

بررسی اثر توسعه یافتگی کارست بر رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه

محمد رحمتی^۱، حمیدرضا مرادی^{۲*}، حاجی کریمی^۳، خلیل جلیلی^۴

۱. کارشناس ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

۲. دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

۳. دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۴. دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۰۴/۰۲)

چکیده

آبخوان‌های کارستی از منابع مهم آب زیرزمینی در استان کرمانشاه به‌شمار می‌روند. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر توسعه یافتگی آبخوان‌های کارستی بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی چشمه‌های کارستی صورت گرفته است. مناطق بررسی شده در این تحقیق، دو آبخوان کارستی بیستون-پراو و کوه پاتاق در استان کرمانشاه است. در منطقه بیستون-پراو از آمار چشمه‌های بیستون، برکه و گزنه‌له، و در منطقه پاتاق از آمار چشمه قره‌بلاغ استفاده شد. برای اجرای این پژوهش از آمار ماهانه بارش و آبدهی چشمه‌ها در طی یک دوره بیست‌ساله استفاده شد. برای تعیین توسعه یافتگی یا عدم توسعه یافتگی آبخوان‌ها، ضریب فرود، حجم ذخیره دینامیک و مساحت حوضه آبریز برای هر یک از چشمه‌ها محاسبه شد. نتایج محاسبه حجم ذخیره دینامیک نشان داد که حجم ذخیره چشمه قره‌بلاغ در منطقه پاتاق $۲۹/۳$ میلیون متر مکعب است که از حجم ذخیره چشمه‌های بیستون، برکه و گزنه‌له (به ترتیب $۰/۵۵$ ، $۲/۲$ و $۱/۳$ میلیون متر مکعب) در منطقه بیستون-پراو بیشتر است که نشان‌دهنده توسعه یافتگی بیشتر منطقه بیستون-پراو نسبت به منطقه پاتاق است. براساس نتایج این تحقیق، واکنش هیدرولوژیکی آبخوان منطقه بیستون-پراو به‌عنوان یک کارست توسعه یافته، سریع‌تر و شدیدتر از آبخوان منطقه پاتاق است.

واژه‌های کلیدی: تأخیر زمانی، توده بیستون-پراو، حجم ذخیره دینامیک، ضریب فرود، کارست.

مقدمه

آبخوان‌های کارستی، مخازن زیرزمینی ناهمگنی‌اند که آب در شبکه‌های مرتبط به هم شکاف‌ها، مغاره‌ها و مجاری درون آنها جمع می‌شود. سطح ایستابی در آنها، پیوسته نیست و دارای شیب منطقه‌ای و محلی است. مناطق کارستی، آب آشامیدنی ۲۵ درصد از جمعیت جهان را تأمین می‌کنند [۵،۱۴]. در مدیترانه و قسمت‌های جنوب شرقی آسیا، آبخوان‌های کارستی اصلی‌ترین منابع تأمین آب شرب به‌شمار می‌روند [۵،۱۰]. بسیاری از شهرها و روستاهای کشور نظیر شیراز، کرمانشاه و مناطق وسیعی از استان‌های ایلام، خوزستان، بوشهر، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان و کردستان از منابع آب کارست استفاده می‌کنند.

در مقوله مدیریت منابع آب، توجه به نواحی کارستی که حدود ۱۱ درصد از مساحت کشور و ۵۵/۲ درصد از مساحت زاگرس را در بر می‌گیرند از اهمیت زیادی برخوردار است. مقدار آب خروجی از چشمه‌های کارستی به عوامل متعددی از جمله مقدار بارندگی، وسعت حوضه آبیگر چشمه و درجه کارست‌شدگی سازند آهکی هر منطقه بستگی دارد. از این رو در بررسی و پیش‌بینی آبدهی چشمه‌های کارستی باید این عوامل را مدنظر داشت [۲]. از سوی دیگر آبخوان‌های کارستی به‌دلیل شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی توسعه‌یافتگی یکسانی ندارند. به‌عبارت دیگر شرایط کارستی شدن در آنها یکسان نیست. برخی از این آبخوان‌ها کاملاً توسعه‌یافته و دارای غارها، چشمه‌سارها و دیگر پدیده‌ها به‌صورت کامل هستند. درحالی که برخی دیگر از توسعه‌یافتگی کمتری برخوردارند و پدیده‌های کارستی به‌صورت ناقص در آنها شکل گرفته است که بر مقدار آبدهی و حجم ذخیره آبخوان تأثیرگذار است. تنوع و شرایط خاص آب‌وهوایی استان کرمانشاه و کمبود و توزیع نامناسب مکانی و زمانی بارش موجب شده منابع آب زیرزمینی اهمیت زیادی داشته باشند.

به عقیده بوناچی [۷] با آنالیز آبنمود چشمه‌های کارستی و براساس ویژگی‌های مهم یک توده سنگی و شکاف‌دار آهکی شناسایی مشخصات آبخوان امکان‌پذیر می‌شود؛ در نتیجه می‌توان ارتباط داده‌ها را در آنالیز آبنمود منحنی فرود مشاهده کرد. او به آنالیز و توصیف دلایل متعدد نقاط شکستگی با مقادیر مختلف ضریب

خشکیدگی (α) در معادله مایلت در شاخه خشکیدگی آبنمود پرداخت. همچنین با شناسایی ارتباط بین α و ضرایب خطی مخزن با به‌کارگیری روش‌های آبنمود آبه‌های زیرزمینی نشان داد که ضرایب خطی مخزن^۱ که با زمان تغییر می‌کند با تغییر شرایط جریان در توده آهکی مطابق است. چن و همکاران [۹] به بررسی تأثیر تأثیرات بالقوه تغییرات آب‌وهوایی در سطح آبه‌های زیرزمینی براساس تجزیه و تحلیل رابطه بین داده‌های تاریخی اقلیمی و سطح آب در چاه‌های واقع در آبخوان کارستی پرداختند. آنها با مشاهده ارتباط معنادار دما و بارش با سطح آب زیرزمینی سالانه در آبخوان، نتیجه گرفتند مناطقی که ضخامت آبخوان کم است، درجه حرارت، تأثیر بیشتری نسبت به بارش بر سطح ایستابی آبه‌های زیرزمینی دارد. نتایج تحقیق فیوریلو [۱۱] در جنوب ایتالیا نشان داد که هرگاه آبنمود چشمه‌های کارستی به‌شکل ممتد و بدون نقطه اوج نشان داده شود بیانگر تغذیه ناکافی چشمه در اثر وقوع خشکسالی هواشناسی است. فیوریلو [۱۳] در پژوهشی به بررسی همبستگی بین سری داده‌های آبدهی چشمه‌های کارستی و بارش در جنوب ایتالیا پرداخت. او در تحقیق خود از شاخص SPI استفاده کرد که بیشتر بر دوره‌های خشکسالی متمرکز بود. نتایج همچنین نشان داد که شاخص SPI دوازده‌ماهه و آبدهی چشمه‌ها دارای روندی همسان است. بریان و همکاران [۸] با بررسی نوسانات دبی روزانه چشمه‌ها در شرایط حاکمیت خشکسالی هواشناسی به این نتیجه رسیدند که نوسانات دبی روزانه چشمه‌ها ناشی از کاهش حجم و فشار مخزن به‌دلیل کاهش تغذیه است که این امر می‌تواند دبی چشمه‌ها را تا ۳۰ درصد تحت تأثیر قرار دهد. فیوریلو و همکاران [۱۲] با تحلیل داده‌های روزانه دبی پنج چشمه کارستی در جنوب ایتالیا با استفاده از آمار ده سال متوالی به بررسی رفتار آبخوان در دوره‌های خشکسالی پرداختند. نتایج نشان داد که رفتار هیدرولیکی آبخوان‌های کارستی هنگام تخلیه، اطلاعاتی را برای مدیریت بهتر چشمه‌های کارستی ارائه می‌دهد. ناصری و همکاران [۶] در تحقیقی به بررسی پاسخ آبخوان‌های کارستی جنوب غرب ایذه در سازند ایلام-سروک و سازند آسماری نسبت به کاهش

در پرآو ۳۳۸۵ متر و حداقل آن در دشت‌های اطراف این توده کوهستانی با ارتفاع متوسط ۱۴۰۰ متر است. توده کوهستانی بیستون-پرآو به تبعیت از جهت کلی زاگرس از شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده است. متوسط طول و عرض آن به ترتیب ۶۰ و ۱۵ کیلومتر است. کوهستان بیستون-پرآو متعلق به دوران دوم زمین‌شناسی است و در انتهای کرتاسه بر روی زاگرس چین‌خورده رانده شده است [۴]. منطقه دوم مورد مطالعه کوه پاتاق است که سازندی آهکی است. کوه پاتاق در ۱۵۰ کیلومتری غرب کرمانشاه واقع شده و بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی قرار گرفته و مساحت تقریبی آن ۸۰۰ کیلومتر مربع است. بیشینه ارتفاع آن در کوه پاتاق با ۲۴۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا و کمینه آن ۸۵۰ متر در بخش غربی حوضه و ارتفاع متوسط آن ۱۰۳۵ است. سازند آسماری که تشکیل‌دهنده اصلی کوه پاتاق است، مربوط به دوران سوم زمین‌شناسی است و از نظر سن و اشکال کارستی و توسعه‌یافتگی نسبت به توده بیستون-پرآو جوان‌تر بوده و در مراحل ابتدایی توسعه‌یافتگی است [۴]. در توده بیستون-پرآو سه چشمه بیستون، برکه و گزنه‌له و در کوه پاتاق چشمه قره‌بلاغ مطالعه شدند. شکل ۱ موقعیت مناطق تحقیق در کشور و استان کرمانشاه را نشان می‌دهد.

مواد و اطلاعات لازم

داده‌ها و اطلاعات لازم برای اجرای این تحقیق شامل نقشه‌های توپوگرافی، نقشه زمین‌شناسی و اطلاعات توصیفی آن، داده‌های بارندگی ایستگاه‌ها و داده‌های آبدی چشمه‌ها در مناطق تحقیق است. این داده‌ها به ترتیب از سازمان‌های نقشه‌برداری، زمین‌شناسی، هواشناسی، شرکت آب منطقه‌ای، منابع طبیعی و شرکت تحقیقات منابع آب ایران (تماب) تهیه شد.

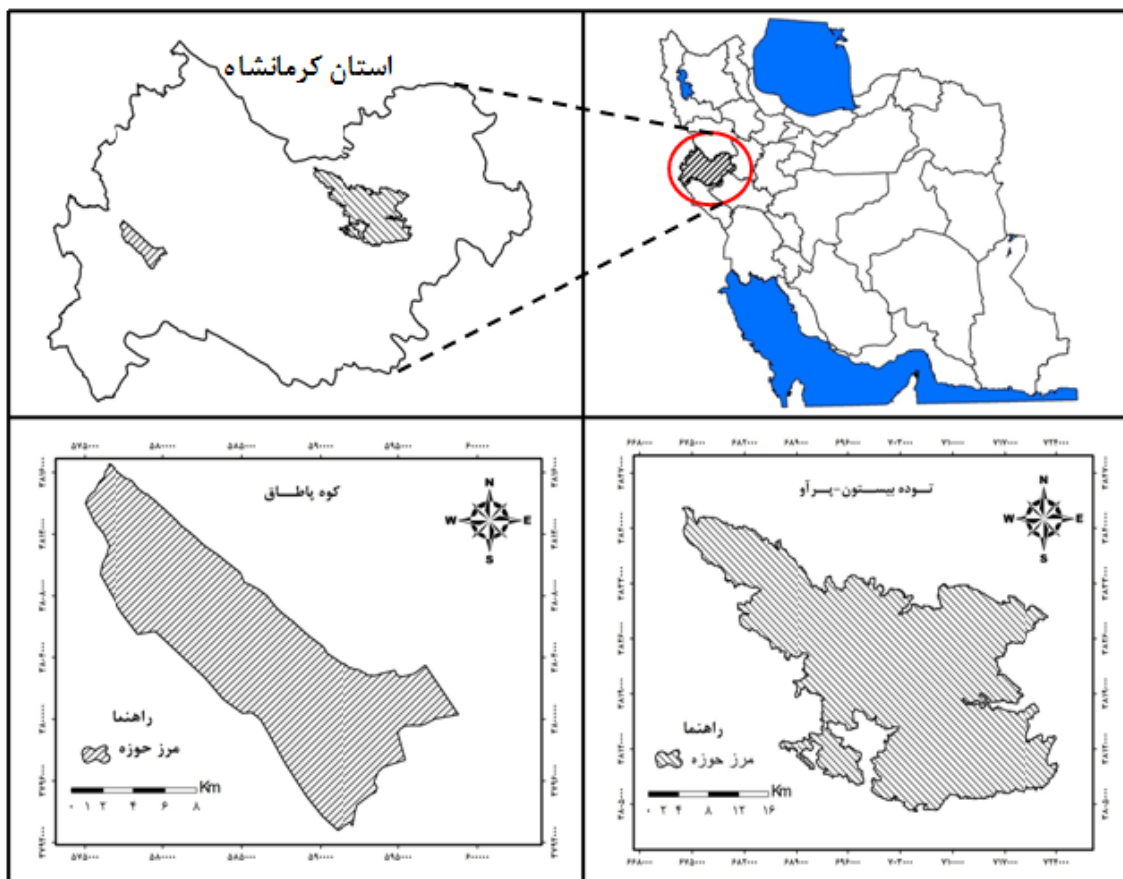
بدون ارزیابی صحیح داده‌ها، تحلیل‌های پیچیده آماری نتایج اطمینان‌بخشی نخواهد داشت. با به‌کارگیری روش‌های مختلف از جمله مقایسه نظری همزمان آمار ایستگاه‌های مختلف، کنترل مقادیر خیلی زیاد یا خیلی کم و کنترل اعداد جافتاده، آمار همه ایستگاه‌ها تأیید شد. در

تغذیه از بارش پرداختند. نتایج ناشی از بررسی آبنمود معرف سطح آب آبخوان‌های آسماری و ایلام-سروک نشان داد که از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸ افت سطح آب در آبخوان کارستی آسماری در مقایسه با آبخوان کارستی ایلام-سروک متفاوت بوده است. همچنین نتایج تفسیر خودهمبستگی و آزمایش پمپاژ تأییدکننده عملکرد تخلخل دوگانه سازند ایلام-سروک و جریان پایه در سازند آسماری است.

بررسی سوابق تحقیق و مستندات در دسترس در زمینه تحقیق حاضر در داخل و خارج از کشور نشان می‌دهد که پژوهش‌های متعددی درباره بررسی رفتارهای هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی انجام گرفته؛ اما در زمینه تأثیر ساختار و توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی و همچنین حجم ذخیره دینامیک در زمان تأخیر و مؤلفه‌های هیدروژئولوژیکی در آبخوان‌های کارستی تحقیقات کمی به‌ویژه در داخل کشور صورت گرفته است. از این رو پژوهش حاضر با جامعیت بیشتر نسبت به پژوهش‌های صورت گرفته بر آن است که اثر توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی را در رفتارهای هیدروژئولوژیکی این آبخوان‌ها بررسی و ارزیابی کند. از آنجا که توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی می‌تواند تأثیر زیادی بر شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها و حجم ذخیره دینامیک و تأثیرپذیری آبخوان از تغییرات اقلیمی داشته باشد، باید در کنار مطالعه تأثیر متغیرهای اقلیمی بر مؤلفه‌های هیدروژئولوژیکی حاکم بر آبخوان‌های کارستی به بررسی شرایط توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی و اثر آن بر شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو آبخوان آهکی توده بیستون-پرآو و کوه پاتاق در استان کرمانشاه انجام گرفت. توده بیستون-پرآو بخشی از زاگرس رورانده است که در استان کرمانشاه و شمال شهر کرمانشاه واقع شده است. این توده کوهستانی تا خط‌القعر، با مساحت ۱۰۳۳ کیلومتر مربع بین عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی قرار گرفته و با دشت‌های آبرفتی احاطه شده است. حداکثر ارتفاع منطقه،



شکل ۱. موقعیت مناطق تحقیق در کشور و استان کرمانشاه

محاسبه حجم ذخیره دینامیک

برای بررسی مقدار ذخیره، دبی و تغییرات آنها در زمان‌های مختلف، ابتدا آبنمودهای دبی چشمه‌های مورد مطالعه ترسیم شد. سپس ضریب فرود (α) و حجم ذخیره دینامیک (به‌عنوان عامل تعیین‌کننده توسعه‌یافتگی آبخوان‌ها) چشمه‌ها محاسبه شد. حجم ذخیره دینامیکی عاملی است که نتیجه شرایط خاص زمین‌شناختی و بازخوردی از توسعه کارستی یک منطقه است. عامل مذکور از رابطه‌های ۱ و ۲ به دست می‌آید [۴]. نمودار مربوط به منحنی فرود چشمه‌ها به گونه‌ای که محور افقی آن زمان و محور عمودی با مقیاس نیمه‌لگاریتمی دبی آن است، در نرم‌افزار اکسل ترسیم شد.

$$V = (Q_0 \times 86400) / a \quad (1)$$

$$a = \frac{\log Q_0 / Q_t}{0.4343(t)} \quad (2)$$

که در آن:

این تحقیق از روش آزمون توالی برای بررسی همگنی داده‌های بارش استفاده شد. دوره آماری بیست‌ساله (۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰) به‌عنوان دوره آماری مشترک به‌منظور تجزیه و تحلیل سری داده‌ها انتخاب شد. برای محاسبه و تعیین بارش متوسط در هر یک از مناطق، از آمار ایستگاه‌های هواشناسی (سینوپتیک، کلیما-تولوژی، باران‌سنجی و تبخیرسنجی) موجود در مناطق مورد مطالعه و اطراف آنها استفاده شد. در این تحقیق با هدف بررسی وضعیت آبدهی آبخوان‌ها و ارزیابی تغییرات صورت‌گرفته طی سال‌های مختلف، ترسیم آبنمود آبخوان در مقیاس‌های ماهانه و سالانه ترسیم شد. برای تعیین حد توسعه‌یافتگی کارست از نقشه‌های زمین‌شناسی و بازدیدهای صحرایی استفاده شد. همچنین حجم ذخیره دینامیک، ضریب خشکیدگی و دبی حداکثر تخلیه‌شده در واحد زمان برای آبخوان هر یک از چشمه‌های تحت مطالعه محاسبه شد.

$$V=CIA \quad (3)$$

که در آن:

V: مقدار تخلیه سالانه چشمه (متر مکعب در سال)، C: درصد نفوذ بارندگی و I: متوسط بارندگی (متر) و A: مساحت حوضه آبخیز چشمه (متر مربع) است.

نتایج

بررسی تغییرات بلندمدت ماهانه آبدهی چشمه‌ها

به منظور ارزیابی تغییرات در آبدهی چشمه‌ها در مقیاس ماهانه، میانگین آبدهی بلندمدت ماهیانه در هر یک از چشمه‌ها محاسبه شد؛ به این صورت که میانگین آبدهی چشمه هر ماه در کل طول دوره آماری ارزیابی شد. شکل ۲ تغییرات میانگین بلندمدت ماهانه را در چشمه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

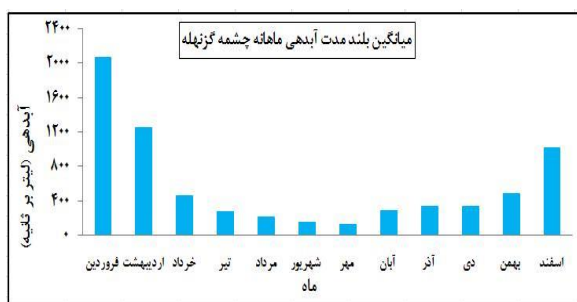
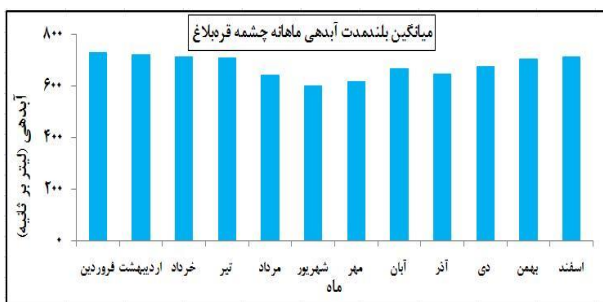
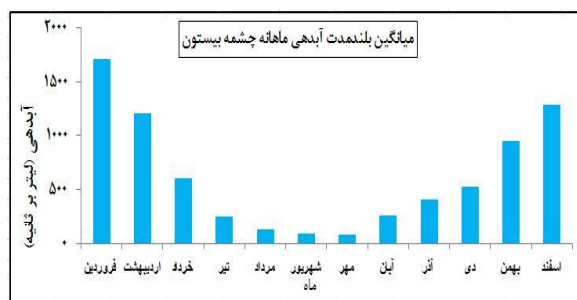
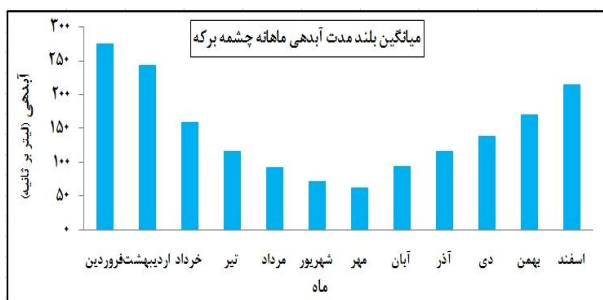
میانگین آبدهی سالانه چشمه‌های مورد مطالعه

به منظور بررسی تغییرات آبدهی سالانه چشمه‌های مورد مطالعه اقدام به محاسبه میانگین سالانه چشمه‌ها در طول دوره آماری مورد مطالعه شد. تغییرات آبدهی میانگین سالانه چشمه‌های مورد مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است.

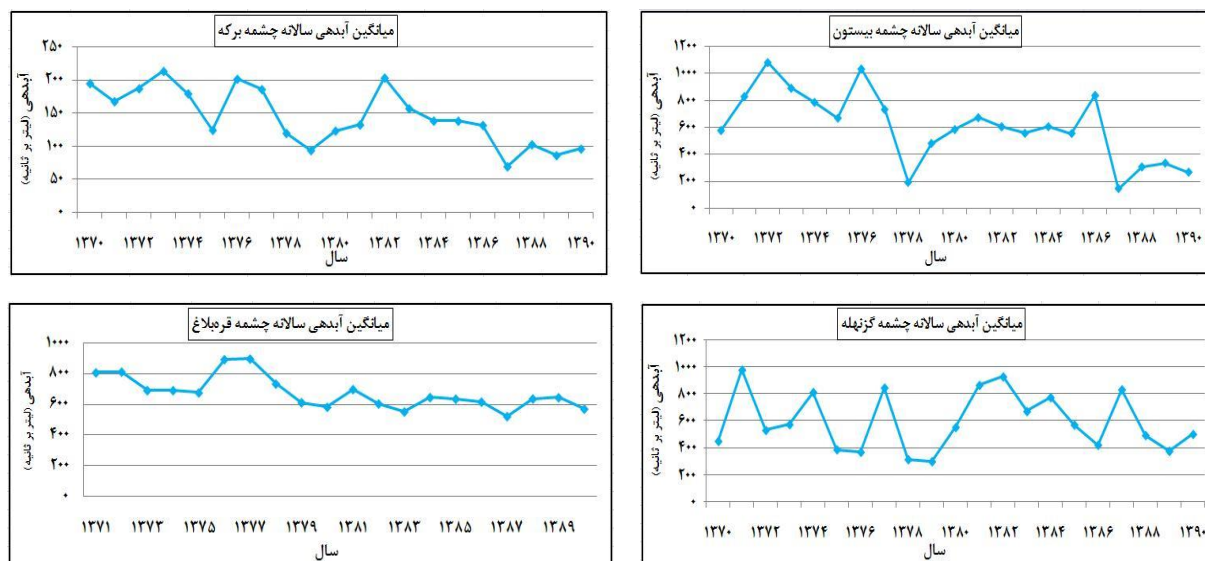
V: حجم ذخیره دینامیکی یک مخزن در فرود یا شکست آب‌نمود مورد نظر، Q0: دبی اولیه که بر روی منحنی فرود انتخاب می‌شود، Qt: دبی ثانویه که در نقطه‌ای به فاصله زمانی t انتخاب می‌شود، α : ضریب تخلیه و t: مدت زمان بین دبی اولیه و ثانویه است. آبخوان‌های مورد مطالعه از نظر توسعه‌یافتگی شرایط متفاوتی دارند. معیار ارزیابی توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی توجه به اشکال ژئومورفولوژیکی و همچنین وجود چشمه‌ها و سراب‌های فراوان با آبدهی زیاد، تغییرات شدید آبدهی و قدرت زیاد هدایت هیدرولیکی است. بنابراین در تحقیق حاضر به منظور بررسی توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی، حجم ذخیره دینامیک و مساحت حوضه آبخیز هر یک از چشمه‌ها محاسبه شد.

تعیین مساحت حوضه آبخیز چشمه‌ها

به منظور به دست آوردن مساحت حوضه آبخیز چشمه‌های مورد مطالعه از روش محاسبه حجم ذخیره دینامیک در آبخوان‌های کارستی استفاده شد. این روش را پیشتر محققان دیگر از جمله حمیدی‌زاده و همکاران [۱]، کریمی و همکاران [۱۶] و کریمی [۳] استفاده کرده‌اند. در این روش مساحت حوضه آبخیز مربوط به هر چشمه با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:



شکل ۲. تغییرات میانگین بلندمدت ماهانه چشمه‌های بیستون، برکه، گزنه‌له و قره‌بلاغ

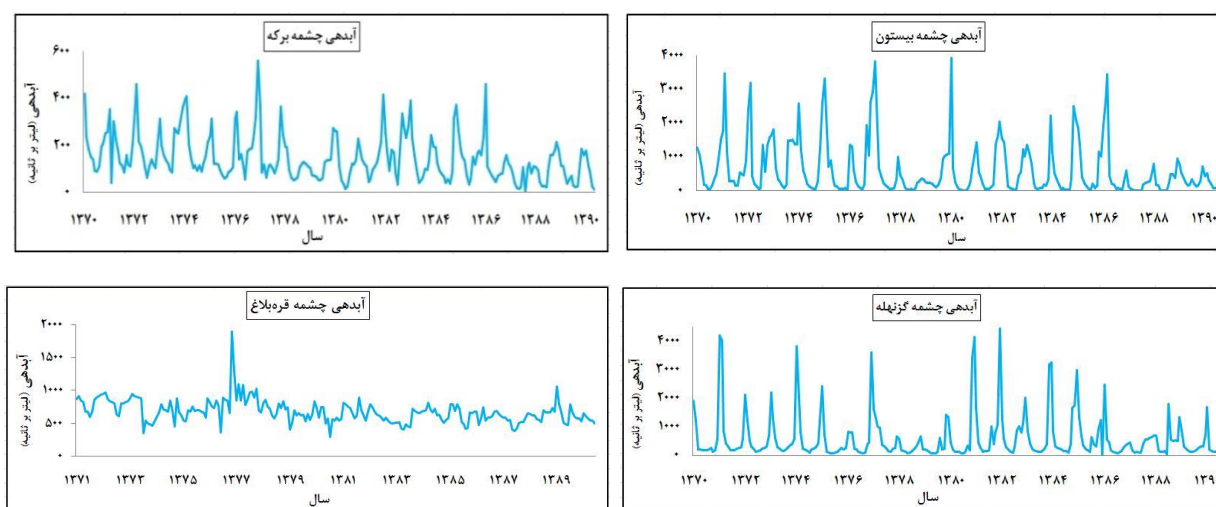


شکل ۳. تغییرات میانگین سالانه آبدهی چشمه‌های بیستون، برکه، گزنهله و قره‌بلاغ

منطقه بیستون-پراو (چشمه‌های بیستون، برکه و گزنهله) نسبت به منطقه پاتاق (چشمه قره‌بلاغ) شدیدتر بود. برای بررسی مقدار ذخیره، دبی و تغییرات آنها در زمان‌های مختلف، ابتدا آبنمودهای چشمه‌های مورد مطالعه برای هر سال آبی ترسیم شد. سپس ضریب خشکیدگی (α)، حجم ذخیره دینامیک و حجم تخلیه سالانه برای هر یک از چشمه‌های مورد مطالعه تعیین شد. نتایج این محاسبات برای چشمه‌های بیستون و قره‌بلاغ در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

بررسی تغییرات آبدهی چشمه‌ها

به‌منظور بررسی تغییرات آبدهی چشمه‌ها، آبنمود چشمه‌ها در طول دوره آماری بیست‌ساله مورد مطالعه ترسیم شد. نمودار آبدهی چشمه‌های مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، روند تغییرات آبدهی همه چشمه‌ها به‌نسبت یکسان است؛ به‌نحوی که در ماه‌هایی که بارش رخ داد، آبدهی چشمه‌ها نیز روند صعودی داشت و هم‌زمان با شروع ماه‌های خشک، روند آبدهی نیز کاهش یافت. همچنین میزان این تغییرات در چشمه‌های واقع در



شکل ۴. تغییرات بلندمدت آبدهی چشمه‌های بیستون، برکه، گزنهله و قره‌بلاغ

جدول ۱. محاسبه ضریب خشکیدگی و حجم ذخیره دینامیک و آبدهی سالانه چشمه بیستون

سال	α_1	α_2	S_1 (متر مکعب)	S_2 (متر مکعب)	AS (متر مکعب)	تخلیه سالانه Q (متر مکعب)	بارش متوسط سالانه (میلی‌متر)	نسبت دبی حداکثر به حداقل
۱۳۷۰-۷۱	-	-	-	-	-	۲۸۴۳۲۳۳۲	۵۷۴	۱۶۴۶
۱۳۷۱-۷۲	۰/۰۲۰۹	۰/۰۶۷۶	۲۵۶۳۰۶	-	-	۲۴۰۲۲۵۴۸	۵۷۱	۲۴۶۰
۱۳۷۲-۷۳	۰/۰۱۸۸	-	۴۰۴۴۲۶	۲۵۶۳۰۶	۱۴۸۱۲۰	۲۵۹۶۷۲۶۸	۴۴۶	۱۶۵۴
۱۳۷۳-۷۴	۰/۰۱۹۶	-	۵۹۰۶۹۴	۴۰۴۴۲۶	۱۸۶۲۶۸	۳۲۸۱۵۸۳۶	۷۳۹	۲۴۹۹
۱۳۷۴-۷۵	۰/۰۲۰۰	-	۶۲۲۰۸۰	۵۹۰۶۹۴	۳۱۳۸۶	۳۱۶۲۷۹۸۰	۴۷۷	۳۱۸۸
۱۳۷۵-۷۶	۰/۰۲۱۴	-	۳۰۶۸۴۱	۶۲۲۰۸۰	-۳۱۵۲۳۹	۱۰۶۴۰۷۷۲	۳۴۳	۱۳۲۳
۱۳۷۶-۷۷	۰/۰۲۱۸	-	۶۲۲۲۳۹	۳۰۶۸۴۱	۳۱۵۳۹۸	۴۲۰۴۲۷۴۴	۵۴۳	۳۷۳۶
۱۳۷۷-۷۸	-	-	-	۶۲۲۲۳۹	-	۶۷۴۶۰۷۶	۳۰۰	۴۲۳
۱۳۷۸-۷۹	۰/۰۰۵۴	-	۱۵۶۸۰۰۰	-	-	۶۴۵۱۷۴۰	۳۴۴	۷۷
۱۳۷۹-۸۰	۰/۰۳۵۴	-	۴۸۸۱۴	۱۵۶۸۰۰۰	-۱۵۱۹۱۸۶	۲۵۲۷۶۱۰۴	۴۵۹	۳۹۲۲
۱۳۸۰-۸۱	۰/۰۲۴۳	-	۱۴۲۲۲۲	۴۸۸۱۴	۹۳۴۰۸	۱۲۵۰۶۶۵۲	۴۳۴	۱۳۹۶
۱۳۸۱-۸۲	۰/۰۱۳۹	۰/۰۵۶۴	۳۴۸۰۸۶	۱۴۲۲۲۲	۲۰۵۸۶۴	۲۴۴۴۸۲۸۴	۴۰۲	۱۵۱۷
۱۳۸۲-۸۳	۰/۰۳۰۵	۰/۰۰۹۰	۱۴۷۳۰۵	۳۴۸۰۸۶	-۲۰۰۷۸۱	۱۸۲۸۸۲۵۲	۵۵۸	۱۲۸۹
۱۳۸۳-۸۴	-	-	-	۱۴۷۳۰۵	-	۱۳۸۹۹۴۹۲	۴۷۲	۱۱۱۳
۱۳۸۴-۸۵	۰/۰۲۸۲	۰/۰۰۶۲	۱۱۴۷۹۷	-	-	۲۳۹۲۵۳۱۲	۵۰۱	۱۸۵۹
۱۳۸۵-۸۶	۰/۰۱۶۲	۰/۰۶۹۱	۸۸۰۰۰۰	۱۱۴۷۹۷	۷۶۵۲۰۳	۳۰۱۶۴۱۸۴۰	۵۸۴	۱۸۸۸
۱۳۸۶-۸۷	-	-	-	۸۸۰۰۰۰	-	۳۷۸۵۶۳۴	۱۷۹	۱۳۹
۱۳۸۷-۸۸	۰/۰۱۰۱	۰/۰۸۶۶	۵۱۳۲۷	-	-	۶۹۳۳۹۷۸	۳۵۳	۷۷۹
۱۳۸۸-۸۹	۰/۰۱۲۳	-	۱۳۱۳۵۶۱	۵۱۳۲۷	۱۲۶۲۲۳۴	۱۲۵۲۷۶۷۶	۵۲۵	۴۳۴
۱۳۸۹-۹۰	۰/۰۰۳۹	۰/۰۲۱۱	۱۴۴۰۰۰۰	۱۳۱۳۵۶۱	۱۲۶۴۳۹	۸۹۳۲۵۷۲	۳۶۱	۴۴۲

- مربوط به سال‌هایی است که آمار وجود ندارد یا احتمالاً آماربرداری اشتباه بوده است.

α : ضریب فرود S: حجم ذخیره دینامیک $S_2 - S_1 = QAS$: حجم تخلیه

جدول ۲. محاسبه ضریب خشکیدگی و حجم ذخیره دینامیک و آبدهی سالانه چشمه قره‌بلاغ

سال	α_1	α_2	S_1 (متر مکعب)	S_2 (متر مکعب)	AS (متر مکعب)	تخلیه سالانه Q (متر مکعب)	بارش متوسط سالانه (میلی‌متر)	نسبت دبی حداکثر به حداقل
۱۳۷۱-۷۲	۰/۰۰۱۵	-	۴۵۹۰۷۲۰۰	-	-	۲۶۵۴۵۴۲۵	۵۲۹	۱۹۲
۱۳۷۲-۷۳	۰/۰۰۰۵	-	۱۵۲۲۳۶۸۰۰	۴۵۹۰۷۲۰۰	۱۰۶۳۲۹۶۰۰	۲۶۰۷۷۶۴۴	۶۷۴	۱۴۸
۱۳۷۳-۷۴	۰۰۰۱۶	-	۳۶۳۴۲۰۰۰	۱۵۲۲۳۶۸۰۰	-۱۱۵۸۹۴۸۰۰	۱۸۳۹۳۳۷۲	۷۴۱	۶
۱۳۷۴-۷۵	۰/۰۰۳۳	-	۱۷۹۰۸۳۶۴	۳۶۳۴۲۰۰۰	-۱۸۴۳۳۶۳۶	۲۱۱۱۸۶۰۸	۶۰۹	۷۴
۱۳۷۵-۷۶	۰/۰۲۵۲	۰/۰۰۲۹	۱۲۴۱۱۴۳	۱۷۹۰۸۳۶۴	-۱۶۶۶۷۲۲۱	۲۲۳۲۲۲۳۲	۴۰۷	۱۴۱
۱۳۷۶-۷۷	-	-	-	۱۲۴۱۱۴۳	-	۳۱۳۳۱۰۱۶	۷۵۱	۴۶۱
۱۳۷۷-۷۸	۰/۰۰۳۳	-	۱۵۱۸۵۴۵۵	-	-	۲۵۱۷۰۹۸۴	۴۵۱	۱۳
۱۳۷۸-۷۹	۰/۰۰۱۴	-	۳۸۳۸۶۲۸۶	۱۵۱۸۵۴۵۵	۲۳۲۰۰۰۸۳۱	۲۰۹۴۵۱۶۰	۲۵۸	۲۱۵

ادمه جدول ۲. محاسبه ضریب خشکیدگی و حجم ذخیره دینامیک و آبدهی سالانه چشمه قره بلاغ

سال	Q_1	Q_2	S_1 (متر مکعب)	S_2 (متر مکعب)	ΔS (متر مکعب)	Q تخلیه سالانه (متر مکعب)	بارش متوسط سالانه (میلی متر)	نسبت دبی حداکثر به حداقل
۱۳۷۹-۸۰	-	-	-	۳۸۳۸۶۲۸۶	-	۲۰۳۰۶۵۵۶	۴۴۷	۲۲۰
۱۳۸۰-۸۱	۰/۰۰۲۲	-	۲۲۵۸۱۸۱۸	-	-	۱۹۴۵۲۴۵۶	۵۱۷	۱۶۱
۱۳۸۱-۸۲	۰/۰۰۲۰	-	۲۵۱۸۵۶۰۰	۲۲۵۸۱۸۱۸	۲۶۰۳۷۸۲	۲۱۲۹۴۶۸۴	۵۹۷	۲۳۵
۱۳۸۲-۸۳	۰/۰۰۲۳	-	۱۷۰۵۴۶۰۹	۲۵۱۸۵۶۰۰	-۸۱۳۰۹۹۱	۱۵۶۷۶۰۲۰	۴۹۰	۲۰۷
۱۳۸۳-۸۴	-	-	-	۱۷۰۵۴۶۰۹	-	۲۱۳۶۵۶۴۰	۷۲۰	۵۲
۱۳۸۴-۸۵	۰/۰۰۶۸	-	۶۶۱۹۷۶۵	-	-	۲۰۳۳۵۴۶۴	۵۷۴	۳۰
۱۳۸۵-۸۶	-	-	-	۶۶۱۹۷۶۵	-	۱۸۱۵۴۲۲۴	۴۴۹	۲۷۰
۱۳۸۶-۸۷	۰/۰۰۵۹	-	۵۶۲۳۳۲۲	-	-	۳۷۸۵۶۳۴	۲۱۷	۸۰
۱۳۸۷-۸۸	۰/۰۰۲۰	-	۲۲۱۶۱۶۰۰	۵۶۲۳۳۲۲	۱۶۵۳۸۲۷۸	۶۹۳۳۹۷۸	۴۱۸	۱۹۸
۱۳۸۸-۸۹	۰/۰۰۵۴	-	۷۶۳۲۰۰۰	۲۲۱۶۱۶۰۰	-۱۴۵۲۹۶۰۰	۱۲۵۲۷۶۷۶	۶۹۰	۱۲۸
۱۳۸۹-۹۰	۰/۰۰۱۷	-	۲۵۲۵۹۲۹۴	۷۶۳۲۰۰۰	۱۷۶۲۷۲۹۴	۸۹۳۲۵۷۲	۳۸۹	۵۸۳

توسعه نشان می‌دهد که ضریب خشکیدگی (α) در چشمه‌های منطقه بیستون-پراو مقادیر بیشتری را نسبت به منطقه پاتاق به خود اختصاص داده‌اند. همچنین چشمه‌های منطقه بیستون-پراو، اغلب یک یا دو ضریب خشکیدگی دارند که نشان‌دهنده تغییرات زیاد در روند آبدهی چشمه است. در حالی که در چشمه قره بلاغ واقع در منطقه پاتاق تنها یک ضریب خشکیدگی وجود دارد که نشان از یکنواختی تخلیه در آبخوان پاتاق دارد. همچنین حجم ذخیره دینامیک محاسبه شده برای هر یک از چشمه‌های مورد مطالعه نشان داد که حجم ذخیره دینامیک در چشمه قره بلاغ بیشتر از چشمه‌های منطقه بیستون-پراو (بیستون، برکه و گزنهله) است. به علاوه نسبت دبی حداکثر به دبی حداقل که یکی از معیارهای توسعه یافتگی آبخوان‌های کارستی است، به این صورت که هرچه مقدار این نسبت بالاتر باشد آبخوان کارستی نیز

توسعه یافته است، برای چشمه‌های هر یک از مناطق مورد مطالعه محاسبه شد که نتایج نشان داد که مقدار این نسبت در چشمه‌های بیستون، برکه و گزنهله به‌طور متوسط ۱۵۸۴، ۲۱۷ و ۲۰۹۵ و برای چشمه قره بلاغ در منطقه پاتاق ۱۷۹ است که نشان‌دهنده توسعه یافتگی بیشتر توده بیستون-پراو نسبت به کوه پاتاق است.

تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌ها

به منظور به دست آوردن مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های مورد مطالعه از روش محاسبه ذخیره دینامیک در آبخوان-های کارستی استفاده شد. سطح حوضه آبرگیر با ضریب ۳۰ تا ۸۰ درصد برای چشمه‌های تحت مطالعه محاسبه شد. نتایج محاسبه مساحت حوضه آبرگیر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های تحت مطالعه با درصد نفوذهای متفاوت بر حسب کیلومتر مربع

مساحت حوضه آبرگیر	ضریب نفوذ (%)					
	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰
چشمه بیستون	۸۹	۱۰۲	۱۱۹	۱۴۳	۱۷۸	۲۳۸
چشمه برکه	۱۳	۱۷	۱۷	۲۰	۲۵	۳۴
چشمه گزنهله	۵۱	۶۸	۶۸	۸۱	۱۰۱	۱۳۵
چشمه قره بلاغ	۵۱	۶۸	۶۸	۸۱	۱۰۲	۱۳۶

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی تغییرات بلندمدت ماهانه آبدهی چشمه‌ها نشان داد که در چشمه‌های منطقه بیستون-پراو شامل چشمه‌های بیستون، برکه و گزنه‌له، آبدهی در ماه‌های مرطوب بسیار زیاد است؛ در صورتی که در ماه‌های خشک مقدار آبدهی چشمه‌ها به شدت کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده ارتباط قوی بارش و آبدهی چشمه‌هاست. به عبارتی به علت توسعه‌یافتگی شبکه کارستی (شامل کانال‌ها و درز و شکافها) ظرفیت انتقال زیاد است که آب نفوذیافته را به سرعت به خروجی چشمه‌ها می‌رساند. این در حالی است که در چشمه قره‌بلاغ در منطقه پاتاق تغییرات آبدهی بلندمدت ماهانه نسبت به تغییرات بارش، کمتر است. علت آن را می‌توان حجم ذخیره زیاد آبخوان و همچنین توسعه‌نیافتگی شبکه کارستی و درز و شکافها در منطقه پاتاق دانست. در نتیجه تخلیه سریع آب نفوذیافته امکان‌پذیر نیست که با یافته‌های بریان و همکاران [۸] مطابقت دارد.

بررسی تغییرات میانگین آبدهی سالانه چشمه‌های مورد مطالعه نشان داد که میانگین آبدهی سالانه چشمه‌ها در سال‌های مرطوب نسبت به سال‌های خشک بیشتر است. همچنین تغییرات آبدهی چشمه‌های واقع در منطقه بیستون-پراو در بین سال‌های خشک و مرطوب، بیشتر از تغییرات آبدهی در چشمه قره‌بلاغ منطقه پاتاق است که علت آن توسعه‌یافتگی بیشتر منطقه بیستون-پراو نسبت به پاتاق است. به این ترتیب که تغییرات مقدار آب نفوذیافته به آبخوان که ناشی از تغییر مقدار بارش است خیلی سریع واکنش نشان می‌دهد که با نتایج بریان و همکاران [۸] مطابقت دارد.

محاسبه حجم ذخیره دینامیک و ضریب خشکیدگی و آبدهی سالانه

تغییرات زمانی آبدهی چشمه‌ها، خصوصیات هیدروژئولوژیک کلی آبخوان‌های کارستی را منعکس می‌کند. منحنی فرود مشخص‌کننده تخلیه آب از آبخوان در رژیم غیرنفوذی است. میزان ضریب آلفا که بیانگر ضریب تخلیه یا توانایی تخلیه آب زیرزمینی است، خصوصیات هیدرولوژیکی منطقه را که منتج از پارامترهایی همچون تخلخل و ضریب انتقال آبخوان است بیان می‌دارد.

در این چارچوب بیشتر بودن مقدار فاکتور α ، نشان‌دهنده شیب بیشتر آبنمود، فروکشی جریان و در نتیجه بیانگر سرعت تأثیرپذیری دبی جریان از بارش است و میزان تخلخل و کارست‌شدگی حوضه را نشان می‌دهد. حال آنکه در حالت عکس، عدم کارست‌شدگی یا کارست‌شدگی کم حوضه مشاهده می‌شود.

ضریب فرود به زمان و نوع آبخوان بستگی دارد. در حقیقت ضریب فرود نشان‌دهنده حد توسعه‌یافتگی در سازندهای آهکی و پتانسیل آبخوان است. رسم آبنمود چشمه‌های حاشیه توده بیستون-پراو و مقایسه آنها با آبنمود چشمه واقع در منطقه پاتاق نشان می‌دهد که توده کوهستانی بیستون-پراو در مرحله پیشرفته‌تری از تحولات کارستی قرار دارد. برای مثال، حداکثر دبی چشمه‌های بیستون و گزنه‌له با آبدهی به ترتیب ۳۳۹۲ و ۴۴۳۶ لیتر بر ثانیه بیشتر از حداکثر دبی چشمه قره‌بلاغ با آبدهی ۱۸۹۷ لیتر بر ثانیه در طول دوره زمانی بیست‌ساله بررسی شده بوده است؛ حال آنکه میانگین حجم ذخیره دینامیک چشمه قره‌بلاغ (۲۹۲۸۸۳۵۰ متر مکعب) مقدار بیشتری را در مقایسه با میانگین حجم ذخیره دینامیک چشمه‌های بیستون (۵۵۳۵۴۴ متر مکعب)، برکه (۲۲۳۶۵۵۲ متر مکعب) و گزنه‌له (۱۳۳۶۴۶۶ متر مکعب) نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، چشمه‌های توده بیستون-پراو در صورت قطع همزمان بارش و عدم تغذیه چشمه‌ها، سریع‌تر از چشمه‌های منطقه پاتاق (قره‌بلاغ) می‌خشکند، که حکایت از توسعه بیشتر درز و شکافها در توده کارستی منطقه دارد.

ضریب α نیز تأییدی بر تحول بیشتر کارستی در توده بیستون-پراو است، چرا که میزان آلفا برای چشمه‌های بیستون، برکه و گزنه‌له مقادیری بیش از آلفای چشمه قره‌بلاغ به دست می‌دهد. براساس منحنی فرود و ضریب آلفای چشمه‌ها، استنباط می‌شود که چشمه‌های اطراف توده بیستون-پراو از یک بستر تکامل‌یافته کارستی تغذیه می‌شوند؛ در حالی که چشمه قره‌بلاغ دارای منحنی فرودی با روند تقریباً یکنواخت نزولی است که توسعه کمتر کارست را در حوضه آگیر آن نشان می‌دهد.

در تفسیر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی حوضه تغذیه یک چشمه، مهم‌ترین نکته توجه به ضریب آلفا در فرود انتهایی چشمه است، زیرا میزان آلفای پایانی، مؤید

بوناچی [۷] مطابقت دارد؛ ولی مساحت‌ها فرق زیادی را نشان نمی‌دهد.

معیار ارزیابی توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی توجه به اشکال ژئومورفولوژیکی و همچنین وجود چشمه‌سارهای فراوان با آبدهی فراوان و قدرت هدایت هیدرولیکی زیاد است. بنابراین توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی می‌تواند تأثیر زیادی بر شرایط هیدرولوژیکی آبخوان‌ها و حجم ذخیره دینامیک و تأثیرپذیری آبخوان از تغییرات اقلیمی داشته باشد. براساس نتایج این تحقیق، آبخوان‌های بررسی‌شده از نظر توسعه‌یافتگی شرایط متفاوتی دارند؛ به‌گونه‌ای که توده بیستون-پراو به‌عنوان یک سیستم کارستی دارای توسعه‌یافتگی زیادی نسبت به کوه پاتاق است؛ زیرا چشمه‌های موجود در منطقه بیستون-پراو به‌علت آبدهی زیاد و همچنین حجم ذخیره دینامیک کم، توسعه‌یافتگی زیادی نسبت به آبخوان کارستی کوه پاتاق دارند. هر چه توسعه‌یافتگی آبخوان بیشتر باشد، تغییرات بارشی در منطقه با سرعت بیشتری در خروجی آبخوان نمود می‌یابد. براساس نتایج این تحقیق، واکنش هیدرولوژیکی آبخوان منطقه بیستون-پراو به‌عنوان یک کارست توسعه‌یافته، سریع‌تر و شدیدتر از آبخوان منطقه پاتاق است که به‌تبع آن تأثیر بیشتری بر منابع آب منطقه بیستون-پراو می‌گذارد.

منابع

- [۱]. حمیدی‌زاده، فروغ، کلانتری، نصراله، کشاورزی، محمدرضا، چرچی، عباس، ۱۳۹۱. بررسی هیدروژئولوژیکی و زمین‌ساختاری چشمه دره‌اناری در منطقه کارستی شیرین بهار استان خوزستان، تحقیقات منابع آب، ۸(۱): ۴۲-۳۰.
- [۲]. زیودار، مظفر، ابراهیمی، بهروز، ۱۳۸۷. بررسی حجم دینامیکی سراب‌های کارستی در دوره خشکسالی، در اولین همایش بهره‌برداری بهینه از منابع آب استان لرستان، خرم‌آباد، ۶ شهریور ۱۳۹۰: ۴۲-۳۳.
- [۳]. کریمی، احمدرضا، ۱۳۸۰. مطالعه هیدرولوژیکی آبخوان‌های کارستی تاقدیس پابده-لالی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌های زیرزمینی، گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز.

خصوصیات عمیق‌ترین قسمت آبخوان است که چشمه از آن تغذیه می‌شود. وجود شرایط خاص در رژیم تخلیه چشمه‌ها که از عوامل مختلفی همچون رژیم بارش، لیتولوژی، طرز قرارگیری لایه‌ها و ضخامت آنها، بافت و تخلخل سنگ‌ها نتیجه می‌شود، هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌ها را متأثر می‌کند. این تأثیرپذیری موجب نمایش متفاوت هیدروگراف چشمه‌های نواحی کارستی در مقایسه با دیگر نواحی می‌شود. در نواحی غیر کارستی یا کمتر توسعه‌یافته کارستی، به‌طور معمول چشمه‌ها منحنی فرودی با روند خطی یکنواخت را نشان می‌دهند؛ اما در نواحی با توسعه‌یافتگی زیاد کارست، چشمه‌ها دارای دو یا سه شکست یا ضریب فرود متفاوت‌اند که در حالت معمول آن میزان α_1 (ضریب فرود اولی) کمتر از α_2 (دومی) و بیشتر از α_3 (سومی) است [۵]. منحنی فرود چشمه‌های بیستون، برکه و گزنهله در منطقه بیستون-پراو اغلب دارای دو یا سه شکست بودند؛ درحالی که منحنی فرود چشمه قره‌بلاغ منطقه پاتاق دارای روند خطی یکنواختی است که می‌تواند دلیلی بر توسعه‌نیافتگی کارست در منطقه قره‌بلاغ باشد که با یافته‌های حمیدی‌زاده و همکاران [۱]، کریمی و همکاران [۱۶]، کریمی [۳] و بوناچی [۷] مطابقت دارد. همچنین محاسبه نسبت دبی حداکثر به دبی حداقل در چشمه‌ها نشان داد که توده بیستون-پراو نسبت به کوه پاتاق دارای توسعه‌یافتگی زیادی است [۱۶].

تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌ها

مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های منطقه بیستون-پراو (چشمه‌های بیستون، برکه، و گزنهله) با در نظر گرفتن ضریب نفوذ ۵۰ درصد به ترتیب ۱۴۳، ۲۰ و ۸۱ کیلومتر مربع و مساحت حوضه آبرگیر چشمه قره‌بلاغ در منطقه پاتاق نیز کیلومتر مربع محاسبه شد. از مقایسه سطح حوضه آبرگیر چشمه‌های منطقه بیستون-پراو و منطقه پاتاق می‌توان نتیجه گرفت که چشمه‌های منطقه بیستون-پراو دارای سطح آبرگیر کمتری هستند که نشان‌دهنده توسعه‌یافتگی بیشتر کارست این منطقه نسبت به منطقه پاتاق است که این بخش از نتایج با یافته‌های حمیدی‌زاده و همکاران [۱]، کریمی و همکاران [۱۶]، کریمی [۳] و

- [10]. Christophe J. G. D., 2008. Karst Aquifer Hydrogeology and Exploitation, Overexploitation and Contamination of Shared Groundwater Resource. NATO Science for Peace and Security Series.
- [11]. Fiorillo F., 2009. Spring Hydrographs as Indicators of Droughts in a Karst Environment, *Journal of Hydrology*, 373(3-4): 290-301
- [12]. Fiorillo F., 2012. Tank-Reservoir Drainage as a Simulation of the Recession Limb of Karst Spring Hydrographs, *Hydrogeology Journal* 20(7): 1009-1019
- [13]. Fiorillo F., Guadagno F. M., 2010. Karst Spring Discharges Analysis in Relation to Drought Periods, Using the SPI, *Journal of Water Resources Management*, 24(9): 1867-1884
- [14]. Ford D., Williams P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons Ltd 1-562.
- [15]. Iglesias A., Garrote L., Cancelliere A., Cubillo F., Wilhite D.A., 2009. Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems. 320 p.
- [16]. Karimi H., Raesi E., Bakalowicz M., 2005. Characterising the Main Karst Aquifers of the Alvand Basin, Northwest of Zagros, Iran, by a Hydrogeochemical Approach, *Journal of Hydrogeology*, 13(1): 787-799.
- [17]. Orehova T., 2004. Comparative Estimate of Resistance to Drought for Selected Karstic Aquifers in BULGARIA. in *Journal of Speleology*, 33(1/4): 73-79.
- [۴]. مقصودی، مهران، کریمی، حاجی، صفری، فرشاد، چهارراهی، ذبیح‌الله، ۱۳۸۸، بررسی توسعه کارست در توده پرآو - بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (۶۹): ۶۵-۵۱.
- [۵]. میلانوویچ، پتروویچ، ۱۹۸۱. هیدرولوژی کارست، ترجمه آغاسی ع، افراسیابیان ا، انتشارات استانداردهای مهندسی آب کشور: ۲۶.
- [۶]. ناصری، حمیدرضا، علیجانی، فرشاد، نخعی، محمد، ۱۳۹۱. مقایسه اثرات خشکسالی بر هیدروژئولوژی کارست سازندهای آسماری و ایلام - سروک در جنوب غرب ایذه، مجله پژوهش آب ایران، ۶(۱۱): ۴۵-۳۵.
- [7]. Bonacci O., 1993. Karst Springs Hydrographs as Indicators of Karst Aquifers *Journal of Hydrological Sciences* 38(1): 24-37
- [8]. Brian B. H., Brian A. S., Nico H., 2012. Real and Apparent Daily Springflow Fluctuations During Drought Conditions in a Karst Aquifer, Barton Springs Segment of the Edwards Aquifer, Central Texas, in: *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 62(1): 189-204.
- [9]. Chen Z., Stephen E., Grasby S. E., Osadetz K. G., 2004. Relation Between Climate Variability and Groundwater Levels in the Upper Carbonate Aquifer, Southern Manitoba, Canada, *Journal of Hydrogeology*, 290(2): 43-62.