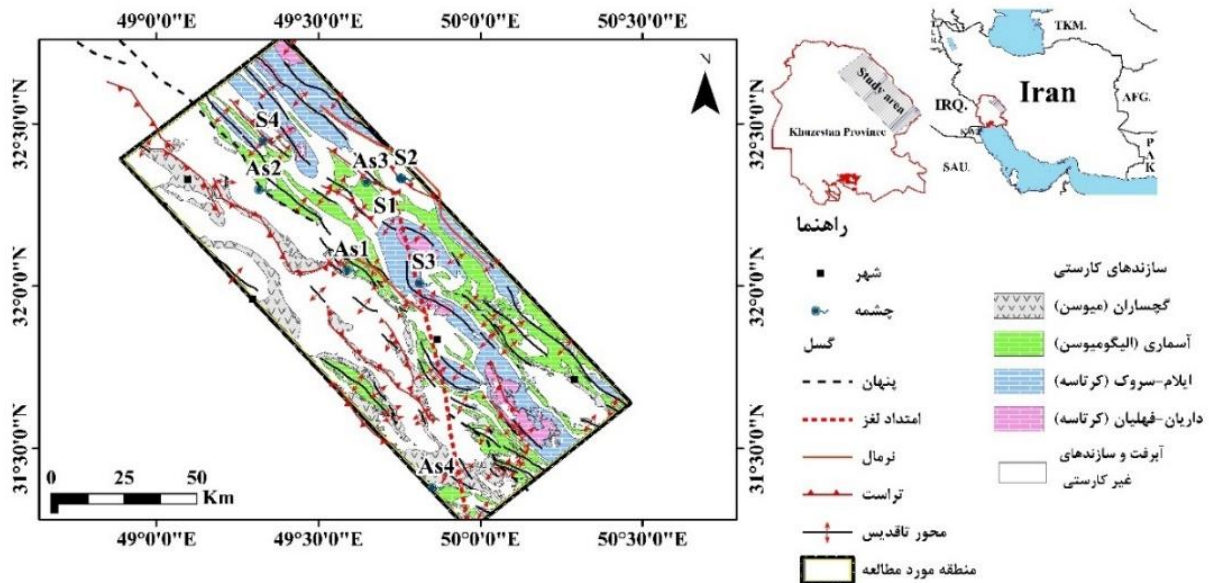
شکل ۱- الف) توزیع چشمه‌های کارستی بزرگ ایران در ارتباط با سازندهای کارستی، ب) موقعیت چشمه‌های کارستی بزرگ ایران در نقشه مدل ارتفاعی رقومی.



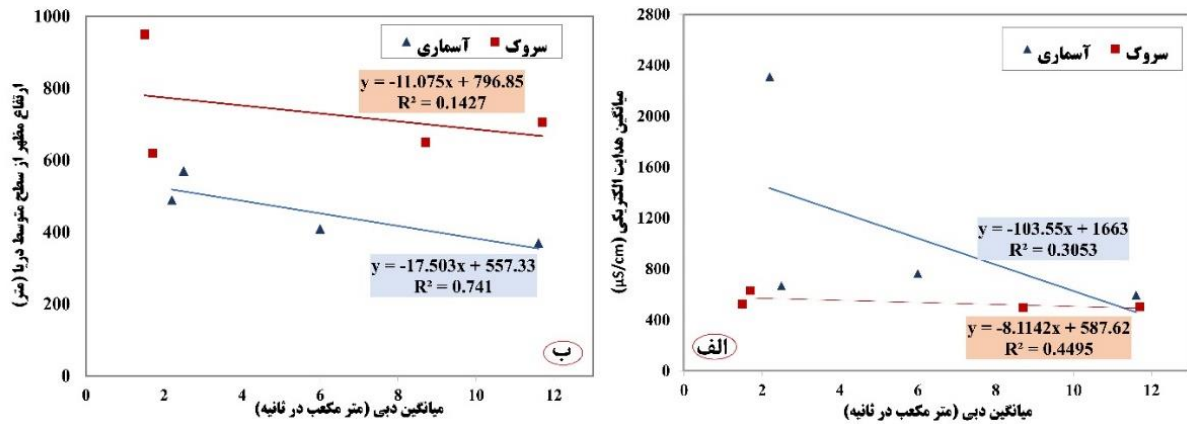
شکل ۲- ارتباط بین تراز مظهر و هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی بزرگ زاگرس با دبی متوسط آنها.

چشمه‌های بزرگ کارستی مورد بررسی در استان خوزستان (با دبی بالای ۱/۵ مترمکعب در ثانیه)، ارتفاع مظهر چشمه‌های آسماری (۳۷۰ تا ۵۷۰ متر از سطح متوسط دریا) کمتر از ارتفاع مظهر چشمه‌های سروک (۶۲۰ تا ۹۵۰ متر از سطح متوسط دریا) است. بررسی ارتباط بین دبی متوسط چشمه‌های مورد بررسی با تراز مظهر و همچنین هدایت الکتریکی متوسط (شکل ۴) نشان می‌دهد که با افزایش تراز مظهر چشمه‌ها، دبی کاهش یافته و شیب کاهش در چشمه‌های آسماری بیشتر از سروک است. ارتباط بین دبی و هدایت الکتریکی نیز معکوس می‌باشد و در چشمه‌های آسماری به دلیل آنومالی‌های ناشی از تغذیه از سازند گچساران در برخی چشمه‌ها هدایت الکتریکی مقادیر بالاتری دارد. هدایت الکتریکی غالب چشمه‌ها در فصل خشک نسبت به فصل تر افزایش یافته است. میزان EC چشمه برم جمال As4 تغییرات زیادی نداشته و در چشمه چالسه سوسن S3 در فصل خشک کمتر از فصل تر ثبت گردیده است.

منطقه مورد مطالعه واقع در شمال شرق استان خوزستان، دربرگیرنده بزرگ‌ترین چشمه‌های کارستی ایران از جمله چشمه براهیم مردون (S1) در تاقدیس کی‌نو با دبی ۵ تا ۲۲ (میانگین ۱۱/۷) مترمکعب در ثانیه در طول دوره فروردین ۱۳۹۷ تا آذرماه ۱۳۹۸ می‌باشد. بعد از آن چشمه چالسه سرباز S2 که در پایین دست چشمه براهیم مردون واقع می‌باشد، در دوره مورد بررسی دبی ۳/۵ تا ۱۵ (میانگین ۸/۷) مترمکعب در ثانیه دارد. هر دو این چشمه‌ها از تاقدیس کی‌نو و سازند آهکی سروک و در فاصله نزدیک به هم (کمتر از ۲۰۰ متر) تخلیه می‌شوند و عملاً به صورت یک چشمه واحد به نام سوسن سرباز نامیده می‌شوند. چشمه کارستی سبزآب As1 با دبی ۷ تا ۱۷ مترمکعب در ثانیه (میانگین ۱۱/۵ مترمکعب در ثانیه) نیز از جمله چشمه‌های بزرگ خوزستان می‌باشد. به طور کلی حداکثر دبی چشمه‌های مورد بررسی در فصل بهار و حداقل آن در فصل پاییز می‌باشد. با توجه به نقشه موقعیت



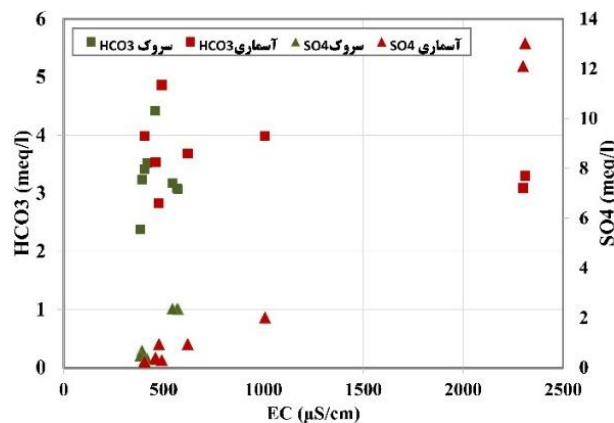
شکل ۳- موقعیت چشمه‌های کارستی بزرگ (با دبی میانگین بیش از ۱/۵ مترمکعب در ثانیه) شمال شرق استان خوزستان در نقشه زمین‌شناسی.



شکل ۴- ارتباط بین دبی متوسط چشمه‌های بزرگ کارستی خوزستان با (الف) میانگین هدایت الکتریکی (ب) تراز مظهر از سطح متوسط دریا.

چشمه‌های آسماری در فصل تر و خشک به ترتیب برابر با ۳/۴۱ و ۳/۹ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و برای چشمه‌های سروک در فصل تر و خشک برابر با ۳/۳۸ و ۳/۱۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر بوده و با افزایش هدایت الکتریکی، کاهش نشان می‌دهد و میانگین سولفات چشمه‌های آسماری در فصل تر و خشک به ترتیب ۳/۳۵ و ۴/۱۹ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و برای چشمه‌های سروک ۰/۴۶ و ۱/۸۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر بوده است.

بررسی ارتباط بین هدایت الکتریکی و مقادیر بی‌کربنات و سولفات چشمه‌های با مخزن سروک و آسماری (شکل ۵) بیانگر این است که مقادیر سولفات هر دو گروه چشمه‌ها به جز چشمه برم جمال کمتر از بی‌کربنات می‌باشد و با افزایش هدایت الکتریکی مقادیر سولفات آنها افزایش یافته است. در چشمه برم جمال به دلیل تغذیه از سازند گچساران مقدار سولفات و هدایت الکتریکی بیشتر می‌باشد. میانگین بی‌کربنات



شکل ۵- ارتباط بین هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی بزرگ خوزستان با میزان بی‌کربنات و سولفات.

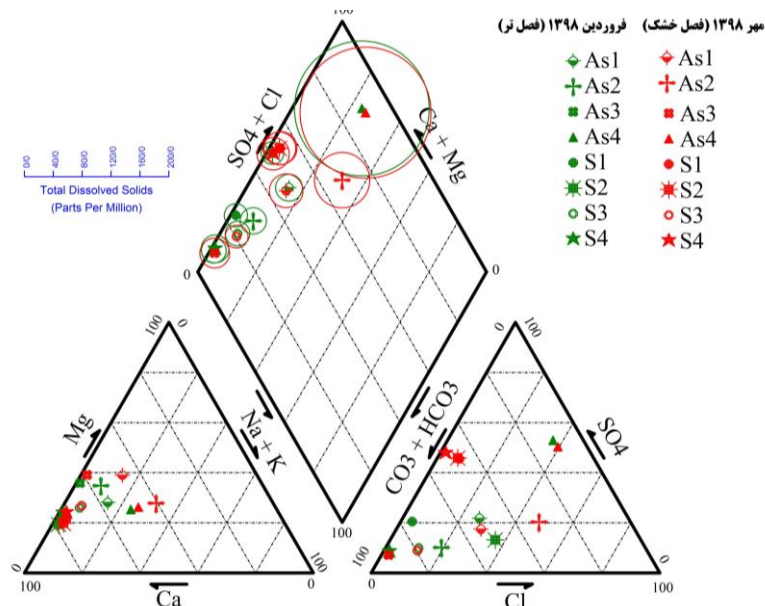
سولفات-کلسیک تمایل پیدا کرده‌اند. با توجه به محل ظهور چشمه‌های S1 و S2 در فاصله کم (حدود ۲۰۰ متر) مخازن آنها مشترک است. نمونه چالسه سوسن ایذه S3 در فصل تر و خشک تغییر ترکیب چندانی ندارد و تیپ بی‌کربنات - کلسیک (منیزیک) دارد. موقعیت چشمه آرپناه S4 بر روی مثلث کاتیون‌ها در مجاورت رأس کلسیم تغییرات چندانی در

به‌منظور بررسی تیپ و رخساره آب چشمه‌ها و نحوه تغییرات از فصل تر به خشک، بر اساس نتایج آنالیز آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی نمونه آب چشمه‌های مورد بررسی، نمودار پایپر ترسیم گردیده است (شکل ۶). مطابق نمودار پایپر در فصل تر و خشک تیپ غالب چشمه‌های سروک بی‌کربنات-کلسیک می‌باشد و در فصل خشک چشمه‌های S1، S2 و S4 به سمت



فصل خشک نسبت به فصل تر ندارد ولی در مثلث آنیون‌ها در فصل خشک کاهش بی‌کربنات و گرایش نمونه به رأس سولفات (از فصل تر به سمت فصل خشک) مشاهده می‌گردد. چشمه‌های آسماری تیپ و رخساره متفاوت‌تری دارند به طوری که موقعیت چشمه سبزاب As1 در فصل تر و خشک بیانگر تمایل به سمت رأس کلر در مثلث آنیونی و رأس سدیم در مثلث کاتیونی می‌باشد. تغذیه از سازند گچساران می‌تواند عاملی برای افزایش سولفات و کلر در دسترس باشد. چشمه بی‌بی‌ترخون As2 در فصل خشک به ضلع سولفات-کلر (بیشتر به سمت کلر) متمایل شده است که به دلیل افزایش سهم

اختلاط آب تغذیه‌ای از سازند گچساران، TDS و EC افزایش یافته است. چشمه اناری As3 در طول زمان از فصل تر به سمت فصل خشک تغییرات یونی زیادی نداشته و تیپ بی-کربناته-کلسیک دارد. در فصل خشک مقادیر منیزیم آن افزایش داشته و بیانگر افزایش زمان ماندگاری در فصل خشک است. چشمه As4 دارای EC میانگین بالای ۲۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است و بیانگر سهم بیشتر آب‌های تغذیه‌ای از سازند گچساران می‌باشد و در طول فصل تر و خشک تغییر رخساره چندانی نشان نداده و تیپ آن سولفات (کلروره)-کلسیک می‌باشد.

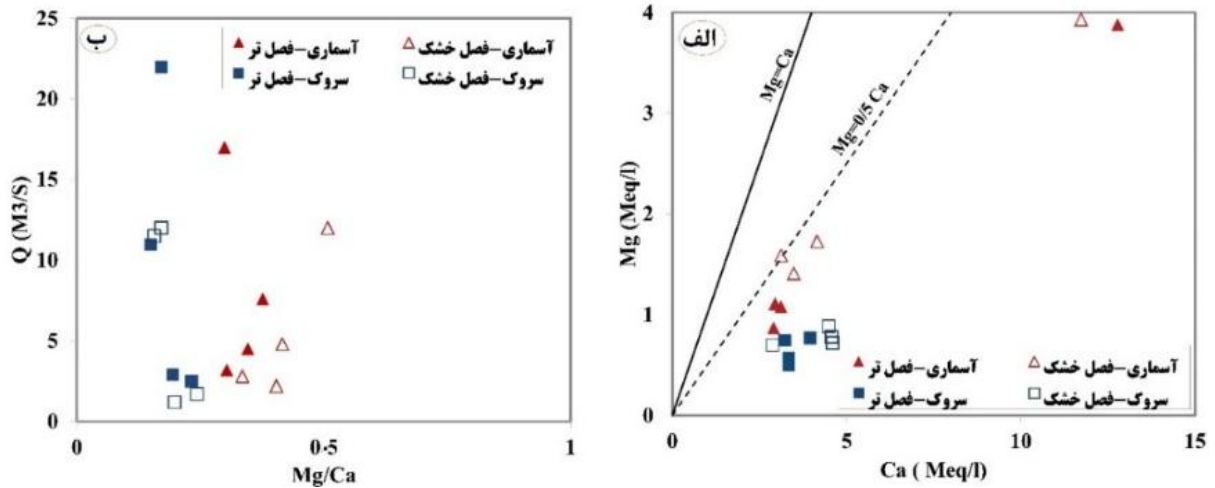


شکل ۶- نمودار پایپر چشمه‌های کارستی بزرگ شمال شرق خوزستان (علائم به رنگ سبز بیانگر فصل تر و علائم به رنگ قرمز مربوط به فصل خشک).

و در چشمه‌های سروک این نسبت کمتر از چشمه‌های آسماری می‌باشد. نسبت  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  در مقابل دبی (شکل ۷ ب) نشان می‌دهد که در چشمه‌های سروک و آسماری با افزایش دبی مقدار نسبت منیزیم به کلسیم کاهش یافته است. به عبارت دیگر حداقل منیزیم به کلسیم در فصل تر بوده و با افزایش دبی عبوری از اپی‌کارست دارای کلسیم زیاد بوده و با کاهش دبی در فصل خشک و افزایش زمان ماندگاری آب در سیستم‌های کارستی این نسبت افزایش یافته است.

### نمودارهای ترکیبی

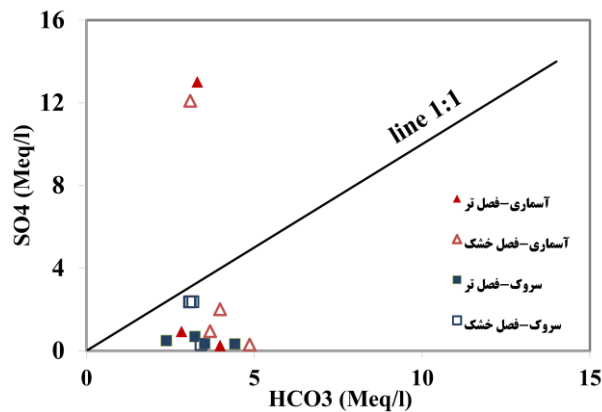
نسبت  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  منعکس‌کننده شدت انحلال سنگ‌های کربناتی است. این نسبت برای انحلال دولومیت تقریباً برابر یک (El-Fiky, 2010) و برای انحلال کلسیت برابر ۰/۵ تا ۰/۱ می‌باشد (Rajmohan and Elango, 2004). همچنین با افزایش این نسبت می‌توان گفت زمان ماندگاری آب در سیستم زیاد بوده است (Toran and Reisch, 2013; Wu et al., 2017). در نمودار منیزیم در مقابل کلسیم و همچنین نسبت  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  در مقابل دبی چشمه‌ها (شکل ۷ الف) کلیه نمونه‌ها در فصل تر و خشک مقادیر  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  کمتر از ۰/۵ دارند



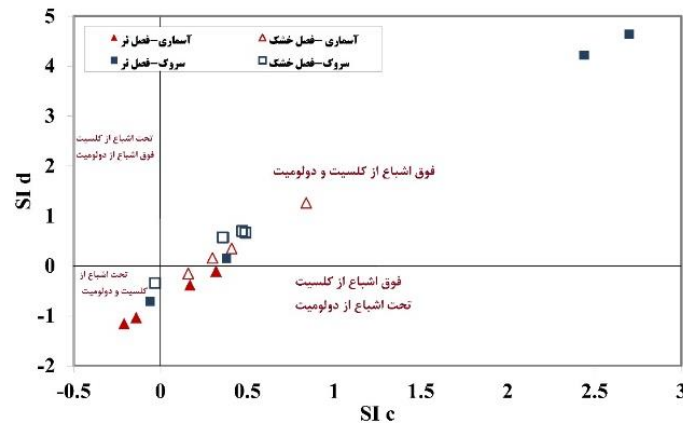
شکل ۷- الف) نسبت منبیزیم به کلسیم چشمه‌های بزرگ کارستی خوزستان در فصل تر و خشک و ب) نسبت منبیزیم به کلسیم در مقابل دبی چشمه‌ها در فصل تر و خشک.

در فصل خشک و افزایش زمان ماندگاری آب در سیستم کارستی، تعامل آب-سنگ‌های میزبان و انحلال آنها افزایش یافته است. مقدار افزایش شاخص اشباع دولومیت بیشتر از کلسیت است. چشمه چالسه سربازار S2 در هر دو دوره تحت اشباع از دولومیت بوده است. ترسیم نمودار شاخص اشباع کلسیت در مقابل  $Ca^{2+} + HCO_3^-$  و شاخص اشباع دولومیت تابعی از  $Ca^{2+} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$  (شکل ۱۰ الف و ب) نشان می‌دهد که کلیه نمونه‌ها در فصل تر و خشک در محدوده اشباع و فوق‌اشباع از کلسیت قرار گرفته‌اند. کل چشمه‌های آسماری و چشمه‌های سروک به جز چالسه سربازار اشباع و فوق‌اشباع از دولومیت می‌باشند.

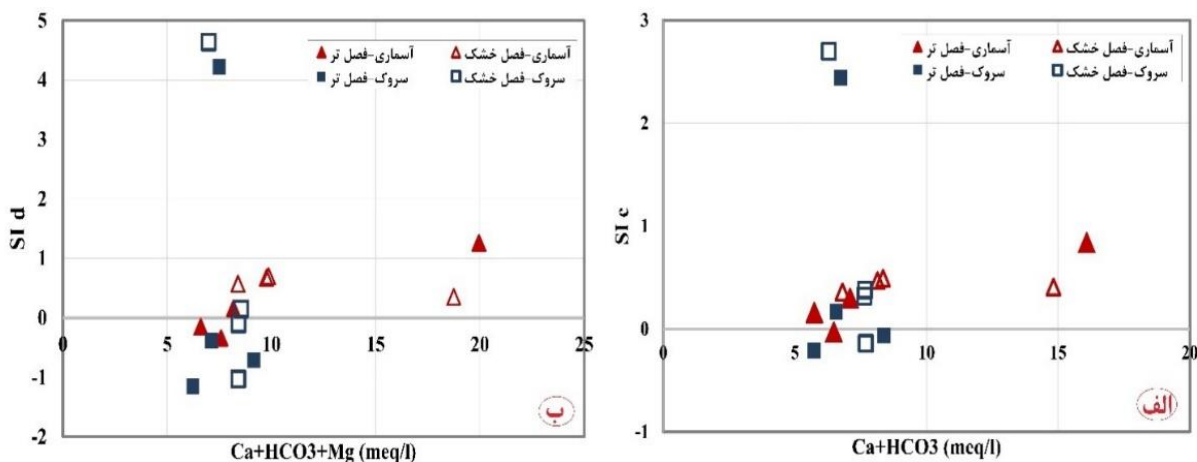
نمودار ترکیبی بی‌کربنات در مقابل سولفات چشمه‌های سروک و آسماری (شکل ۸) نشان می‌دهد که کلیه نمونه‌ها به جز چشمه برم جمال As4 (در هر دو فصل تر و خشک) دارای بی‌کربنات بیشتری بوده و انحلال کربنات‌ها غالب است. در نمونه چشمه برم جمال سولفات غالب می‌باشد که ناشی از تغذیه از سازند گچساران بوده و در طول فصل تر و خشک مقدار سولفات بیشتر از بی‌کربنات است با توجه به نمودار شاخص اشباع کلسیت در مقابل شاخص اشباع دولومیت برای چشمه‌های با مخزن سازند آسماری و سروک در فصل تر و خشک (شکل ۹)، به استثنای چشمه برم جمال As4 در کلیه نمونه‌ها شاخص اشباع کلسیت و دولومیت در فصل خشک بیشتر از فصل تر می‌باشد و بیانگر این است که با کاهش تغذیه



شکل ۸- نمودار بی‌کربنات در مقابل سولفات چشمه‌های کارستی بزرگ خوزستان در فصول تر و خشک.



شکل ۹- نمودار شاخص اشباع کلسیت در مقابل دولومیت چشمه‌های بزرگ کارستی خوزستان در فصول تر و خشک.



شکل ۱۰- الف) نمودار شاخص اشباع کلسیت در مقابل مجموع کلسیم و بی‌کربنات (ب) و شاخص اشباع دولومیت در مقابل مجموع کلسیم، بی‌کربنات و منیزیم چشمه‌های بزرگ کارستی خوزستان در فصول تر و خشک

### هیدروگراف چشمه‌های کارستی

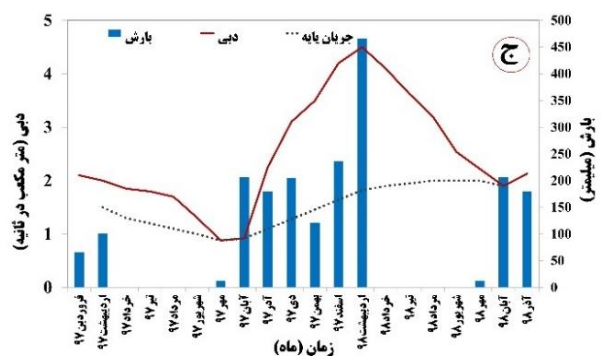
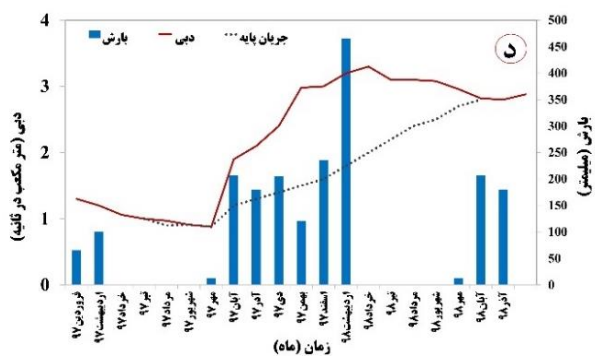
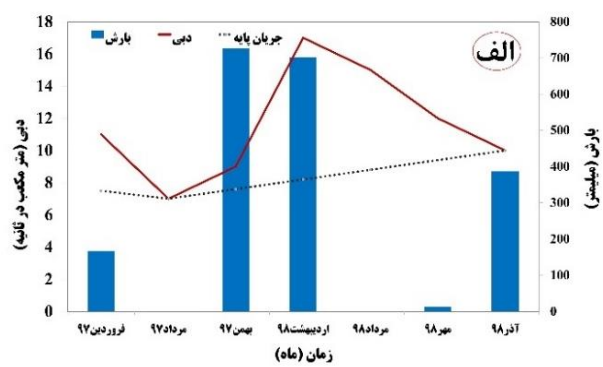
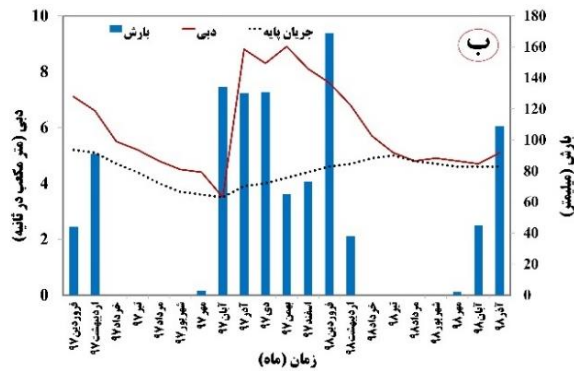
شده است. در چشمه اناری As3 بعد از شروع بارش‌ها، روند افزایشی دبی ادامه داشته و دبی اوج در اردیبهشت ۱۳۹۸ مشاهده می‌گردد و دقیقاً هم‌زمان با وقوع بارش حداکثری است و بلافاصله پس از اتمام بارش، یال کاهشی با شیب زیاد آغاز گردیده است. در چشمه برم جمال As4 نیز افزایش دبی هم‌زمان با آغاز بارش سال آبی رخ داده و یک ماه پس از بارش-های حداکثری، دبی اوج ثبت گردیده و پس از آن کاهش دبی با شیب ملایم‌تری صورت گرفته است. در این چشمه‌ها دبی حداقل در یال کاهشی بیشتر از دبی حداقل سال آبی قبل بوده است که ناشی از وقوع بارش‌های سیل‌آسا در فروردین سال ۱۳۹۸ می‌باشد.

در چشمه‌های براهیم مردون S1 و چالسه سربازار S2، بعد از شروع بارش‌های سال آبی روند افزایشی هیدروگراف با شیب

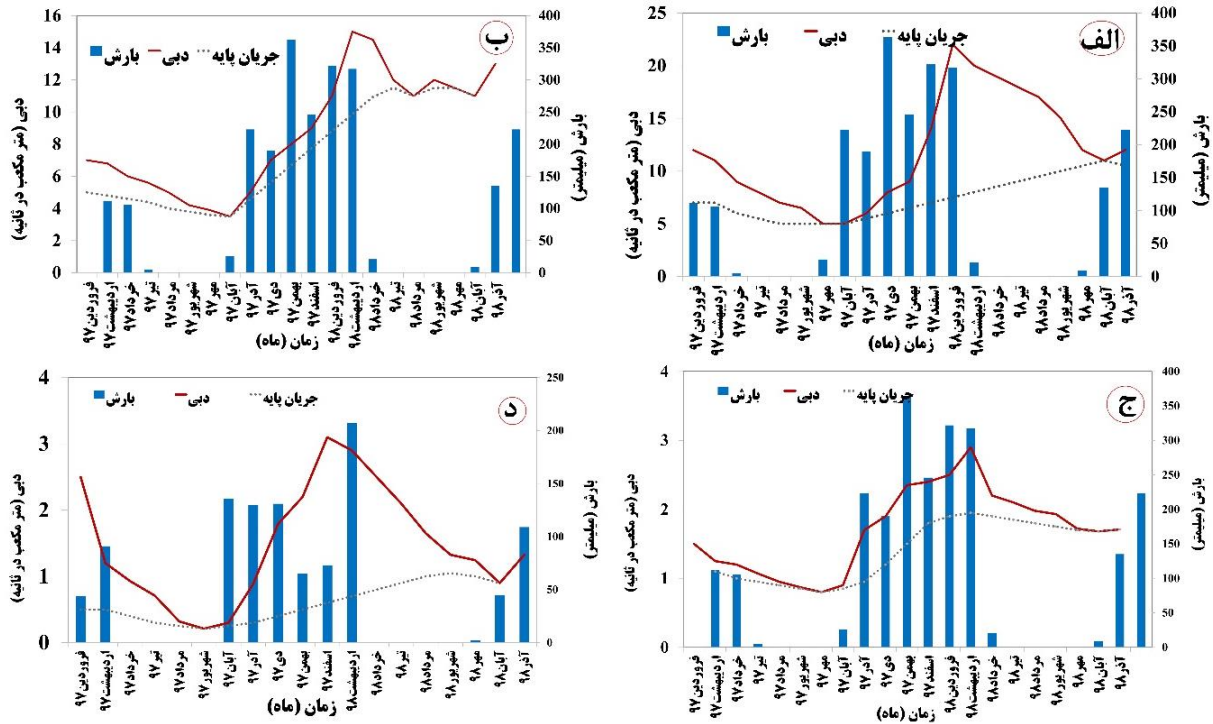
بهترین روش برای مطالعه و بررسی آبخوان‌های کارستی، پایش و آنالیز هیدروگراف چشمه‌های آنها می‌باشد (روحی و کلانتری، ۱۳۹۸). با توجه به هیدروگراف چشمه‌ها (شکل ۱۱ و ۱۲)، رخداد بارش سیل‌آسا در فروردین ۱۳۹۸ (به میزان ۷۷۰ میلی‌متر در ایستگاه سد شهید عباسپور) موجب افزایش دبی چشمه سبزاب As1 گردیده و دبی پیک این چشمه، بعد از تأخیر یک‌ماهه در اردیبهشت‌ماه ثبت گردیده است و بعد از آن مطابق هیدروگراف، دبی روند نزولی داشته است. در چشمه بی‌بی‌ترخون As2، بعد از شروع بارش سال آبی، دبی حداکثر مشاهده می‌گردد و با کاهش بارندگی‌ها در بهمن‌ماه، روند نزولی دبی آغاز گردیده است. وقوع بارش سیل‌آسا در فروردین ۱۳۹۸ موجب کاهش شیب در یال نزولی هیدروگراف

محدب و مقعر متفاوت باشد. چشمه چالسه سوسن ایزه در قسمت مقعر با استرس غالب فشارشی ظهور یافته است که این نوع استرس موجب می‌گردد امکان عبور آب و انحلال مجاری کمتر شده و آب با سرعت کمی جریان یابد. در چشمه آرنه شیب افزایش و کاهش دبی، بیشتر می‌باشد. در جدول ۲ مشخصات منحنی فروکش چشمه‌ها و مقادیر دبی و ذخیره دینامیک آنها ارائه گردیده است. بیشترین حجم ذخیره دینامیک به ترتیب مربوط به چشمه براهیم مردون، سبزاب، چالسه سربازار و بی‌بی ترخون است. با توجه به اشتراک حوضه آبرگیر چشمه‌های براهیم مردون و چالسه سربازار به جرأت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که غنی‌ترین آبخوان کارستی زاگرس، تقادیس کی‌نو می‌باشد.

زیاد آغاز گردیده است. حداکثر بارش در حوضه این دو چشمه در دی‌ماه ۱۳۹۷ ثبت گردیده و دبی اوج بعد از زمان ۲ ماه مشاهده می‌گردد. روند کاهشی در چشمه چالسه سربازار با چشمه براهیم مردون متفاوت است به طوری که روند کاهشی چشمه چالسه سربازار شیب بیشتری دارد و در مرداد و شهریور علیرغم نبود بارش، مجدداً افزایش یافته است. در چشمه چالسه سوسن ایزه S3 نیز با شروع فصل بارش، دبی افزایش نشان می‌دهد و بعد از دبی حداکثری در اردیبهشت ۱۳۹۸، روند کاهشی دبی ابتدا شیب زیادی داشته و سپس شیب آن کمتر شده است. علت این امر به تأثیر پهنه گسل ایزه برمی‌گردد به طوری که این گسل باعث شده تا تقادیس پیون شکل S مانند به خود گرفته و نوع استرس و درزه‌ها در قسمت



شکل ۱۱ - هیدروگراف چشمه‌های آسماری الف) سبزاب، ب) بی‌بی ترخون، ج) اناری، د) برم جمال.



شکل ۱۲- هیدروگراف چشمه‌های سروک الف (براهیم مردون، ب) چالسه سربازار، ج) چالسه سوسن ایذه و د) آرپناه.

جدول ۲- مشخصات منحنی فروکش، دبی حداکثر، حداقل، درصد ضریب تغییرات دبی و مقادیر ذخیره دینامیک چشمه‌های کارستی بزرگ شمال شرق خوزستان.

نام چشمه	علامت اختصاری	طول دوره فروکش (ماه)	تعداد	مقدار ضریب فروکش	درصد جریان پایه	درصد جریان سریع	نسبت دبی حداکثر به حداقل	درصد ضریب تغییرات دبی	حجم ذخیره دینامیک (MCM)
سبزآب	As1	۳	α1	۰/۰۰۱۴	۵۸	۴۲	۲/۴۳	۲۹/۹	۱۲۴/۲
			α2	۰/۰۰۱۹	۸۱	۱۹			۱۳۴/۲
			α3	۰/۰۰۲۹	۵۷	۴۳			۹۲/۵
بی بی ترخون	As2	۲	α1	۰/۰۰۳۸	۸۴	۱۶	۲/۵۷	۲۷	۲۲/۱
			α2	۰/۰۰۳۷	۸۶	۱۴			۲۵
			α3	۰/۰۰۴۸	۹۸	۲			۱۱/۴
اناری	As3	۱	α1	۰/۰۰۲	۷۱	۲۹	۳/۶۳	۳۵/۲	۵/۳
			α2	۰/۰۰۰۱	۸۲	۱۸			۸/۳
			α3	۰/۰۰۱۴	۹۹	۱			۱۶
برم جمال	As4	۲	α1	۰/۰۰۲۵	۴۱	۵۹	۳/۷۵	۴۳/۷	۱۱/۷
			α2	۰/۰۰۵۱	۷۵	۲۵			۲۳۶
			α3	۰/۰۰۱۱	۶۵	۳۵			۶۷
براهیم مردون	S1	۵	α1	۰/۰۰۰۶	۹۵	۵	۴/۲۹	۴۱/۸	۳۸/۲
			α2	۰/۰۰۲۹	۹۶	۴			۳۴/۲
			α3	۰/۰۰۳۸	۹۹	۱			۲۹/۷
چالسه سربازار	S2	۱	α1	۰/۰۰۱۴	۹۹	۱			۵۹/۵
			α2	۰/۰۰۳۸	۴۰	۶۰			۲۹/۶
			α3	۰/۰۰۳۸	۷۸	۲۲	۵/۱۱	۴۲/۹	۷/۸
چالسه سوسن ایذه	S3	۱	α1	۰/۰۰۲۶	۹۹	۱			۹/۹
			α2	۰/۰۰۲۶	۹۹	۱			۱۲/۸
			α3	۰/۰۰۵	۸	۹۲			۷/۹
آرپناه	S4	۲	α1	۰/۰۰۰۷	۲۰	۸۰	۱۴/۷۶	۵۹/۴	۲/۴
			α2	۰/۰۰۰۷	۲۰	۸۰			
			α3	۰/۰۰۱	۶۸	۳۲			

## بحث

افشان (انتشاری) غالب تر دیده می شود ولی فقط درز و شکاف-ها توانایی تأمین آبدهی این چشمه ها را ندارد و به دلیل بزرگ بودن حوضه، جریان کانالی اثر خود را نشان نمی دهد. نسبت کلسیم به منیزیم در چشمه های سروک بیشتر از چشمه های آسماری است. حداکثر میزان نسبت کلسیم به منیزیم در چشمه های چالسه سربازار و براهیم مردون (با مخزن سروک) و حداقل آن در چشمه بی بی ترخون و سبزآب (با مخزن آسماری) می باشد. نسبت بی کربنات به سولفات که به منظور بررسی وضعیت تکامل ژئوشیمیایی در آبخوان ها بررسی گردیده است نشان داد که این نسبت در چشمه های سروک و آسماری به جز چشمه برم جمال در فصل تر و خشک بیشتر از یک است و بیانگر غالب بودن انحلال کربنات ها می باشد. در چشمه برم جمال غالب بودن تغذیه از سازند گچساران موجب افزایش سولفات گردیده و در هر دو دوره تر و خشک مقادیر مشابهی دارد. در چشمه های سروک به جز چالسه سوسن ایذه این نسبت کاهش یافته و بیانگر کاهش تغذیه و ماندگاری آب در سیستم کارستی در فصل بدون بارش و در نتیجه کاهش بی کربنات می باشد. بررسی شاخص اشباع کلسیت و دولومیت نشان می دهد که به استثنای چشمه برم جمال As4 در کلیه نمونه ها شاخص اشباع کلسیت و دولومیت در فصل خشک بیشتر از فصل تر می باشد. به عبارت دیگر با کاهش تغذیه در فصل خشک و افزایش زمان ماندگاری آب در سیستم کارستی تعامل آب-سنگ های میزبان و انحلال آنها افزایش یافته است. مقدار افزایش شاخص اشباع دولومیت بیشتر از کلسیت است. در چشمه برم جمال که آنومالی ناشی از تغذیه از سازند گچساران دارد، مقادیر شاخص اشباع کلسیت و دولومیت در فصل خشک کاهش یافته ولی همچنان در محدوده اشباع قرار دارد. با توجه به هیدروگراف های ترسیم شده، عدم پاسخ سریع چشمه های سبزآب As1 و بی بی ترخون As2 به رخداد بارندگی سیل آسا در ابتدای سال ۱۳۹۸ بیانگر این است که حوضه آبرگیر این دو چشمه، وسعت بیشتر و فراتر از تاقدیس محل ظهور دارند. در مورد چشمه سبزآب نقش تغذیه از مخزن سد شهید عباسپور نیز قابل ملاحظه می باشد (دبی اوج هیدروگراف یک ماه پس از اوج بارش بوده است و یال کاهشی نیز شیب اندکی دارد) به طوری که تغذیه از این مخزن در طول سال وجود داشته و افزایش دبی قابل ملاحظه ای بعد از وقوع

بررسی های هیدروشیمی نشان داد که تیپ غالب آب در چشمه های مورد بررسی بی کربنات-کلسیک می باشد و در برخی چشمه های آسماری تغذیه از سازند تبخیری گچساران موجب ایجاد تیپ سولفات (کلروه)-سدیک گردیده است. نمونه آب چشمه های سروک با دبی بالا (چالسه سربازار S2 و براهیم مردون S1) دارای مواد محلول بالا به ویژه یون های کلسیم و بی کربنات بالا می باشد که نشان دهنده زمان ماندگاری بالا، حوضه آبرگیر بزرگ و یا جریان عمیق و تعامل زیاد آب-سنگ های کربنات در این چشمه ها است. با کاهش دبی در فصل خشک، مقادیر مواد محلول افزایش می یابد. در چشمه چالسه سوسن S3 رفتار متفاوتی مشاهده می گردد به طوری که با کاهش دبی در فصل خشک مقدار یون ها و مواد محلول کاهش یافته است. به نظر می رسد افزایش سولفات چشمه های براهیم مردون و چالسه سربازار در فصل خشک ناشی از تأثیر سازند پابده-گورپی واقع در زیر لایه سروک و حرکت آب های دارای سولفات از طریق راندگی های واقع در محل مظهر چشمه ها می باشد. افزایش سولفات چشمه آرپناه در فصل خشک ناشی از تأثیر شیل و مارن سازند کژدمی در زیر سروک و حرکت از طریق راندگی سرخبود نتیجه گیری می شود.

نسبت منیزیم به کلسیم معیاری از زمان ماندگاری آب در سیستم می باشد. این نسبت در چشمه های سروک کمتر از چشمه های آسماری است که می توان به خلوص بیشتر سنگ های کربنات سروک مرتبط دانست. با شروع فصل بارش و تغذیه سیستم کارستی، آب های جدید دارای کلسیم بیشتر نسبت به منیزیم، در سیستم کارستی حرکت کرده و از چشمه تخلیه می گردند و با قطع بارش و ماندگاری آب در سیستم، مقادیر منیزیم افزایش می یابد. به همین دلیل در فصل تر این نسبت کمتر از فصل خشک است. از طرفی در چشمه های سروک مقدار تغییرات این نسبت در فصل خشک و تر اندک است و در چشمه براهیم مردون ثابت می باشد که قطعاً در رابطه با بزرگ بودن حوضه آبرگیر و اختلاط آب های جدید و قدیمی در مسیر حرکت به سمت چشمه می باشد. می توان گفت که در چشمه های سروک به جز چشمه آرپناه، جریان

بارش رخ نداده است. مقدار دبی خروجی از این دو چشمه سبزاب و بی بی ترخون نمی‌تواند صرفاً از ماتریکس سنگ‌های کارستی تأمین گردد و قطعاً حوضه آبرگیر بزرگی داشته و جریان مجرای-افشان دارند. در چشمه اناری As3 دبی پیک همزمان با بارندگی رخ داده و نشان‌دهنده مجرای بودن جریان در تاقدیس میزبان است. چشمه برم جمال As4 پاسخ ملایم-تری به افزایش و کاهش بارندگی نشان داده است و بیانگر جریان افشان و تأثیر مؤلفه دیگری به جز بارش (تغذیه دگرزا از سازند گچساران) در امر تغذیه آن است. در کلیه چشمه‌های سروک و آسماری به جز چشمه آرپناه As4 درصد جریان پایه بیشتر از جریان سریع می‌باشد. همچنین درصد تغییرات دبی و نسبت دبی حداکثر به حداقل، در این چشمه بیشتر از بقیه چشمه‌ها بوده و بیانگر مجرای بودن جریان در سیستم کارستی حوضه آبرگیر آن است. کمترین درصد تغییرات دبی و کمترین میزان نسبت دبی حداکثر به حداقل مربوط به چشمه بی‌بی ترخون As2 و بعد از آن چشمه سبزاب As1 است به این مفهوم که تغییرات دبی نسبت به سایر چشمه‌ها کمتر است. جریان پایه در چشمه چالسه سربازار S2 بیشتر از بقیه چشمه‌ها می‌باشد و با توجه به نزدیک بودن مظهر آن با چشمه براهیم مردون S1، مخزن مشترکی داشته و حوضه آبرگیر بزرگی دارند.

با توجه به وسعت حوضه آبرگیر و کشیدگی تاقدیس کی‌نو به‌عنوان مخزن اصلی این دو چشمه، جریان مجرای اثر خود را نشان نمی‌دهد و جریان افشان غالب‌تر دیده می‌شود. شکل هیدروگراف چشمه چالسه سربازار در انتهای تابستان (فصل بدون بارش) و همچنین کاهش شیب در یال نزولی چشمه براهیم مردون نشان‌دهنده تغذیه حاصل از ذوب برف در حوضه آبرگیر آنها است. پاسخ دبی چشمه چالسه سوسن ایزه S3 به بارش آهسته و پلکانی بوده به طوری که بعد از وقوع بارش دبی با تأخیر حدود یک‌ماهه افزایش یافته است و همچنین زیاد بودن جریان پایه بیانگر مجرای-افشان بودن جریان است. در چشمه آرپناه S4 جریان پایه نسبت به جریان سریع کمتر بوده و جریان مجرای است. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که چشمه‌های با آبدی بالا در زاگرس بیانگر توسعه کارست در این رشته‌کوه می‌باشد. با توجه به میانگین دبی چشمه‌های شمال شرق خوزستان در دوره مورد بررسی (فروردین ۱۳۹۷ تا آذر ماه ۱۳۹۸) نسبت به سایر چشمه‌های بزرگ زاگرس می‌توان گفت که چشمه‌های براهیم مردون، چالسه سربازار، سبزاب و بی‌بی ترخون با میانگین دبی به ترتیب ۱۱/۷، ۸/۶، ۱۱/۵ و ۶ مترمکعب در ثانیه بزرگ‌ترین چشمه‌های کارستی ایران محسوب می‌گردند (جدول ۳).

جدول ۳- جایگاه چشمه‌های کارستی اصلی شمال شرق خوزستان در میان چشمه‌های بزرگ کارستی ایران بر اساس دبی میانگین (سال آبی ۹۸-۱۳۹۷).

استان	نام چشمه	دبی میانگین (مترمکعب در ثانیه)	استان	نام چشمه	دبی میانگین (مترمکعب در ثانیه)
خوزستان	براهیم مردون	۱۱/۷	چهار محال و بختیاری	کوه‌رنگ	۲/۴
خوزستان	سبزاب	۱۱/۵	چهار محال و بختیاری	دزداران	۲/۴
خوزستان	چالسه سربازار	۸/۶	چهار محال و بختیاری	شرمک	۲/۳
خوزستان	بی‌بی ترخون	۶	چهار محال و بختیاری	سفیدلردگان	۲/۳
کهگیلویه و بویر احمد	موگرمون	۵/۱	خوزستان	برم جمال	۲/۲
کرمانشاه	ریجاب	۵	چهار محال و بختیاری	سرداب رستم آباد	۲/۱
چهار محال و بختیاری	پیرغار	۴/۵	همدان	سراب گاماسیاب	۲/۱
کهگیلویه و بویر احمد	چشمه کوچک	۴	چهار محال و بختیاری	او دی چشمه آب	۱/۹
چهار محال و بختیاری	سرخون	۳/۹	کردستان	چشمه تلوکسان	۱/۹
چهار محال و بختیاری	سندگان	۳/۴	فارس	شش پیر	۱/۹
چهار محال و بختیاری	دیمه	۳/۱	کهگیلویه و بویر احمد	چشمه سیاه	۱/۸
کرمانشاه	هانی کوان	۲/۹	فارس	دم اسب	۱/۸
چهار محال و بختیاری	باغ رستم	۲/۸	کردستان	کانی بل	۱/۸
خوزستان	چالسه سوسن	۲/۷	چهار محال بختیاری	برم لردگان	۱/۷
خوزستان	اناری	۲/۵	خوزستان	آرپناه	۱/۵
چهار محال و بختیاری	ماربران	۲/۵			

## نتیجه گیری

نسبت دبی حداکثر به دبی حداقل و همچنین درصد ضریب تغییرات دبی در چشمه‌های آسماری کمتر از چشمه‌های سروک است و بیانگر تغییرات کمتر و پایداری دبی در این چشمه‌ها است. از طرفی بررسی‌های هیدروشیمی از جمله نسبت یونی منیزیم به کلسیم در فصل تر و خشک نشان‌دهنده تغییرات کمتر در چشمه‌های با مخزن سازند سروک نسبت به سازند آهکی آسماری بوده است و بیانگر خلوص بیشتر سازند سروک نسبت به آسماری می‌باشد. همچنین عدم تغییر زیاد این نسبت در فصل خشک نسبت به فصل تر در چشمه‌های سروک بیانگر زیاد بودن زمان ماندگاری آب در سیستم کارستی و پایداری جریان است. لذا چشمه‌های بزرگ سروک و آسماری مورد بررسی که دبی بالایی دارند (از جمله براهیم مردون، چالسه سربازار، سبزآب و بی‌بی ترخون) حوضه آبگیر بزرگ و جریان پایدار دارند. حداکثر حجم ذخیره دینامیک در سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ در چشمه‌های براهیم مردون (۳۰۳ MCM)، سبزآب (۲۵۸ MCM)، چالسه سربازار (MCM) (۱۶۱) و بی‌بی ترخون (۱۳۹/۶ MCM) به‌عنوان بزرگ‌ترین چشمه‌های کارستی زاگرس به‌دست‌آمده است. با توجه به قرارگیری چشمه‌های مورد بررسی در رشته‌کوه زاگرس و ارتباط معکوس بین دبی و تراز مظهر چشمه‌ها و هدایت الکتریکی آنها همانند سایر چشمه‌های بزرگ زاگرس، نتایج این مقاله می‌تواند برای سایر چشمه‌های زاگرس نیز مورد استناد قرار گیرد.

## سپاسگزاری

از مدیریت مطالعات پایه و طرح‌های جامع منابع آب سازمان آب و برق خوزستان به‌واسطه در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز قدردانی می‌گردد.

## منابع

باقری، ر.، کرمی، غ.، رحیمی، ف.، ۱۳۹۷. هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی تاقدیس سالدوران، استان چهارمحال و بختیاری. هیدروژئولوژی، ۳(۱)، ۶۹-۸۰.  
حمیدی‌زاده، ف.، کلانتری، ن.، کشاورزی، م.ح.، چرچی، ع.، ۱۳۹۱. بررسی هیدروژئولوژیکی و زمین‌ساختاری چشمه

دره اناری در منطقه کارستی شیرین بهار خوزستان. تحقیقات منابع آب ایران، ۱، ۳۰-۴۲.  
رحمتی، م.، مرادی، ح.ر.، کریمی، ح.، جلیلی، خ.، ۱۳۹۴. بررسی اثر توسعه‌یافتگی کارست بر رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه. اکوهیدروژئولوژی، ۲(۲): ۱۶۳-۱۷۳.  
روحی، ح.، کلانتری، ن.، ۱۳۹۸. استفاده از هیدروگراف چندساله به‌منظور مقایسه رژیم هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی تاقدیس کوه سفید، استان خوزستان. هیدروژئولوژی، ۴(۱)، ۱۴-۲۵.  
زارعی، ح.، کلانتری، ن.، محمدی بهزاد، ح.ر.، ندیری، آر.، ۱۳۹۶. اثر نوسانات اقلیمی بر شرایط کمی و کیفی چشمه کارستی بی‌بی تلخون، شهرستان لالی خوزستان. هیدروژئولوژی، ۲(۲)، ۱-۱۶.  
فرهادی، ص.، علی‌جانی، ف.، ناصری، ح.ر.، ۱۳۹۹. مقایسه مشخصات ایزوتوپ‌های پایدار بارش سیل‌آسا فروردین ۱۳۹۸ در جنوب غرب کشور با خط آب جوی دیگر مناطق ایران و کشورهای مجاور. نشریه هواشناسی کشاورزی (وابسته به انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران)، ۸(۲): ۴۴-۵۹.  
کریمی وردنجانی، ح.، چیت‌سازان، م.، کریمی، ح.، محرابی-نژاد، ع.، زارعی‌پور، م.، ۱۳۹۲. خصوصیات هیدروژئولوژی و همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.  
کلانتری، ن.، محمدی بهزاد، ح.ر.، چرچی، ع.، کشاورزی، م.ر.، ۱۳۹۰. چشمه‌های کارستی به‌عنوان ساده‌ترین ابزار برای تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی، مطالعه موردی چشمه بی‌بی تلخون، استان خوزستان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲(۱): ۹۰-۱۰۰.  
مالی، س.، محمدی، ض.، ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های برآورد جریان پایه در چشمه‌های کارستی، مطالعه موردی چشمه‌های پیرغار و دیمه. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۴، ۲۲-۳۷.



- Karimi, H., Raeisi E., Rezaei, A., 2018. Determination of karst aquifer characteristics using physicochemical parameters (A case study from west of Iran). *Geopersia*, 8 (2): 293-305.
- Kresic, N., Bonacci, O., 2010. Spring discharge hydrograph. In: Kresic, N., Stevanovic, Z., *Groundwater Hydrogeology of Springs: Engineering, Theory, Management and Sustainability*. Elsevier., USA, 129-163.
- Kova'cs, A., Perrochet, P., Király, L., 2005. A quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. *Journal of Hydrology*, 303: 152-164.
- Maillet, 1905. *Essais d'hydraulique souterraine & fluviale*, A. Hermann, Google, 268 p.
- Manga, M., 2001. Using springs to study groundwater flow and active geologic processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29: 201-228
- Milanovic, P., Aghili, B., 1990. Hydrogeological characteristics and groundwater mismanagement of Kazerun karstic aquifer, Zagros, Iran. *Hydrogeological Processes in Karst Terranes*, 10: 163-171.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to Phreeqc (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geological Survey, Reston, VA.
- Rajmohan, N., Elango, L. 2004. Identification and Evolution of Hydrogeochemical Processes in the Groundwater Environment in an Area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. *Environmental Geology*, 46: 47-61.
- Toran, L., Reisch, C.E., 2013. Using stormwater hysteresis to characterize karst spring discharge. *Groundwater*, 51: 575-587.
- White, W.B., 1998. Groundwater Flow in Karstic Aquifers. In Delleur, J. W. (Ed.), *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL, 21: 1-47.
- Wu, X., Zheng, Y., Zhang, J., Wu, B., Wang, S., 2017. Tian, Y.; Li, J.G.; Meng, X. Investigating Hydrochemical Groundwater Processes in an Inland Agricultural Area with Limited Data: A Clustering Approach. *Water*, 9, 723.
- Zölt, J., 1960. Die Hydrographic des nordost Alpinen Karsts. *Steirsche Beitrage Hydrogeology*, 2: 53-183.
- محمدی بهزاد، ح.ر.، چرچی، ع.، کلانتری، ن.، ۱۳۹۴. بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی سبزآب، شمال شرق استان خوزستان. *مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، ۱۵، ۱۰-۱۹.
- ناصری، ح.ر.، ۱۳۷۰. مطالعه هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی حوضه آبریز سد درودزن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آب‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.
- Bakalowicz M, El Hakim M, El-Hajj A (2008) Karst groundwater resources in the countries of eastern Mediterranean. *Environmental Geology*, 54:597-604.
- Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology*, 13: 148-160.
- Bakalowicz, M., El Hakim, M., El-Hajj., 2008. A., Karst groundwater resources in the countries of eastern Mediterranean: the example of Lebanon. *Environmental Geology*, 54:597-604.
- Chen, H. S., Hu, K., Nie, Y. P., Wang, K. L., 2017. Analysis of soil water movement inside a footslope and a depression in a karst catchment, Southwest China. *Scientific Reports*, 7(1): 2544.
- Christophe, J.G.D., 2008. Karst Aquifer Hydrogeology and Exploitation, Overexploitation and Contamination of Shared Groundwater Resource. NATO Science for Peace and Security Series.
- El-Fiky, A., 2010. Hydrogeochemical characteristics and evolution of groundwater at the Ras Sudr-Abu Zenima area, Southwest Sinai, Egypt. *Journal of King Abdulaziz University Earth Science*, 21:79-109.
- Ford, D., Williams, P.W., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, revised ed. Wiley, Chichester, UK, 578 p.
- Gams, I., 1966. Factor and dynamics of corrosion of the carbonate rocks in the Dinaric and Alpine karst of Slovenia (Yugoslavia). *Geografski Vestnik*, 38: 11-68.
- Gillison, D., 2004. *Caves, processes, development and management*. Edvard Arnold, London.
- Jacobson, R. L., Longmuir, D., 1974. Controls on the quality variation of some carbonate spring waters. *Journal of Hydrology*, 23: 247-265.
- Kalantari, N., Rouhi, H., 2018. Discharge hydraulic behavior comparison of two karstic springs in Kuhe-Safid anticline, Khuzestan, Iran. *Carbonates and Evaporites*, 34, 1343-1351.