بررسی ویژگی‌های هیدرولوژیکی آبخوان کارستی چشمه‌علی دامغان

سید موسی حسینی*[۱]، هاجر قدیری[۲]، فاطمه گراوند[۳]

۱-دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
۲-فارغ التحصیل کارشناسی‌ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
۳-دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۲/۱۸
تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۷/۲۸

چکیده

چشمه‌علی دامغان با متوسط آبدهی روزانه ۱۴۰ لیتر در ثانیه اهمیت زیادی در تأمین نیازهای شرب و کشاورزی منطقه دارد. در این تحقیق با بررسی آماری داده‌های بارش و دبی روزانه چشمه از سال ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۸، درک عمیق‌تری از ویژگی‌های هیدرولوژیکی این آبخوان کارستی ارائه شده است. براساس طبقه‌بندی آبخوان کارستی مانجین، سیستم مجرایی در بخش بالایی آبخوان، نسبت به بخش‌های نزدیک به خروجی چشمه از درجه توسعه یافتگی بالاتری برخوردارند. آنالیز هم‌بستگی متقاطع بین داده‌های دبی روزانه چشمه و بارندگی تجمعی (۱ تا ۳۶۵ روزه) نشان داد بارش‌های همان روز تا ۳۰۰ روز قبل بر جریان خروجی چشمه در روز متناظر تأثیر قابل توجهی دارند. آنالیز خشکسالی هیدرولوژیک دبی چشمه به روش جریان‌های کمینه و با تداوم‌های ۳، ۷ و ۱۰ روزه نشان داد که آبدهی متوسط روزانه چشمه که در ۹۹٪ مواقع می‌توان انتظار داشت به ترتیب برابر و کمتر از ۳۵۰، ۲۶۲ و ۲۱۳ لیتر بر ثانیه باشد. هم‌چنین برای دوره‌های بازگشت کمتر از ۵ سال که دارای احتمال وقوع بالایی نیز هستند تفاوت چندانی بین دبی‌های پیش‌بینی شده مشاهده نمی-شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز خشکسالی، بارش مؤثر، چشمه علی، روش مانجین، آبخوان کارستی.

*- نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۸۰۹۹۱۸۷ Email: smhosseini@ut.ac.ir

مقدمه

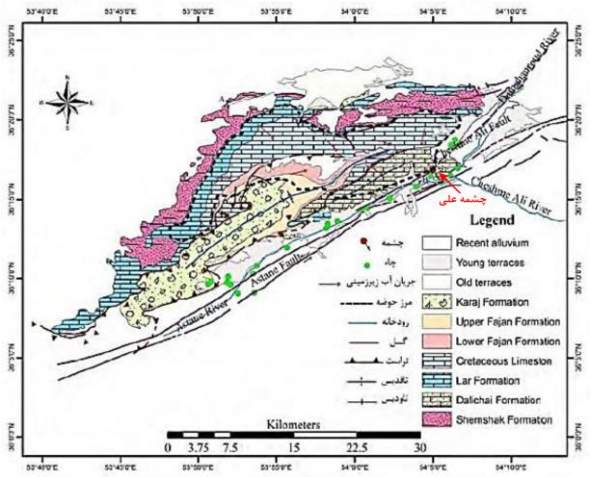
حدود ۲۵ درصد از منابع آب‌های زیرزمینی جهان در تشکیلات کارستی ذخیره شده است و به عنوان یکی از منابع مهم تأمین کننده نیازهای آبی محسوب می‌شوند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). در ایران حدود ۱۱ درصد از وسعت کشور را نواحی کارستی تشکیل می‌دهد (افراسیابیان، ۱۳۷۲). مدیریت محیط‌های کارستی (شامل خاک و آب زیرزمینی و کنترل آلودگی‌ها) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (بوناسی، ۲۰۱۳) سنگ‌های آهکی که محل شکل‌گیری آبخوان‌های کارستی می‌باشند، در مراحل اولیه تشکیل، تخلخل و نفوذپذیری کمی دارند، ولی بعداً بر اثر عوامل تکتونیکی درز و شکاف و گسل‌هایی به وجود می‌آید که همراه با آب باران در آنها انحلال ایجاد می‌شود و در نتیجه اشکال مناطق کارستی را به وجود می‌آورند (میلانویک، ۱۹۸۱). هیدروگراف جریان خروجی از آبخوان کارستی که عموماً در قالب چشمه می‌باشند، تصویر روشنی از پاسخ تشکیلات کارستی را در مقابل محرک‌های ورودی که شامل تغذیه از سطح زمین می‌باشد به دست می‌دهد (بوناسی، ۱۹۸۷). آنالیز منحنی فرود هیدروگراف روش مهمی در بررسی‌های هیدرولوژیکی است که برای تفسیر ویژگی‌های آبخوان‌های کارستی استفاده می‌شود (کرسیک و بوناسی، ۲۰۱۰). شکل منحنی فروکش جریان چشمه تابعی از اندازه و حجم آبخوان کارستی و مشخصات هیدرودینامیک آبخوان می‌باشد. مطالعات متعددی بر روی ویژگی‌های هیدروژئولوژی و هیدروشیمیایی جریان خروجی از چشمه‌های کارستی کشور و تغییرات زمانی آنها در طول سال انجام شده است. به عنوان مثال، پادیلا و همکاران (۱۹۹۴)، هیدروگراف‌های فروکش چهار چشمه کارستی در اروپا را توسط معادلات مانجین (۱۹۷۵) و کوتین (۱۹۶۸) مورد تحلیل قرار دادند و درصد مشارکت جریان سریع و پایه از حجم کل آب ذخیره شده در آبخوان را تعیین نمودند. تاد و کارل (۱۹۹۸) از آوریل ۱۹۹۴ تا می ۱۹۹۵ هیدروگراف‌های جریان سیلاب در سفره آب زیرزمینی کارست را با مجراهای کاملاً توسعه یافته به دست آوردند. فیوریلو و همکاران (۲۰۰۷) آنالیز همبستگی آماری بین مقادیر بارش مؤثر و دبی خروجی چشمه کارستی سرینو[1] واقع در جنوب ایتالیا را بر اساس آمار طولانی مدت داده‌های روزانه طی ۵۳ سال مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که آبدهی این چشمه به شدت تحت تأثیر فاکتورهای اقلیمی مدیترانه‌ای قرار دارد. شفیعی مطلق و لشکری‌پور (۱۳۸۷)، برای اولین بار روی چشمه کارستی کورسا در جنوب‌غربی دهدشت در استان کهگیلویه و بویراحمد به بررسی‌های هیدروژئولوژیکی سفره کارستی آبدار منطقه، برآورد حجم دینامیکی چشمه، بررسی‌های هیدروشیمیایی و اقدام به نمونه‌برداری نموده‌اند. شکری (۱۳۹۰) برای مطالعه هیدروژئولوژیکی چشمه‌علی دامغان به بررسی توسعه کارست سطحی و درونی نمود و به این نتیجه رسید که حدود ۱۸/۳ درصد از حوضه آبگیر چشمه، مناطق با توسعه کم کارست و تنها ۲/۶۷ درصد از حوضه آبگیر را نواحی با توسعه خیلی زیاد کارست تشکیل می‌دهد و شکل باریک این آبخوان در تغذیه مداوم و پیوسته چشمه تأثیرگذار است. هم‌چنین با بررسی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی و تغییرپذیری اندک ویژگی‌های چشمه مشخص شد که سیستم جریان حاکم در این آبخوان، از نوع جریان افشان است. با توجه به اهمیت آبخوان کارستی چشمه‌علی دامغان در تأمین نیاز شرب و کشاورزی منطقه، به مطالعه هیدروژئولوژیکی این

آبخوان پرداخته شده است. در این راستا، طبقه-بندی آبخوان و درجه توسعه یافتگی کارست آن بر اساس روش کمی (مانجین، ۱۹۷۵) انجام شد. مقادیر بارش ماهانه مؤثر در تغذیه آبخوان برآورد و بر اساس همبستگی متقاطع ارتباط بین بارش و دبی خروجی چشمه بررسی شد و در نهایت تحلیل فراوانی دبی‌های حداقل چشمه به منظور شناخت بیشتر و درک عمیق‌تر از وضعیت آبخوان و در نتیجه بهره‌برداری بهینه از منابع آب این چشمه کارستی انجام شده است.

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبگیر چشمه‌علی با مساحت ۱۴۸ کیلومتر مربع در ۳۲ کیلومتری شمال غربی شهر دامغان یکی از زیرحوضه‌های کویر حاج علی‌قلی و به عنوان بزرگ‌ترین چشمه کارستی در استان سمنان شناخته شده است که دامغانرود از آن سرچشمه می‌گیرد (شکل ۲). از نظر زمین‌شناسی، حوضه آبگیر چشمه در زون البرز شرقی واقع است و عمدتاً از آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای سازند لار (حدود ۶۵ درصد) و آهک‌های نازک لایه و آهک‌های مارنی سازند دلیچای تشکیل شده است (کرمی، ۱۳۸۸) که شامل سازندهای شمشک، دلیچای، لار، آهک‌های کرتاسه، فجن، کرج و نهشته‌های کواترنری می‌باشد (شکل ۱). متوسط آبدهی چشمه در خروجی ایستگاه آستانه، ۵۰۰ تا ۷۰۰ لیتر در ثانیه (حجم رواناب سالانه ۲۷ میلیون متر مکعب) است که تأمین کننده نیاز آبی بخشی از شهر دامغان و حدود ۲۵ روستای اطراف می‌باشد. بر اساس نزدیک‌ترین ایستگاه باران سنجی (آستانه) به خروجی چشمه، حوضه آبگیر آن دارای میانگین بارش سالانه ۱۵۵ میلیمتر، میانگین سالانه دما ۱۶ درجه سانتیگراد و میانگین تبخیر سالانه ۱۹۰۰ میلیمتر می‌باشد که اقلیم نیمه خشک را در این منطقه موجب شده است. قسمت اعظم بارش‌ها در این حوضه به صورت برف است که منجر می‌شود بیشترین آبدهی چشمه در فروردین ماه رخ دهد (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۰). از نظر ژئومورفولوژی، ارتفاعات شمالی چشمه‌علی دارای دو تیپ کوهستانی همراه با دشت آبرفتی کوچکی در حد واسط آن می‌باشد. این منطقه فاقد پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مهم کارستی از قبیل گودی‌های مسدود، فروچاله‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌های انحلالی بزرگ و عمیق است. بازدیدهای صحرایی در برخی نواحی آثار قطرات باران، شکستگی‌های کم و بیش بزرگ، حفرات لانه کبوتری و کارن را نشان می‌دهد (کرمی، ۱۳۸۳). از نظر زمین‌شناسی، عملکرد نسبتاً شدید راندگی‌ها، تکتونیک بلوکی و حوضه-های رسوبی محدود به زون‌های گسلی، سبب به هم خوردگی نظم اولیه توالی‌ها و ضخامت واحد-های سنگ چینه‌ای هم سن و هم زمان شده است (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین). از نظر چینه-شناسی، سازند نفوذناپذیر زیرین شمشک باعث محدود کردن ارتباط‌های هیدرولوژیکی با آبخوان-های زیرین و ممانعت از جریان آب‌های زیرزمینی به سمت نواحی دورتر می‌شود، بنابراین مرز سازند شمشک با آهک‌های منطقه یکی از مرزهای حوضه آبگیر چشمه می‌باشد. گسلی با فاصله حدود ۲۰۰ متر بالادست مظهر چشمه‌علی با روند شمال شرق-جنوب غرب با ساز و کار معکوس در برون زده‌های دلیچای مشخص است. جابجایی این گسل سبب ریزش بلوک‌هایی از آهک‌های دلیچای بر روی آبرفت‌های کنار جاده شده است (شکری، ۱۳۹۰). در حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان هیچ-گونه چاه بهره‌برداری یا اکتشافی حفر نشده، اما در جنوب تاقدیس چشمه‌علی در داخل آبرفت‌های کواترنری تعداد ۲۴ حلقه چاه حفاری جهت

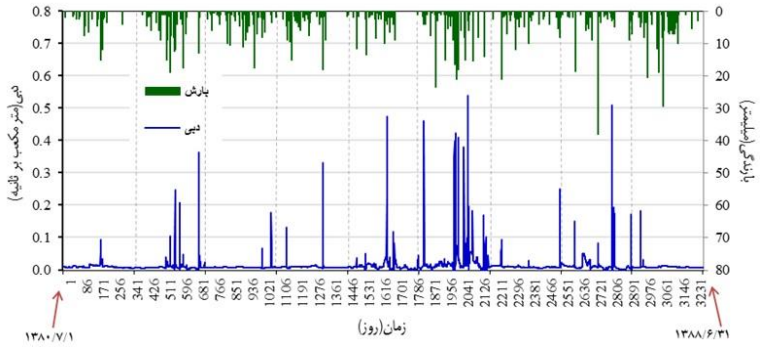
مصارف کشاورزی حفر شده است (شکل ۲). روند کلی افزایش عمق حفاری از شرق حوضه (از محل چشمه) به غرب و نوع سفره در این چاه‌ها آزاد می‌باشد. هدایت الکتریکی نزدیکترین چاه به چشمه (با فاصله ۷۰۰ متر) ۱۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده‌اند. از آنجا که رودخانه آستانه فصلی می‌باشد در فصول خشک ته‌نشست املاح در بستر رودخانه صورت می‌گیرد، جریان دوباره رودخانه و نفوذ آب سبب بالا بردن هدایت الکتریکی آب این چاه‌ها شده است (شکری، ۱۳۹۰). اندازه‌گیری‌های میدانی کرمی در سال ۱۳۸۳ نشان می‌دهد که، تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی جریان چشمه بسیار اندک بوده به گونه‌ای که ضریب تغییرات پارامترهای کیفی، حداقل برابر با ۱/۳۹٪ برای دمای آب و حداکثر برابر با ۱۵/۴۵٪ مربوط به نیترات می‌باشد.



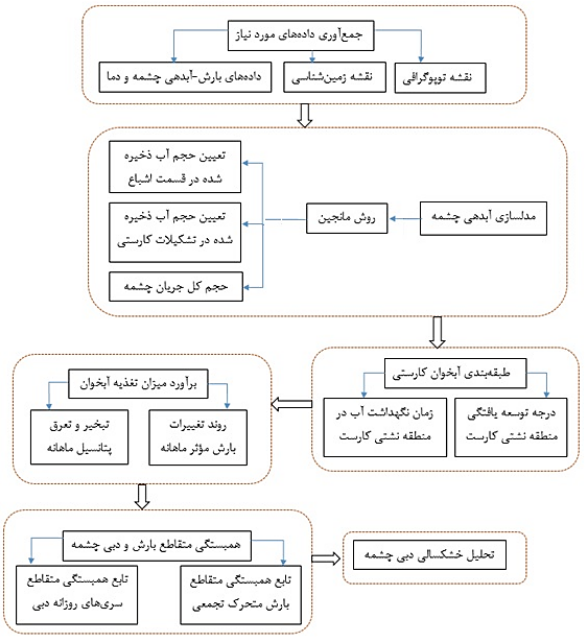
شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی حوضه آبگیر چشمه علی دامغان (کرمی، ۱۳۸۳)

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا اقدام به جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات لازم برای انجام پژوهش، شامل کلیه نقشه‌های بزرگ مقیاس۱.۲۵۰۰۰۰ توپوگرافی، زمین‌شناسی و اطلاعات توصیفی آن از سازمان-های نقشه‌برداری و زمین‌شناسی کشور، تهیه شدند. به منظور بررسی رفتار هیدرولوژیکی چشمه مورد مطالعه، از آمار ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری آستانه طی سال‌های ۸۱-۱۳۸۰ تا ۸۹- ۱۳۸۸ که از شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ شدند، استفاده گردید. مراحل اجرایی پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار سری زمانی داده‌های روزانه بارش و دبی چشمه مورد مطالعه



شکل ۳: بررسی ویژگی‌های هیدرولوژیکی آبخوان کارستی چشمه علی

بر اساس آزمون من-کندال در سطح معنی‌داری ۰/۰۵، هیچ روند معنی‌دار مشاهده نشد. با اینکه کمترین بارش (۱/۷ میلی‌متر) در ماه مرداد رخ می‌دهد، اما کمترین دبی در این ماه مشاهده نمی‌شود. از سویی، بیشترین بارش و کمترین دبی خروجی چشمه در ماه فروردین رخ می‌دهد که وجود چنین مسائلی بر پیچیدگی‌های هیدرولوژیکی تشکیلات کارستی آبخوان و لزوم بررسی چگونگی تأثیرپذیری دبی خروجی از میزان تغذیه را می‌طلبد.

مدل‌سازی آبدهی چشمه کارستی

مانجین دبی فروکش چشمه کارستی در هر زمان t، Q_t را به صورت مجموع جریان پایه، q_t^b مطابق با روش مایلت، و جریان سریع، q_t^* متاثر از تغذیه و نفوذ سطح خاک در آن زمان معرفی نمود:

رابطه ۱)
$$Q_t = q_t^b + q_t^*$$

رابطه ۲)
$$q_t^b = q_0^b \ e^{-\alpha t}$$

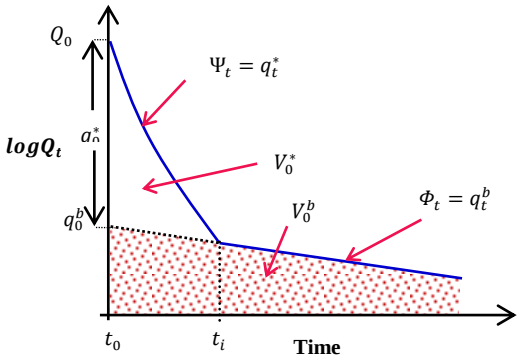
رابطه ۳)
$$q_b^* = q_0^* \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t}$$

که در آن‌ها q_0^b، جریان پایه برون یابی شده در ابتدای منحنی فروکش مطابق با شکل ۴ می‌باشد. پارامتر α، نیز ضریب فروکش جریان پایه طبق روش مایلت است. q_0^*، اختلاف بین دبی کل چشمه Q_0، مقدار متناظر جریان پایه، q_0^b، در زمان شروع فروکش، $t = 0$ مطابق شکل ۳ می‌باشد. پارامتر η، معکوس زمان شروع دبی پایه $(\frac{1}{t_i})$، ضریب ε که از نظر ریاضی درجه تقعر منحنی جریان سریع را نیز نشان می‌دهد، بیانگر ضریب متوسط منطقه غیر اشباع در نفوذ ضریب آب از سطح خاک به تشکیلات کارستی می‌باشد و دارای بعد عکس زمان $(\frac{1}{t})$، می‌باشد. مقدار $\frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t}$ ، که با تابع y_t، نیز نشان داده می‌شود، دارای مقدار بین صفر و یک می‌باشد.

رابطه ۴)

$$Y_t = \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ K & 0 < t < t_i \\ 0 & t = t_i \end{cases}$$

که در آن $0 < K < 1$ است. این تابع، بی بعد بوده و مستقل از جریان چشمه است و می‌توان برای مقایسه تغییرات جریان سریع چشمه در طول سال‌های مختلف به کار برد.



شکل ۴: نمودار تغییرات جریان سریع و پایه در منحنی فروکش آبدهی چشمه کارستی (پادیلا و همکاران، ۱۹۹۴)

با گرفتن انتگرال از توابع دبی جریان‌های سریع و پایه نسبت به زمان، می‌توان توابع حجم آب ذخیره شده در قسمت غیر اشباع خاک، v_t^*، و هم‌چنین تشکیلات کارستی، v_t^b، را در هر زمان محاسبه نمود:

رابطه ۵)

$$v_t^* = \int_{t=}^{t} q_t^* \, d_t = \int_{t=0}^{t} q_0^* \, \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} \, d_t = \frac{q_0^*}{\varepsilon}(\ln(1+\varepsilon t)(1+\quad)-\eta t) \qquad 0< t < t_i$$

رابطه ۶)

$$v_t^b = \int_{t=0}^{t} q_t^b = \int_{t=0}^{t} q_t^b e^{-\propto t} \, d_t = \frac{q_0^b}{\propto}(1-e^{-\propto t}) \qquad t > 0$$

تابع حجم کل جریان چشمه در هر زمان، v_t^T، برابر مجموع دو تابع فوق می‌باشد:

رابطه ۷)

$$V_t^T = V_t^* + V_t^b$$

برای محاسبه حجم اولیه آب ذخیره شده در ابتدای شاخه جریان سریع، V_0^*، و هم‌چنین حجم آب ذخیره شده در تشکیلات کارستی که در طول جریان پایه تخلیه می‌شوند، V_0^b، می‌توان در بالای انتگرال در روابط ۵ و ۶ را به ترتیب مقادیر t_i، و بی نهایت قرار داد:

رابطه ۸)

$$v_0^* = \int_{t=0}^{t_i} q_t^* \, d_t = \int_{t=0}^{t_i} q_0^* \, \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} \, d_t = [\frac{q_0^*}{\varepsilon}(\ln(1+\varepsilon t)\left(1+\frac{\eta}{\varepsilon}\right)-1]$$

رابطه ۹)

$$v_0^b = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_t^b d_t = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_0^b e^{-\propto t}\, d_t = \frac{q_0^b}{\propto}$$

می‌توان نتیجه گرفت که حجم اولیه آب ذخیره شده که در طول فروکش جریان توسط چشمه تخلیه می‌شود، V_0^T، برابر $V_0^T = V_0^* + V_0^b$ ، است.

طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی

مانجین (۱۹۷۵)، بر اساس دو پارامتر K، که نشان دهنده درجه توسعه یافتگی منطقه نشتی کارست و i که شرایط نفوذ آب از سطح به آبخوان می‌باشد برای طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی تعریف نمود. حد تابع رابطه‌ی ۶ در بینهایت مقدار حجم ذخیره دینامیکی در منطقه نشتی (تشکیلات کارست v_{dyn})، را به دست می‌دهد:

رابطه ۱۰)

$$v_{dyn} = \lim_{t\to+\infty} v_t^b = \frac{q_0^b}{\propto}(1\text{-}e^{-\propto t}) = \lim_{t\to+\infty} C\,\frac{q_0^b}{\propto}$$

که در آن v_{dyn}، حجم ذخیره در ابتدای جریان پایه بر حسب متر مکعب، ضریب c، ضریب تبدیل و برابر ۸۶۴۰۰، q_0^b، دبی در ابتدای منحنی جریان پایه بر حسب متر مکعب بر ثانیه و α، ضریب جریان پایه بر حسب، $(day)^{-1}$ می‌باشد. هر چه ذخیره نشتی (v_{dyn})، بیشتر باشد، منطقه نشتی آبخوان کارستی نقش بیشتری در تنظیم دبی خروجی از چشمه را خواهد داشت. از طرفی دیگر حجم جریان انتقالی آبخوان کارستی (V_{trans}) را می‌توان با انتگرال‌گیری از دبی جریان خروجی چشمه (رابطه‌ی ۱) نسبت به زمان برای مدت یک سال محاسبه نمود. به عبارتی V_{trans}، برابر حجم خروجی از چشمه در هر سال می‌باشد به سادگی از رابطه ۱۱ نیز قابل محاسبه است:

رابطه ۱۱)

$$V_{trans} = Q \times t_{rec} \times 86400$$

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

رابطه ۱۲)

$$K = \frac{v_{dyn}}{V_{trans}}$$

پارامتر K هم‌چنین به عنوان معیاری نشان دهنده زمان نگهداشت آب در منطقه نشتی است. در بیشتر آبخوان‌های کارستی ۰/۵>K>۰ می‌باشد. هر چه مقدار K بیشتر و به ۰.۵ نزدیک‌تر باشد، قدرت تنظیمی منطقه نشتی آبخوان کارست در مقایسه با ناحیه غیر اشباع در جریان خروجی چشمه قوی تر است. پارامتر i آبخوان، مقدار تابع بدون بعد (Y_t) در رابطه ۴ به ازای $t = 2\ day$ می‌باشد به عبارتی دیگر $i = Y_{t=2}$. حدود تغییرات پارامتر $0 < i < 1$ می‌باشد. هر چه پارامتر i به صفر نزدیک شود، نفوذ آب از سطح زمین سریعتر، و هر چه به عدد یک نزدیک شود، سرعت تغذیه آب به درون آبخوان آهسته‌تر می‌باشد که بر اساس مقادیر مختلف پارامترهای K و i، پنج ناحیه متمایز به وجود می‌آید: ناحیه ۱: $K < 0.5$ و $i > 0.5$: سیستم آبخوان کارستی پیچیده، توسعه

یافتگی بالا و مخازن مختلفی است. ناحیه ۲: $K < 0.5$ و $0.25 < i < 0.5$: در آبخوان کارستی سیستم مجرایی در بخش بالایی (منطقه نفوذ)، نسبت به بخش‌های نزدیک به خروجی چشمه، توسعه یافته‌تر است. ناحیه ۳: $K < 0.1$ و $0 < i < 0.25$: آبخوان دارای سیستم توسعه یافته کارست هم در بخش نفوذی است و هم در بخش نشتی. به عبارت دیگر در تمام بخش آبخوان کارست، سیستم مجرایی وجود دارد. ناحیه ۴: $0.1 < K < 0.5$ و $0 < i < 0.25$: سیستم آبخوان دارای منطقه نفوذی با درجه کارستی بالا و یک شبکه مجرایی گسترده است، که به ناحیه نشتی منتهی می‌شود. ناحیه ۵: $K > 0.5$: سیستم آبخوان کارستی منطقه نشتی دارای عمق زیاد و درز و شکاف فراوان به صورت جزء یا تماما در زیر رسوبات با نفوذپذیری کم محصور شده است و توسعه کارست آن عمدتا مربوط به دوران کارستی زایی قبلی می‌باشد و ممکن است شبکه‌های مجرایی پالئو در منطقه اشباع آبخوان فعالیت داشته باشد به این نوع آبخوان‌ها، سیستم‌های غیرفعال از نظر کارستی شدن نیز می‌گویند و دارای یک ساختار زهکشی پیچیده با زمان تاخیر بسیار طولانی است. برای بررسی بیشتر زمان پاسخ آبخوان به میزان تغذیه، آنالیز هم‌بستگی متقاطع (CCT)[۲] بین داده‌های دبی چشمه و بارندگی انجام شد. تابع هم‌بستگی متقاطع (r_{qr}) توسط رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود:

رابطه ۱۳)

$$r_{qp} = \frac{C_{qp}(k)}{\sigma_q . \sigma_p}$$

که $C_{qp}(k)$ کوواریانس بین سری زمانی دبی (q_i) و سری زمانی بارش (p_i) به ازای تأخیر k سری بارش است. مقادیر σ_q و σ_p به ترتیب انحراف استاندارد سری‌های زمانی دبی و بارش می‌باشند.

برای بررسی توزیع و مقدار میزان تغذیه آبخوان، سری زمانی مقادیر بارش مؤثر ماهانه (Δ_t) به عنوان تنها عامل تغذیه آبخوان چشمه علی محاسبه شد:

رابطه ۱۴)

$$\Delta_t = (P_t - E_p) - (P_m - E_p) + \Delta_{t-1}$$

که P_t بارش ماه t، P_m بارش متوسط ماهانه و E_p نیز تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه می‌باشد. در رابطه ۱۴ زمانی که $P < E$ باشد، مقدار $P - E = 0$ منظور می‌شود. متغیر Δ_t می‌تواند مثبت (تغذیه آبخوان)، صفر و یا منفی (بدون تغذیه) باشد. برای بهترین توزیع برازشی به داده‌های دبی از برازش توزیع‌های احتمالاتی استفاده شد که این توزیع دارای تابع چگالی تجمعی احتمال (CDF) به شکل رابطه ۱۵ می‌باشد:

رابطه ۱۵)

$$F(z) = \begin{cases} e^{-\left(1+k\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}} & k \neq 0 \\ e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}} & k = 0 \end{cases}$$

که k پارامتر شکل توزیع و متغیر استاندارد z از $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ قابل محاسبه است (σ انحراف استاندارد جامعه X و μ میانگین جامعه X است و $x \epsilon X$).

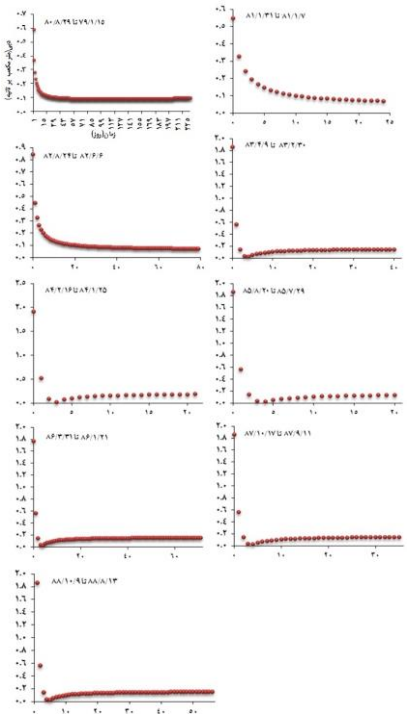
قلمرو توزیع بالا به صورت رابطه ۱۶ تعریف می-شود:

رابطه ۱۶)

$$\begin{cases} 1 + kz > 0 & k \neq 0 \\ -\infty < x < +\infty & k = 0 \end{cases}$$

نتایج

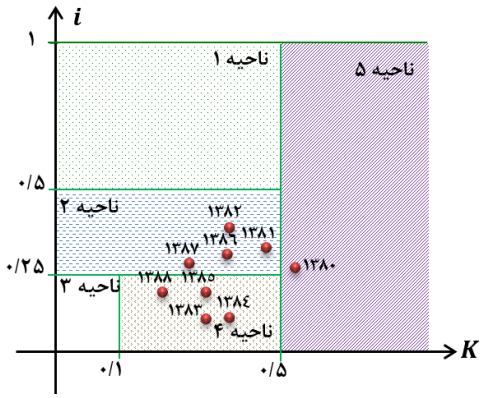
شکل کلی منحنی‌های فروکش سالانه دبی روزانه چشمه علی (شکل ۵) از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ و هم‌چنین مقادیر دبی در ابتدای فروکش (q_0^b) شبیه به یکدیگر می‌باشند اما از سال ۱۳۸۳ به بعد شکل منحنی‌های فروکش اندکی با دوره قبل متفاوت است به طوری که در پایان جریان سریع مقدار دبی خروجی چشمه به حدود صفر نزدیک شده سپس با مشارکت جریان پایه با اندکی تأخیر، مقدار دبی افزایش نشان می‌دهد. مدت زمان مشارکت جریان سریع (t_i) در دبی خروجی چشمه برای دوره‌های ۸۲-۱۳۸۰ نسبت به دوره-های بعدی بیشتر است. این موضوع حاکی از تأخیر در مشارکت جریان پایه در دوره جدید نسبت به دوره قبل از آن است. برای هر منحنی فروکش، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه K و i به طور جداگانه استخراج و به همراه محاسبه این دو پارامتر در جدول ۱ ارائه شده‌اند. حدود تغییرات پارامترهای K و i برای سال‌های مختلف به ترتیب ۰/۵۶ > K > ۰/۲۴ و ۰/۴۹ > i > ۰/۲۲ به دست آمده است. در بیشتر سال‌های مورد مطالعه، پارامتر K به دست آمده دارای مقادیری نزدیک به حد بالای آن (۰/۵) است که نشان دهنده قدرت کنترلی بیشتر بخش نشتی (اشباع) نسبت به بخش غیر اشباع آبخوان در جریان خروجی چشمه می‌باشد. هم‌چنین مقادیر به دست آمده برای پارامتر i که همگی کمتر از ۰/۵ می-باشند، بیانگر نفوذ سریع آب از سطح زمین به درون آبخوان است. بر اساس مقادیر به دست آمده برای دو پارامتر K و i بر روی شکل ۶ طی تقسیم‌بندی مانجین، آبخوان کارستی چشمه علی دامغان در ناحیه دوم قرار می‌گیرد که نشان می-دهد سیستم مجرایی در بخش بالایی (منطقه نفوذ)، نسبت به بخش‌های نزدیک به خروجی چشمه دارای درجه توسعه یافتگی بالاتری است که این موضوع با تخلیه کوتاه‌مدت جریان سریع و هم‌چنین نفوذ سریع آب از سطح زمین به درون آبخوان نیز توجیه‌پذیر است. علاوه بر این، تغییرات مقادیر حجم ذخیره در ابتدای جریان پایه (V_{dyn}) و ذخیره نشتی (V_{dyn}) در طی نه سال نشان می-دهد که حدود ۷۵٪ از کل حجم آب ذخیره شده سالانه آبخوان (معادل ۵/۶ میلیون متر مکعب)، مربوط به بخش اشباع (جریان پایه) و بقیه (معادل ۱/۹ میلیون مترمکعب) مربوط به ذخیره نشتی است (جدول ۱). بیشترین حجم آب ذخیره شده در آبخوان مربوط به سال ۸۵-۱۳۸۴ برابر با ۱۴/۷ میلیون متر مکعب برآورد شده است.



شکل ۵: منحنی فروکش جریان چشمه طی سال‌های مختلف

جدول ۱: نمایش مقادیر متوسط پارامترهای به دست آمده در طول دوره آماری

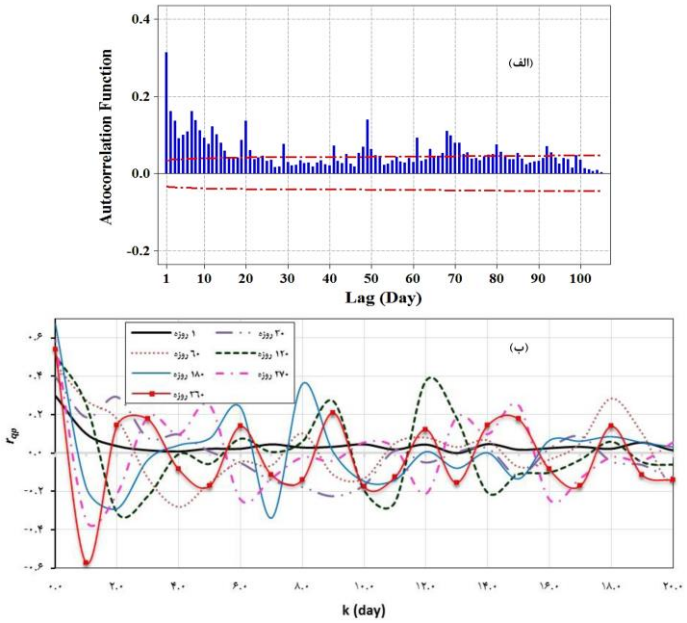
سال	k (-)	α $(day)^{-1}$	q_0^b (m^3/s)	v_{dyn} (m^3)	v_{trans} (m^3)	i (-)	ε (day)	η $(day)^{-1}$	t_i (day)
۱۳۸۰	۰/۵۶	۰/۰۰۴	۰/۰۸۰	۱۷/۲۸	۳۰/۹۰۵	۰/۳۶	۰/۷۰	۰/۰۷۱	۱۴
۱۳۸۱	۰/۴۶	۰/۰۰۵	۰/۱۳۲	۲۲/۸۰۹	۴۹/۵۱۱	۰/۴۰	۰/۳۴	۰/۱۲۵	۸
۱۳۸۲	۰/۳۹	۰/۰۰۶	۰/۱۲۵	۱۸/۱۴۴	۴۶/۰۴۲	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۰۸۳	۱۲
۱۳۸۳	۰/۳۰	۰/۰۰۷	۰/۱۲۳	۱۵/۱۸۱	۵۰/۱۴۲	۰/۲۲	۰/۶۵	۰/۲۵	۴
۱۳۸۴	۰/۳۶	۰/۰۰۲	۰/۰۹۰	۳۸/۸۸	۱۰۷/۸۵۳	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۳۳	۳
۱۳۸۵	۰/۲۸	۰/۰۰۳	۰/۱۱۰	۳۱/۶۸	۱۱۱/۶۶۷	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۳۳	۳
۱۳۸۶	۰/۳۹	۰/۰۰۶	۰/۰۷۰	۱۰/۰۸	۲۵/۵۴۴	۰/۴۰	۰/۱۲	۰/۲۵	۴
۱۳۸۷	۰/۳۰	۰/۰۰۷	۰/۰۹۰	۱۱/۱۰۸	۳۶/۵۸۱	۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۲۵	۴
۱۳۸۸	۰/۲۴	۰/۰۰۷	۰/۰۸۰	۹/۸۷۴	۴۱/۳۱۲	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۲۵	۴



شکل ۶: طبقه‌بندی سیستم آبخوان‌های کارستی بر اساس روش Mangin

همبستگی متقاطع بین بارش و دبی چشمه

تابع خود همبستگی دبی روزانه چشمه در شکل ۷ الف ارائه شده است که همبستگی معنی‌دار حداکثر تا ۲۰ روز را نشان می‌دهد. بیشترین همبستگی به مقدار ۰/۳۱ به ازای تأخیر زمانی یک روزه مشاده می‌شود. تابع همبستگی متقاطع برای سری‌های مختلف ۱، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ روزه بارش متحرک تجمعی و سری روزانه دبی به ازای ۲۰ تأخیر، طی دوره آماری بین سال-های (۸۹-۱۳۸۰) بر اساس رابطه ۱۳ محاسبه و نتایج به دست آمده در شکل ۷ ب نشان داده شده است. برای بارش و دبی روزانه (نمودار ۱ روزه در شکل ۷ ب) بیشترین همبستگی به ازای $k = 0$ برابر با ۰/۳۰ محاسبه گردید که نسبت به سایر سری‌های متحرک تجمعی کمترین مقدار را داراست. برای سری‌های بارش متحرک تجمعی بالاتر، مقدار همبستگی افزایش می‌یابد که بیانگر ویژگی کنترل کنندگی دبی خروجی از چشمه توسط بارش تجمعی در طی زمان‌های مختلف است. بیشترین همبستگی بین سری بارش متحرک تجمعی ۱۸۰ روزه به ازای $k = ۰$ برابر با ۰/۶۷ محاسبه شده است. نکته قابل توجه اینکه در تمام سری‌های متحرک تجمعی بارش، بیشترین همبستگی بین این مقادیر و داده‌های دبی در تأخیر صفر رخ می‌دهد و بر اساس آزمون آماری t در سطح α=۰/۰۵ تمام مقادیر همبستگی-های متقاطع بین سری تجمعی بارش و دبی یک روزه تا ۲۷۰ روزه در تأخیر صفر معنی‌دار هستند (جدول ۲) اما از سری متحرک تجمعی ۳۰۰ روزه به بعد این همبستگی معنی‌دار نیست. این موضوع نشان دهنده این است که بارش‌های همان روز تا ۳۰۰ روز قبل بر جریان خروجی چشمه علی در روز متناظر تأثیر قابل توجهی دارند به عبارتی حداقل و حداکثر زمان انتقال آب بارش در تشکیلات آبخوان حدوداً بین یک تا ۳۰۰ روز به طول می‌انجامد.



شکل ۷: الف) تابع خود همبستگی دبی روزانه چشمه علی؛ ب) همبستگی متقاطع بین بارش متحرک تجمعی و دبی روزانه طی دوره آماری بین سال‌های (۸۹-۱۳۸۰)

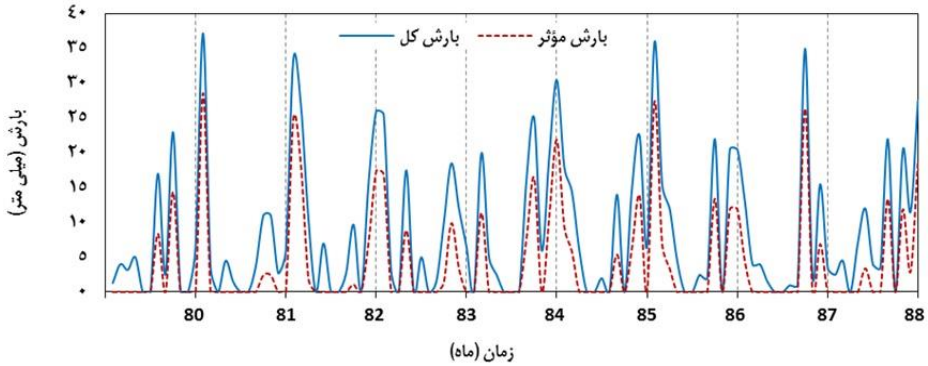
جدول ۲: نتایج آزمون t برای بررسی معنی‌داری همبستگی بین بارش تجمعی و دبی در تأخیر صفر

سری متحرک	مقدار همبستگی	آزمون t		
		شاخص	مقدار	P-value
۱	۰/۳۰	۱۷/۸۹	۱/۹۶	۰/۰۰۰ [a]
۳۰	۰/۴۱	۴/۶۷	۱/۹۹	۰/۰۰۰ [a]
۶۰	۰/۴۶	۳/۷۷	۲/۰۱	۰/۰۰۰ [a]
۱۲۰	۰/۵۱	۳/۰۲	۲/۵۶	۰/۰۰۶ [a]
۱۸۰	۰/۶۷	۳/۷۲	۲/۱۱	۰/۰۰۲ [a]
۲۷۰	۰/۵۹	۲/۳۱	۲/۲۳	۰/۰۴۵ [a]
۳۰۰	۰/۴۶	۱/۵۵	۲/۲۶	۰/۱۵۷ [b]
۳۶۰	۰/۵۴	۱/۸۱	۲/۳۰	۰/۱۰۸ [b]

[a] معنی دار در سطح اعتماد ۹۵٪ [b] عدم معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵٪ (α=۰/۰۵)

برآورد میزان تغذیه (بارش مؤثر) به آبخوان

روند تغییرات بارش مؤثر ماهانه آبخوان چشمه علی در طول دوره آماری ۸۸-۷۹ بر اساس رابطه ۱۴ محاسبه همراه با تغییرات بارش کل در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: سری زمانی تغییرات بارش مؤثر ماهانه آبخوان و بارش کل

سری زمانی بارش مؤثر محاسبه شده بر اساس آزمون من-کندال در سطح معنی‌داری α= ۰/۰۵، روند معنی‌دار صعودی (z=۱/۰۸ , P-value=۰/۱۴) یا نزولی (z=۱/۰۸ , P-value=۰/۸۶) را نشان نداد.

تحلیل فراوانی خشکسالی دبی چشمه

به منظور تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی، استفاده از شاخص‌های خشکسالی برای ارائه نمودن تصویر روشنی از نمودهای ذخایر آبی، کارآیی بالایی در مسائل مدیریتی دارند (هایز، ۱۹۹۹). شاخص‌های متداول در تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی شامل شاخص‌های سری جریان حداقل، تحلیل دنباله‌ها یا کمبودها (یوجویچ، ۱۹۶۷) و شاخص‌های مستخرج شده از منحنی تداوم جریان (شو، ۱۹۵۴) می‌باشند. به دلیل عدم ذخیره‌سازی آب چشمه علی در مخزن، به نظر می‌رسد استفاده از روش سری جریان‌های حداقل مناسب‌تر باشد (خزایی و همکاران، ۱۳۸۲). تحلیل فراوانی مقادیر حداقل دبی چشمه با تداوم‌های مختلف می‌تواند به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رفتار هیدرولوژیکی آبخوان در دراز مدت و هم-چنین مدیریت کمی و کیفی بهینه بهره‌برداری از منابع آب چشمه مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که توزیع حدی گامبل نوع سوم و توزیع لوگ نرمال بیشترین کاربرد را در مطالعات تحلیل فراوانی خشکسالی در هیدرولوژی آب‌های سطحی دارند (اسماختین، ۲۰۰۱). خزایی

و همکاران (۱۳۸۲) در تحلیل خشکسالی رودخانه قره‌سو واقع در استان کرمانشاه برای سری جریان-های حداقل ۱، ۷، ۱۵ و ۳۰ روزه توزیع لوگ پیرسون تیپ سه را انتخاب کردند اسلامیان و همکاران (۱۳۷۹)، با انجام تحلیل فراوانی بر روی جریان‌های حداقل با تداوم‌های ۷، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ روزه تعدادی از ایستگاه‌های حوضه آبریز مازندارن، توزیع لوگ پیرسون تیپ سوم را به عنوان بهترین توزیع برازشی به جریان‌های حداقل منطقه معرفی نمودند. Fiorillo و همکاران در سال ۲۰۰۷، آنالیز فراوانی داده‌های دبی‌های حداقل روزانه چشمه Serino واقع در جنوب اسپانیا را انجام و نتیجه گرفتند که توزیع گامبل نوع سوم، برازش بهتری نسبت به سایر توزیع‌های آماری دارد.

جدول ۳: مشخصات آماری داده‌های دبی سه، هفت و ده روزه چشمه علی

آماره	دبی سه روزه	دبی هفت روزه	دبی ده روزه
تعداد	۱۰۹۵	۴۶۹	۳۲۸
میانگین	۲/۱۱۰	۴/۹۳۹	۱/۸۷
میانه	۰/۹۰	۰/۸۷	۰/۸۵
مینیمم	۰/۲	۰/۲	۰/۲
ماگزیمم	۰/۱۱۸۰	۰/۵۷۴	۰/۵۷۴
واریانس	۰/۹۰۴۲	۰/۳۴۵۰	۰/۲۷۸۰
ضریب تغییرات	۰/۸۶۳	۰/۶۲۵	۰/۶۰۵
ضریب چولگی	۴/۶۴	۳/۳۴	۳/۵۶

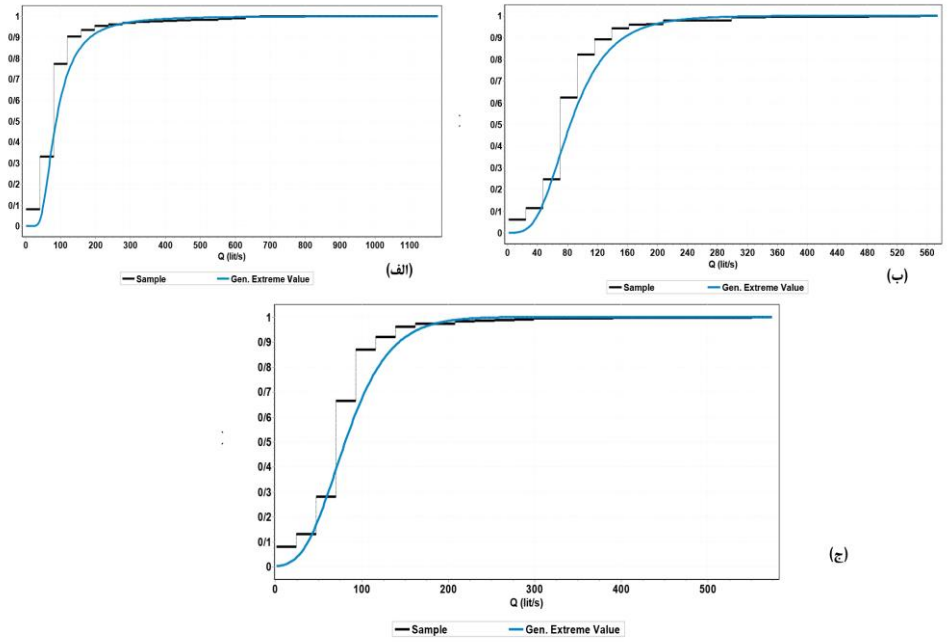
فرهنگ بین‌المللی هیدرولوژی جریان کم را به عنوان جریان آب رودخانه در طول آب و هوای خشک طولانی مدت تعریف می‌کند (پاریدا و همکاران، ۱۹۹۸). علت محاسبه جریان کم برای روزهای پیاپی به حداقل رساندن اثر تغییرات و نوسانات جریان است (اسدی و همکاران، ۱۳۸۸). برای تحلیل خشکسالی منابع آب سطحی تأمین کننده نیازهای کشاورزی و شرب، استفاده از شاخص سری جریان حداقل روزانه، ۳ روزه، ۷ روزه، ۱۵ و ۳۰ روزه اهمیت فراوانی دارند (ساندوال، ۲۰۰۹). لذا در این پژوهش به منظور تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی چشمه‌علی ابتدا سری زمانی داده‌های حداقل جریان با تداوم‌های ۳، ۷ و ده روزه محاسبه گردید و سپس اقدام به برازش توزیع‌های آماری مرسوم در داده‌های حدی هیدرولوژی در سطح اطمینان ۹۵٪ به این داده‌ها گردید. خلاصه آماره‌های توصیفی داده‌های سه نوع دبی حداقل ۳، ۷ و ده روزه در جدول ۳ می-باشد. داده‌های دبی حداقل ده روزه نسبت به دو نوع دیگر از تغییرات و پراکندگی کمتری برخوردار. عدم وجود روند بر اساس آزمون من-کندال در داده‌های سه نوع جریان حداقل، نشان-دهنده عدم وجود تغییرات سیستماتیک و در نتیجه همگنی و تصادفی بودن داده‌ها را نشان می‌دهد. نتایج برازش توزیع‌های احتمالاتی نشان داد که بر اساس آزمون نکویی برازش کلموگروف-اسمرینوف (K-S)، توزیع مقادیر حدی کلی (GEV) به عنوان بهترین توزیع برازشی به هر سه نوع داده‌های دبی شناخته شد. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: نتایج آزمون‌های نکویی K-S برای توزیع برازشی گامبل نوع سوم به داده‌های دبی حداقل ۳، ۷ و ۱۰ روزه

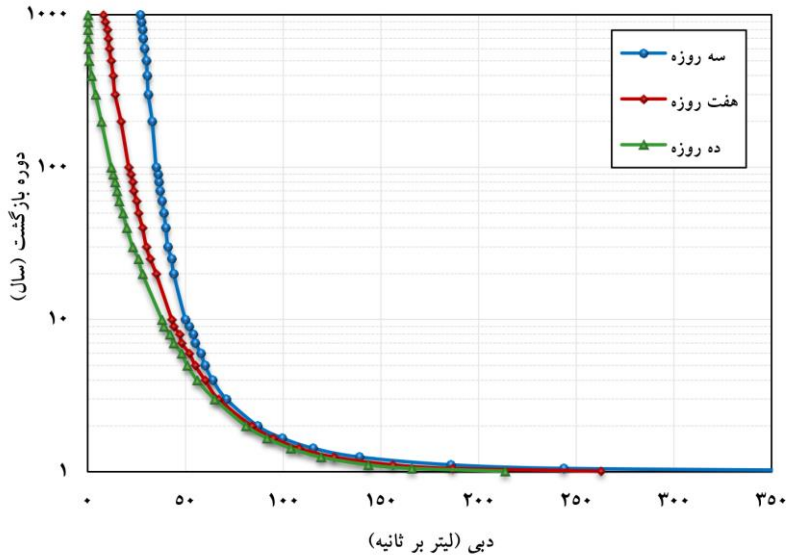
نوع دبی	توزیع برازش یافته	تابع چگالی تجمعی توزیع	آزمون K-S آماره	آزمون K-S P-Value	آزمون K-S مقدار
۳ روزه	توزیع حدی کلی (GEV)	$F(x) = e^{-\left(1+0.341\times\frac{x-74.74}{32.81}\right)^{-\frac{1}{0.341}}}$	0.156	0	0.041
۷ روزه		$F(x) = e^{-\left(1+0.079\times\frac{x-71.10}{34.52}\right)^{-\frac{1}{0.079}}}$	0.153	4.14E-10	0.062
۱۰ روزه		$F(x) = e^{-\left(1-0.050\times\frac{x-68.39}{35.35}\right)^{\frac{1}{0.050}}}$	0.157	1.34E-7	0.075

* در هر سه مورد، مقدار بحرانی از مقدار حداکثر آماره کوچکتر است ($D<D_{max}$)، لذا فرض صفر مبنی بر عدم وجود اختلاف بین داده‌های تئوری (توزیع) و تجربی، در سطح اعتماد ۹۵٪ پذیرفته می‌شود (آزمون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ = α انجام شده است).

شکل توزیع چگالی تجمعی برازش یافته به سه نوع دبی به همراه مقادیر متناظر مشاهداتی در شکل ۹ نشان داده شده است. برای هر سه نوع دبی، توزیع برازشی GEV برای مقادیر دبی بیشتر از میانگین کارآیی بالایی نسبت به مقادیر کمتر از میانگین نشان می‌دهد و با دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰۰ ساله بر اساس توزیع برزشی در سطح اطمینان ۹۵٪ پیش‌بینی و نمودار آنها در شکل ۱۰ رسم شده است. مقادیر دبی با توالی ۳، ۷ و ده روزه با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله (احتمال وقوع ۱٪) به ترتیب برابر با ۳۵، ۲۱ و ۱۲ لیتر بر ثانیه برآورد شده است که با در نظر گرفتن میانگین مشاهداتی جریان حداقل ۳، ۷ و ده روزه به ترتیب برابر با ۱۱۰، ۹۴ و ۸۷ لیتر بر ثانیه می‌توان گفت که دبی‌های پیش‌بینی شده به ترتیب ۳۲٪، ۲۲٪ و ۱۴٪ میانگین مشاهداتی متناظر هستند. دبی میانگین حداقل جریان روزانه چشمه برابر با ۱۳۹ لیتر بر ثانیه به ترتیب با احتمال متوسط ۸۵٪ از روی سری‌های حداقل ۳، ۷ و ده روزه قابل پیش-بینی است. آبدهی متوسط روزانه چشمه که در ۹۹٪ مواقع می‌توان انتظار داشت برای سری‌های حداقل با توالی ۳، ۷ و ده روزه به ترتیب برابر و کمتر از ۳۵۰، ۲۶۲ و ۲۱۳ لیتر بر ثانیه برآورد می‌شود که این مقادیر در مباحث تأمین نیازهای آبی شرب، کشاورزی و مدیریت کیفی و حقابه زیست محیطی رودخانه پائین دست چشمه دارای اهمیت فراوان است. دبی که به طور متوسط در ۵۰٪ روزهای سال می‌توان از چشمه انتظار داشت برای هر سه نوع دبی حدود ۸۴ لیتر بر ثانیه برآورد می‌شود. براساس نمودار شکل ۱۰ برای دوره‌های بازگشت کمتر از ۵ سال که دارای احتمال وقوع بالایی نیز هستند تفاوت چندانی بین دبی‌های پیش‌بینی شده ۳، ۷ و ده روزه مشاهده نمی‌شود. به عبارتی دیگر، تداوم خشکسالی ۱۰ روزه با یک روزه از نظر مقدار تفاوت چندانی ندارند. بنابراین تأثیر گزینه‌های مدیریتی در تأمین نیازهای آبی شرب، کشاورزی، زیست محیطی و منابع طبیعی نسبت به تداوم خشکسالی در منطقه در بروز شدت خشکسالی دارای اهمیت می‌باشد.



شکل ۹: تابع چگالی تجمعی برازش یافته به همراه مقادیر مشاهداتی به داده‌های دبی الف) سه، ب) هفت و ج) ده روزه.



شکل ۱۰: مقادیر دبی‌های حداقل ۳، ۷ و ده روزه چشمه‌علی به ازای دوره بازگشت‌های مختلف بر اساس تابع احتمالاتی برازشی

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که می‌توان آبخوان کارستی چشمه‌علی دامغان را در ناحیه دوم طبقه‌بندی مانجین (۱۹۷۵) در نظر گرفت که نشان‌دهنده این واقعیت است که سیستم مجرایی در بخش بالایی آبخوان (منطقه نفوذ یا نشتی)، نسبت به بخش‌های نزدیک به خروجی چشمه (بخش اشباع) دارای درجه توسعه یافتگی بالاتری است که این موضوع با تخلیه کوتاه‌مدت جریان سریع و هم‌چنین نفوذ سریع آب از سطح زمین به درون آبخوان نیز هم‌خوانی دارد.

با وجود عدم تغذیه در مردادماه، شاهد آبدهی قابل توجه چشمه در این ماه هستیم. که این مسئله با نتایج آنالیز همبستگی متقاطع بین بارش تجمعی و دبی خروجی چشمه نیز هم‌خوانی دارد زیرا که حداقل و حداکثر زمان انتقال آب بارش به عنوان تنها منبع تغذیه کننده آبخوان از سطح زمین تا زمانی که در دبی خروجی مشارکت نماید، حدوداً بین یک تا ۳۰۰ روز به طول می‌انجامد که نشان دهنده سرعت بالای تخلیه جریان سریع (جریان بخش غیراشباع) و حجم بالای ذخیره در تشکیلات کارستی (بخش اشباع) است و در نهایت تحلیل فراوانی دبی‌های حداقل سه، هفت و ده روزه چشمه نشان داد که برای دوره‌های بازگشت کمتر از ۵ سال که دارای احتمال وقوع بالایی نیز هستند تفاوت چندانی بین دبی‌های پیش‌بینی شده این سه نوع تداوم مشاهده نمی‌شود از این رو اعمال مدیریت بهینه بهره‌برداری و تخصیص منابع آب چشمه‌علی متناسب با تداوم و شدت خشکسالی از اهمیت فراوانی برخوردار است.

پانوشت

2-Cross Correlation

1-Serino

منابع

-اسدی، ا.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، ملک پور، ا.، فاخری فرد، ا. و دین پژوه، ی.، ۱۳۸۸. پایش خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از تئوری ران (مطالعه موردی حوضه آجی چای آذربایجان شرقی)، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان.

-اسلامی، س.س.، زارعی، ع. و ابریشم‌چی، ا.، ۱۳۷۹. پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک، اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با کم آبی و خشکسالی، دانشگاه باهنر کرمان.

-افراسیابیان، ا.، ۱۳۷۲. مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی، کرمانشاه-تهران، ص ۱۲۶-۱۳۷.

-پایگاه ملی داده‌های علوم زمین، ۱۳۹۵، www.ngdir.ir.

-خزایی، م.، تلوری، ع. و جباری، ا.، ۱۳۸۲. تحلیل توزیع فراوانی خشکسالی هیدرولوژیک مطالعه موردی حوضه رودخانه قرسو، مجله جغرافیا و توسعه، جلد اول، شماره ۲، ص ۴۵-۵۶.

-شفیعی مطلق، خ. و لشکری پور، غ.ر.، ۱۳۸۷. هیدروژئولوژی چشمه کارستی کورسا دهدشت، چهارمین همایش زمین‌شناسی و محیط زیست، اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.

-شکری، م.، اشجاری، ج. و کرمی، غ.ح.، ۱۳۹۰. تاثیر تکتونیک و چینه‌شناسی در جهت یابی جریان آب زیرزمینی در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.

-شهبازی، ر. و فیض نیا، س.، ۱۳۹۰. تاثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوزه آبخیز کویر مرکزی ایران (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چشمه علی دامغان)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۱، ص ۲۲-۳۵.

-کرمی، غ.ح.، ۱۳۸۳. بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی چشمه علی دامغان، طرح پژوهشی با کد ۲۱۰۷، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۴۷ ص.

-کرمی، غ.ح، ۱۳۸۸. نقش چینه‌شناسی در توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان، مجله پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، دوره ۲۵، شماره ۱، بهار ۱۳۸۸، ص ۳۹-۵۲.

-کریمی وردنجانی، ح.، ۱۳۸۹. هیدروژئولوژی کارست، انتشارات ارم شیراز، ۳۹۹ ص.

-Atkinson, T.C., 1977. Diffuse flow and conduit flow, Journal of Hydrology, v. 35, p. 93 -110.

-Bonacci, O., 1987. Karst hydrogeology and water resource- past, present and future, IAHS publ, v. 164, p. 205-213.

-Bonacci, O., 1993. Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers, Hydrogeological sciences-journal, des science hydrologiques, v. 38 (1), p. 51-62.

-Bonacci, O. and Jukić, I., 2015." Karst spring catchment: an example from Dinaric karst", Environ Earth Sci Journal, Doi: DOI 10.1007/s12665-015-4644-8. 74:6211–6223.

-Bonacci, O.Z., eljkovic, I. and Galic, A., 2013. Karst rivers' particularity: an example from Dinaric karst (Croatia/Bosnia and Herzegovina), Environ Earth Sci, v. 70(2), p. 963-974.

-Chow, V.T., 1954. The log probability law and its engineering applications, v. 80(536), p. 1-25, Proceedings of the ASCE, USA.

-Cotton, F.A. and Edwards, W.T., 1968. The crystal and molecular structure of nitropentamminocobalt (III) bromide, Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts 02139, U.S.A., v.24(4), p. 474-477.

-Ford, D. and Williams, P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, Second edition, p. 553.

-Fiorillo, F., Espesito, L. and Guadagno, F.M., 2007. Analysis and forcast of water resources in an ultra-centenarian spring discharge series from Serino (southern Italy), Journal of Hydrology, v. 336, p. 125-138.

-Gumbel, E.J., 1958. Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York, USA, 375 p.

-Hayes, S.C., Strosahl, K. and Wilson, K.G., 1999. Acceptance and Commitment Therapy: An experiential approach to behavior change, New York: Guilford Press, 470 p.

-Kuhta, M., Brkić, Ž. and Stroj, A., 2012. "Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia", Geologia Croatica, v. 65 (1), p. 41-52.

-Kresic, N. and O., 2010. "Spring discharge hydrograph, In Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability", Elsevier ch 4, p. 129-163.

-Mangin, A., 1975. Contribution a l'etude hydrodynamique des aquifères karstiques, Annales de Speleologie, v. 26, p. 283-339.

-Maillet, E., 1905. Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale, Paperback: 280 pages, Publisher: Kessinger Publishing, LLC (February 6, 2009), Language: French.

-Milanovic, P., 1981. Karst Hydrogeology, Water Resources Pubns, 434 p.

-Padilla, A., Pulido-Bosch, A. and Mangin, A., 1994. Relative importance of base-flow and quick-flow from hydrographs of karst spring, Ground water, v. 32(2), p. 267-277.

-Parida, B.P., Kachroo, R.K. and Shrestha, D.B., 1998. Regional flood frequency analysis of Mahi-Sabarmati basin (Subzon 3-a) using index flood procedure with L-moments. J. Water resource management, v. 12, p.1-12

-Sandoval, E., 2009. Mixed Disteributions in Low-Flow Frequency Analysis. Revista Ingenieria Investigación y Tecnología, v. 10(3), p. 247-253.

-Smakhtin, V.Y. and Toulouse, M., 1998. Relationships between low-flow characteristics of South African streams, South African Journals, v. 24(2), p. 107-112.
-Todd, H. and Carol, W.M., 1998. Modeling of storm responses in conduit flow aquifers with reservoirs, Journal of Hydrology, v. 208(1–2), p. 82-91.
-Yevjevich, V. and Jeng, R.I., 1967. "Effects of in consistency and a homogeneity on hydrologic time series, "Proceedings International Hydrology Symposium, Fort Collins, Colorado, September 1967, v. 1, p. 58.