

تحلیل هیدروژئومورفولوژیک آبخوان کارستی چشمه ساسان-دشت ارژن فارس

سید موسی حسینی* - استادیار گروه هیدروژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران.
مهران مقصودی - دانشیار گروه هیدروژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران.
ابوالقاسم گورابی - استادیار گروه هیدروژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران.
هاجر قدیری - دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۰۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۱۰/۲۰

چکیده

در دو دهه اخیر حفاظت و مدیریت صحیح منابع آب موجود در آبخوان‌های کارستی، به دلیل اهمیت ویژه آن‌ها در تامین آب شرب، مورد توجه بسیار بوده است. چشمه ساسان در جنوب غرب استان فارس، در سمت راست رودخانه شاپور و در قاعده سازند آسماری-چهرم ظاهر شده است. آب این چشمه در شهرستان کازرون در زمینه اقتصاد کشاورزی و تامین آب منطقه بخصوص شهر بوشهر از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق به منظور طبقه بندی آبخوان کارستی و شبیه سازی منحنی فروکش آبدهی و تخمین حجم آب ذخیره شده در بخش اشباع و غیر اشباع آبخوان کارستی از روش مانجین استفاده شد. نتایج نشان دهنده شیب ملایم منحنی فروکش و ذخیره دینامیکی زیاد که کمتر تحت تاثیر بارش قرار می گیرد است. از نظر طبقه بندی مانجین، سیستم آبخوان کارستی منطقه نشتی، دارای عمق زیاد و درز و شکاف فراوان بصورت جزء یا تماماً در زیر رسوبات با نفوذپذیری کم محصور شده است. روش مانجین هماهنگی نسبتاً خوبی در شبیه سازی مقادیر دبی های دوره فروکش طی سالهای مختلف دارد و حداکثر درصد خطای روش مانجین در برآورد حجم آب ذخیره شده در آبخوان کارستی برابر با ۵/۵۱ درصد می باشد. بطور متوسط حدود ۷۵ درصد از کل حجم آب ذخیره شده سالانه در آبخوان مربوط به بخش ذخیره اشباع (جریان پایه) و بقیه مربوط به غیراشباع (جریان سریع) است. در این آبخوان کارستی، شبکه کارستی بخوبی توسعه نیافته است و سیستم از نوع افشان است. با توجه به اینکه عمدتاً منطقه از آهک تشکیل شده است اشکال کارستیک در منطقه توسعه یافته اند که نقش مهمی در جذب نزولات جوی و نفوذ آب دارند و در نهایت با توجه به قرار گیری چشمه ساسان در سازند آسماری-چهرم و حجم آب، کارست زایی در قسمت های پایین دست، به صورت انواع لایه ها نمایان می شود.

واژگان کلیدی: چشمه ساسان، آبخوان کارستی، روش مانجین، شبیه سازی منحنی فروکش، طبقه بندی آبخوان

مقدمه

در سال های اخیر، رشد جمعیت و به تبع آن کمبود منابع آب شرب، اهمیت مطالعه آبخوان های کارستی را دو چندان نموده است. بسیاری از منابع آب کارستی در ارتفاعات و کوهستانها قرار دارند و از این لحاظ کمتر در معرض آلودگیها می باشند (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹، ۶). تقریباً یک پنجم از سطح کره زمین توسط سازندهای مختلف کربناته پوشیده شده است (لاموراکس^۱، ۱۹۹۱). از طرف دیگر بیش از ۲۵ درصد جمعیت جهان یا مستقیماً بر روی مناطق کارستی زندگی می کنند و یا آب مورد نیاز خود را از منابع کارستی تامین می نمایند. در ایران حدود ۱۱ درصد (بر اساس نظر احمدی پور، حدود ۱۳ درصد) از سطح کل کشور و حدود ۹۰ درصد از ارتفاعات زاگرس از سازندهای کارستی تشکیل شده است (افراسیابیان، ۱۳۷۷). آبخوانهای کارستی، مخازن زیرزمینی ناهمگن هستند که آب در شبکه های مرتبط به هم شکاف ها، مغاره ها و مجاری درون آنها جمع آوری می شوند. سطح ایستابی در این آبخوانها یک سطح پیوسته نیست و دارای شیب منطقه ای و محلی است. آبخوان های کارستی در ازای پدیده های دینامیکی که نسبت به زمان و مکان عمل می نمایند توسعه پیدا می کنند. موقعیت هندسی آنها به سرعت تغییر می یابد (میلانویچ^۲، ۱۹۸۱، ۱۲۴). بارزترین نتیجه کارستی شدن مورفولوژی خاصی است که مناطق کارستی را از نواحی دیگر غیر کارستی کاملاً متمایز می سازد شکلهای کارست و تکامل تدریجی آنها نتیجه مستقیم عمل انحلال آب در محیط های کربناته انحلال پذیر می باشد (میلانویچ، ۱۹۸۱؛ ۶۰). جریان آب و ساختارهای تکتونیکی از مهم ترین عوامل کارستی شدن سنگ های انحلال پذیر هستند (قبادی، ۱۳۸۶، ۸۷). واژه کارست رابطه مستقیم با سنگهای کربناته، بخصوص بیشتر با سنگهای آهکی و دولومیتی دارد، هر چند فرایند کارستی شدن در سازندهای گچی، ژپس و نمک نیز اتفاق می افتد (میلانویچ، ۱۹۸۱؛ ۲۶). سیستم های آبخوان کارستی غالباً جریان آب متمرکز خود را به یک چشمه ی بزرگ تخلیه می کنند که شکل و نرخ فرود هیدروگراف آن می تواند اطلاعات قابل توجهی در مورد ذخیره و خصوصیات ساختاری آبخوان دارا باشد. در سفره های کارستی، در شرایطی که میزان جریان کم بوده و یا حالت عادی باشد، آب از تخلخل زمینه (ماتریکس) وارد مجاری می گردد. در حالیکه در هنگام بالا بودن جریان (سیلابی) و گرادیان هیدرولیکی کافی، آب از مجاری وارد زمینه می گردد (مارتین و اسکرتون^۳، ۲۰۰۱). در نتیجه جریان افشان زمینه، آبدهی چشمه را در هنگام جریان پایه کنترل می نماید، در حالیکه بعد از بارندگی ها، جریان مجرائی قسمت عمده ی جریان چشمه را تامین می کند (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹؛ ۲۷۶).

با توجه به اهمیت مناطق کارستی در تغذیه منابع آب زیرزمینی تحقیقات نسبتاً جامعی در رابطه با کارست در جهان و ایران و بخصوص زاگرس انجام گرفته است. از آنجا که تحقیقات انجام شده در خارج از کشور در زمینه بررسی هیدرولوژی چشمه های متنوع و فراوان می باشد می توان به چند مورد اشاره کرد، که عبارتند از: بوناچی^۴ (۱۹۹۳) به آنالیز جزئیات و توصیف موارد متعددی از نقاط شکست در منحنیهای فروکش از طریق ارزشهای مختلف ضریب فروکش در معادله مایلت^۵ (۱۹۰۵)، پرداخته است وی رابطه بین ضریب فروکش و ضریب مخزن خطی را با استفاده از هیدروگراف آب زیرزمینی بررسی، و نشان داده است که ضریب مخزن خطی با توجه به زمان، طبق تغییرات شرایط جریان در توده سنگی کارستی تغییر میکند. پادیللا^۶ و همکاران (۱۹۹۴) هیدروگراف های فروکش چهار چشمه کارستی در اروپا را توسط معادلات مانجین و کناین مورد تحلیل قرار دادند و درصد مشارکت جریان سریع و پایه از حجم کل آب ذخیره شده در آبخوان را تعیین نمودند. تد و کارول^۷ (۱۹۹۸)، به کمک مدل سازی عددی جریان مجرای، واکنش هیدروگراف چشمه را

1- LaMoreaux

2- Milanovic

3- Martin and Screaton

4- Bonacci

5- Maillet

6- Padilla

7- Todd and Carol

در مقابل پاسخ هیدرولوژیکی آبخوان کارستی مورد بررسی قرار دادند. سامانی^۱ (۲۰۰۱) در تحقیقی به بررسی رابطه بین بارش و ارتفاع سطح ایستابی و آبدهی چشمه‌های کارستی حوضه‌ی مهارلو در استان فارس به کمک روشهای سری زمانی دوگانه پرداخت و نتایج تحقیق حاکی از آن است که یک تاخیر زمانی ۱ تا ۳ ماهه بین رخداد بارش و عکس‌العمل سطح ایستابی در چاه‌ها و آبدهی چشمه‌ها وجود دارد. اشجاری و رئیسی (۲۰۰۷) به بررسی تاثیر لیتولوژی در شیمی آب آبخوان‌های کارستی در محدوده‌ی ای زاگرس جنوب شرقی در ایران پرداختند. در این پژوهش از اطلاعات هیدروشیمی ۱۹۵ چشمه استفاده شده و نتایج نشان می‌دهد که ترکیب سنگ شناسی سازندها و وسعت رخنمون آنها در حوضه تغذیه کننده چشمه کارستی دارای اثر عمده‌ای بر کیفیت آب بوده و رخنمون مارن و آهک مارنی در حوضه تغذیه کننده چشمه کارستی میتواند آب بیکربناته را به بیکربنات سولفات تغییر دهد. رخنمون گچ و انیدریت آبی با تیپ سولفات تولید می‌کند. گنبد‌های نمکی و آب شور دریاچه‌های مجاور و آبخوان‌های آبرفتی منبع اصلی آب با تیپ کلرید هستند.

تحقیقات انجام شده در داخل ایران نیز عبارتند از: مقصودی و همکاران (۱۳۸۸) تحولات کارستی چشمه‌های اصلی منطقه پراو بیستون در مقایسه با چشمه‌های دیگر واقع در زون زاگرس چین خورده براساس فاکتورهای هیدروژئولوژیکی پرداختند هیدروگراف چشمه‌ها در توده پراو بیستون متأثر از توسعه کارستی به وجود آمده، نوسان و پیچیدگی‌های بیشتری را نشان می‌دهد که تغذیه به صورت کانالیزه رخ می‌دهد و از طرف دیگر میزان ضریب خشکیدگی چشمه‌ها، ضریب آلفا و حجم ذخیره دینامیکی چشمه‌های اطراف پراو بیستون، در مقایسه با دیگر چشمه‌ها نیز دلالت بر توسعه کارست در منطقه دارد و تغذیه مجرای و کانالیزه‌ی چشمه‌ها را نشان می‌دهد. شجاع و محمدی (۱۳۸۹) به بررسی اثر میزان و مقدار بارندگی در چشمه کارستی پیرغار بر روی شکل هیدروگراف و مشخصات هیدروژئولوژیکی آن پرداختند نتایج نشان داد که مقدار بارش بر شکل هیدروگراف، دبی پایه، دبی پیشینه و ضرایب فرود تاثیر می‌گذارد بطوری که با تغییر مقدار بارش ممکن است بخش‌های جدیدی از سیستم کارست در سفره فعال شود. شکری (۱۳۹۰) به مطالعه و بررسی توسعه کارست در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژی RS و GIS پرداخت و نتایج نشان میدهد که بیشترین درصد مساحت تشکیل دهنده حوضه آبخیز چشمه دارای توسعه متوسط کارست بوده و تجزیه و تحلیل هیدروگراف و منحنی فرود چشمه و برآورد حجم جریان پایه و سریع، نشان دهنده حاکم بودن جریان افشان کاذب موجود در منطقه می‌باشد. تغییرات هیدروگراف و پاسخ چشمه به بارندگی‌ها حاکی از وجود حداقل یک یا چند مجرای بزرگ و بررسی هیدروگراف و کموگراف، نیز مؤید توسعه متوسط تا زیاد مجاری زهکشی درونی آبخوان می‌باشد. طاحونی (۱۳۷۴) به بررسی و شناخت اشکال کارست در منطقه دشت ارژن و کازرون به منظور تخمین حجم آبهای زیرزمینی پرداخت و در این پایان نامه جنبه‌های مختلف جغرافیایی طبیعی، زمین شناسی، ژئوهیدرولوژی مورد بررسی قرار گرفته و در فصل پنج کارست منطقه با در نظر گرفتن عوامل ژئومورفولوژیکی و زمین شناسی طبقه بندی گردید. حسینی و عیوضی (۱۳۹۳) به منظور مدل‌سازی دبی روزانه چشمه علی دامغان در طول دوره فروکش دو روش مانجین و کتاین^۲ مورد استفاده قرار گرفت نتایج این تحقیق نشان داد که به منظور پیش بینی جریان روزانه چشمه کارستی طی دوره فروکش، روش کتاین نسبت به روش مانجین از این نظر که لازم به تفکیک جریانهای سریع و پایه چشمه طی دوره فروکش نمی‌باشد و همچنین به دلیل سادگی ساختار مدل و اینکه تنها به یک پاراکتر وابسته است و در نتیجه به محاسبات کمتری نیازمند است، دارای ارجحیت می‌باشد. کشاورزی (۱۳۹۱) به منظور شناسایی و تعیین اشکال کارست، طبقه بندی آنها و تعیین سطح کارست شدگی به مطالعه ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبخیز چشمه ساسان پرداخت از جمله اشکال کارستی حوضه می‌توان به انواع لاپیه‌ها، دولین، غارها و غیره اشاره کرد. مقدار فرسایش

^۱- Samani

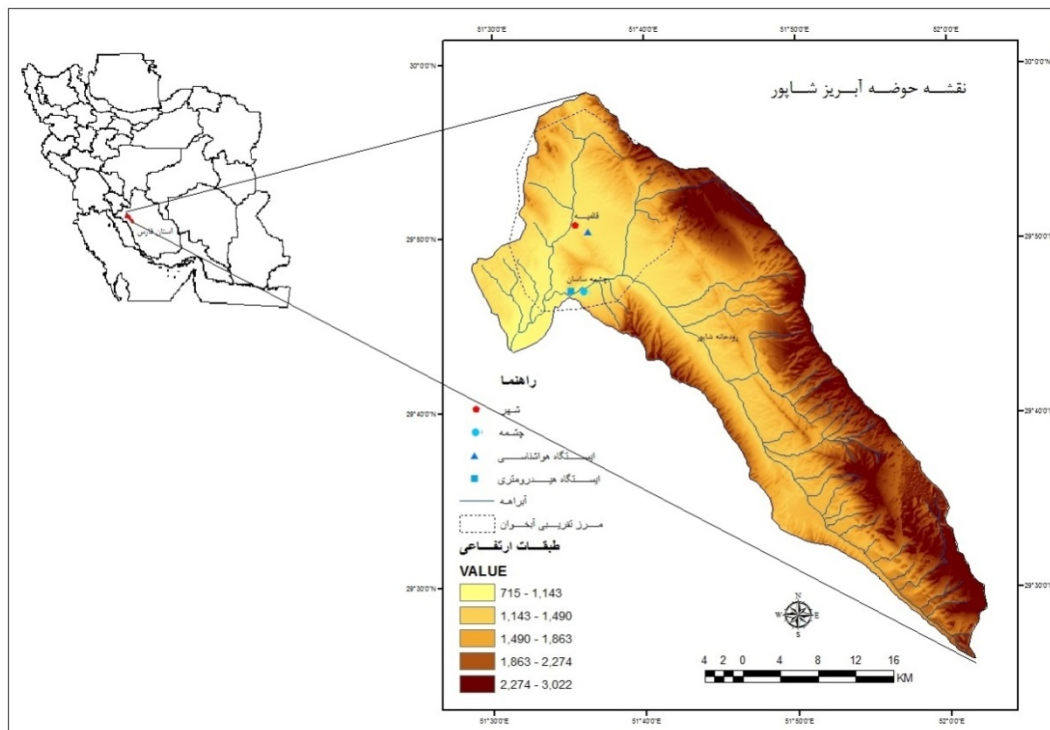
^۲- Mangin and Coutagne

کارستی در سطح حوضه براساس قانون دالتون مقدار $1/85$ میلیمتر در سال محاسبه گردید و ارتباط زهکشی با تحول کارست بررسی گردید که سازند های آهکی-دولومیت تراکم کمتر از یک درصد نشان می دهد. ویژگی های ایزوتوپی-شیمیایی، حجم ذخیره دینامیکی، ضریب آلفا و شاخص مینزر مورد ارزیابی قرار گرفت و همگی موید تنوع درجه کارست شدگی و تکامل ژئومورفیک منطقه است.

با توجه به اینکه تحقیقاتی بر روی حوضه کارستی چشمه ساسان تاکنون در زمینه مدلسازی و تحلیل منحنی فروکش و پارامترهای موثر بر آبدهی چشمه و همچنین طبقه بندی آبخوان از لحاظ توسعه یافتگی کارست انجام نشده است این تحقیق در نظر دارد برای اولین بار به طبقه بندی آبخوان کارستی و شبیه سازی منحنی فروکش آبدهی چشمه کارستی ساسان طی یک دوره آماری یازده ساله با استفاده از روش کمی-تحلیلی بپردازد.

منطقه مورد مطالعه

چشمه ساسان در جنوب غرب استان فارس در فاصله ۲۰ کیلومتری شهرستان کازرون و در قسمت غربی تنگ چوگان که خود در قسمت شمال غربی تاکدیس دشتک واقع است و در سمت راست رودخانه شاپور با ارتفاع ۸۱۳.۵ متر و در قاعده سازند آسماری-چهرم ظاهر شده است. از نظر کیفی آب چشمه با میانگین سولفات ۳۰ میلی گرم در لیتر و غالباً نوع بی کربنات کلسیم-منیزیم یا بی کربنات کلسیم-سدیم در حد بسیار خوب و قابل قبولی است هدایت الکتریکی آن از ۵۲۰ میکرومhos و میزان کلر ۱۲۶ میلی گرم در لیتر می باشد. مقداری از آب این چشمه به شهرستان های جنوبی و بوشهر منتقل شده و قسمتی از آب شرب این شهر و شهرستان های مجاور را تامین می کند (توکلی و همکاران، ۱۳۷۰، ۹). حداکثر ارتفاع منطقه برابر ۳۰۲۲ متر مربوط به کوه فامور و کمترین ارتفاع در تنگ چوگان، ۷۱۵ متر است.

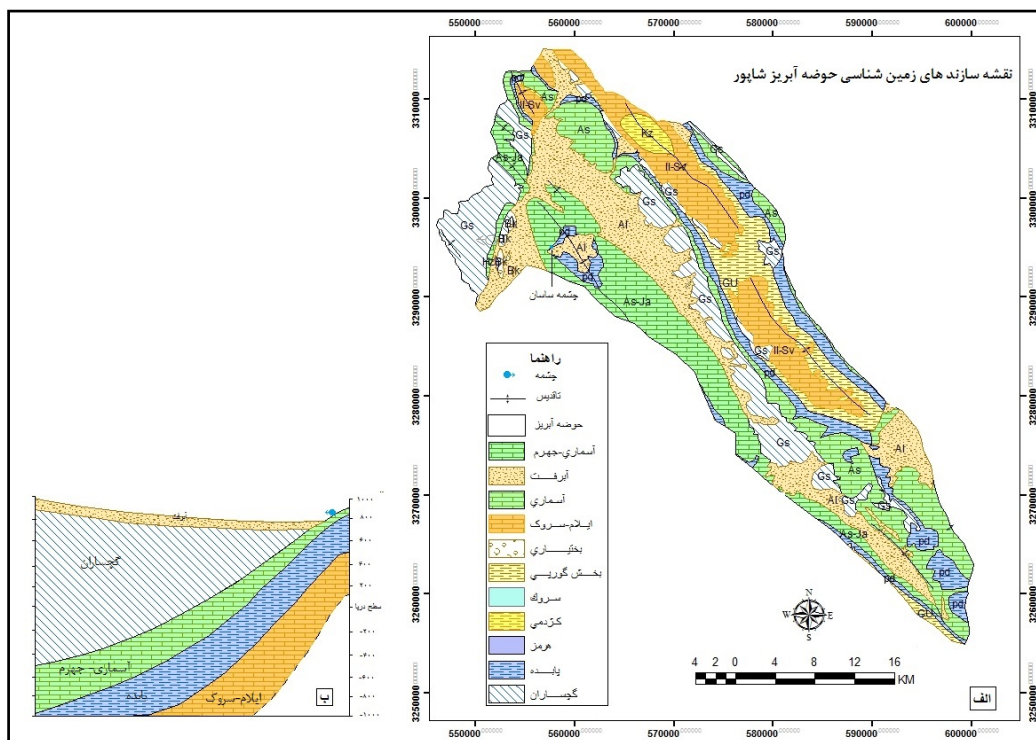


شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارنده)

از نظر زمین شناسی، چشمه ساسان در تاکدیس دشتک قرار دارد. طول تاکدیس دشتک ۷۰ و پهنای آن ۸ کیلومتر با محور شمال غربی-جنوب شرقی است. سازند های رخنمون شده در این تاکدیس به ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از: ایلام-سروک با سن کرتاسه بالایی، گورپی با سن کرتاسه بالایی، پابده با سن ائوسن-پالئوسن، آسماری-چهرم با سن

الیگوسن-میوسن و گچساران با سن میوسن که به مقدار کمی در اطراف این تاقدیس یافت می‌شود. قسمت اعظم وسعت این تاقدیس را سازند آسماری-چهرم با مساحت ۲۲۱ کیلومترمربع تشکیل می‌دهد که آبخوان اصلی آن محسوب می‌شود. امتداد کلی شکستگیها تقریباً با محور تاقدیس هم جهت بوده و از نوع درزه های کششی می‌باشد. از نظر تکتونیک، منطقه مورد مطالعه در واحد ساختمانی و چین خوردگی زاگرس قرار دارد که در آن رسوبات پالئوزوئیک، مزوزوئیک و ترشیر بطور هم شیب روی هم قرار دارند. این رسوبات پوشش های حاشیه قاره ای مشرق پلاتفرم عربستان را تشکیل می‌دهد که در پلیوسن تغییر یافته و چین خورده اند و این چین خوردگی و فشار های وارده بر این نواحی باعث ایجاد گسلها و درزه های متنوع در منطقه شده است. گسل قطر-کازرون مهمترین گسل در حوضه خلیج فارس می‌باشد که با امتداد تقریباً شمالی-جنوبی و در بخش غربی شهر کازرون گسترش یافته است (شرکت سهامی سازمان آب منطقه فارس، ۱۳۶۷: ۲۷).

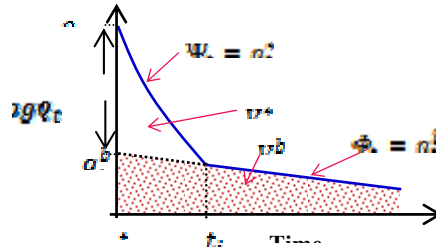
از نظر ژئومورفولوژی، در حد فاصل تاقدیس دشتک و شاهنشین دشت برم قرار دارد. نهشته های دشت برم، مخروط افکنه ها و زمین لغزش ها با اختلاف ارتفاع محدود و عرض کم در امتداد حاشیه رودخانه اصلی در حوضه گسترش یافته است. عارضه تنگ چوگان توسط قدرت فرسایشی آب بر ساختمان تاقدیس دشتک تحمیل شده است. به دلیل اینکه منطقه عمدتاً از آهک توده ای و ضخیم لایه تشکیل شده است تحت تاثیر فرایندهای تکتونیک، عمل آب و فرسایش انحلالی اشکال کارستیک شکل گرفته اند که نقش مهمی در جذب نزولات جوی و نفوذ آب دارند. پولیه (دشت آهکی) دشت ارژن، نمونه ای از این عوارض می‌باشد. غار شاپور در تنگ چوگان نیز طی فرایند انحلال و سیستم درزو شکاف در سنگ های آهکی ایجاد شده است. در اثر بارش مستقیم باران بر روی سطح سنگهای انحلال پذیر و همچنین در اثر روانابهای ورقه ای و کانالی ناشی از بارش، لایه ها شکل گرفته اند که بیشترین درصد را لایه شیبی عمیق و متراکم بر روی تاقدیس دشتک در سازند آسماری-چهرم به خود اختصاص داده است. اووالا و دولین، دارای حجم و عمق کم می‌باشند.



شکل ۲: الف) نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه (منبع: نگارنده)، ب) مقطع زمین شناسی چشمه ساسان (فخاری به نقل از طاحونی)

$$Y_t = \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ K & 0 < t < t_i \\ 0 & t = t_i \end{cases} \quad \text{رابطه ی ۴}$$

که در آن $0 < K < 1$ است. این تابع، بی بعد بوده و مستقل از جریان چشمه است و می توان 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 (منبع: Padilla et al., 1994, 270)

با گرفتن انتگرال از توابع دبی جریانهای سریع و پایه نسبت به زمان، می توان 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:

$$v_t^* = \int_{t=0}^t q_t^* dt = \int_{t=0}^t q_0^* \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} dt = \frac{q_0^*}{\varepsilon} (\ln(1+\varepsilon t)(1+\eta) - \eta t) \quad 0 < t < t_i \quad \text{رابطه ی ۵}$$

$$v_t^b = \int_{t=0}^t q_t^b dt = \int_{t=0}^t q_0^b e^{-\alpha t} dt = \frac{q_0^b}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad t > 0 \quad \text{رابطه ی ۶}$$

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

$$V_t^T = V_t^* + V_t^b \quad \text{رابطه ی ۷}$$

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 می شوند، V_0^b ، می توان در بالای انتگرال در روابط (۵) و (۶) را به ترتیب مقادیر t_i ، و بی نهایت قرار داد:

$$v_0^* = \int_{t=0}^{t_i} q_t^* dt = \int_{t=0}^{t_i} q_0^* \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} dt = \left[\frac{q_0^*}{\varepsilon} (\ln(1+\varepsilon t) (1+\eta) - \eta t) \right] \quad \text{رابطه ی ۸}$$

$$v_0^b = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_t^b dt = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_0^b e^{-\alpha t} dt = \frac{q_0^b}{\alpha} \quad \text{رابطه ی ۹}$$

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

طبقه بندی آبخوانهای کارستی

مانجین در سال ۱۹۷۵ یک روش کمی برای طبقه بندی آبخوانهای کارستی، بر اساس دو پارامتر K ، که نشان دهنده درجه توسعه یافتگی منطقه نشی کارست می باشد و I که شرایط نفوذ آب از سطح به آبخوان را نمایش می دهد را تعریف نمود. حد تابع رابطه ی ۶ در بینهایت مقدار حجم ذخیره دینامیکی در منطقه نشی (تَشکیلات کارست v_{dyn})، را بدست می دهد:

$$v_{dyn} = \lim_{t \rightarrow +\infty} v_t^b = \frac{q_0^b}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) = \lim_{t \rightarrow +\infty} C \frac{q_0^b}{\alpha} \quad \text{رابطه ی ۱۰}$$

که در آن v_{dyn} ، حجم ذخیره در ابتدای جریان پایه بر حسب متر مکعب، ضریب C ، ضریب تبدیل و برابر q_0^b ، ۸۶۴۰۰ ، دبی در ابتدای منحنی جریان پایه بر حسب متر مکعب بر ثانیه، و یا جریان چشمه در $t = t_0$ ، و U ، ضریب جریان پایه بر حسب، $(day)^{-1}$ می باشد. هر چه ذخیره نشی (v_{dyn})، بیشتر باشد، منطقه نشی آبخوان کارستی نقش بیشتری در تنظیم دبی خروجی از چشمه را خواهد داشت.

از طرفی دیگر حجم جریان انتقالی آبخوان کارستی (V_{trans}) را می توان با انتگرال گیری از دبی جریان خروجی چشمه (رابطه ی ۱) نسبت به زمان برای مدت یک سال محاسبه نمود. به عبارتی دیگر V_{trans} ، برابر حجم خروجی از چشمه در هر سال می باشد به سادگی از رابطه زیر نیز قابل محاسبه است:

$$V_{trans} = Q \times t_{rec} \times 86400 \quad \text{رابطه ی ۱۱}$$

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_{dyn} و V_{trans} ، برای منحنی فروکش هر سال محاسبه شده و از تقسیم این دو مقدار، پارامتر K برای سال مورد نظر بدست می آید:

$$K = \frac{v_{dyn}}{V_{trans}} \quad \text{رابطه ی ۱۲}$$

پارامتر K همچنین به عنوان معیاری برای نشان دادن زمان نگهداشت آب در منطقه نشتی (تشکیلات کارستی) است. در بیشتر آبخوانهای کارستی $0.5 < K < 0.9$ می باشد. هر چه مقدار K بیشتر باشد (به ۰.۵ نزدیک تر باشد)، قدرت تنظیمی منطقه نشتی آبخوان کارست در مقایسه با ناحیه غیر اشباع در جریان خروجی چشمه قوی تر است.

پارامتر i آبخوان، طبق تعریف مانجین، همان مقدار تابع بدون بعد (Y_t) در رابطه (۴) به ازای $t = 2 \text{ day}$ می باشد به عبارتی دیگر $i = Y_{t=2}$. حدود تغییرات پارامتر $0 < i < 1$ می باشد. 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 آهسته تر می باشد. بر اساس مقادیر مختلف پارامترهای K و i ، پنج ناحیه متمایز بوجود می آید:

ناحیه ۱: $0.5 < K < 0.9$ و $i > 0.5$: سیستم آبخوان کارستی پیچیده بوده و دارای توسعه یافتگی بالا و مخازن مختلفی است.

ناحیه ۲: $0.5 < K < 0.9$ و $0.25 < i < 0.5$: در آبخوان کارستی سیستم مجرای در بخش بالایی (منطقه نفوذ)، نسبت به بخش های نزدیک به خروجی چشمه، توسعه یافته تر است.

ناحیه ۳: $0.1 < K < 0.25$ و $0 < i < 0.25$: آبخوان دارای سیستم توسعه یافته کارست هم در بخش بالایی (نفوذی) است و هم در بخش نشتی (نزدیک به خروجی). به عبارت دیگر در تمام بخش آبخوان کارست، سیستم مجرای 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 مجرای گسترده است، که به ناحیه نشتی منتهی می شود.

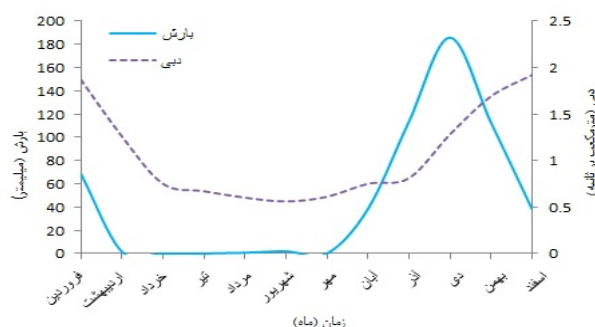
ناحیه ۵: $K > 0.5$: سیستم آبخوان کارستی منطقه نشتی دارای عمق زیاد و درز و شکاف فراوان به صورت جزء یا تماما در زیر رسوبات با نفوذپذیری کم محصور شده است و توسعه کارست آن عمدتا مربوط به دوران کارستی زایی قبلی می باشد و ممکن است شبکه های مجرای پالئو در منطقه اشباع آبخوان فعالیت داشته باشد به این نوع آبخوان ها، سیستم های غیرفعال از نظر کارستی شدن نیز می گویند و دارای یک ساختار زهکشی پیچیده با زمان تاخیر بسیار طولانی است.

بحث و نتایج

بررسی آبنگاریها و بارش نگارها نشان می دهد که حداکثر دبی با مقدار $1/92$ مترمکعب بر ثانیه در اسفند ماه رخ می دهد در حالی که بیشترین بارش با مقدار $185/71$ میلیمتر مربوط به دی ماه می باشد. روند تغییرات بارش و دبی ماهانه در حوضه آبرگیر چشمه مشابه هستند در حالی که تاخیر زمانی دو ماهه بین این دو متغیر وجود دارد (شکل ۵).

جدول ۱: مشخصات آماری آبدی چشمه ساسان (از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۷)

آماره	ضریب تغییرات	واریانس (m^3/s)	چولگی	خطای استاندارد میانگین	آبدی بیشینه (m^3/s)	آبدی کمینه (m^3/s)	آبدی میانگین (m^3/s)
مقدار	۰/۸۵	۱/۲۹	۱۰/۵۳	۰/۱۰	۷/۸۶	۰/۳۳	۱/۲۹



شکل ۵: نمودار تغییرات دبی و بارش ماهانه حوضه مورد مطالعه (از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۷)

به منظور طبقه بندی آبخوان کارستی چشمه ساسان به روش مانجین، به کمک روابط (۱۰) تا (۱۲) مقادیر ضریب فروکش جریان (α)، حجم ذخیره دینامیکی (v_{dyn})، حجم ذخیره آب در بخش نشتی آبخوان (v_{trans})، پارامتر η ، ضریب تقعر منحنی جریان سریع (ε)، دبی اولیه جریان پایه (q_0^b) برای دوره های فروکش سال های مختلف محاسبه و نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. مقادیر ضریب α محاسبه شده برای چشمه ساسان بین ۰/۰۰۰۳ تا ۰/۰۰۲۲ قرار دارد که نشان دهنده شیب ملایم منحنی فروکش، غالب بودن سیستم افشان عبور آب در آبخوان و اینکه چشمه دارای ذخیره دینامیکی زیاد و کمتر تحت تاثیر بارش قرار می گیرد. در اینگونه آبخوان های کارستی، شبکه کارستی بخوبی توسعه نیافته است و بنابراین آب های زیرزمینی نیاز به زمان بیشتری برای جابجایی در آبخوان دارند. این سامانه ها توسط محققین مختلف به عناوین مختلفی همچون سامانه های جریان کند، توسط اکینسون^۱ (۱۹۷۷)؛ جریان افشان توسط بوناچی (۱۹۹۳) و جریان متفرق توسط سویت^۲ (۲۰۰۵) نامگذاری شده اند. در آبنگار چشمه های با سامانه های افشان اوج دبی خروجی چشمه پس از یک تاخیر زمانی معین نسبت به دوره بارش رخ می دهد (فیوریلو^۳، ۲۰۰۹، ۲۹۰).

حدود تغییرات حجم آب ذخیره شده دینامیکی و انتقالی برای دوره های مختلف فروکش جریان طبق روابط (۱۰) و (۱۱) در محدوده $25/12 < v_{dyn} < 212/05$ و $15/98 < v_{trans} < 62/24$ میلیون مترمکعب بدست آمده است که بطور متوسط کمتر از ۲۴ درصد از حجم آب ذخیره در کل سیستم کارست آبخوان بصورت انتقالی از مظهر چشمه خارج می شود و مابقی در تشکیلات کارستی باقی می ماند. بیشترین حجم انتقالی آب در آبخوان مربوط به دوره فروکش ۸۱/۱۱/۲۹ تا ۸۳/۷/۲۶ برابر با ۴۴/۷۸ میلیون متر مکعب می باشد که نسبت به دوره فروکش سال های مورد بررسی بیشترین طول دوره (۶۰۸ روز) را داراست.

حدود تغییرات پارامترهای k و i برای دوره های فروکش جریان چشمه در سالهای مختلف طبق روابط (۴) و (۱۲) در محدوده $1/163 < k < 6.4$ و $0/84 < i < 0/98$ بدست آمد. در بیشتر سالهای مورد مطالعه، پارامتر k بدست آمده دارای مقادیری بالای (۰/۵) است که نشان دهنده قدرت کنترلی بیشتر بخش نشتی (اشباع) نسبت به بخش غیر اشباع آبخوان در جریان خروجی چشمه می باشد. همچنین مقادیر بدست آمده برای پارامتر i که همگی بیشتر از ۰/۵ می باشند، بیانگر غیر قابل نفوذ بودن آب از سطح زمین به درون آبخوان است.

¹- Atkinson

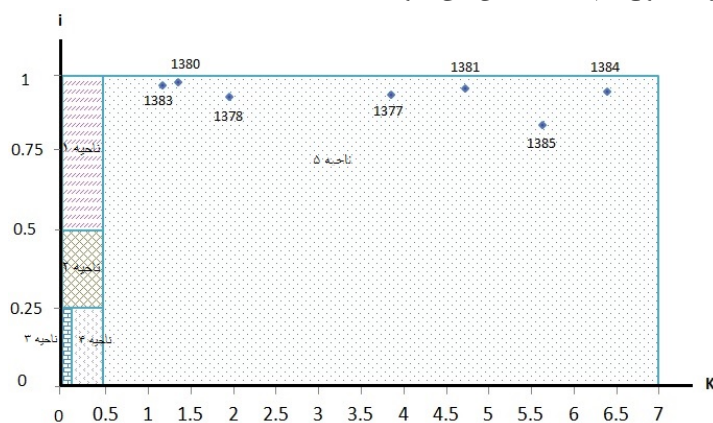
²- Civita

³- Fiorillo

جدول ۲: نمایش مقادیر پارامترهای بدست آمده در طول دوره آماری

i (-)	K (-)	t _i (day)	D (day) ⁻¹	ε (day)	V _{trans} (× 10 ⁶ m ³)	V _{dyn} (× 10 ⁶ m ³)	q ₀ ^b (m ³ /s)	α (day) ⁻¹	دوره فروکش
۰/۹۴	۳/۸۶	۱۲۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۱	۳۱/۸۱	۱۲۳/۰۸	۱/۵۶۷	۰/۰۰۱	۷۷/۱۲/۱۷ تا ۷۸/۴/۲۰
۰/۹۳	۱/۹۶	۵۷۹	۰/۰۰۳	۰/۰۲۹	۶۲/۲۴	۱۲۲/۴۵	۰/۵۶۶	۰/۰۰۰۴	۷۸/۱۱/۱۱ تا ۷۹/۶/۹
۰/۹۸	۱/۳۶	۲۶۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۲۹/۶۲	۴۰/۳۹	۰/۶۵۴	۰/۰۰۱	۸۰/۱۱/۲۹ تا ۸۱/۸/۱۸
۰/۹۶	۴/۷۳	۶۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۴۴/۷۸	۲۱۲/۰۵	۰/۷۳۶	۰/۰۰۰۳	۸۱/۱۱/۲۹ تا ۸۳/۷/۲۶
۰/۹۷	۱/۱۶	۱۷۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۲۱/۴۹	۲۵/۱۲	۰/۶۳۹	۰/۰۰۲	۸۳/۱۲/۲۴ تا ۸۴/۶/۱۸
۰/۹۵	۶/۴۰	۱۸۹	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۱۶/۵۰	۱۰۵/۶۴	۰/۴۸۹	۰/۰۰۰۴	۸۴/۱۲/۱۳ تا ۸۵/۶/۱۷
۰/۸۴	۵/۶۳	۲۲۰	۰/۰۰۷	۰/۸	۱۵/۹۸	۹۰/۰۲	۰/۵۲۱	۰/۰۰۰۵	۸۵/۱/۲۸ تا ۸۶/۹/۱

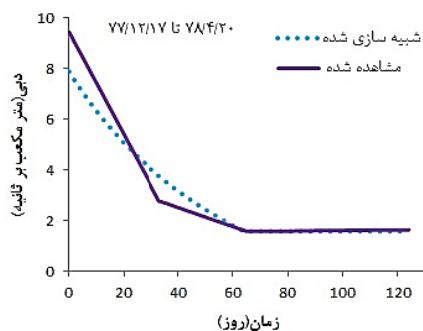
اگر مقادیر بدست آمده برای دو پارامتر k و i را بصورت زوج نقاط بر روی نمودار طبقه بندی آبخوان کارستی مانجین مطابق شکل (۶) مشخص نمائیم می توان نتیجه گرفت آبخوان کارستی چشمه ساسان در ناحیه پنجم این تقسیم بندی قرار می گیرد و نشان دهنده این مسئله است که سیستم آبخوان کارستی منطقه نشتی دارای عمق زیاد و درز و 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 می باشد و ممکن است شبکه های مجرای پالتو در منطقه اشباع آبخوان فعالیت داشته باشد به این نوع آبخوان ها، سیستم های غیرفعال از نظر کارستی شدن نیز می گویند و دارای یک ساختار زهکشی پیچیده با زمان تاخیر بسیار طولانی است. تاخیر زمانی دو ماهه بین حداکثر بارش و دبی ماهانه (شکل ۵) نیز تأییدکننده این مطلب است در اطراف و حوضه بالادست چشمه ساسان تکامل اشکال کارست، سیمای کارستی بی نظیری از قبیل غار شاپور، تنگ چوگان، چشمه کارستی با دبی بالا، دولین و انواع لایپه ها را به وجود آورده است. با توجه به قرار گیری چشمه در آهک آسماری-چهرم و براساس مقادیر بالای k (۰/۵) و در نهایت باتوجه به حجم آب میزان کارستی شدن در قسمت های پایین دست به صورت انواع لایپه ها نمایان می شود.



شکل ۶: طبقه بندی سیستم آبخوان های کارستی بر اساس روش مانجین

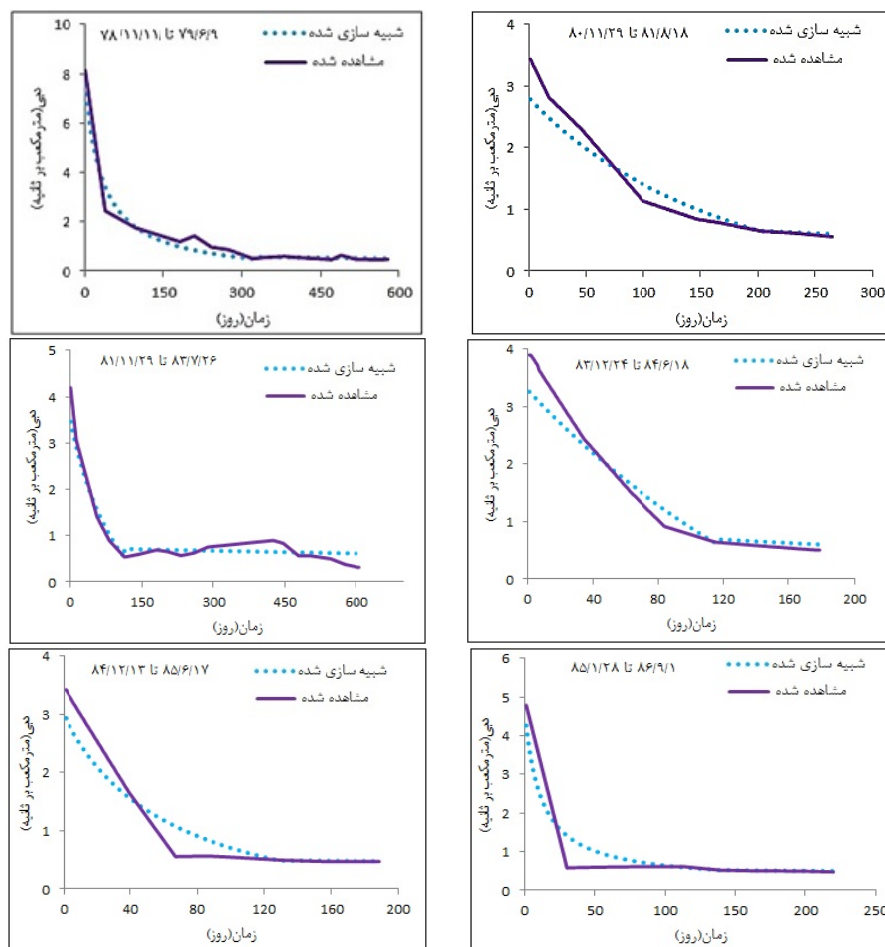
داده های منحنی فروکش سال اول (۱۳۷۷)، به منظور واسنجی روش مانجین (تخمین مقدار بهینه پارامترهای ϵ و η) مورد استفاده قرار گرفت و داده های سایر منحنی های فروکش موجود به منظور ارزیابی پارامترهای تخمین زده شده، به کار

گرفته شد. به کمک تکنیک بهینه سازی خطی توسط ابزار Solver در محیط نرم افزار Excel، مقادیر بهینه پارامترهای η و ε به ترتیب برابر با $\frac{1}{day} 0.11$ و $\frac{1}{day} 0.15$ به دست آمد (شکل ۷).



شکل ۷: منحنی واسنجی فروکش جریان چشمه توسط روش مانجین

بر اساس پارامترهای واسنجی شده، منحنی فروکش جریان چشمه برای سالهای ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۷ شبیه سازی شدند و نتایج در شکل (۸) نشان داده شد. روش مانجین هماهنگی نسبتاً خوبی در شبیه سازی مقادیر دبی های دوره فروکش طی سالهای مختلف دارد ولی با این حال در قسمت جریان سریع، پایین افتادگیهایی مشاهده می شود که سبب ناهماهنگی در منحنی نمودار شده است، و در قسمت جریان پایه منطبق بر دبی پایه بوده و پاسخ مناسبتری دریافت شده است.



شکل ۸: منحنی های شبیه سازی شده فروکش جریان به روش مانجین

مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده حجم اولیه جریان ذخیره شده (V_0^T) در مخزن تشکیلات کارستی چشمه مورد مطالعه که در طول منحنی فروکش تخلیه می شود، محاسبه و در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر می باشد که مقادیر (V_0^T) از مجموع حجم اولیه جریان سریع (V_0^*) و جریان پایه (V_0^b) بدست آمده است. نتایج نشان می دهد که بطور متوسط حجم اولیه آب ذخیره شده در آبخوان که توسط روش مانجین شبیه سازی شده برابر با ۳۱/۲۴ میلیون متر مکعب می باشد در حالی که در حالی که مقدار حجم متوسط سالانه آب چشمه براساس داده های مشاهداتی برابر با ۳۱/۹۲ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. حداکثر درصد خطای روش مانجین در برآورد حجم آب ذخیره شده در آبخوان کارستی برابر با ۵/۵۱ درصد می باشد که نشان دهنده دقت بالای این روش می باشد.

میزان حجم ذخیره کل (V_0^T) که برابر با مجموع حجم جریان سریع و پایه در هر دوره فروکش می باشد در جدول (۳) ارائه شده است. این پارامتر بعنوان عاملی که نتیجه شرایط خاص زمین شناختی و بازخوردی از توسعه کارستی یک منطقه است مطرح می باشد. که با مقدار ضریب آلفا رابطه ای معکوس دارد. هر چه حجم ذخیره دینامیکی چشمه ها کمتر باشد. بالا بودن مقدار حجم ذخیره کل در آبخوان چشمه ساسان حاکی از توسعه یافتگی کم کارستی می باشد و در این شرایط چشمه در مدت زمان طولانی تری به رخداد خشکسالی واکنش نشان می دهند.

در طی هفت دوره فروکش مورد مطالعه، بطور متوسط حدود ۷۵ درصد از کل حجم آب ذخیره شده سالانه در آبخوان، مربوط به ذخیره اشباع (جریان پایه) و بقیه معادل ۲۵٪ مربوط به بخش غیراشباع (جریان سریع) است (جدول ۳). غالب بودن جریان پایه نسبت به جریان سریع، حاکی از توسعه یافتگی ناچیز آبخوان کارستی می باشد و افشان بودن سیستم جریان آب در آبخوان می باشد. نکته قابل توجه دیگر اینکه مقادیر حجم اولیه آب ذخیره شده در آبخوان (V_0^T) که در جدول (۳) نشان داده شده است، با مقادیر حجم آب انتقالی به مظهر چشمه (V_{trans}) که در جدول (۲) نشان داده شده است، از نظر مقدار بسیار نزدیک به یکدیگر می باشند.

جدول ۳: حجم اولیه آب ذخیره شده در آبخوان کارستی (V_0^T)

دوره فروکش	حجم اولیه مشاهداتی ($\times 10^6 m^3$)	V_0^* ($\times 10^6 m^3$)	V_0^b ($\times 10^6 m^3$)	$V_0^T = V_0^b + V_0^*$ ($\times 10^6 m^3$)	درصد خطای محاسبه حجم (%)
۷۷/۱۲/۱۷ تا ۷۸/۴/۲۰	۳۱/۹۲	۸/۰۸	۲۳/۱۵	۳۱/۲۴	۲/۱۳
۷۸/۱۱/۱۱ تا ۷۹/۶/۹	۶۲/۰۶	۱۱/۹۵	۴۶/۶۸	۵۸/۶۴	۵/۵۱
۸۰/۱۱/۲۹ تا ۸۱/۸/۱۸	۲۹/۶۲	۳/۵۵	۲۵/۷۷	۲۹/۳۲	۱/۰۱
۸۱/۱۱/۲۹ تا ۸۳/۷/۲۶	۴۴/۶۵	۲۸/۱۵	۱۶/۴۶	۴۴/۶۱	۰/۰۸
۸۳/۱۲/۲۴ تا ۸۴/۶/۱۸	۲۰/۷۶	۳/۶۱	۱۷/۹۳	۲۱/۵	۳/۵۶
۸۴/۱۲/۱۳ تا ۸۵/۶/۱۷	۱۶/۵۱	۲/۵۷	۱۴/۰۲	۱۶/۷۸	۱/۶۳
۸۵/۱/۲۸ تا ۸۶/۹/۱	۱۵/۹۸	۳/۷۲	۱۳/۱۳	۱۶/۸۶	۵/۵۰

نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور طبقه بندی آبخوان کارستی و شبیه سازی منحنی فروکش آبدی چشمه کارستی از روش مانجین استفاده شد، مقادیر ضریب α محاسبه شده برای چشمه ساسان نشان دهنده ملایم بودن شیب منحنی فروکش، غالب بودن سیستم افشان عبور آب در آبخوان و اینکه چشمه دارای ذخیره دینامیکی زیاد و کمتر تحت تاثیر بارش قرار

می‌گیرد است. بیشترین حجم ذخیره دینامیکی و انتقالی آب در آبخوان مربوط به دوره فروکش ۸۱/۱۱/۲۹ تا ۸۳/۷/۲۶ می‌باشد در اینگونه آبخوان‌های کارستی، شبکه کارستی بخوبی توسعه نیافته است و بنابراین آب‌های زیرزمینی نیاز به زمان بیشتری برای جابجایی در آبخوان دارند. بالا بودن مقادیر پارامتر k و t (مقادیر بیش از ۰/۵) در بیشتر سالهای مورد مطالعه، نشان دهنده قدرت کنترلی بیشتر بخش نشستی (اشباع) نسبت به بخش غیر اشباع آبخوان در جریان خروجی چشمه و همچنین بیانگر غیر قابل نفوذ بودن آب از سطح زمین به درون آبخوان است. آبخوان کارستی چشمه ساسان در ناحیه پنجم این تقسیم بندی قرار می‌گیرد که نشان دهنده این مسئله است که سیستم آبخوان کارستی منطقه نشستی، دارای عمق زیاد و درز و شکاف فراوان بصورت جزء یا تماماً در زیر رسوبات با نفوذپذیری کم محصور شده است. پوشیده شدن ۲۱/۶۰۳ درصد آبخوان کارستی از رسوبات موید آن است و توسعه کارست آن عمدتاً مربوط به دوران کارستی زایی قبلی می‌باشد و ممکن است شبکه‌های مجرای پالئو در منطقه اشباع آبخوان فعالیت داشته باشد به این نوع آبخوان‌ها، سیستم‌های غیرفعال از نظر کارستی شدن نیز می‌گویند و تحول کارستی غار شاپور در طی دوران گذشته تأیید کننده این مطلب است و دارای یک ساختار زهکشی پیچیده با زمان تأخیر بسیار طولانی است که اختلاف زمانی وقوع پیک دبی چشمه و بارش حداکثر (شکل ۵) این ساختار پیچیده را نشان می‌دهد. به منظور مدلسازی جریان فروکش چشمه ساسان داده‌های آماری طی ۱۱ سال در مقیاس روزانه مورد استفاده قرار گرفت. مشاهده می‌شود که روش مانجین هماهنگی نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی مقادیر دبی‌های دوره فروکش طی سالهای مختلف دارد. ولی با این حال در قسمت جریان سریع، پایین افتادگی‌هایی مشاهده می‌شود که سبب ناهماهنگی در منحنی نمودار شده است، و در قسمت جریان پایه منطبق بر دبی پایه بوده و پاسخ مناسبتری دریافت شده است. بطور متوسط حجم اولیه آب ذخیره شده در آبخوان که شبیه‌سازی شده برابر با ۳۱/۲۴ میلیون متر مکعب می‌باشد حداکثر درصد خطای روش مانجین در برآورد حجم آب ذخیره شده در آبخوان کارستی برابر با ۵/۵۱ درصد می‌باشد که نشان دهنده دقت بالای این روش می‌باشد. در طی هفت دوره فروکش مورد مطالعه، بطور متوسط حدود ۷۵ درصد از کل حجم آب ذخیره شده سالانه در آبخوان، مربوط به ذخیره اشباع و بقیه مربوط به بخش غیراشباع است بنابراین غالب بودن جریان پایه چشمه ساسان نسبت به جریان سریع، حاکی از توسعه یافتگی ناچیز آبخوان کارستی می‌باشد و افشان بودن سیستم جریان آب در آبخوان می‌باشد. با توجه به اینکه عمدتاً منطقه از آهک تشکیل شده است اشکال کارستیک در منطقه توسعه یافته اند که نقش مهمی در جذب نزولات جوی و نفوذ آب دارند و در نهایت با توجه به قرارگیری چشمه ساسان در سازند آسماری-چهرم و حجم آب، کارست زایی در قسمت‌های پایین دست، به صورت انواع لایه‌ها نمایان می‌شود.

منابع

- افراسیابیان، احمد، ۱۳۷۷، اهمیت مطالعه و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی، کرمانشاه.
- توکلی، محمدحسن و محمدحسن صادقیپور، محمدحسن نجاتی، ۱۳۷۰، گزارش بازدید از مناطق جنوب (کازرون، بوشهر، برازجان و سواحل خلیج فارس) و بررسی پدیده‌های کارستیک در مجاورت گسل کازرون و کرانه خلیج فارس، سازمان آب منطقه ای فارس.
- حسینی، موسی و اکرم عیوضی، ۱۳۹۳، مدل سازی آبدی روزانه چشمه کارستی طی دوره فروکش جریان با استفاده از روش‌های تحلیلی (مطالعه موردی: چشمه علی دامغان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، شماره ۴، صص ۷۰-۵۴
- شجاع، عاطفه و ضرغام محمدی، ۱۳۸۹، بررسی اثر تغییرات بارندگی بر مشخصات هیدروگراف چشمه ی کارستی پیر غار، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، ۹ صفحه.

- شرکت سهامی سازمان آب منطقه ای فارس، ۱۳۶۷، گزارش بررسی های منابع آب کازرون، طرح آبرسانی بوشهر، جلد اول.
- شکری، محمد، ۱۳۹۰، بررسی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی (GIS و RS)، استاد راهنما غلامحسین کرمی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- طاحونی، پوران، ۱۳۷۴، بررسی و شناخت اشکال کارست در منطقه دشت ارژن و کازرون به منظور تخمین حجم آبهای زیرزمینی، استاد راهنما فرج الله محمودی، دانشگاه تهران.
- قبادی، محمدحسین، ۱۳۸۶، زمین شناسی مهندسی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- کریمی وردجانی، حسین، ۱۳۸۹، هیدروژئولوژی کارست، چاپ اول، انتشارات ارم شیراز.
- کشاورزی، مجید، ۱۳۹۱، مطالعه ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبخیز چشمه ساسان، استاد راهنما محمدعلی زنگنه اسدی، دانشگاه حکیم سبزواری.
- مقصودی، مهران و حاجی کریمی، فرشاد صفری، ذبیح الله چهارراهی، ۱۳۸۸، بررسی توسعه کارست در توده پرآو بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۹، صص. ۶۵-۵۱.
- میلانویچ، پیتر، ۱۹۸۱، هیدروژئولوژی کارست، ترجمه عبدالوحید آغاسی و احمد افراسیابیان، چاپ اول، انتشارات طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور.
 - Ashjari, J., Raeisi, E., 2007. Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies*, vol. 68, No. 3, pp. 118–129.
 - Atkinson, T.C., 1977, Diffuse flow and Conduit Flow in limestone Terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain), *J. Hydrol*, vol. 35, pp. 93–100.
 - Bonacci O., 1993, karst spring hydrographs as indicators of karst aquiferes. *Hydrogeological sciences- journal, des science hydrologiques*, 38,1,2, pp. 51-62.
 - Civita, M., 2005, *Idrogeologia Applicata e Ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 794 pp.
 - Halihan Todd, Wicks Carol M. , 1998, Modeling of storm responses in conduit flow aquifers with reservoirs, *Journal of Hydrology*, Vol. 20, pp. 82–91.
 - LaMoreaux, P. E., 1991, History of karst hydrogeological studies, *Proceedings of the Internatinoal on Environmental Changes in karst Areas I.G.U. – U.I.S.- Italy 15-27 sept; quaderin del dipartimento di geografia* No. 13, pp.215-229.
 - Mailliet, E. 1905, *Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale*, Paperback: 280 pages, Publisher: Kessinger Publishing, LLC (February 6, 2009), Language: French.
 - Martin, J.B., Sreaton, E., 2001, Exchange of matrix and conduit water with examples from the floridan aquifer. In: *US Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Water-Resources Investigations Report*, vol. 1, pp. 38–44.
 - Padilla .A, Pulido-Bosch .A, Mangin. A, 1994, Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring. *Ground water*, Vol. 32, No. 2, pp. 267–277.
 - Samani N., 2001, Stochastic Response of Karst Aquifers to Rainfall and Evaporation, *Maharlu Basin, Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 63, No. 1, pp. 33-40.