هیدروژئولوژی، سال چهارم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۸
Hydrogeology, Volume 4, No. 1, Summer 2019

استفاده از هیدروگراف چندساله به منظور مقایسه رژیم هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی تاقدیس کوه سفید، استان خوزستان

حسن روحی[۱]، نصراله کلانتری[۲*]

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

* نویسنده مسئول: nkalantari@hotmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۰۵

چکیده

بهترین روش برای مطالعه و بررسی آبخوان‌های کارستی، پایش و آنالیز هیدروگراف چشمه‌های آن‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از این مطالعات می‌تواند در شناخت و مدیریت این منابع ارزشمند کمک قابل ملاحظه‌ای نماید. هدف اصلی این مطالعه تعیین خصوصیات آبخوان‌های کارستی دو چشمه برم جمال و پوتو در تاقدیس کوه سفید واقع در جنوب شرقی استان خوزستان، با استفاده از آنالیز چند ساله هیدروگراف است. داده‌های دبی-اشل چند سال متوالی به منظور تعیین ضرایب فرود، حجم جریان‌های سریع و پایه و شناخت خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های تغذیه کننده هر کدام از چشمه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مخازن کارستی تشکیل شده در تاقدیس کوه سفید رفتارهای هیدرولیکی متفاوتی را نشان دهند. بررسی ضرایب فرود چشمه برم جمال نشان می‌دهد که دو نوع جریان شامل جریان مجرایی و انتشاری- ماتریکسی آبدهی چشمه را کنترل می کند و جریان انتشاری-ماتریکسی بر جریان مجرایی آن غلبه دارد. در حالی که برای چشمه پوتو جریان مجرایی غالب است که یک حد آستانه را نشان می‌دهد. همچنین بررسی هیدروگراف چشمه‌ها نشان می‌دهند که دوره‌های چند ساله بارندگی و خشک‌سالی بر افزایش و کاهش حجم ذخیره آبخوان چشمه برم جمال بطور قابل ملاحظه‌ای موثر بوده اند و سبب افزایش و کاهش قابل ملاحظه دبی پایه چشمه در سال‌های آتی شده اند؛ اما در مورد چشمه پوتو به دلیل جریان کانالی و تخلیه سریع، دوره‌های چندساله ترسالی اثر زیادی در افزایش ذخیره مخزن نداشته است. بنابراین، چشمه برم جمال به واسطه دبی بیشتر و زمان تخلیه طولانی تر نسبت به چشمه پوتو، از نظر تأمین آب در فصل خشک و دوره‌های خشک‌سالی قابلیت اطمینان بیشتری دارد. علاوه بر آن، نتایج این پژوهش رفتار نادر رژیم تخلیه چشمه پوتو را مشخص می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: چشمه برم جمال؛ چشمه پوتو؛ کارست؛ منحنی فروکش؛ هیدروگراف چندساله.

مقدمه

طبیعت آبخوان‌های کارستی بسیار پیچیده و ناهمگن است. جریان در این نوع آبخوان‌ها با تخلخل‌های نوع دوم و سوم که بترتیب شامل درزه‌ها و کانالهای انحلالی عریض است کنترل می‌شود، همچنین ساختارهای اولیه می‌توانند کنترل کننده جریان آب در این آبخوان‌ها باشند (لابت و همکاران، ۱۹۹۹). بر این اساس جریان‌های مختلفی در آبخوان شکل می‌گیرد که اثر آن‌ها در هیدروگراف چشمه قابل مشاهده است. هرچند که

روش‌هایی مانند بررسی‌های صحرایی و هیدروژئولوژیکی، بررسی‌های ژئوفیزیکی و غارشناسی و ردیابی‌های رنگی و ایزوتوپی اطلاعاتی در مورد خصوصیات هندسی و هیدرولیکی آبخوان‌های کارستی ارائه می‌نمایند اما داده‌های سری زمانی هیدروگراف و تحلیل منحنی فروکش با ارزش‌ترین اطلاعات را در این خصوص آشکار می‌سازد (کواکس و همکاران، ۲۰۰۵). در اقلیم‌های نیمه خشک مانند ایران که تغییرات مشخص فصلی در بارش مشاهده می‌شود تحلیل هیدروگراف و آنالیز فروکش با سهولت بیشتری انجام می‌گیرد. در این مناطق هیدروگراف چشمه‌های کارستی سیگنال‌های ورودی به سیستم از بارش‌های سالانه را به طور مشخصی نشان می‌دهد. زیرا معمولاً هیدروگراف فروکش در مدت زمان طولانی به وسیله تغذیه مجدد گسیخته نمی‌شود. محققان زیادی در خارج و داخل کشور در زمینه تحلیل هیدروگراف آبخوان‌های کارستی تحقیقاتی را ارائه داده‌اند از جمله: (کلانتری و همکاران، ۱۳۹۰)، (رضایی، ۱۳۷۹)، (زارعی و همکاران، ۱۳۹۶)، (فتحی و همکاران، ۱۳۹۳)، (کرمی و همکاران، ۱۳۹۷)، (کریمی، ۱۳۸۴)، (چیت سازان و همکاران، ۱۳۸۷)، (بناسی، ۲۰۰۱)، (کریمی و همکاران، ۲۰۰۵)، (گیر و همکاران، ۲۰۰۸)،(بیرک و هرگارتن ، ۲۰۱۰)، (فیوریلو، ۲۰۱۴)، (چانگ و همکاران، ۲۰۱۵)، (لی و همکاران، ۲۰۱۶)، (حمیدی زاده و همکاران، ۲۰۱۲).

چشمه‌های کارستی برم جمال و پوتو از منابع آبی مهم شهرستان میداود در استان خوزستان هستند که نقش قابل توجهی در اقتصاد منطقه دارند. آبخوان چشمه برم جمال در سازند آسماری و آبخوان چشمه پوتو در سازند ایلام- سروک تشکیل شده است.

در این مطالعه قصد بر این است که خصوصیات هیدرودینامیکی مخازن، نوع جریان و رژیم تخلیه این چشمه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. این اطلاعات به شناخت پتانسیل آبدهی و نوسانات حجم تخلیه سالانه و دراز مدت آبخوان‌ها، به منظور مدیریت اصولی استفاده از این منابع کمک شایانی می‌کند. همچنین این مقاله به توضیح یک رفتار نادر از رژیم تخلیه چشمه‌های کارستی می‌پردازد که در چشمه پوتو اتفاق افتاده است. علاوه بر آن، به لحاظ اینکه سازندهای آهکی آسماری و ایلام- سروک مهم‌ترین مخازن آب زیرزمینی کارستی در جنوب غربی ایران را تشکیل می‌دهند، این چشمه‌ها می‌توانند به عنوان نماینده آبخوان‌های کارستی تشکیل شده در هر کدام از این سازندها مورد توجه قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

تاقدیس کوه سفید در غرب استان خوزستان با مختصات جغرافیایی ´۵۰ °۴۹ تا ´۳۰ °۵۰ شرقی و ´۵۷ °۳۰ تا ´۲۲ °۳۱ شمالی واقع شده است و بصورت یک تاقدیس طویل با روند شمال غرب- جنوب شرق، مطابق با روند عمومی زاگرس است. محور این تاقدیس در جنوب غربی در اثر تداخل با تاقدیس کوه سیاه انحنا پیدا کرده است. به لحاظ چینه شناسی سازندهای آسماری، پابده، گورپی و ایلام- سروک چینه شناسی ظاهری تاقدیس کوه سفید را تشکیل می‌دهند که در اطراف تاقدیس با سازند گچساران محدود شده است.

سازندهای آسماری به سن الیگو- میوسن و ایلام- سروک به سن کرتاسه از جمله مهم‌ترین سازندهای کربناته استان خوزستان می‌باشند که به لحاظ هیدروژئولوژی و تشکیل مخازن کارستی با ذخیره آبی زیاد دارای اهمیت زیادی بوده و چشمه‌های بزرگ استان در آن‌ها گسترش یافته اند. از نظر لیتولوژی سازند آسماری متشکل از سنگ آهک های مقاوم کرم تا قهوه‌ای رنگی است که در آن‌ها درزه‌های فراوانی گسترش یافته اند و در لابلای آن‌ها طبقات نازک لایه شیلی نیز دیده می‌شود. سازند ایلام-سروک نیز در منطقه مورد مطالعه شامل آهک‌های توده‌ای قهوه‌ای روشن و آهک‌های خیلی ضخیم لایه است. تکتونیزاسیون شدید و وجود تنگه‌ها و دره ها و سایر اشکال ژئومورفولوژیک کارست از قبیل گرایک، کارن و مجاری انحلالی-

کارستی از خصوصیات بارز سازندهای آسماری و ایلام سروک در منطقه می‌باشد. هرچند که به علت رخنمون سازند ایلام- سروک در هسته تاقدیس و اثر بیشتر نیروهای کششی در محور، درجه خرد شدگی و گسترش گسل‌ها و درزه‌های کششی در آن نسبت به سازند آسماری بیشتر است. وجود سازندهای شیلی- مارنی پابده و گورپی در بین این دو سازند ارتباط هیدرولیکی آن‌ها را محدود ساخته است. به همین جهت مانند بسیاری دیگر از تاقدیس‌های منطقه، دو آبخوان کارستی مجزا از یکدیگر در تاقدیس کوه سفید تشکیل شده است.

توالی چینه شناسی، شرایط تکتونیکی و فرسایشی باعث ایجاد آبخوان کارستی آسماری در دامنه‌ها و مخزن کارستی ایلام- سروک در ارتفاعات بالای تاقدیس شده است (شکل ۱).

تکتونیک با ایجاد ساختارهای چین خورده و گسترش شکستگی در لایه‌های سنگی و فرسایش با حذف سازند آسماری و پابده در محور تاقدیس و در معرض قرار دادن سازند قدیمی‌تر ایلام- سروک باعث پیدایش آبخوان کارستی آسماری در یال‌های تاقدیس و در ارتفاعات کمتر و آبخوان کارستی ایلام-سروک در هسته تاقدیس و ارتفاعات بالاتر شده‌اند. چشمه برم جمال با آبدهی متوسط ۱/۳ مترمکعب بر ثانیه مهم‌ترین خروجی مخزن کارستی آسماری بوده و مهم‌ترین خروجی مخزن کارستی ایلام- سروک چشمه پوتو با آبدهی متوسط ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه، در محدوده پلانژ شمال غربی تاقدیس واقع شده‌اند. البته درصدی از آب آبخوان ایلام- سروک احتمالاً از چشمه‌های موگرمون و سرآسیاب در پلانژ جنوب غربی و در مشارکت با آبخوان تاقدیس کوه سیاه خارج می‌گردد. از نظر شرایط اقلیمی بر اساس آمار ایستگاه‌های تبخیر سنجی باغملک، چم نظام، ماشین، و ایستگاه‌های باران سنجی میداود و الگن (سال‌های آبی ۶۷-۶۶ تا ۹۶-۹۵) منطقه نیمه خشک با متوسط بارندگی در حدود ۷۰۰ میلیمتر در سال است که اغلب از آبان تا اردیبهشت ماه سال بعد اتفاق می‌افتد. متوسط دمای سالانه منطقه نیز در حدود ۲۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

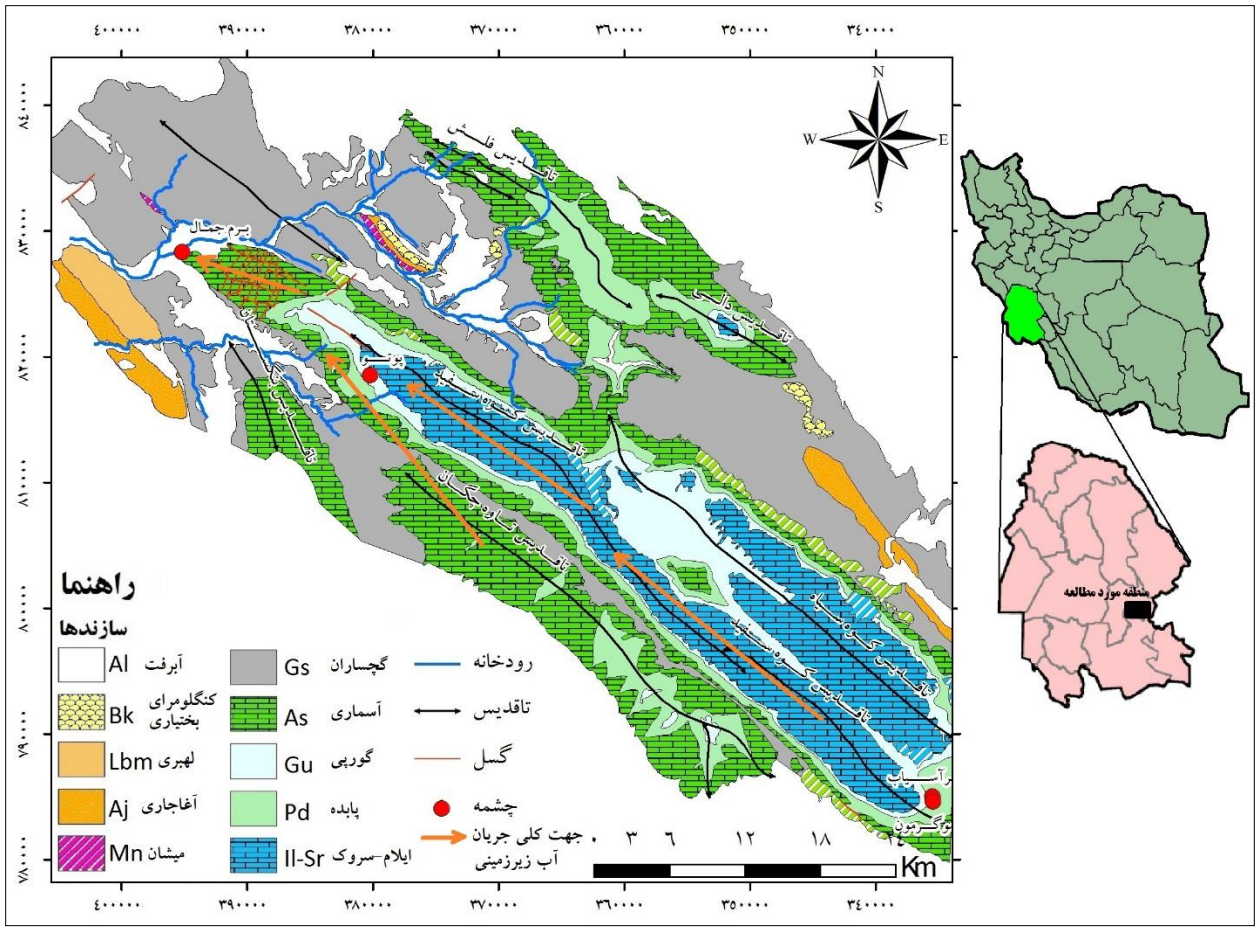
روش کار

روش بکار رفته ترکیبی از پایش هیدرومتری، تحلیل هیدروگراف چشمه و آنالیز فروکش است. داده‌های دبی-اشل برای دو چشمه برم جمال و پوتو به ترتیب که در یک دوره زمانی ۸ ساله (۸۳-۸۲ تا ۹۰-۸۹) و ۷ ساله (۹۵-۹۴ تا ۸۹-۸۸) توسط سازمان آب و برق خوزستان اندازه‌گیری شده است. دبی چشمه‌ها به صورت ماهیانه و اشل به صورت روزانه قرائت و ثبت شده‌اند. داده ای اخذ شده ابتدا مرتب‌سازی و بازبینی گردیده و در صورت عدم وجود داده قرائت اشل بین دو مقدار، دبی بصورت خطی درونیابی شده است. در مرحله بعد داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و هیدروگراف واحد هر چشمه در طول دوره آماری ترسیم شده است. سپس با استفاده از روابط فروکش هیدروگراف، ضرایب فرود از داده‌های طولانی مدت محاسبه شده‌اند. این ضرایب از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\alpha = \frac{\log Q2 - \log Q1}{0.434\ t} \qquad \text{رابطه(۱)}$$

در این رابطه α ضریب فرود، t زمان پایه هیدروگراف و $Q1$ و $Q2$ آبدهی (بر حسب متر مکعب بر ثانیه) به ترتیب در زمان‌های $t1$ و $t2$ می‌باشند. به منظور ارزیابی میزان توسعه کانال‌های جریان و شناخت رفتار تخلیه هر آبخوان، تعداد دوره‌های فروکش بر اساس ضرایب فرود رده‌بندی شده و همچنین حجم جریان سریع و پایه به وسیله جداسازی هیدروگراف محاسبه گردیده است. جداسازی هیدروگراف پایه برای هر سال آبی با استفاده از روش گرافیکی دبی ثابت انجام گرفته است مساحت زیر منحنی دبی پابه به عنوان جریان پایه و مساحت بین منحنی دبی پایه و دبی کل بعنوان حجم جریان سریع در نظر گرفته شده و در نرم‌افزار اکسل محاسبه گردیده است.

در نهایت با استفاده از ضرایب فرود و نوع واکنش هر آبخوان به وقایع بارش سناریوهای مختلف برای رفتار تخلیه آبخوان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- نقشه هیدرواستراتیگرافی منطقه مورد مطالعه.

بحث و نتایج

بررسی پاسخ‌های زمانی هیدروگراف

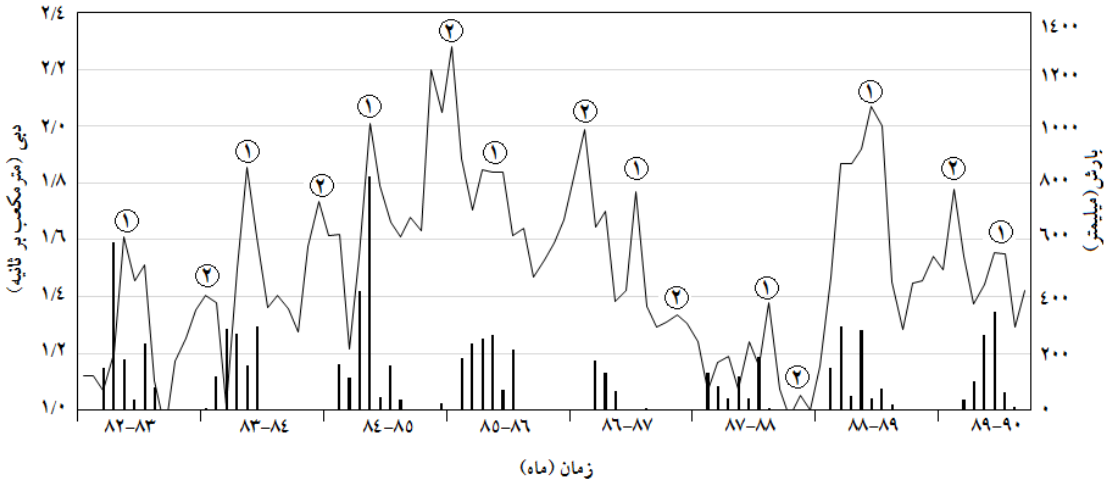
اولین قدم در شناخت یک آبخوان کارستی، بررسی رفتار هیدروگراف چشمه‌های تخلیه کننده آن و آنالیز واکنش هیدروگراف نسبت به وقایع بارندگی است. هرچقدر که دوره هیدروگراف طولانی‌تر باشد علاوه بر اینکه امکان شناخت واکنش آبخوان به بارندگی سالانه با دقت و اطمینان بیشتری فراهم می‌گردد امکان بررسی واکنش آبخوان به نوسانات بارندگی دراز مدت نیز وجود خواهد داشت. به همین منظور هیدروگراف‌های چند ساله دو چشمه برم جمال و پوتو که بترتیب نماینده آبخوان‌های کارستی آسماری و ایلام- سروک می‌باشند در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

هیدروگراف چشمه برم جمال

در یک دید کلی می‌توان تشخیص داد که چشمه برم جمال به بارندگی طولانی مدت حساس است و وقوع پریودهای خشک‌سالی و ترسالی باعث کاهش و افزایش محسوس در دبی پایه چشمه شده است. به عنوان مثال روند تدریجی افزایش دبی پایه و دبی کل در اثر بارندگی مناسب سال‌های ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۵-۱۳۸۴ اتفاق افتاده است در حالی که در طی سال‌های خشکی ۸۷-۱۳۸۶ یک افت کلی در روند هیدروگراف مشاهده می‌گردد (شکل ۲). بنابراین، می‌توان گفت که هیدروگراف چشمه برم جمال علاوه بر نوسانات بارندگی سالانه، پریودهای تر و خشک چندساله را نیز آشکار می‌سازد. برای چشمه برم جمال در طول دوره آماری ۸ ساله یک دبی حداقل برابر ۱ متر مکعب بر ثانیه وجود داشته است به طوری که حتی در دوره‌های خشک‌سالی دبی چشمه از این مقدار کمتر نشده است. در یک

دید دقیق‌تر مشاهده می‌گردد که به دنبال هر دوره بارش سالانه ۲ پیک اصلی در هیدروگراف ایجاد شده است که با اعدا ۱ و ۲ روی شکل نشان داده شده‌اند.

پیک شماره ۱ با یک تاخیر زمانی در حدود ۴ ماه پس از شروع اولین بارش ایجاد شده است و پیک شماره ۲ اغلب در مرداد تا شهریور ماه و با یک فاصله زمانی ۶ الی ۷ ماه بعد از اولین پیک قابل مشاهده است. بر این اساس تغذیه چشمه برم جمال از ۲ حوضه آبگیر مجزا مفروض است. بررسی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و محل ظهور چشمه‌ها در تاقدیس‌های اطراف نشان می‌دهد که پیک شماره ۲ احتمالاً از سیگنال آب‌های ورودی از تاقدیس تاوه چگان در غرب تاقدیس کوه سفید ناشی می‌شود (شکل ۲).

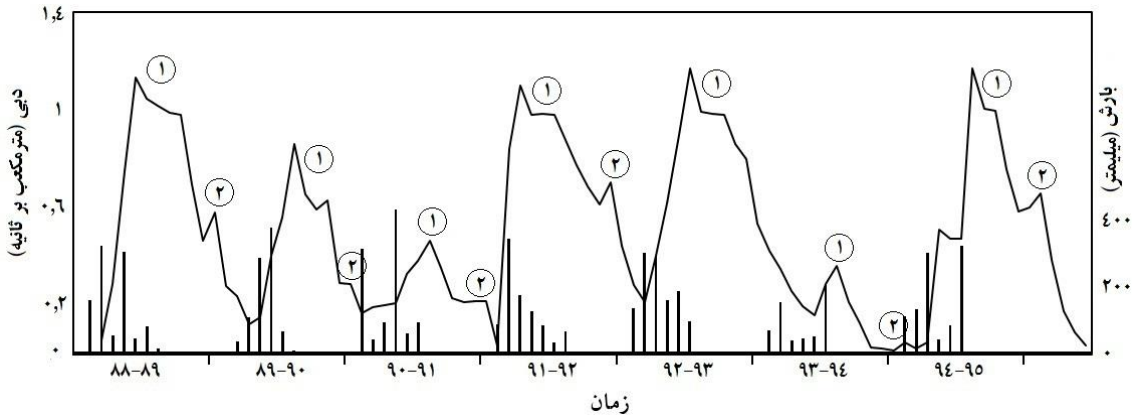


شکل ۳- (الف) استخراج محلول میکرو حلال و (ب) کروماتوگرافی گازی

هیدروگراف چشمه پوتو

هیدروگراف چشمه پوتو دارای یک پیک اصلی مشخص و مجزا برای هر سال آبی است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد به فاصله تقریبی ۴ ماه پس از شروع فصل بارندگی در هر سال آبی پیک هیدروگراف نمایان می‌گردد (عدد ۱ روی شکل ۳)؛ سپس فروکش تا شروع بارندگی‌های سال بعد ادامه می‌یابد. برخلاف چشمه برم جمال، سال‌های پربارش متوالی اثر قابل توجهی در هیدروگراف چشمه پوتو نداشته است به عبارت دیگر ترسالی‌ها و خشکسالی‌های متوالی دبی پایه هیدروگراف چشمه پوتو را به میزان قابل توجه تغییر نمی‌دهد و اثر چندانی بر هیدروگراف سال‌های آتی ندارد. این امر را می‌توان به خصوصیات زهکشی سریع و کانالی و یا حوضه آبگیر کوچکتر چشمه نسبت داد. تشخیص اثر هر کدام از این عوامل نیز به نوبه خود به وسیله تحلیل ضرایب فرود قابل تحقیق است. نکته قابل توجه این است که صرف نظر از میزان بارش سالیانه، دبی چشمه از یک حد معینی تجاوز نکرده است به عبارت دیگر یک حد آستانه جریان (در حدود ۰/۹۸ مترمکعب بر ثانیه) برای تخلیه چشمه پوتو وجود دارد. در سال‌های آبی ۸۹-۱۳۸۸، ۹۲-۱۳۹۱، ۹۳-۱۳۹۲ و ۹۵-۱۳۹۴ که با بارش مناسب همراه بوده است دبی چشمه پوتو به حد آستانه رسیده است. در مقابل، در سال‌های آبی ۹۰-۱۳۸۹، ۹۱-۱۳۹۰ و ۹۴-۱۳۹۳ که رویدادهای بارندگی کوچکتری وجود داشته است دبی پیک هیدروگراف کمتر بوده و به حد آستانه نمی‌رسد.

علاوه بر پیک اصلی هیدروگراف یک پیک کوچک نیز در بسیاری از سال‌ها مشاهده می‌شود که با عدد ۲ روی هیدروگراف شکل ۳ نشان داده شده است. این پیک کوچک می‌تواند به سیگنال ورودی از یک کانال فرعی کوچک یا تغذیه از ذوب برف نسبت داده شود.



شکل ۳- هیدروگراف ۷ ساله چشمه کارستی پوتو.

بررسی ضرایب فرود

ضرایب فرود چشمه برم جمال

محاسبه و طبقه‌بندی ضرایب فرود برای چشمه برم جمال (جدول ۱) نشان می‌دهد که از تعداد ۳۷ دوره فروکش شناسایی شده در طول دوره آماری ۸ ساله تعداد ۳۰ دوره دارای ضرایب فرود (α) بسیار کوچک و کوچک است. این دوره‌های فروکش اغلب با جریان انتشاری در ارتباط است و نشان دهنده تخلیه جریان از ماتریکس و درزو شکاف‌های ریز آبخوان است. تعداد ۷ دوره شناسایی شده نیز مربوط به ضرایب فروکش متوسط تا سریع است. طبق نظر (ساتر، ۱۹۹۲) این مقادیر α ترکیبی از جریان کانالی و انتشاری را نشان می‌دهد. به این ترتیب می‌توان گفت که در مورد چشمه برم جمال جریان انتشاری حاصل از ماتریکس درز و شکافدار بر جریان کانالی غالب است و بالا بودن میزان جریان پایه در طول دوره آماری نیز ناشی از همین امر است. روند تخلیه کند آبخوان سبب افزایش جریان پایه طی سال‌های متوالی پر بارش شده است و برعکس کاهش تغذیه آبخوان در خشکسالی‌های چند ساله باعث کاهش تدریجی دبی پایه می‌گردد (شکل ۲).

ضرایب فرود چشمه پوتو

هیدروگراف چشمه پوتو برای دوره آماری ۷ ساله، تعداد ۳۳ دوره فروکش مختلف را نشان می‌دهد (جدول ۱). از این میان ۱۲ دوره مربوط به ضرایب فرود مسطح و آهسته، ۱۳ دوره مربوط به ضرایب فرود متوسط و ۸ دوره مربوط به ضرایب فرود سریع و خیلی سریع است. از آنجایی که چشمه پوتو ضرایب فرود سریع و خیلی سریع را نیز شامل می‌شود می‌توان گفت که توسعه کانالی در ساختار آبخوان این چشمه بیشتر بوده و جریان کانالی مشارکت زیادی در تخلیه چشمه پوتو دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که بیشتر ضرایب فرود بسیار کوچک (مسطح) در محل پیک هیدروگراف این چشمه دیده می‌شوند. به همین جهت یک سیستم زهکشی زیرزمینی خاص برای این چشمه مفروض است. همانطور که قبلاً بیان شد یک حد آستانه جریان (۰/۹۸ مترمکعب بر ثانیه) برای این چشمه وجود دارد که نماینده دبی بیشینه چشمه است (شکل ۳). برای وقایع تغذیه کوچک تا متوسط حد آستانه جریان حاصل نشده است و رویدادهای فروکش معمولاً خیلی سریع بوده‌اند (سال‌های آبی ۹۰-۸۹، ۹۱-۹۰ و ۹۴-۹۳). برای اکثر این رویدادهای کوچک ضرایب فرود ۰/۰۱۶ تا ۰/۰۵۶ است. شاخه پایین رونده هیدروگراف برای رویدادهای تغذیه کوچک تا متوسط دارای شیب زیادی است که نشان می‌دهد ذخیره انتشاری کوچک بوده و دبی عمدتاً از ذخیره کانالی تأمین می‌شود.

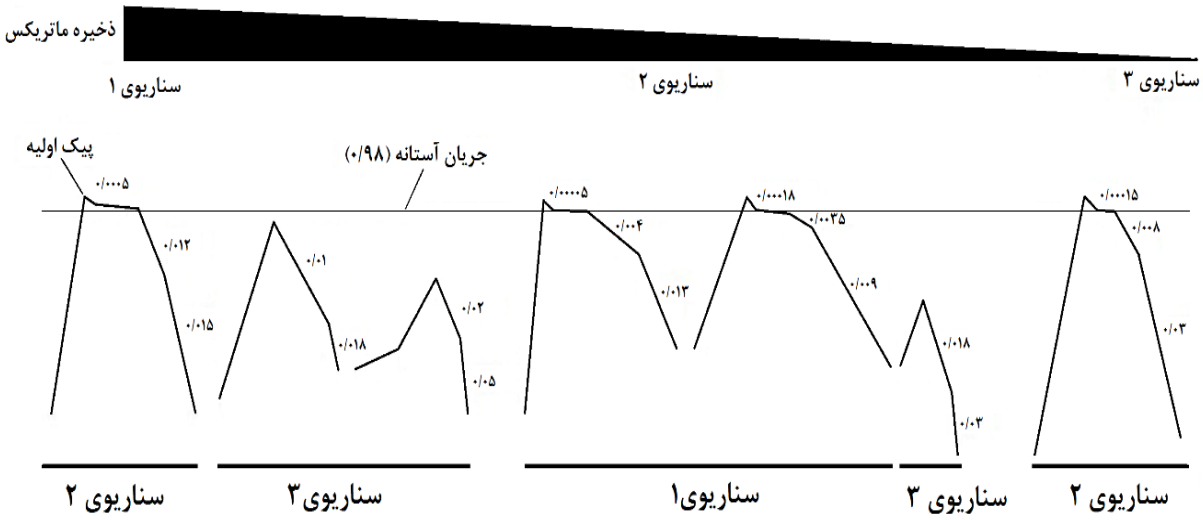
جدول ۱- خصوصیات ضرایب افت بدست آمده از تحلیل هیدروگراف چند ساله چشمه‌های برم جمال و پوتو.

چشمه	نوع فروکش	α میانه (d^{-1})	α میانگین (d^{-1})	تغییرات α (d^{-1})	دوره فروکش
برم جمال	مسطح	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱۲	-۰/۰۰۱۸ ۰/۰۰۰۰۳	۱۱
	آهسته	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳۸	—۰/۰۰۵۰۵ ۰/۰۰۳۱۶	۱۹
	متوسط	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۶۱—۰/۰۰۹۶	۴
	متوسط تا سریع	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۰۰—۰/۰۱۰۷	۳
پوتو	مسطح	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۲۵	-۰/۰۰۰۴ ۰/۰۰۰۰۵	۶
	آهسته	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۶—۰/۰۰۵۳	۶
	متوسط	۰/۰۰۶۴۴	۰/۰۰۶۹۱	۰/۰۰۵۸—۰/۰۰۸۴	۶
	متوسط تا سریع	۰/۰۱۱۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۰—۰/۰۱۶	۷
	سریع	۰/۰۱۸۴	۰/۰۱۷۷	۰/۰۱۶—۰/۰۱۹	۳
	خیلی سریع	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۶۷	۰/۰۲۴—۰/۰۵۷	۵

در مجموع بر اساس ضرایب فرود بدست آمده برای چشمه پوتو سه سناریو قابل تعریف است (شکل ۴). در سناریوی ۱ بعد از بخش مسطح هیدروگراف ضریب فرود شاخص جریان ۰/۰۰۳۵ تا ۰/۰۰۴ تخمین زده می‌شود که نشان دهنده مشارکت ماتریکس درز و شکافدار در تخلیه است. مشابه این مقادیر برای زهکشی ماتریکس در مطالعات قبلی از جمله (فورکاسیویچ و پالوک، ۱۹۶۷؛ ساتر، ۱۹۹۲) بدست آمده است. این دوره به وسیله دوره ضرایب متوسط ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۰۱۳ دنبال می‌شود. این سناریو در سال‌های پر بارش اتفاق می‌افتد که در نتیجه آن بار هیدرولیکی در ماتریکس درز و شکافدار آبخوان افزایش می‌یابد و سپس جریان ماتریکس به نحو موثری در تخلیه مشارکت نموده و باعث کاهش شیب فروکش می‌شود. هر چند (فلوری و همکاران، ۲۰۰۷) بیان کردند که منشأ این آب همچنین ممکن است ناشی از اپیکارست یا زون وادوز باشد. در بعضی از سال‌ها بعد از بخش مسطح ضرایب فرود بزرگتری (۰/۰۰۸ تا ۰/۰۱۲) مشاهده می‌شود که با ضرایب تخلیه سریع ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۳ دنبال می‌شوند (سناریوی ۲). در این شرایط ذخیره ماتریکس بطور عمده کم بوده و بنابراین جریان کانالی غالب بوده و ضرایب فرود بزرگتر هستند. سناریوی ۳ دوره های زمانی را توصیف می‌کند که تغذیه به اندازه‌ای نبوده است که جریان آستانه حاصل شود و همچنین ماتریکس درز و شکافدار دارای ذخیره بسیار محدود است. در نتیجه جریان کانالی با ضرایب سریع و خیلی سریع ۰/۰۱۸ تا ۰/۰۵۶ عمده تخلیه آبخوان را شامل می‌شود. با تخلیه سریع آبخوان به وسیله جریان کانالی، قبل از آغاز بارندگی‌های سال آتی چشمه تا مرز خشک شدن پیش می‌رود.

ضرایب فرود مختلف به بار هیدرولیکی متغیر و حجم ذخیره متفاوت در بخش‌های مختلف آبخوان مربوط می‌شود. در ارتباط با نوع مخزن به لحاظ تئوری و مفهومی یک مخزن بسیار نفوذپذیر شامل سیستم کانالی و اشکال بسیار نفوذپذیر (حفره‌های کارستی، غارها و غیره) و یک مخزن کم نفوذپذیر

شامل ماتریکس سنگی همراه با اشکال کوچک مقیاس بدیهی است.



شکل ۴- تصویر شماتیک از رفتار پیچیده فروکش چشمه پوتو بر اساس فرض ذخیره آب در ماتریکس درز و شکافدار.

محاسبه حجم جریان سریع و پایه

با استفاده از جداسازی دبی پایه هیدروگراف، حجم جریان سریع و پایه چشمه‌های مورد مطالعه به منظور شناخت هرچه بیشتر سیستم آبخوان، برآورد سهم جریان‌های انتشاری و کانالی و تعیین پتانسیل کلی آبدهی چشمه تخمین زده شده و نتایج در جدول ۲ ارائه گردیده است. منظور از جریان پایه دبی پایه هیدروگراف و منظور از جریان سریع اختلاف بین دبی پایه و دبی کل در هر نقطه از هیدروگراف می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود سهم جریان سریع چشمه برم جمال با مقدار ۳۹۰ لیتر بر ثانیه در حدود ۳۰ درصد و سهم جریان پایه با مقدار ۹۰۰ لیتر بر ثانیه در حدود ۷۰ در صد است. این مقادیر نتایج تحلیل هیدروگراف و ضرایب فرود را در مورد غالب بودن جریان انتشاری- ماتریکسی در این چشمه تأیید می‌نماید. در مقابل، چشمه پوتو با دارا بودن سهم جریان کانالی ۷۷/۴ درصد از کل جریان، نشان از توسعه کارستیفیکاسیون و تمرکز جریان در کانال‌ها و ساختارهایی با نفوذپذیری زیاد دارد. روشن است که جریان انتشاری با مقدار ۲۲/۶ درصد، مشارکت کمتری در تخلیه این چشمه داشته است. متوسط دبی حاصل از جریان کانالی چشمه پوتو نیز ۳۸۴ لیتر بر ثانیه و متوسط دبی پایه ۱۱۲ لیتر بر ثانیه در طول دوره آماری برآورد شده است. بر طبق مباحث فوق انتظار می‌رود که زمان رسیدن به دبی پیک هیدروگراف پس از شروع فصول بارندگی برای چشمه پوتو که سهم جریان کانالی بیشتری دارد نسبت به چشمه برم جمال سریعتر اتفاق افتد اما این زمان برای هر دو چشمه تقریباً یکسان است (۴-۳ ماه پس از شروع بارندگی‌ها). این امر احتمالاً به دلیل شکل کشیده‌تر حوضه زهکشی زیرزمینی چشمه پوتو اتفاق می‌افتد. در حوضه‌های زیرزمینی مانند حوضه‌های سطحی اگر شکل حوضه طویل باشد (طول آبراهه یا کانال زیرزمینی زیاد باشد) زمان تمرکز حوضه و متعاقباً زمان رسیدن به پیک هیدروگراف افزایش می‌یابد.

جدول ۲- سهم جریان سریع و پایه چشمه‌های مورد مطالعه.

چشمه	نوع جریان	حجم در کل دوره (میلیون متر مکعب)	درصد	متوسط دبی (لیتر بر ثانیه)
	سریع	۱۰۹/۷۸۶	۳۰/۲۵	۳۹۰
برم جمال	پایه	۲۵۳/۱۰۴	۶۹/۷۵	۹۰۰
	مجموع	۳۶۲/۸۹	۱۰۰	۱۲۹۰
	سریع	۸۳/۷۹	۷۷/۴۲	۳۸۴
پوتو	پایه	۲۴/۴۴	۲۲/۵۸	۱۱۲
	مجموع	۱۰۸/۲۳	۱۰۰	۴۹۶

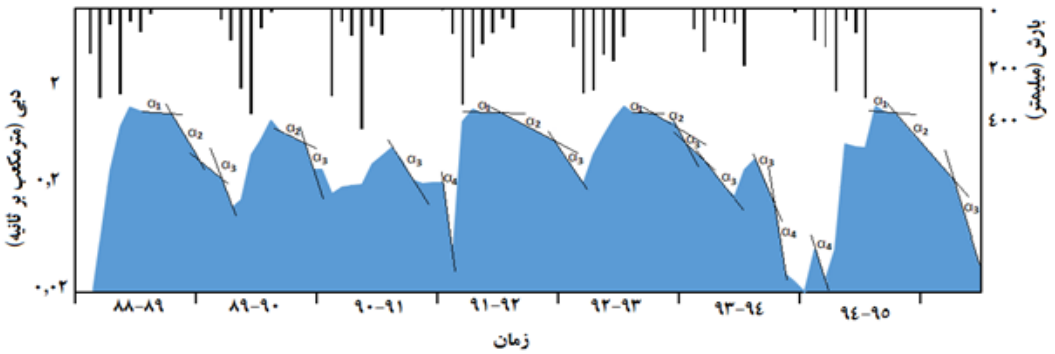
کنترل هندسه آبخوان بر رژیم تخلیه

با توجه به موقعیت ساختاری سازندهای کربناته در بر دارنده آبخوان چشمه‌های برم جمال و پوتو، اثر تنش‌های تکتونیکی بر توسعه کانال‌های جریان قابل بررسی است. به این ترتیب که سازند آسماری که مخزن چشمه برم جمال به حساب می‌آید در یال‌های تاقدیس گسترش یافته‌است اما رخنمون سازند ایلام-سروک در محور تاقدیس به چشم می‌خورد. در یال‌های تاقدیس معمولاً درزه‌های عرضی و برشی توسعه می‌یابند که باعث ایجاد زون پر درزوشکاف با باز شدگی کم درزه‌ها می‌شود، درحالی که در محور تاقدیس تنش‌های کششی باعث توسعه شکستگی‌های طولی با بازشدگی زیاد می‌شود که با انجام عمل انحلال کانال‌های طولی گسترش می‌یابند. بنابراین می‌توان گفت که موقعیت ساختاری حوضه آبگیر چشمه پوتو در غالب بودن سهم جریان کانالی مؤثر بوده است.

توسعه کانالی زیاد در حوضه آبگیر چشمه پوتو عامل تخلیه سریع این چشمه و کم بودن دبی پایه هیدروگراف است. اما شکل ویژه هیدروگراف این چشمه و وجود یک جریان آستانه، به محدود بودن ظرفیت تخلیه کانال خروجی منتهی به چشمه نسبت داده می‌شود. در بالای حد آستانه، رژیم جریان بصورت کانال محدود[3] درنظر گرفته می‌شود که باعث یک پلات مایل در هیدروگراف چشمه شده است. همانطور که پیش‌تر بیان گردید وقایع تغذیه کوچک تا متوسط منجر می‌شود که دبی به حد آستانه نرسد و فروکش سریع جریان در مدت زمان کمی بعد از بارندگی انجام شود. بر طبق نظریات (کاوینگتون و همکاران، ۲۰۰۹) این رفتار متضاد تخلیه می‌تواند به رژیم‌های جریان آبخوان کنترل (بیشتر از آستانه جریان) و تغذیه کنترل (زیر آستانه) طبقه‌بندی شود (شکل ۵). بر این اساس به منظور تفسیر بهتر هیدروگراف چشمه پوتو مناسب است که دو زیر سیستم برای حوضه این چشمه در نظر گرفته شود، یکی سیستم با نفوذ پذیری زیاد (شامل غارها، شفت‌ها و دولین‌ها) و دیگری ماتریکس درزوشکافدار آبخوان. در سال‌های پر بارش به دلیل انتقال آب از ساختارهای نفوذپذیر به ماتریکس یک بار هیدرولیکی اولیه زیاد بصورت هموار در سیستم توزیع می‌شود. این افزایش بار منجر به پیدایش یک پیک اولیه در هیدروگراف می‌شود. این پیک اولیه در مطالعات دیگری از جمله (هرمن و همکاران، ۲۰۰۸) و (فیوریلو، ۲۰۱۱) مشاهده و بررسی شده است. سپس هد آب زیرزمینی در بخش نفوذپذیر به دلیل خروج آب از چشمه و انتقال آب به ماتریکس فروکش می‌کند که منجر به یک تخلیه مسطح کمی مایل می‌شود (α = ۰/۰۰۰۲۵). (اسمارت، ۱۹۸۳) نشان داد که در برخی از آبخوان‌های کانال محدود تغذیه اضافی با سرریزی از

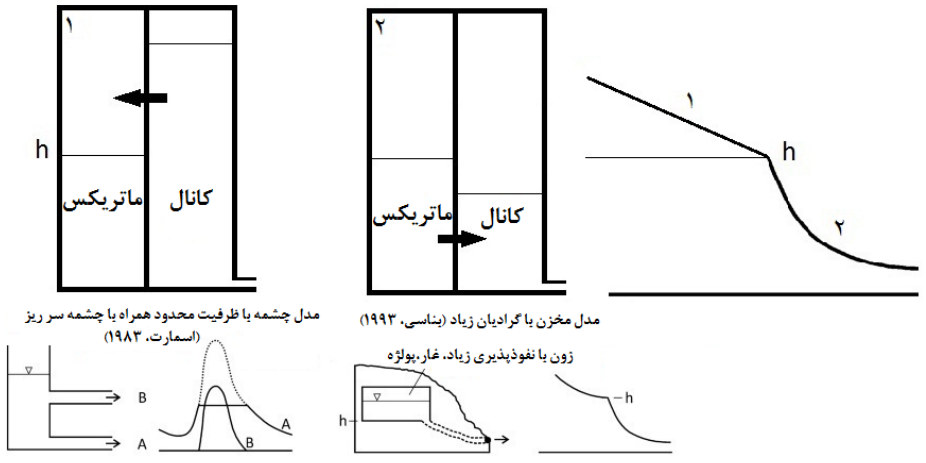
[3] - Conduit restricted

چشمه‌های بالا دست تخلیه می‌شود که انتظار می‌رود یک پلات مسطح ایجاد کند. در مقابل پلات کمی مایل در سیستم جریان چشمه پوتو نشان می‌دهد که تغذیه اضافی در سیستم ذخیره شده و بتدریج از چشمه تخلیه می‌گردد. در مجموع پیدایش حد بیشینه‌ای از دبی و رفتار فروکش محدب چشمه پوتو که با افزایش در ضرایب فرود به هنگام فروکش جریان همراه است می‌تواند نشان دهنده رفتار تخلیه کانال محدود باشد (شکل ۵). خروج آب از مظهر اصلی چشمه پوتو با فشار و سرعت زیاد در نتیجه عملکرد این نوع سیستم تخلیه قابل توجیه است. (چمیت، ۲۰۱۴) بیان کردند که اگر دبی چشمه در نقطه شکست تحدب نزدیک به بیشینه دبی مشاهده شده باشد رفتار کانال محدود مفروض است.



شکل ۵- رفتار فروکش محدب چشمه پوتو با حذف پیک‌های کوچک ثانویه. رفتار فروکش محدب به ویژه در سال‌های آبی ۹۲-۹۱، ۹۳-۹۲ و ۹۵-۹۴ به خوبی قابل مشاهده است.

در مجموع سیستم زهکشی آبخوان کارستی پوتو را می‌توان به وسیله مجموعه‌ای از مدل‌های ارائه شده توسط (اسمارت، ۱۹۸۳) و (بناسی، ۱۹۹۳) توصیف کرد. شکل ۶ یک مدل مفهومی شماتیک از مخزن این چشمه و مدل‌های الگو را نشان می‌دهد. مطابق شکل افزایش بار هیدرولیکی در ساختارهای کانالی و شفت‌ها در اثر تغذیه، باعث انتقال جریان به ماتریکس و افزایش بار در آن می‌شود (مرحله ۱ شکل). پس از افت سطح آب در بخش کانالی در اثر تخلیه از چشمه و انتقال به ماتریکس، سپس ماتریکس در تخلیه مشارکت می‌کند (مرحله ۲ شکل)، در این حالت فروکش بطور قابل ملاحظه‌ای نمایی می‌شود (بیلی و همکاران، ۲۰۱۰) و در مرحله آخر با تخلیه ماتریکس مجدداً جریان کانالی غالب می‌شود.



شکل ۶- مدل مفهومی شماتیک چشمه پوتو و مدل‌های الگو.

نتیجه‌گیری

روش‌های هیدروژئولوژیکی کلاسیک بخصوص پایش هیدروگراف چشمه و تحلیل آن یک چارچوب مفهومی را برای شناسایی سیستم آبخوان‌های کارستی و چگونگی رفتار آن‌ها مهیا می‌کند. برای نیل به این شناخت بخصوص در مناطق نیمه خشک که دوره‌های تر و خشک طولانی وجود دارد و جریان آب زیرزمینی و ذخایر آن می‌توانند خیلی متغیر باشند، به کار بردن یک هیدروگراف چند ساله الزامی است. در این مطالعه ترکیبی از پایش هیدرومتری و آنالیز هیدرولوژیکی داده‌های دبی برای شناسایی رفتار آبخوان‌های کارستی چشمه برم جمال و پوتو در دوره‌های کم بارش و پر بارش بکار رفته و نیز چگونگی اثر خصوصیات آبخوان‌ها بر منحنی فروکش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از محاسبه ضرایب فرود و تخمین حجم دبی پایه و سریع نشان می‌دهد که بعلت غالب بودن جریان سریع در چشمه پوتو (۷۷/۴٪) جریان پایه آن ناچیز است. برعکس چشمه برم جمال به دلیل جریان عمده پایه و انتشاری (۶۹/۷۵٪) همواره دارای دبی پایه بیشتر و ذخیره بزرگتری است. نوع رژیم زهکشی زیرزمینی در حوضه کارستی چشمه‌ها باعث شده است که آبدهی چشمه برم جمال متأثر از هر دوی تغذیه سالانه و دراز مدت آن باشد، در صورتی که آبدهی چشمه پوتو عمدتاً تحت تأثیر بارندگی سالانه قرار گیرد. همچنین چشمه پوتو به دلیل ظرفیت محدود مجرای تخلیه یک بیشینه مشخص از دبی ($۰/۹۸ \ m^3/s$) را که جریان آستانه نامیده می‌شود نشان می‌دهد. این پدیده منجر به یک رفتار فروکش غیر استاندارد به نام فروکش محدب شده است، به طوری که ضرایب فرود هیدروگراف نسبت به زمان افزایش می‌یابد. برای دورنمای مدیریت منابع آب به نظر می‌رسد که آبخوان‌های کارستی کانال محدود (مانند آبخوان چشمه پوتو) اگر با چشمه‌های سرریز زهکشی نشوند، نسبت به چشمه‌هایی که تخلیه آزاد دارند دارای مزیت هستند زیرا مکانیسم کانال محدود با ایجاد جریان آستانه از تخلیه سریع آب جلوگیری می‌کند. در مناطق نیمه خشک با دوره‌های خشک طولانی، رفتار فروکش کانال محدود به عنوان یک ابزار طبیعی برای مدیریت تخلیه آبخوان عمل می‌نماید. همچین واضح است که چشمه‌هایی مانند برم جمال با سهم جریان انتشاری زیاد و مدت زمان تخلیه طولانی‌تر به دلیل قابلیت ذخیره سازی و تداوم آبدهی، جهت مدیریت منابع آب مناسب‌ترند. علاوه بر آن به وسیله این‌گونه مطالعات می‌توان برآوردی از میزان آب در دسترس برای مصارف مختلف شرب و کشاورزی منطقه را در دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی به دست آورد.

منابع

چیت‌سازان م.، سیدی پور، م.، میرزایی، ی.، ۱۳۸۷. تعیین خصوصیات آبخوان کارستی چشمه برم جمال با استفاده از پاسخ‌های فیزیکی- شیمیایی. مجله آب و فاضلاب، شماره ۶۸، صفحه ۷۷-۷۲.

رضایی، م.، ۱۳۷۹. پیش‌بینی تغییرات آبدهی چشمه‌های کارستی در دوره‌های خشک‌سالی. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با کم آبی و خشک‌سالی. جهاد دانشگاهی استان کرمان.

زارعی، ح.، کلانتری، ن.، ندری، آ.، محمدی بهزاد، ح.، ۱۳۹۶. اثر نوسانات اقلیمی بر شرایط کمی وکیفی چشمه کارستی بی بی تلخون، شهرستان لالی خوزستان. هیدروژئولوژی. سال ۲، شماره ۲، ص ۱۶-۱.

فتحی، گ.، سنجری، م.، سلاجقه، ع.، مهدوی، م.، خلیقی، ش.، ۱۳۹۳. مقایسه و تعیین مناسب‌ترین فرمول شاخه خشکیدگی هیدروگراف برای مناطق مختلف کارستی غرب ایران. نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال ۸، شماره ۲۶، ص ۲۰-۱۱.

کرمی، غ.، باقری ح.، رحیمی، ف.، ۱۳۹۷. هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی تاقدیس سالدوران، استان چهارمحال و بختیاری. هیدروژئولوژی. سال ۳، شماره ۱، ص ۷۹-۶۹.

کریمی ، ح.، ۱۳۸۴، بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه‌های موگرمون و سرآسیاب. نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم.

کلانتری، ن.، محمدی بهزاد، ح.، چرچی، ع.، کشاورزی، م.، ۱۳۹۰. چشمه‌های کارستی به عنوان ساده ترین ابزار برای تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی، مطالعه موردی چشمه بی بی تلخون، استان خوزستان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، زمستان ۹۰، شماره ۲، جلد ۱، ص ۱۰۰-۹۰.

Hamidi zadeh, F., kalantari, N., Keshavarzi, M., charchi, A., 2012. Hydrogeological and geo-structural assessment of the Dareh-e-Anari spring in the Shirin Bahar karstic area, Khuzestan province. Iran-Water Resources Research. 8(1):30-42.

Herman, H.K., Toran, L., White, W.B., 2008. Threshold events in spring discharge: evidence from sediment and continuous water level measurement. Journal of Hydrolgy. 351: 98–106.

Karimi, H., Raeisi, E., Zare, M., 2005. Physicochemical time series of karst spring as a tool to differentiate the source of spring water. Journal Carbonates Evaporites. 20 (2): 138-147.

Kovacs, A., Perrochet, P., Kiraly, L., Jeannin, P.Y., 2005. A quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. Journal of Hydrolgy. 303: 152-164.

Labat, D., Ababou, R., Mangin, A., 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: Convolution and spectral analysis. Journal of Hydrology. 238 (3–4): 123–148.

Li, G., Goldscheider, N., Field M.S., 2016. Modeling karst spring hydrograph recession based on head drop at sinkholes. Journal of Hydrology. 542: 820-7.

Sauter, M., 1992. Quantification and Forecasting of Regional Groundwater Flow and Transport in a Karst Aquifer (Gallusquelle, Malm, SW. Germany). Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten C13, Tübingen.

Schmidt, S., Geyer, T., Guttman, J., Marei, A., Ries, F., Sauter, M., 2014. Characterisation and modelling of conduit restricted karst aquifers – Example of the Auja spring, Jordan Valley. Journal of Hydrology. 511: 750–763.

Smart, C.C., 1983. The Hydrology of a Glacierised Alpine Karst: Castleguard Mountain, Alberta. Ph.D. Thesis, McMaster University, Hamilton, Open Access Dissertations and Theses, P 1382.

Bailly-Comte, V., Martin, J.B., Jourde, H., Screaton, E.J., Pistre, S., Langston, A., 2010. Water exchange and pressure transfer between conduits and matrix and their influence on hydrodynamics of two karst aquifers with sinking streams. Journal of Hydrolgy. 386: 55–66.

Birk, S., Hergarten, S., 2010. Early recession behaviour of spring hydrographs. J. Journal of Hydrolgy. 380: 435–446.

Bonacci, O., 1993. Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. Journal of Hydrolic Science. 38: 51–62.

Bonacci, O., 2001. Analysis of the maximum discharge of karst springs. Journal of Hydrogeolgy. 9: 328–338.

Chang, Y., Wu, J., Liu, L., 2015. Effects of the conduit network on the spring hydrograph of the karst aquifer. Journal of Hydrology. 527: 517-30.

Covington, M., Wicks C., Saar, M., 2009. A dimensionless number describing the effects of recharge and geometry on discharge from simple karstic aquifers. Journal of Water Resources. 45: W11410.

Fiorillo, F., 2011. Tank-reservoir drainage as a simulation of the recession limb of karst spring hydrographs. Journal of Hydrogeolgy. 19: 1009–1019.

Fiorillo, F., 2014. The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers. Journal of Water Resour Management. 28: 1781–1805.

Fleury, P., Plagnes, V., Bakalowicz, M., 2007. Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: application to Fontaine de Vaucluse (South of France). Journal of Hydrolgy. 345: 38–49.

Forkasiewicz, J., Paloc, H., 1965. Le regime de tarissement de la Foux de la Vis, etude préliminaire. In: Hydrology of Fractured Rocks, Proceedings of the Dubrovnik Symposium. Journal of of Water Resources. 44: 213–226.

Geyer, T., Birk, S., Liedl, R., Sauter, M., 2008. Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. Journal of Hydrolgy. 348: 452–463.