

مقاله پژوهشی

ارزیابی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار براساس تحلیل هیدروگراف چشمه

فاطمه گراوند^۱، سید موسی حسینی^{۲*}، مهران مقصودی^۲، مجتبی یمانی^۳ و راضیه لک^۴

چکیده

در این پژوهش، تحلیل کمی از رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی دیمه و پیرغار در استان چهارمحال و بختیاری واقع در زون‌های زاگرس مرتفع و سنج‌سیرجان با استفاده از داده‌های روزانه دبی و بارش در طول دوره آماری مشترک ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸ مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل سری زمانی بلندمدت چشمه دیمه و پیرغار نشان داد که زمان پاسخ دبی نسبت به بارش به ترتیب حدود ۳ و ۲ ماه است و احتمالاً نشان‌دهنده توسعه بیشتر توده کارستی مرتبط با چشمه پیرغار در مقایسه با دیمه است. برآورد ضرایب فروکش جریان سریع (α_f)، جریان انتقالی (α_i) و جریان پایه (α_b) چشمه‌ها براساس تحلیل ۱۸ منحنی فروکش برابر با $\alpha_f = 0.004 \text{ day}^{-1}$ ، $\alpha_i = 0.016 \text{ day}^{-1}$ و $\alpha_b = 0.042 \text{ day}^{-1}$ برای چشمه دیمه و $\alpha_f = 0.007 \text{ day}^{-1}$ ، $\alpha_i = 0.038 \text{ day}^{-1}$ و $\alpha_b = 0.125 \text{ day}^{-1}$ برای چشمه پیرغار نشان داد که درجه توسعه‌یافتگی چشمه پیرغار ۷ و چشمه دیمه برابر با ۵/۵ (از ۱۰) است؛ برآورد حجم ذخیره دینامیک چشمه‌ها به روش مانجین (۱۹۷۵) نیز نشان داد که به‌طور متوسط در طول دوره مورد بررسی، به ترتیب حدود ۲۷ و ۵۵ درصد از کل حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه پیرغار و دیمه (معادل ۸/۱ و ۴۷/۷۵ میلیون مترمکعب در سال) مربوط به جریان پایه است. بالابودن میزان جریان انتقالی چشمه پیرغار، تغذیه نقطه‌ای و سیستم مجرای کارست منطقه را نشان می‌دهد. همچنین طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی مرتبط با چشمه‌ها به روش مانجین (۱۹۷۵) نشان داد که چشمه پیرغار دارای سیستم آبخوان کارستی پیچیده و توسعه‌یافتگی بالاتری نسبت به چشمه دیمه است. نتایج این پژوهش که صرفاً براساس تحلیل هیدروگراف خروجی چشمه‌های کارستی انجام شده است، می‌تواند اطلاعات کمی مهمی را از ذخایر دینامیک، درجه توسعه‌یافتگی، زمان مرگ چشمه و نوع رژیم جریان آبخوان‌های کارستی در شرایط فقدان/کمبود داده‌های هیدروژئولوژیکی، اکتشافی و ردیابی، ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: منحنی فروکش، طبقه‌بندی آبخوان، روش مانجین، چشمه‌های کارستی چهارمحال و بختیاری.

ارجاع: گراوند ف.، حسینی س.، مقصودی م.، یمانی م. و لک ر. ۱۴۰۱. ارزیابی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی دیمه و پیرغار براساس تحلیل هیدروگراف چشمه. مجله پژوهش آب ایران. ۴۷: ۴۱-۵۵. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13956.2420>

۱- کاندیدای دکتری رشته ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۳- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

۴- پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.

* نویسنده مسئول: smhosseini@ut.ac.ir

مقدمه

در سطح جهانی، آب‌های زیرزمینی کارستی دومین منبع آب زیرزمینی مورد استفاده برای تأمین آب آشامیدنی هستند (استوانویچ و استوانویچ، ۲۰۲۱). تخمین زده می‌شود که آب‌های زیرزمینی در سفره‌های کارستی در حال حاضر حدود ۲۵ درصد از آب آشامیدنی جهان را تأمین می‌کند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). در سال ۲۰۱۹، برآورد شده است که حدود ۱/۳ میلیارد نفر از جمعیت جهان در مناطق کارستی زندگی می‌کنند (گلشاید و همکاران، ۲۰۲۰). در ایران، زمین‌های کارستی حدود ۱۳ درصد از مساحت کل کشور را دربرمی‌گیرد (رئیزی و کوثر، ۱۹۹۷). زاگرس مهم‌ترین ناحیه حضور و رخنمون سازندهای کربناته در کشور است و آبخوان‌های کارستی یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های سازندهای کربناته زاگرس هستند (فرزین، ۱۳۹۸). حدود ۵۶ درصد از چشمه‌ها و بیشتر رودخانه‌های بزرگ ایران از این پهنه سرچشمه می‌گیرند (احمدی‌پور، ۱۹۹۹) که برای توسعه اقتصادی، (گوا و همکاران، ۲۰۱۹) و به‌ویژه توسعه و بهره‌برداری زاگرس‌نشینان نقش بسیار مهمی دارند (فرزین، ۱۳۹۸). مطالعه دقیق چشمه‌های کارستی پیش‌نیاز بهره‌برداری پایدار از این منابع آبی است (وایت و همکاران، ۲۰۱۶). روش‌های موجود در بررسی‌های هیدروژئولوژی کارست شامل روش‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، غارشناسی، تکنیک‌های هیدروژئولوژیکی-هیدرولیکی، استفاده از ردیاب‌های طبیعی مانند ایزوتوپ‌ها و پارامترهای هیدروشیمیایی و همچنین استفاده از ردیاب‌های مصنوعی است (گلشاید و درو، ۲۰۰۷). هرچند این روش‌ها برای ارزیابی هیدروژئولوژیکی توده کارستی اطلاعات دقیق‌تری ارائه می‌دهند، اما دارای محدودیت اجرایی و اقتصادی در سطوح وسیع هستند؛ بنابراین به دلیل نبود اطلاعات لازم برای مدل‌سازی‌ها و محدودیت‌های هزینه و زمان، استفاده از تحلیل منحنی فروکش یک روش سریع و کم‌هزینه است که رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌ها، درجه توسعه کارست، زمان مرگ چشمه، نوع رژیم جریان و حجم دینامیکی آبخوان را نیز مشخص کرده و می‌تواند برای تحلیل آبخوان‌های کارستی ایران که اطلاعات دقیق سیستم کارست درونی ندارند، برای تخمین توسعه‌یافتگی کارست درونی استفاده شود. تجزیه و تحلیل منحنی‌های فروکش چشمه‌های کارستی برای تعیین پارامترهای

هیدرولیکی، ویژگی‌های هندسی و مکانیسم‌های انتقالی که ماهیت دینامیکی سیستم‌های آبخوان کارستی را توصیف می‌کنند، ضروری است (اولارینویه و همکاران، ۲۰۲۱)؛ علاوه بر این، شکل و نرخ منحنی‌های فروکش اطلاعات قابل توجهی را درباره ذخیره‌سازی، ترکیب سنگ‌شناسی و ویژگی‌های ساختاری سیستم آبخوان نگهدارنده چشمه ارائه می‌دهد (ممون، ۱۹۹۵).

سوابق پژوهشی مربوط به تحلیل هیدروگراف و تجزیه و تحلیل منحنی فروکش چشمه‌های کارستی در منطقه و سایر نقاط جهان به این صورت است که براساس آنالیزهای سری زمانی انجام‌شده به کمک توابع خودهمبستگی، چگالی طیفی، عملکرد تابع همبستگی متقابل، ماندگاری اثر بارندگی در دبی چشمه‌های پیرغار، برم لردگان و دیمه نشان داد که در سیستم‌های کارستی مورد مطالعه، رژیم‌های مختلف جریان وجود داشته و سیستم کارستی پیرغار نسبت به چشمه‌های برم لردگان و دیمه از توسعه کامل‌تر و پیشرفته‌تری برخوردار است (محمدی و ریاحی‌پور، ۱۳۹۰). بررسی و مقایسه تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی معروف در استان چهارمحال و بختیاری در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸، بالا بودن جریان سریع چشمه‌های پیرغار، باباحیدر و پارک فرخشهر، نشان داد که جریان غالب در رژیم جریان سیستم کارستیک آن‌ها از نوع مجرای بوده و دامنه تغییرات کم در میزان آبدی چشمه‌های لردگان، شلمزار، سندگان و دیمه و به دنبال آن کاهش ضریب فروکش این چشمه‌ها در این سال حاکی از تأمین عمده آب چشمه توسط جریان پایه بوده که نشانگر نوع سیستم جریان افشان و تأمین آب توسط درز و شکاف‌های توسعه‌نیافته یا پر شده از خاک است (ریاحی‌پور و خلیلی، ۱۳۹۱). تحلیل سری‌های زمانی، بالا بودن مقدار ضرایب فروکش چشمه پیرغار نسبت به دیمه و بررسی شکل هیدروگراف چشمه و بالا بودن تغییرات نسبت‌های آبدی بیشینه و کمینه و برعکس در چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه، نشان داد که سیستم آبخوان چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه از جریان سریع و کارستی‌شدن بیشتری برخوردار است؛ اما چشمه دیمه، سیستم افشان داشته و احتمالاً تخلخل آن بیشتر از نوع ماتریسی (درز و شکاف کوچک) است (مالی و محمدی، ۱۳۹۲).

به تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه و مدل سازی سیستم کارستی پرداختند. تحقیقات بالا نشان می دهد که شکل هیدروگراف چشمه می تواند تحت تأثیر جهت جریان تبدیلی در طول رویدادهای تغذیه و فروکش باشد و تحلیل منحنی فروکش می تواند اطلاعات مهمی در تعیین رفتار دینامیکی آب زیرزمینی ارائه کرده که در مناطق کارستی فاقد اطلاعات اکتشافی و ردیابی، کمک شایانی به شناخت توده کارستی می کند. همچنین می تواند پشتوانه ای علمی برای اتخاذ راه کارهای مناسب در راستای مدیریت بهینه کمی منابع آب کارست و حوضه های آبرگیر بوده و راهنمای مناسبی برای تعیین میزان تکامل کارست باشد.

مواد و روش ها

ویژگی های طبیعی و زمین شناسی منطقه مورد

مطالعه

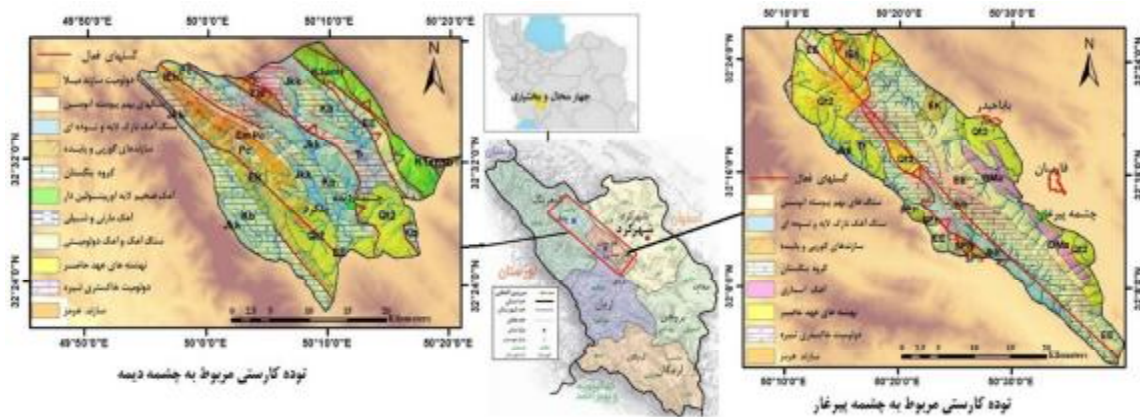
استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۱۶۵۳۲ کیلومتر مربع در بخش مرکزی کوه های زاگرس بین پیش کوه های داخل و استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). این منطقه دارای یک درصد از کل وسعت ایران بوده که با وجود مساحت کم، ده درصد از منابع آب کشور را در اختیار دارد. توده کارستی پیرغار به لحاظ موقعیت جغرافیایی در جنوب و غرب شهرستان فارس و در دامنه شمالی تاق دیس سالدوران با مساحت حوضه آبرگیر ۹۲ کیلومتر مربع، میانگین بارندگی ۵۴۲ میلی متر (در ایستگاه فارس) و در ارتفاع ۲۱۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است و در قسمت زون رسوبی-ساختاری زاگرس مرتفع قرار دارد. در این منطقه، گسلش بر چین خوردگی غلبه دارد و واحدهای رسوبی متعلق به پالئوژئیک و مزوزوئیک با کنتاکت گسله بیرون زدگی دارد. تاق دیس ها و ناودیس های شکل گرفته نیز به تبعیت از روند رشته کوه زاگرس، شمال غرب-جنوب شرق هستند و از نظر زمین ریخت شناسی از سمت غرب به طرف شرق از میزان ارتفاعات کاسته شده و به دره های باز و دشت فارس-جونقان ختم می شود. مرتفع ترین قله در منطقه، کوه سالدوران با ارتفاع ۳۶۲۱ متر است. آهک های سفید، آهک های مارنی و دولومیتی معادل سازند آسماری-جهرم و شهبازان با سن ائوسن-الیگوسن همراه با آهک های کرم رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری، آبخوان اصلی کارستی چشمه پیرغار را تشکیل داده است (شکل

تانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از ۴۹ آزمایش تجربی به مطالعه آبخوان کارستی آزمایشگاهی و مدل سازی هیدروگراف چشمه و تجزیه و تحلیل منحنی فروکش چشمه کارستی پرداختند. نتایج نشان داد که ضخامت اشباع آبخوان تأثیر زیادی بر جریان اولیه منحنی فروکش و مدت زمان فروکش دارد. حسینی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از داده های هواشناسی و دبی روزانه ۲۱ ساله ایستگاه های اقلیمی مرتبط، به مطالعه آبخوان کارستی چشمه ساسان در جنوب غرب ایران پرداختند. در این پژوهش مدل سازی هیدروگراف چشمه کارستی و مدل بیلان آب انجام شد؛ نتایج نشان دهنده نقش مهم سیستم جریان انتقالی^۱ در مدل سازی هیدرولوژیکی سیستم های کارستی در دوره مرطوب است. فاجروهمن و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از سری زمانی داده های دبی بلند مدت روزانه چشمه کاکاپ، جاوا مرکزی، در اندونزی به مدل سازی هیدروگراف چشمه و تعیین درجه کارستی توسعه یافتگی آبخوان کارستی پرداختند؛ در این پژوهش از روش جداسازی جریان پایه با کمک روش فیلتر دیجیتالی استفاده شد و نتایج نشان داد آبخوان تحت سلطه رژیم جریان آشفته قرار دارد. نورکولیش و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از داده های دبی رودخانه زیرزمینی جاوا، در توده کارستی جونگرانگان اندونزی به مدل سازی هیدروگراف چشمه، تجزیه و تحلیل منحنی فروکش و تعیین درجه کارستی شدن توده کارستی پرداختند. نتایج، جریان های دبی مختلط از نوع مجرای، درز و شکاف و افشان را که در منحنی فروکش اصلی محاسباتی قابل مشاهده بود، تأیید کرد. تورسان و همکاران (۲۰۲۰) به تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه های کارستی نانتو، موسانو و ویچنزا در ایتالیا پرداختند. نتایج نشان داد که دو مورد از چشمه های مورد بررسی رفتار یکسانی را در نتیجه رویدادهای تغذیه نشان دادند. چانگ و همکاران (۲۰۲۱) آبخوان کارستی غار دایه، چین را با استفاده از داده های بارش و دبی روزانه چشمه مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش آنالیز منحنی فروکش چشمه و تست های ردیاب انجام شد، نتایج نشان داد که شکل منحنی فروکش تحت شرایط مختلف بارندگی تغییر کرده است. شیرافکن و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از آزمایش های آزمایشگاهی مجموعه ای از هیدروگراف های چشمه را به صورت مصنوعی تولید کرده و

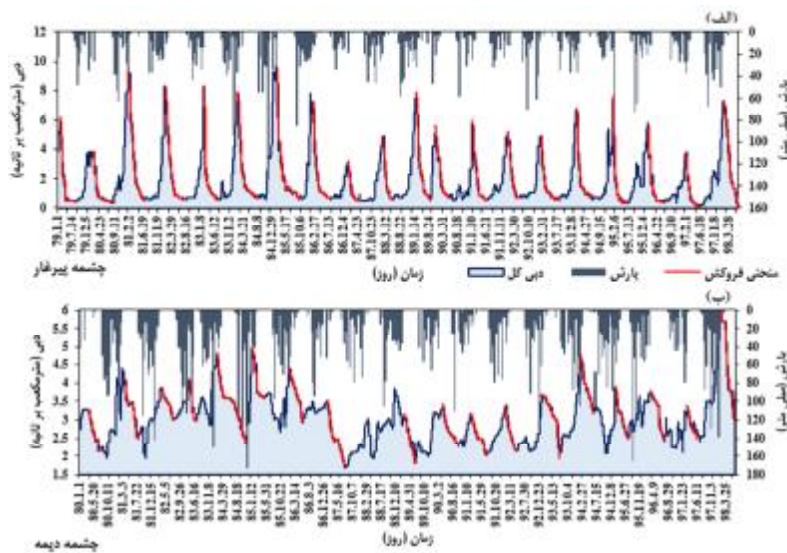
۱). از نظر تکتونیکی روراندگی زاگرس و تحت فشار بودن این ناحیه، سیستم درزه‌ها، توسعه قابل توجهی یافته و محیط مساعدی برای چرخه آب در سنگ‌های کربناته را فراهم آورده است؛ بنابراین این منطقه برای توسعه کارست مساعد بوده و باعث ایجاد پدیده‌های ژئومورفولوژی کارستی متنوعی نظیر غار، سینک‌هول و چشمه شده است. به دلیل مرتفع بودن منطقه، درجه حرارت به‌طور معمول پایین بوده و در برخی از نقاط حتی به چندین درجه زیر صفر می‌رسد، میزان نزولات جوی بیش از ۶۰۰ میلی‌متر در سال بوده و اغلب به‌صورت برف است که عامل مؤثری برای پیشرفت کارست است (کرمی و همکاران، ۱۳۹۷). چشمه دیمه در تاق‌دیس زراب سرچشمه اصلی زاینده‌رود در ۱۲ کیلومتری چلگرد در مجاورت روستای دیمه واقع شده است و ارتفاع قرارگیری این چشمه ۲۱۹۶ متر از سطح دریا است. مساحت حوضه آبرگیر آن ۱۴۰ کیلومتر مربع و میانگین بارندگی ۱۳۲۹ میلی‌متر (در ایستگاه چلگرد) است. آهک‌های سفید، آهک‌های مارنی و آهک‌های دولومیتی معادل سازند آسماری-چهرم و شهبازان با سن ائوسن-الیگوسن همراه با آهک‌های کرم‌رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری به سن الیگوسن و آهک نازک لایه رسی و آهک خاکستری همراه با فسیل اربیتولین و شیل، مارن و ماسه‌سنگ به سن کرتاسه می‌توانند در تأمین آب چشمه دیمه مؤثر باشند (شکل ۱) (مالی و محمدی، ۱۳۹۳). گسل‌ها و تراس‌های متعددی با راستای شمال غربی-جنوب شرقی از بین واحدهای چینه‌ای این منطقه عبور می‌کند. مهم‌ترین آن‌ها شامل تراس اصلی زاگرس با طول بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر بوده که در محدوده مطالعاتی موجب رانده شدن آهک‌های کرتاسه روی واحدهای میوسن و کنگلومرای بختیاری شده است. به موازات این گسل تراس‌های متعددی از جمله گسل زراب، گسل اردل و گسل زردکوه نیز شکل گرفته است. از لحاظ چینه‌شناسی، قدیمی‌ترین رخنمون‌های کوه زراب را هرمز (کمپلکس هرمز) تشکیل داده است که بیشتر در امتداد راندگی‌های بنیادی به سطح زمین رخنمون یافته‌اند و جدیدترین واحد سنگی منطقه کنگلومرای بختیاری است. سازند اصلی

تشکیل‌دهنده تاق‌دیس زراب واحد K معادل سازند سروک است. میانگین ضخامت سازند سروک در محدوده کوه زراب حدود ۵۰۰ متر است (کرمی و رندجانی و همکاران، ۱۳۹۴). در این پژوهش به‌منظور بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌ها، داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری و بارش روزانه ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی مربوط به چشمه‌های کارستی استان چهارمحال و بختیاری و شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه شده است. سپس چشمه‌های کارستی دیمه و پیرغار با توجه به طول دوره آماری مشترک (از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸) برای تحلیل‌های کمی انتخاب شدند. برای چشمه دیمه داده‌های ایستگاه باران‌سجی چلگرد و داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری دیمه انتخاب شدند و از داده‌های ایستگاه باران‌سجی فارسان و ایستگاه هیدرومتری ده چشمه برای چشمه پیرغار استفاده شده است. نمودار سری زمانی این داده‌ها در شکل ۲ ارائه شده است، منحنی‌های قرمز رنگ منحنی‌های فروکشی است که در این پژوهش، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به تحلیل سری زمانی، اوج بارش در هر دو منطقه در ماه‌های دی و بهمن بوده است، اما اوج دبی برای چشمه پیرغار در فروردین، معمولاً ۹/۲ و در چشمه دیمه معمولاً در اردیبهشت و گاهی خرداد، ۵/۵ مترمکعب بر ثانیه است؛ یعنی زمان پاسخ دبی نسبت به بارش در چشمه دیمه حدود ۳ ماه و در چشمه پیرغار حدود ۲ ماه است. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای به‌دست آوردن اطلاعات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شد (شکل ۱).

پس از جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز در مرحله بعد، ابتدا آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، تعیین میزان تغییرپذیری دبی چشمه مربوط به چشمه‌های کارستی مورد مطالعه با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده محاسبه (جدول ۱) و سپس مراحل اصلی تجزیه و تحلیل‌های کمی که در زیر به آن پرداخته می‌شود، انجام شده است:



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی توده‌های کارستی مورد بررسی که روی آن سنگ‌های آهکی کارستی مشخص شده است (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرکرد؛ تهیه‌شده در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)



شکل ۲- نمودار سری زمانی داده‌های دبی و بارش روزانه چشمه‌های مورد مطالعه (از ۱ فروردین ۱۳۷۹ تا ۳۱ شهریور ۱۳۹۸)

محاسبه شاخص تغییرپذیری دبی چشمه

روش‌های ارائه‌شده برای طبقه‌بندی تغییرپذیری آبدهی چشمه‌ها براساس اندازه‌گیری‌های منظم پارامتر آماری دبی انجام شده است. انجمن هیدرومترولوژی اسلواکی، از سال ۱۹۶۰ مسئولیت مشاهدات بیش از ۱۳۰۰ چشمه را برای توصیف پایداری آبدهی آن‌ها برعهده داشت که برای این منظور از شاخص تغییرپذیری I_V استفاده کرده است؛ که ساده‌ترین اندازه‌گیری میزان تغییرپذیری آبدهی چشمه بوده و از نسبت حداکثر و حداقل دبی ثبت‌شده (Q_{max}/Q_{min}) محاسبه می‌شود (معادله (۱)).

$$I_V = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} \quad (1)$$

ضریب تغییرپذیری چشمه (SVC؛ معادله (۲)) براساس نسبت دبی ۱۰ درصد به ۹۰ درصد بوده که در آن SVC

ضریب تغییرپذیری چشمه، Q_{10} مقدار دبی در ۱۰ درصد زمان و Q_{90} مقدار دبی در ۹۰ درصد زمان است.

$$SVC = \frac{Q_{10}}{Q_{90}} \quad (2)$$

پارامتر ضریب تغییرات چشمه (SCVP؛ معادله (۳)) نسبت انحراف استاندارد به میانگین حسابی مقادیر دبی است. فلورا (۲۰۰۴) و اشپرینگر و همکاران (۲۰۰۴) محاسبه SCVP را براساس معادله زیر پیشنهاد دادند:

$$SCVP = \frac{\sigma}{\bar{\theta}} \quad (3)$$

که در آن SCVP ضریب تغییرپذیری چشمه، σ انحراف استاندارد داده‌های دبی چشمه و $\bar{\theta}$ میانگین حسابی مقادیر دبی چشمه است.

تجزیه و تحلیل منحنی فروکش چشمه با استفاده از روش مانجین

نخستین گام در شناخت یک آبخوان کارستی، بررسی رفتار هیدروگراف چشمه‌های تخلیه‌کننده آن آبخوان است (روچی و کلانتری، ۱۳۹۸). تحلیل منحنی فروکش هیدروگراف روش مهمی در بررسی‌های هیدرولوژیکی است که برای تفسیر ویژگی‌های آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود (کرسچ و بوناچی، ۲۰۱۰؛ مانجین ۱۹۷۵) نشان داد که مجموع دبی چشمه کارستی در هر زمان $Q(t)$ ، در طول دوره فروکش برای منحنی‌های دو مؤلفه‌ای (جریان سریع و جریان پایه) می‌تواند به صورت معادله (۴) و منحنی‌های سه مؤلفه‌ای دارای جریان سریع، جریان بینابینی و جریان پایه به صورت معادله (۵) تعریف می‌شود:

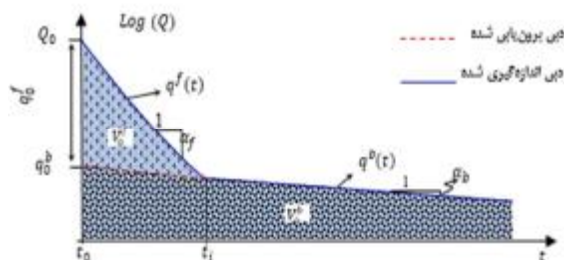
$$Q(t) = q^f(t) + q^b(t) \quad (4)$$

$$Q(t) = q^f(t) + q^i(t) + q^b(t) \quad (5)$$

$$q^b(t) = q_0^b \times e^{-\alpha_b t} \quad (6)$$

$$q^f(t) = q_0^f \times y(t) ; y(t) = \frac{(1 - \eta \cdot t)}{(1 + \varepsilon \cdot t)} \quad (7)$$

که در آن $q^b(m^3/s)$ تابع جریان پایه برون‌یابی شده در ابتدای منحنی فروکش و $q^i(m^3/s)$ تابع جریان بینابینی مطابق با شکل ۳ است. پارامتر α (day^{-1})، نیز ضریب فروکش جریان پایه مطابق با روش مایلت است. $q^f(m^3/s)$ تابع جریان سریع و نشان‌دهنده اثر تغذیه و نفوذ سطحی از ناحیه غیراشباع کارست است که ممکن است از ناحیه اشباع نیز عبور کند. Q_0 ، مقدار متناظر جریان پایه در زمان شروع فروکش، $t = 0$ مطابق با شکل ۳ است. پارامتر η معکوس زمان شروع دبی پایه ($\frac{1}{t_i}$) یا طول عکس مدت زمان جریان سریع معرفی شده است. ضریب ε که از نظر ریاضی درجه تقعر منحنی جریان سریع را نیز نشان می‌دهد، بیانگر ضریب متوسط منطقه غیراشباع در نفوذ آب از سطح خاک به تشکیلات کارستی است و دارای بُعد عکس زمان ($\frac{1}{t}$) است. مقدار $\frac{(1-\eta \cdot t)}{(1+\varepsilon \cdot t)}$ که با تابع $y(t)$ نیز نشان داده می‌شود، دارای مقدار بین صفر و یک است. این تابع، بی‌بُعد بوده و مستقل از جریان چشمه است و می‌تواند برای مقایسه تغییرات جریان سریع چشمه در طول سال‌های مختلف به کار رود.



شکل ۳ - نمودار اجزای منحنی فروکش آب‌دهی چشمه کارستی در روابط مانجین

به‌عنوان حجم جریان سریع در نظر گرفته شد و در نرم‌افزار اکسل با انتگرال‌گیری از توابع جریان‌های سریع، انتقالی و پایه نسبت به زمان، توابع حجم آب ذخیره‌شده در قسمت غیراشباع خاک و همچنین تشکیلات کارستی در هر زمان به صورت معادلات زیر محاسبه شد (مارسو، ۱۹۹۷):

برای محاسبه حجم ذخیره دینامیک جریان پایه (میلیون مترمکعب در سال):

$$V_t^b = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_t^b dt = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_0^b e^{-\alpha t} dt \quad (8)$$

$$= \frac{q_0^b}{\alpha_b} (1 - e^{-\alpha t}) \quad t > 0$$

محاسبه حجم ذخایر آب در قسمت غیراشباع خاک و تشکیلات کارستی

به‌منظور ارزیابی میزان توسعه کانال‌های جریان و شناخت رفتار تخلیه هر آبخوان، تعداد دوره‌های فروکش براساس ضرایب فروکش رده‌بندی و همچنین حجم جریان سریع، انتقالی و پایه به‌وسیله جداسازی هیدروگراف محاسبه شد. جداسازی هیدروگراف پایه برای هر سال آبی با استفاده از روش گرافیکی دبی ثابت انجام شد. مساحت زیر منحنی دبی پایه به‌عنوان حجم جریان پایه، مساحت بین منحنی دبی پایه و منحنی دبی انتقالی به‌عنوان حجم جریان بینابینی و مساحت بین منحنی دبی انتقالی و دبی کل

که در آن Q ، متوسط دبی خروجی از چشمه طی دوره فروکش و t_{rec} مدت زمان دوره فروکش بر حسب روز است. برای محاسبه پارامتر k آبخوان، مقادیر V_{trans} و V_{dyn} برای منحنی فروکش هر سال محاسبه شده و از تقسیم این دو مقدار، پارامتر k برای سال مورد نظر به دست می‌آید (مارسو، ۱۹۹۷ و گراوند و همکاران، ۲۰۲۲):

$$k = \frac{V_{dyn}}{V_{trans}} \quad (15)$$

پارامتر i آبخوان، طبق تعریف مانجین، همان مقدار تابع بدون بُعد (Y_t) در معادله (۷) به ازای $t = 2 \text{ day}$ است. به عبارتی دیگر $i = Y_{t=2}$.

نتایج و بحث

پایش آبدی چشمه‌ها برای تعیین تغییرپذیری کمی آن‌ها در طول مدت زمان مورد استفاده، قابلیت اعتبار آن‌ها را به عنوان منابع آب قابل اعتماد نشان می‌دهد. آبدی چشمه‌ها هنگام تغذیه و تخلیه شدن طبیعی مخزن تغییر می‌کند، فراوانی و شدت این تغییرات به هندسه آبخوان و خصوصیات فیزیکی آن بستگی دارد و معمولاً تغییرات آبدی و تغذیه چشمه‌های کارستی ناگهانی و قابل توجه است (استوانویچ، ۲۰۱۵). براساس استاندارد فنی اسلوآکی STN 751520 (SÚTN, 2009) که پایداری دبی چشمه را با توجه به شاخص تغییرپذیری (I_v) و ضریب تغییرپذیری (SVC) و فلورا (۲۰۰۴) و اشرینگر و همکاران (۲۰۰۴) که طبقه‌بندی چشمه‌ها را با استفاده از ضریب تغییرپذیری SCVP نشان داده‌اند (جدول ۱) و شاخص‌های تغییرپذیری (I_v ، SVC) محاسبه شده برای چشمه‌های مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که آبدی چشمه دیمه از درجه اعتمادپذیری بالاتری برخوردار است و تغییرپذیری کمتری نسبت به چشمه پیرغار دارد (جدول ۲). چشمه پیرغار که آبدی آن تغییرپذیری بیشتری دارد، توانایی بالاتری برای نشان دادن ویژگی‌های انتقال آب به آبخوان و پاسخ سریع سیستم به تغذیه دارد (استوانویچ، ۲۰۱۵). همچنین آمار توصیفی پارامترهای اندازه‌گیری شده مربوط به چشمه‌های کارستی مورد مطالعه برای یک دوره آماری ۲۰ ساله محاسبه و همان‌طور که در جدول ۲، نشان داده شده است حداقل دبی برای چشمه پیرغار و دیمه به ترتیب ۰/۰۴۳ و ۱/۷۲، حداکثر دبی در چشمه پیرغار ۵۹/۹ و در چشمه دیمه ۵/۹۱ مترمکعب بر ثانیه است. همان‌طور که

حجم ذخیره دینامیک جریان بینابینی (برحسب میلیون مترمکعب) برای توابع خطی به صورت معادله (۹) و برای توابع نمایی به صورت معادله (۱۰) است:

$$V_t^i = (\Delta t_f + \Delta t_i) \times q_0^i \times \frac{1}{2} \times 86400 \quad (9)$$

$$V_t^i = \int_{t=0}^{t=\Delta t_f + \Delta t_i} q_t^i \times e^{-\alpha_i t} dt = \frac{q_0^i}{-\alpha_i t} \times (e^{-\alpha_i(\Delta t_f + \Delta t_i)} - 1) \times 86400 \quad (10)$$

همچنین به منظور محاسبه حجم ذخیره دینامیک جریان سریع (میلیون مترمکعب) برای توابع خطی از معادله (۱۱) و برای توابع نمایی از معادله (۱۲) استفاده می‌شود:

$$V_t^f = \Delta t_f \times q_0^f \times \frac{1}{2} \times 86400 \quad (11)$$

$$V_t^f = \int_{t=0}^{t=\Delta t_f} q_t^f \times e^{-\alpha_f t} dt = \frac{q_0^f}{-\alpha_f t} \times (e^{-\alpha_f \times \Delta t_f} - 1) \times 86400 \quad (12)$$

طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی

مانجین در سال ۱۹۷۵ یک روش کمی برای طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی، براساس دو پارامتر k که نشان‌دهنده درجه توسعه‌یافتگی منطقه نشستی کارست است و i که شرایط نفوذ آب از سطح به آبخوان را نمایش می‌دهد، تعریف کرد. حد تابع معادله (۹) در بی‌نهایت، مقدار حجم ذخیره دینامیکی در منطقه نشستی (تشکیلات کارست V_{dyn}) را به دست می‌دهد (مارسو، ۱۹۹۷):

$$V_{dyn} = \lim_{t \rightarrow +\infty} v_t^b = \quad (13)$$

$\frac{q_0^b}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) = \lim_{t \rightarrow +\infty} C \frac{q_0^b}{\alpha}$ که در آن V_{dyn} ، حجم ذخیره در ابتدای جریان پایه بر حسب متر مکعب، ضریب C ، ضریب تبدیل و برابر با ۸۶۴۰۰ است. q_0^b دبی در ابتدای منحنی جریان پایه بر حسب متر مکعب بر ثانیه یا جریان چشمه در زمان $t = t_0$ و α_b ، ضریب فروکش جریان پایه بر حسب $(\text{day})^{-1}$ است. هرچه ذخیره نشستی (V_{dyn}) بیشتر باشد، منطقه نشستی آبخوان کارستی نقش بیشتری در تنظیم دبی خروجی از چشمه خواهد داشت. از طرفی دیگر حجم جریان انتقالی آبخوان کارستی (V_{trans}) را می‌توان با انتگرال‌گیری از دبی جریان خروجی چشمه (معادله (۵)) نسبت به زمان برای مدت یک سال محاسبه کرد. به عبارت دیگر V_{trans} ، حجم خروجی از چشمه در هر سال است که به سادگی از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$V_{trans} = Q \times t_{rec} \times 86400 \quad (14)$$

مشخص شد، مقدار دبی در ۱۰ درصد زمان یا Q_{10} در چشمه پیرغار بیشتر از چشمه دیمه است، اما برعکس مقدار دبی در ۹۰ درصد زمان یا Q_{90} در چشمه دیمه بیشتر از چشمه پیرغار است و انحراف معیار داده‌های دبی برای چشمه پیرغار نیز بیشتر از چشمه دیمه است که همه این عوامل نشان‌دهنده درجه پایداری دبی چشمه دیمه و تغییرپذیری بالاتر چشمه پیرغار است.

برای آشکارسازی بیشتر منحنی تداوم جریان^۱ (FDC) برای این دو چشمه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. این منحنی معیاری از دامنه و تغییرپذیری جریان آبراهه یا دبی چشمه است و درصدی از زمان را نشان می‌دهد که در طی آن مقدار مشخصی از دبی از یک مکان معین فراتر می‌رود (فاستر، ۱۹۲۴ و ۱۹۳۴؛ سرسی، ۱۹۵۹)؛ و اطلاعات مهمی درباره رژیم جریان چشمه‌های کارستی ارائه می‌دهد. مقدار دبی بین Q_{10} تا Q_{70} (یعنی مقدار دبی در ۱۰ تا ۷۰ درصد زمان) می‌تواند در محدوده دبی متوسط باشد؛ اما مقدار دبی از Q_{70} تا Q_{100} دوره‌های کم‌آبی هستند و با خشکسالی‌های دوره‌های کم‌آبی روبه‌رو خواهیم شد؛ به‌همین دلیل سیستم‌های ذخیره آب به‌دلیل کمبود جریان شروع به خشک‌شدن می‌کنند؛ بنابراین هنگام نیاز منابع آبی به آب و تأمین مقدار آب زیرزمینی موجود باید این مقادیر را در نظر گرفت. مقدار دبی قابل بهره‌برداری براساس قوانین و تجارب به‌عنوان دبی‌های با احتمال وقوع ۷۰-۹۰ درصد یعنی Q_{70} تا Q_{90} ، معمولاً Q_{80} ، برای تأمین تضمینی آب در دوره مربوط در نظر گرفته می‌شود (استوانویچ، ۲۰۱۵).

برای طبقه‌بندی آبخوان کارستی چشمه‌های پیرغار و دیمه به روش مانجین و با کمک معادلات (۱۳) تا (۱۵) مقادیر ضریب فروکش جریان (α) حجم ذخیره دینامیکی V_{dyn} و حجم ذخیره آب در بخش نشستی آبخوان V_{trans} ، پارامتر η ، ضریب تقعر منحنی جریان سریع (۸) و دبی اولیه جریان پایه (q_0^b)، دبی اولیه جریان انتقالی (q_0^l)، دبی اولیه جریان سریع (q_0^f)، برای دوره‌های فروکش سال‌های مختلف برای چشمه‌های مورد مطالعه محاسبه و نتایج آن در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. منحنی فروکش چشمه‌ها از سه ضریب α_f و α_b تشکیل شده‌اند که در آن‌ها α_f نشان‌دهنده تخلیه سریع از مجاری کانالی و حفره‌ای است و مقدار عددی آن بزرگ‌تر از α_b بوده و نشان‌دهنده

تخلیه آب از مجاری، شکستگی‌ها و درزه‌های ریز است (جریان انتقالی) و α_b که کمترین مقدار را دارد نشان‌دهنده جریان افشان (جریان پایه) است (شکل ۵). میانگین مقادیر ضریب α محاسبه‌شده چشمه پیرغار برای جریان پایه، انتقالی و سریع به ترتیب برابر با ۰/۰۰۷، ۰/۰۳۸ و ۰/۱۲۵ است. همچنین میانگین مقادیر ضریب α برای چشمه دیمه نیز برابر با ۰/۰۰۴ برای جریان پایه، ۰/۰۱۶ برای جریان انتقالی و ۰/۰۴۲ برای جریان سریع است. با توجه به اینکه هر چه ضریب α چشمه‌ها بیشتر باشد، شیب منحنی فروکش جریان بیشتر و در نتیجه سرعت تأثیرپذیری دبی جریان از بارش و میزان تخلخل و کارست‌شدگی حوضه بیشتر است و هر چه ضریب فروکش پایین‌تر باشد، کارست‌شدگی حوضه کمتر است (کرسچ و استوانویچ، ۲۰۱۰). بنابراین کارستی چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه دارای توسعه‌یافتگی بیشتری است. همچنین درجه کارستی‌شدگی در مناطق تغذیه چشمه‌ها براساس پارامترهای منحنی فروکش به روش ملیک و وُجْکُوا (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که درجه توسعه‌یافتگی چشمه پیرغار و چشمه دیمه به ترتیب برابر با ۷ و ۵/۵ است. چشمه دیمه دارای یک مؤلفه جریان خطی و دو مؤلفه جریان نمایی بوده و تحت تأثیر مجاری کوچک به‌هم متصل تخلیه می‌شود. چشمه پیرغار دارای رژیم جریان ترکیبی از یک مؤلفه جریان نمایی و دو مؤلفه جریان خطی است که توسعه کارستی‌شدگی آبخوان به‌واسطه گسل‌های بزرگ تکتونیکی آزاد بوده و توسط کانال‌های کارستی تخلیه می‌شود (جدول ۵).

حدود تغییرات حجم آب ذخیره‌شده دینامیکی و انتقالی برای دوره‌های مختلف فروکش جریان طبق luhnghj (۱۳) تا (۱۵) به‌ترتیب برای چشمه پیرغار در محدوده $12.75 < v_{day} < 53.13$ میلیون مترمکعب و $12.5 < v_{trans} < 58.8$ میلیون مترمکعب و برای چشمه دیمه در محدوده $29.52 < v_{day} < 287.26$ میلیون مترمکعب و $19.32 < v_{trans} < 52.7$ میلیون مترمکعب به‌دست آمد. به‌طور متوسط حدود ۷۳ درصد از حجم آب ذخیره در کل سیستم آبخوان کارستی چشمه پیرغار به‌صورت انتقالی از مظهر چشمه خارج می‌شود که این رقم برای چشمه دیمه کمتر از ۴۵ درصد است و مابقی در تشکیلات کارستی باقی می‌ماند. بیشترین حجم انتقالی آب در آبخوان چشمه پیرغار مربوط به دوره فروکش ۱۳۹۸/۲/۵ تا ۱۳۹۸/۶/۱۰

از توسعه یافتگی کمتر کارست منطقه باشد، یا به عبارت دیگر توسعه کمتر کارست منجر به جابه‌جایی آهسته آب در آبخوان کارستی و بالا رفتن حجم ذخیره دینامیکی می‌شود و برعکس (حاتمی‌فرد، ۱۳۹۷). از همین‌رو چون ذخیره دینامیکی چشمه دیمه نسبت به چشمه پیرغار بیشتر و شبکه کارستی آن به‌خوبی توسعه نیافته است، کمتر تحت تأثیر بارش قرار می‌گیرد و آب زیرزمینی نیاز به زمان بیشتری برای جابه‌جایی در آبخوان دارد.

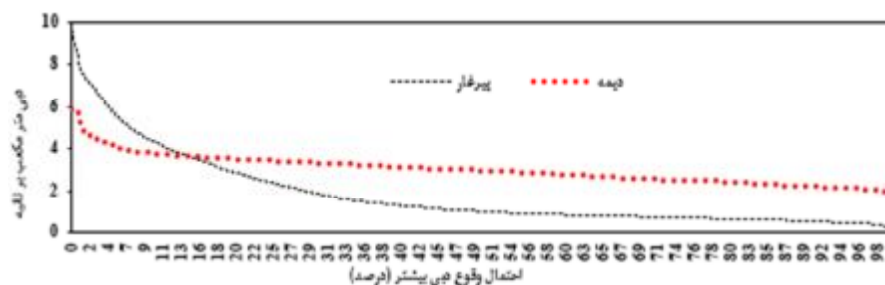
و برابر با ۵۸/۸ میلیون متر مکعب است که نسبت به دوره فروکش سال‌های مورد بررسی بعد از سال ۱۳۹۵ کمترین طول دوره فروکش (۱۳۰ روز) را داراست. همچنین بیشترین حجم انتقالی آب در آبخوان چشمه دیمه مربوط به دوره فروکش ۱۳۸۴/۲/۳ تا ۱۳۸۴/۱۱/۱۶ و برابر با ۵۲/۷ میلیون متر مکعب است که نسبت به دوره فروکش سال‌های مورد بررسی بیشترین طول دوره فروکش (۲۸۹ روز) را داراست (جدول ۶). بالابودن حجم ذخیره دینامیکی یک چشمه، در کنار دیگر عوامل می‌تواند حاکی

جدول ۱- طبقه‌بندی درجه پایداری دبی چشمه براساس شاخص‌های تغییرپذیری دبی چشمه

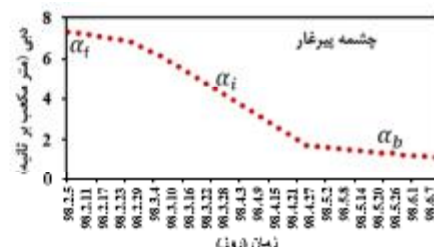
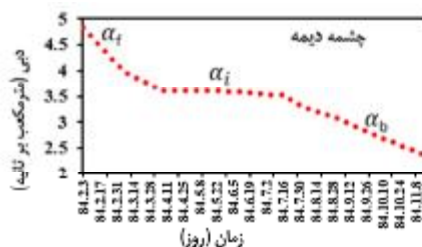
طبقه‌بندی چشمه‌ها با استفاده از ضریب SCVP (فلورا، ۲۰۰۴؛ اشپرینگر و همکاران، ۲۰۰۴)		طبقه‌بندی درجه پایداری دبی چشمه براساس مقدار SVC یا I_v (سوشن، ۲۰۰۹)	
طبقه‌بندی چشمه‌ها	ضریب تغییرپذیری (SCVP)	طبقه‌بندی چشمه‌ها	مقدار SVC یا I_v
کم	۰ - ۴۹	بسیار پایدار	۱ - ۳
متوسط	۵۰ - ۹۹	پایدار	۳/۱ - ۱۰
زیاد	۱۰۰ - ۱۹۹	ناپایدار	۱۰/۱ - ۲۰
بسیار زیاد	> ۲۰۰	بسیار ناپایدار	۲۰/۱ - ۱۰۰
-	-	به‌شدت ناپایدار	> ۱۰۰

جدول ۲- آمار توصیفی پارامترهای اندازه‌گیری شده در چشمه‌های کارستی مورد مطالعه (واحد تمام پارامترها مترمکعب بر ثانیه است).

پارامتر	Q_{min}	Q_{min}	Q_{10}	Q_{90}	$Q_{Average}$	Q_{STDEV}	I_v	SVC	SCVP
پیرغار	۰/۰۴	۰/۰۴	۴/۲۵	۰/۵۵	۱/۸۱	۱/۷۳	۲۲۳	۷/۶۷	۰/۹۵
دیمه	۱/۷۲	۱/۷۲	۳/۷۵	۲/۲۳	۳/۰۱	۰/۶۶	۳/۴۳	۱/۶۸	۰/۲۲



شکل ۴- منحنی تداوم جریان (FDC) برای چشمه‌های کارستی پیرغار و دیمه



شکل ۵- نمایش نمونه‌ای از جریان سه مؤلفه‌ای منحنی فروکش چشمه‌ها

جدول ۳- نتایج تحلیل دوره‌های مختلف فروکش چشمه پیرغار

سال	جریان پایه		جریان انتقالی		جریان سریع		پارامترهای روش مانجین ۱۹۷۵	
	q_b^b (m^3/s)	α_b (day^{-1})	q_i^i (m^3/s)	α_i (day^{-1})	q_f^f (m^3/s)	α_f (day^{-1})	η (day^{-1})	ε (day^{-1})
۱۳۷۹	۰/۶۹	۰/۰۳	۳/۸	۰/۰۵	۱/۶	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۱
۱۳۸۰	۰/۹۵	۰/۰۴	۱/۹۸	۰/۰۳	۰/۹۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱
۱۳۸۱	۵/۳۸	۰/۰۱۵	۳/۴۸	۰/۰۴	۰/۲	۰/۴۱	۰/۲	۰/۰۰
۱۳۸۲	۵/۵۳	۰/۰۰۵	۳/۶۵	۰/۰۳	۳/۱	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۱
۱۳۸۴	۲/۲۶	۰/۰۰۶	۲/۳۳	۰/۰۳	۳/۲۷	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۰
۱۳۸۵	۲/۴	۰/۰۰۵	۳/۸۶	۰/۰۶	۳/۴۹	۰/۳	۰/۰۸	۰/۱۲
۱۳۸۶	۲/۰۳	۰/۰۰۷	۲/۳۱	۰/۰۳	۲/۸۹	۰/۱	۰/۰۴	۰/۰۰
۱۳۸۷	۱/۲۹	۰/۰۰۷	۱/۰۶	۰/۰۱	۲/۵۴	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۴
۱۳۸۹	۲/۲۵	۰/۰۰۷	۱/۴۵	۰/۰۲	۵/۹۶	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۰
۱۳۹۰	۱/۹۲	۰/۰۰۷	۳/۱۸	۰/۰۴	۰/۴۴	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۰
۱۳۹۱	۱/۳۸	۰/۰۰۵	۳/۷۶	۰/۰۵	۰/۷۶	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۰۷
۱۳۹۲	۲/۴۳	۰/۰۱۲	۱/۴	۰/۰۱	۱/۳	۰/۰۲	۲/۰۲	۰/۰۰
۱۳۹۳	۲/۹۱	۰/۰۱۳	۰/۵۹	۰/۰۱	۱/۳۵	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۰
۱۳۹۴	۱/۹۶	۰/۰۰۶	۲/۷۶	۰/۰۶	۲/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۰
۱۳۹۵	۲/۰۱	۰/۰۰۷	۱/۰۰	۰/۰۵	۱/۲۹	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۰
۱۳۹۶	۰/۶۳	۰/۰۰۳	۱/۱۶	۰/۰۲	۱/۱۹	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۰۰
۱۳۹۷	۰/۸۸	۰/۰۱۱	۲/۱۹	۰/۰۴	۰/۷۳	۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۰۰
۱۳۹۸	۳/۹۲	۰/۰۱	۳/۶۷	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۲

جدول ۴- نتایج تحلیل دوره‌های مختلف فروکش چشمه دیمه

سال	جریان پایه		جریان انتقالی		جریان سریع		پارامترهای روش مانجین ۱۹۷۵	
	q_b^b (m^3/s)	α_b (day^{-1})	q_i^i (m^3/s)	α_i (day^{-1})	q_f^f (m^3/s)	α_f (day^{-1})	η (day^{-1})	ε (day^{-1})
۱۳۸۰	۲/۴۸	۰/۰۰۳	۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۱
۱۳۸۱	۳/۳۴	۰/۰۰۷	۰/۲۷	۰/۰۱	۰/۷۸	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰
۱۳۸۲	۳/۳	۰/۰۰۵	۰/۴۴	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۰
۱۳۸۳	۳/۳۱	۰/۰۰۱	۰/۶۲	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۰
۱۳۸۴	۳/۳۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۳۹	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۰
۱۳۸۵	۳/۸۳	۰/۰۰۴	۱/۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
۱۳۸۶	۳/۳۴	۰/۰۰۷	۰/۹	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۰
۱۳۸۷	۲/۴۹	۰/۰۰۶	۰/۴۹	۰/۰۰۸	۰/۵۷	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰
۱۳۸۹	۰/۲۹	۰/۰۰۵	۰/۵۹	۰/۰۱	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰
۱۳۹۰	۳	۰/۰۰۲	۰/۰۹	۰/۰۰۳	۰/۳۳	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۰
۱۳۹۱	۲/۴۳	۰/۰۰۶	۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۵۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰
۱۳۹۲	۲/۱	۰/۰۰۷	۰/۶۹	۰/۰۰۹	۰/۶	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۰
۱۳۹۳	۳/۱۷	۰/۰۰۴	۰/۴۴	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۰۰
۱۳۹۴	۴/۶۶	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰
۱۳۹۵	۳/۰۷	۰/۰۰۳	۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۵۳	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۰
۱۳۹۶	۲/۵	۰/۰۰۳	۰/۸۷	۰/۰۱	۰/۳۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰
۱۳۹۷	۳/۲۴	۰/۰۰۳	۰/۰۹	۰/۰۰۵	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۲
۱۳۹۸	۳/۸۴	۰/۰۰۴	۱/۸	۰/۰۴	۰/۲۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۰

جدول ۵- درجه کارستی‌شدگی چشمه‌های پیرغار و دیمه در مناطق تغذیه براساس پارامترهای منحنی فروکش (ملیک و وجکوا، ۲۰۱۲)

چشمه	درجه کارستی‌شدگی	نوع مؤلفه جریان آب زیرزمینی	مشخصه معادله منحنی فروکش (میانگین گیری شده از ۱۸ منحنی)	ویژگی‌های پارامترهای منحنی فروکش (میانگین گیری شده از ۱۸ منحنی)	ویژگی‌های درجه کارستی‌شدگی
دیمه	۵/۵	رژیم جریان پیچیده، ترکیبی از یک مؤلفه جریان مدل خطی و دو مؤلفه جریان نمایی.	$y = 3.09e^{-0.004t}$ $y = -0.016t + 0.59$ $y = 0.292e^{-0.042t}$	$\alpha_b = 0.004$ $\alpha_i = 0.016$ $\alpha_f = 0.042$	شکستگی وسیع با درز و شکاف‌های غالباً آزاد و نیمه‌آزاد کارستی‌شده و کارستی‌نشده
پیرغار	۷	رژیم جریان ترکیبی از یک مؤلفه جریان نمایی و دو تا سه مؤلفه جریان خطی است.	$y = 2.07e^{-0.007t}$ $y = -0.038t + 2.42$ $y = -0.125t + 1.85$	$\alpha_b = 0.007$ $\alpha_i = 0.038$ $\alpha_f = 0.125$	توسعه کارستی‌شدگی آبخوان به واسطه گسل‌های بزرگ تکتونیکی توأم با مجاری بزرگ کارستی

جدول ۶- نتایج تحلیل حجم آب ذخیره‌شده دینامیکی و انتقالی برای دوره‌های مختلف فروکش چشمه‌های پیرغار و دیمه

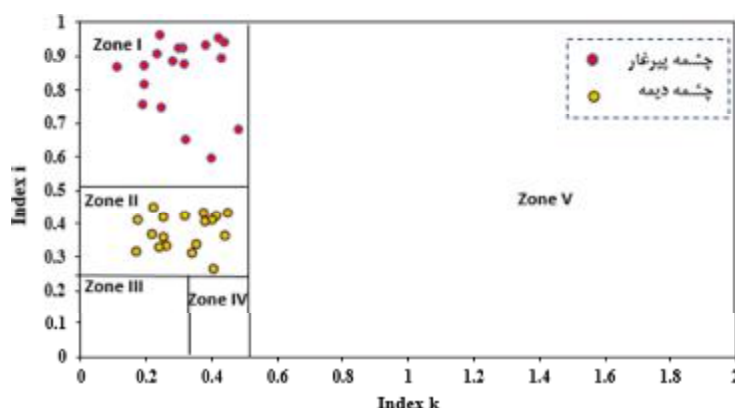
چشمه دیمه				چشمه پیرغار			
V_{trans} (MCM)	V_{dyn} (MCM)	Δt (day)	سال	V_{trans} (MCM)	V_{dyn} (MCM)	Δt (day)	سال
۲۳/۱۶	۶۴/۹۴	۱۰۱	۱۳۸۰	۲۲/۸۶	۳۱/۰۲	۱۵۸	۱۳۷۹
۴۵/۰۷	۴۳/۸۵	۱۵۱	۱۳۸۱	۱۵/۱۹	۲۵/۸۲	۱۸۸	۱۳۸۰
۳۵/۲۱	۵۸/۹۰	۱۱۷	۱۳۸۲	۴۶/۹۷	۴۴/۲۱	۱۵۶	۱۳۸۱
۱۹/۳۱	۲۸۷/۲۶	۶۶	۱۳۸۳	۳۲/۸۱	۴۸/۷۴	۲۰۸	۱۳۸۲
۵۲/۷	۱۴۷/۵۶	۲۸۸	۱۳۸۴	۳۴/۵۳	۴۶/۷۸	۱۹۴	۱۳۸۴
۴۱/۲۱	۸۵/۳۶	۱۱۹	۱۳۸۵	۳۲/۷۳	۵۳/۱۴	۲۰۰	۱۳۸۵
۴۵/۴۷	۴۳/۴۶	۱۴۰	۱۳۸۶	۲۸/۰۱	۳۴/۳۵	۱۸۰	۱۳۸۶
۳۷/۶۷	۳۸/۲۹	۱۷۶	۱۳۸۷	۲۲/۳۹	۲۱/۶	۱۱۶	۱۳۸۷
۲۳/۴۸	۴۱/۵۳	۱۰۹	۱۳۸۹	۳۴/۳۶	۴۲/۱۵	۱۵۷	۱۳۸۹
۳۶/۵۵	۱۳۰/۲۷	۱۵۷	۱۳۹۰	۲۷/۸۹	۳۳/۰۷	۱۹۲	۱۳۹۰
۱۶/۳۴	۳۷/۵	۱۵۳	۱۳۹۱	۲۶/۶۳	۳۵/۳۴	۱۶۴	۱۳۹۱
۳۲/۸۸	۲۹/۵۲	۱۶۶	۱۳۹۲	۲۴/۳۶	۲۶/۷۳	۱۶۹	۱۳۹۲
۴۹/۱۶	۷۰/۳۲	۱۷۵	۱۳۹۳	۱۹/۶	۲۱/۶۷	۱۶۹	۱۳۹۳
۴۵/۵۱	۱۳۴/۲۳	۱۳۵	۱۳۹۴	۲۹/۴۷	۳۴/۸۲	۱۳۴	۱۳۹۴
۳۳/۰۳	۷۲/۸۹	۱۲۶	۱۳۹۵	۱۸/۶۷	۲۷/۱۳	۸۵	۱۳۹۵
۳۸/۹۹	۷۶/۶۳	۱۴۱	۱۳۹۶	۱۳/۹۲	۲۱/۱۹	۱۰۱	۱۳۹۶
۲۶/۴۹	۹۳/۵۸	۱۰۸	۱۳۹۷	۱۲/۷۵	۱۹/۴۹	۱۶۱	۱۳۹۷
۴۴/۷۶	۸۹/۵۹	۱۳۵	۱۳۹۸	۵۸/۷۶	۶۷/۳۵	۱۳۰	۱۳۹۸

Δt : طول تداوم جریان بر حسب روز، V_{dyn} : حجم آب ذخیره‌شده دینامیک و V_{trans} : حجم آب انتقالی بر حسب میلیون مترمکعب

توسعه‌یافتگی بالا و مخازن مختلفی است. در زون دو: $k < 0.5$ و $0.25 < i < 0.5$: وجود سیستم مجرای در بخش بالایی (منطقه نفوذ) آبخوان کارستی حاکمیت داشته و نسبت به بخش‌های نزدیک به خروجی چشمه، توسعه‌یافته‌تر است. در زون سه: $k < 0.1$ و $0 < i < 0.25$: آبخوان دارای سیستم توسعه‌یافته کارست، هم در بخش بالایی (نفوذی) و هم در بخش نشتی (نزدیک به

براساس مانجین (۱۹۷۵) حدود تغییرات پارامتر k و i بین صفر و یک است. هرچه پارامتر i به صفر نزدیک شود، نفوذ آب از سطح زمین سریع‌تر و هرچه به عدد یک نزدیک شود، سرعت تغذیه آب به درون آبخوان آهسته‌تر است. براساس مقادیر مختلف پارامترهای k و i ، مانجین پنج ناحیه متمایز را تعریف کرده است: در زون یک: $k < 0.5$ و $i > 0.5$: سیستم آبخوان کارستی پیچیده بوده و دارای

منطقه اشباع آبخوان فعالیت داشته باشد. به این نوع آبخوان‌ها، سیستم‌های غیرفعال از نظر کارستی‌شدن نیز می‌گویند و دارای یک ساختار زهکشی پیچیده با زمان تأخیر بسیار طولانی هستند. میانگین پارامترهای k و i در دوره‌های مختلف فروکش برای چشمه پیرغار به ترتیب برابر با 0.194 و 0.845 و برای چشمه دیمه برابر با 0.327 و 0.500 است که طبق طبقه‌بندی مانجین و براساس شاخص‌های k و i ، محاسبه شده، چشمه پیرغار در زون یک و چشمه دیمه در زون دو قرار دارند (شکل ۶).



شکل ۶- طبقه‌بندی سیستم‌های کارست مورد مطالعه که براساس تحلیل منحنی‌های فروکش جریان چشمه‌ها و محاسبه شاخص‌های k و i مانجین (۱۹۷۵) به دست آمده است.

داشته و احتمالاً تخلخل آن بیشتر از نوع ماتریکسی است. نتایج این پژوهش در مقایسه با مطالعات مذکور در یک راستا بوده و توسعه‌یافتگی بیشتر توده کارستی پیرغار را نسبت به دیمه نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

شکل و روند فروکش، اطلاعات مهمی را درباره ذخیره و ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیکی توده آبخوان تأمین‌کننده چشمه، فراهم می‌آورد. در این پژوهش به منظور بررسی توسعه‌یافتگی توده‌های کارستی چشمه‌های پیرغار و دیمه، طبقه‌بندی آبخوان کارستی و شبیه‌سازی منحنی فروکش آبدی چشمه کارستی از روش مانجین استفاده شد. با توجه به تحلیل سری‌های زمانی بارش و دبی، زمان پاسخ دبی نسبت به بارش در چشمه دیمه حدود ۳ ماه و در چشمه پیرغار حدود ۲ ماه است که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده توسعه بهتر کارست این منطقه نسبت به چشمه دیمه باشد. مقادیر

خروجی) است؛ به عبارت دیگر در تمام بخش آبخوان کارست، سیستم مجرای وجود دارد. در زون چهار: $0.1 < k < 0.5$ و $0 < i < 0.25$: سیستم آبخوان دارای منطقه نفوذی با درجه کارستی بالا و یک شبکه مجرای گسترده است که به ناحیه نشی منتهی می‌شود. در زون پنج: $k > 0.5$ سیستم آبخوان کارستی منطقه نشی دارای عمق زیاد و درز و شکاف فراوان به صورت جزء یا تماماً در زیر رسوبات با نفوذپذیری کم محصور شده و توسعه کارست آن عمدتاً مربوط به دوران کارستی‌زایی قبلی است و ممکن است شبکه‌های مجرای پالئو در

با توجه به مطالعات انجام‌شده در مناطق مورد ارزیابی، مانند محمدی و ریاحی‌پور (۱۳۹۰) که توابع خود همبستگی، چگالی طیفی، عملکرد تابع همبستگی متقابل و ماندگاری اثر بارندگی را براساس آنالیز سری‌های زمانی برای چشمه‌های پیرغار، برم، لردگان و دیمه انجام دادند. نتیجه نشان داد که در سیستم‌های کارستی مورد مطالعه، رژیم‌های مختلف جریان وجود داشته و سیستم کارستی پیرغار نسبت به چشمه‌های برم لردگان و دیمه از توسعه کامل‌تر و پیشرفته‌تری برخوردار است. همچنین مطالعه مالی و محمدی (۱۳۹۲) با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی، بالابودن مقدار ضرایب فروکش چشمه پیرغار نسبت به دیمه و بررسی شکل هیدروگراف چشمه، بالابودن تغییرات نسبت‌های آبدی بیشینه و کمینه و برعکس را در چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه نشان داد. این پژوهشگران بیان کردند که سیستم آبخوان چشمه پیرغار نسبت به چشمه دیمه از جریان سریع و کارستی‌شدن بیشتری برخوردار است؛ اما چشمه دیمه، سیستم افشان

منابع

- ضریب α محاسبه شده برای چشمه ها براساس روش ملیک و وُجُکُوا (۲۰۱۲) نشان داد که درجه توسعه یافتگی برای چشمه پیرغار و چشمه دیمه به ترتیب برابر با $5/5$ و $7/5$ است. چشمه دیمه دارای یک مؤلفه جریان خطی و دو مؤلفه جریان نمایی بوده و عمدتاً تحت تأثیر شکاف های متصل به هم تخلیه می شود و کمتر از سیستم مجاری تأثیر می پذیرد. چشمه پیرغار دارای رژیم جریان ترکیبی از یک مؤلفه جریان نمایی و دو مؤلفه جریان خطی است که توسعه کارستی شدگی آبخوان به واسطه گسل های بزرگ تکتونیکی آزاد بوده و توسط کانال های کارستی تخلیه می شود. برآورد حجم ذخیره دینامیک به روش مانجین نیز نشان داد که میانگین حجم کلی ذخیره دینامیک آبخوان چشمه های پیرغار و دیمه در دوره مورد بررسی به ترتیب برابر با $33/75$ و $86/8$ میلیون مترمکعب در سال بوده که ۲۷ درصد از کل حجم ذخیره دینامیک آبخوان چشمه پیرغار مربوط به جریان پایه و ۷۳ درصد آن مربوط به جریان انتقالی بوده؛ اما برای چشمه دیمه کمتر از ۴۵ درصد از کل حجم ذخیره دینامیک آبخوان به صورت انتقالی از مظهر چشمه خارج شده و مابقی، یعنی تقریباً ۵۵ درصد دیگر در تشکیلات کارستی باقی می ماند. بالابودن میزان جریان انتقالی چشمه پیرغار را می توان به تغذیه نقطه ای و سیستم مجرای کارست منطقه نسبت داد. از طرفی زمین شناسی، تکنیک و وجود گسل های فراوان در منطقه، ارتباط آبخوان های آهکی کرتاسه و ائوسن الیگوسن، شرایط را برای گسترش کارست در منطقه چشمه پیرغار و همچنین نقش سازنده های غیرکربناته در انتقال آب در منطقه چشمه دیمه فراهم کرده است. همچنین با توجه به شاخص های k و i محاسبه شده، چشمه پیرغار در زون یک و چشمه دیمه در زون دو این طبقه بندی واقع شده اند که براین اساس چشمه پیرغار دارای سیستم آبخوان کارستی پیچیده و توسعه یافتگی بالا و مخازن مختلف است. نتایج این پژوهش که صرفاً براساس تحلیل هیدروگراف خروجی چشمه های کارستی انجام شده است، می تواند اطلاعات کمی مهمی را از ذخایر دینامیک، درجه توسعه یافتگی، زمان مرگ چشمه و نوع رژیم جریان آبخوان های کارستی در شرایط فقدان/کمبود داده های هیدروژئولوژیکی، اکتشافی و ردیابی، ارائه کند.
- (۱) روحی ح. و کلانتری ن. ۱۳۹۸. استفاده از هیدروگراف چندساله به منظور مقایسه رژیم هیدروژئولوژیکی چشمه های کارستی تاقدیس کوه سفید، استان خوزستان، هیدروژئولوژی، ۴(۱): ۲۵-۱۴.
- (۲) ریاحی پور م. و خلیلی خ. ۱۳۹۱. بررسی و مقایسه هیدروژئولوژی چشمه های کارستی معرف در استان چهارمحال و بختیاری، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، شیراز.
- (۳) فرزین م. ۱۳۹۸. کارست شناسی و اهمیت آن در توسعه پایدار زاگرس، دومین همایش ملی منابع طبیعی و توسعه پایدار در زاگرس، شهرکرد.
- (۴) کریمی وردنجانی ح. چیت سازان م. فاضلی فارسانی ع. صبا ع. و کریمی ح. ۱۳۹۴. تعیین حریم حفاظتی چشمه کارستی دیمه با استفاده از ردیابی رنگی، سی و چهارمین کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین، ایران، تهران.
- (۵) کرمی غ. ح. باقری ر. و رحیمی ف. ۱۳۹۷. هیدروژئولوژی چشمه های کارستی تاقدیس سالدوران، استان چهارمحال و بختیاری، هیدروژئولوژی، ۳(۱): ۶۹-۷۹.
- (۶) مالی س. و محمدی ض. ۱۳۹۲. بررسی توسعه کارست با استفاده از تحلیل هیدروگراف و سری زمانی بارندگی و دبی چشمه ها. هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.
- (۷) مالی س. و محمدی ض. ۱۳۹۳. ارزیابی روش های برآورد جریان پایه در چشمه های کارستی، مطالعه موردی چشمه های پیرغار و دیمه. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۴(۴): ۳۷-۲۲.
- (۸) محمدی ض. و ریاحی پور م. ۱۳۹۰. بررسی رفتار هیدرو دینامیکی سیستم های کارستی با استفاده از آنالیز سری های زمانی، دومین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی منابع آب ایران، زنجان.
- 9) Ahmadipour M. R. 1999. Karst terraines in Iran- Examples from Lorestan. Acta carsologica. 28/2(13): 213-224.
- 10) Chang W. Wan J. Tan J. Wang Z. Jiang C. and Huang K. 2021. Responses of Spring Discharge to Different Rainfall Events for

- 23) Malik P. and Vojtkove S. 2012. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environ Earth Sci.* 65: 2245-2257.
- 24) Mangin A. 1975. Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, 3eme partie. Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. *Ann Spéleol.* 30(1): 21-124.
- 25) Marsaud B. 1997. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux (Structure and functioning of the saturated zone of karsts from experimental results). Documents du BRGM 268, Editions de BRGM, Orleans.
- 26) Memon P.A. Gleeson B.J. 1995. Towards a new planning paradigm? Reflections on New Zealand's resource management act. *Environment and Planning B: planning and design.* 22(1): 109-124.
- 27) Nurkholis A. Adji T. N. Haryono E. Cahyadi A. Waskito W.A. Fathoni H. Kurniawan I. A. and Agniy R. F. 2019. Analysis of Master Recession Curve (MRC) and flood hydrograph components for karstification degree estimation in Kiskendo Cave, Jonggrangan Karst System, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 256(1): 012011. IOP Publishing.
- 28) Olarinoye T. Gleeson T. and Hartmann A. 2021. Karst spring recession curve analysis: efficient, accurate methods for both fast and slow flow components, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/hess-2021-249>.
- 29) Raeisi E. Kowsar N. 1997. Development of Shahpour Cave, Southern Iran- Cave and KarstScience. Nottingham. 24(1): 27-34.
- 30) Searcy J. K. 1959. Flow-duration curves. manual of hydrology, part 2. Low-flow techniques. Geological survey water-supply paper 1542-A, Methods and practices of the geological survey, United States Government Printing Office, Washington., 33 p.
- 31) Shirafkan M. Mohammadi Z. Sivellev V. and Labat D. 2021. The Effects of Exchange Flow on the Karst Spring Hydrograph under the Different Flow Regimes: A Synthetic Modeling Approach. *Water* 13(9): 1189. <https://doi.org/10.3390/w13091189>.
- 32) Springer A. E. Stevens L. E. Anderson D. E. Parnell R. A. Kreamer D. K. and Flora S. P. 2004. A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical and Single-Conduit Karst Aquifers in Western Hunan Province, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18: 5775. <https://doi.org/10.3390/>
- 11) Fatchurohman H. Adji T. N. Haryono E. and Wijayanti P. 2018. Baseflow index assessment and master recession curve analysis for karst water management in Kakap Spring, Gunung Sewu. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science* 148: 012029.
- 12) Flora S. P. 2004. Hydrogeological characterization and discharge variability of springs in the Middle Verde River watershed, Central Arizona. MSc thesis, Northern Arizona University. 237 p.
- 13) Ford D. C. and Williams P. 2007. *Karst Hydrogeology and geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd 1-562.
- 14) Foster H. A. 1924. Theoretical frequency curves and their application to engineering problems. *Am Soc Civil Eng Trans.* 87:142-303.
- 15) Foster H. A. 1934. Duration curves. *Am Soc Civil Eng Trans.* 99: 1213-1267.
- 16) Geravand F. Hosseini S. M. Maghsoudi M. and Yamani, M. 2022. Characterization of Karst Springs from Zagros Mountain in southwestern Iran. *Environmental Earth Sciences.* 81(23): 1-24.
- 17) Goldscheider N. and Drew D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology.* International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis Group. 264 p.
- 18) Goldscheider N. Chen Z. Auler A. S. Bakalowicz M. Broda S. Drew D. Hartmann J. Jiang G. Moosdorf N. Stevanovic Z. and Veni G. 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal.* 28: 1661-1677.
- 19) Guo Y. Jim Yeh T. C. and Hao Y. 2019. Investigation of Karst Spring Flow Cessation Using Grey System Models. *Water* 11(9): 1927.
- 20) Hosseini S. M. Ataie-Ashtiani B. and Simmons C. T. 2017. Spring hydrograph simulation of karstic aquifers: Impacts of variable recharge area, intermediate storage and memory effects. *Journal of Hydrology.* 552: 225-240.
- 21) Kresic N. and Bonacci. 2010. Spring discharge hydrograph. In *Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability.* Elsevier ch. 4: 129-163.
- 22) Kresic N. and Stevanovic Z. (Eds.). 2010. *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability.* Butterworth-heinemann.

- ecological criteria. In: *Aridland springs in North America: ecology and conservation*, pp. 49-75.
- 33) Stevanović Z. (Ed.). 2015. *Karst aquifers-characterization and engineering*. Springer.
- 34) Stevanovic Z. and Stevanovic A. M. 2021. Monitoring as the Key Factor for Sustainable Use and Protection of Groundwater in Karst Environments—an Overview. *Sustainability*. 13(5468): 2–16.
- 35) SÚTN. 2009. Slovak technical standard STN 751520 Hydrológia, Hydrologické údaje podzemných vôd, Kvantifikácia výdatnosti pramenov. (Hydrology, hydrological data on groundwater, quantification of spring's discharge; in Slovak), Slovenský ústav technickej normalizácie (SÚTN) Bratislava. 14 p.
- 36) Tang R. Shu L. Lu C. Zhang C. Fan J. and Appiah-Adjei E. K. 2016. Laboratory analog analysis of spring recession curve in a karst aquifer with fracture and conduit domains. *Journal of Hydrologic Engineering*. 21(2): 06015013.
- 37) Torresan F. Fabbri P. Piccinini L. Libera N. D. Pola M. and Zampieri D. 2020. Defining the hydrogeological behavior of karst springs through an integrated analysis: a case study in the Berici Mountains area (Vicenza, NE Italy). *Hydrogeology Journal*. 28: 1229–1247.
- 38) White W. B. Herman E. Rutigliano M. Herman J. Vesper D. and Engel S. 2016. *Karst groundwater contamination and public health*. Leesburg VA Karst Waters Inst. Spec. Publ. 19: 1-347.

