نشریه علمی کاوشهای جغرافیایی مناطق بیابانی. سال دهم، شماره اول، صفحات ۱۰۰-۸۳

مقاله پژوهشی

بررسی علل تفاوت رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی در مناطق خشک، مطالعه موردی: توده آهکی دوساری، جنوب شرق ایران

محمد فاریابی[1]*

۱- استادیار هیدروژئولوژی، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت

(دریافت:۱۳۹۹/۰۳/۱۶، پذیرش:۱۴۰۰/۰۷/۲۴)

چکیده

در سال‌های اخیر، کاهش ذخایر آب زیرزمینی موجود در آبخوان‌های آبرفتی باعث توجه به منابع آب موجود در سازندهای متراکم شده است. یکی از مهمترین انواع سازندهای متراکم از دیدگاه هیدروژئولوژی، سنگ‌های آهکی هستند. در جنوب شرق دشت جیرفت، سنگ‌های آهکی دوساری متعلق به دوره الیگومیوسن (معادل سازند قم) رخنمون دارند. این تحقیق به منظور تعین عوامل موثر بر رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های موجود در این سنگ‌ها انجام شده است. به این منظور از داده‌های آبدهی و کیفیت آب چشمه‌های موجود استفاده شده است. شکستگی‌ها و خطواره‌ها نیز با استفاده از تصاویر ماهواره ای استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد با وجود خاستگاه یکسان چشمه‌ها، تفاوت‌هایی در میزان آبدهی و روند تغییرات زمانی آن مشاهده می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده رژیم تغذیه چشمه‌ها، یک رژیم انتشاری است. بر اساس مدل مفهومی تهیه شده در این تحقیق، تفاوت در مساحت حوضه آبگیر چشمه‌های مورد مطالعه و مسیرهای متفاوت جریان آب در آبخوان کارستی، باعث تفاوت آبدهی چشمه‌ها و روند تغییرات زمانی متفاوت آن‌ها شده است.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، چشمه کارستی، دبی، پارامترهای کیفی، توده آهکی دوساری.

Email: Faryabi753@yahoo.com

مقدمه

آبخوان‌های کارستی آب آشامیدنی ۲۲ درصد از جمعیت جهان را تامین می‌کنند (فورد و ویلیامز[1]، ۲۰۰۷). مناطق کارستی در نتیجه انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر به ویژه سنگ‌های آهکی تشکیل می‌شوند. آب باران و آب‌های سطحی از طریق درزه‌ها، شکاف‌ها و حفره‌ها به داخل این سنگ‌ها نفوذ کرده و باعث ایجاد پدیده‌های انحلالی و جریان آب‌زیرزمینی در آن‌ها می‌شوند. ویژگی‌های زمین‌شناسی نقشی اساسی را در گردش آب‌زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی دارند. کارستی‌شدن سنگ‌های قابل انحلال را می‌توان به عنوان مهمترین پدیده زمین‌شناختی که رفتار هیدرولیکی آبخوان‌های کارستی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، در نظر گرفت (تورسن[2] و همکاران، ۲۰۲۰). فرآیند کارستی شدن[3] باعث ایجاد شبکه پیچیده‌ای از درز و شکاف‌ها و مجاری انحلالی در سنگ‌های آهکی خواهد شد. این شبکه‌های شکستگی و مجاری انحلالی، باعث زهکشی آب به سمت چشمه‌های کارستی می‌شوند (فیوریلو و ملیک[4]، ۲۰۱۹). چشمه‌های کارستی معمول‌ترین راه خروج آب از سنگ‌های آهکی هستند. هیدروگراف این چشمه‌ها معرف فرآیندهایی است که جریان آب‌زیرزمینی در درون آبخوان کارستی را تحت تاثیر قرار می دهد (کوتها[5] و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعه روند تغییرات زمانی پارامترهای شیمیایی آب چشمه‌ها نیز کمک فراوانی به شناخت ویژگی‌های آبخوان‌های کارستی می‌کند (محمدی‌بهزاد و همکاران، ۱۳۹٤). ویژگی‌های شیمیایی و باکتریولوژی آب چشمه‌های کارستی ارتباط زیادی با خصوصیات هیدرولیکی آبخوان‌های کارستی دارد. ناهمگنی زیاد ویژگی‌های هیدرولیکی این آبخوان‌ها منجر به تغییرات ناگهانی پارامترهای کیفی آب خروجی از چشمه‌ها خواهد شد (فیوریلو و ملیک، ۲۰۱۹).

برخی اوقات چشمه‌های کارستی دارای شرایط زمین‌شناسی همگن و متجانس، رفتارهای هیدروژئولوژیکی متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. کلانتری و همکاران (۱۳۹۱) نقش شکستگی‌ها در در آبدهی چشمه چم‌آسیاب در شمال شرق استان خوزستان را بررسی کردند. این محققان با استفاده از نقشه‌های چگالی طولی و چگالی کرنل خطواره‌ها بیان کردند که تراکم شکستگی‌ها با ایجاد تخلخل ثانویه، باعث افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها شده و نقش مهمی در آبدهی چشمه دارد. باقری سیدشکری و همکاران (۱۳۹۲) ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی گیلانغرب و خورین در استان کرمانشاه را بررسی کردند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد که توسعه ژئومورفولوژی کارست سطحی و وجود فروچاله‌ها، عامل اصلی رفتار هیدرودینامیکی چندگانه در آبخوان خورین است. نبود فروچاله‌ها و توسعه کم ژئومورفولوژی کارست و ویژگی‌های فیزیوگرافی همچون کشیدگی حوضهٔ تغذیه کنندهٔ آبخوان گیلانغرب، سبب نوسان کم در رفتار هیدرودینامیکی آبخوان گیلانغرب شده است. خوش‌اخلاق

[1] Ford and Williams
[2] Torresan
[3] Karstification
[4] Fiorillo and Malik
[5] Kutha

و همکاران (۱۳۹۳) تاثیر خشکسالی‌های شدید بر آبدهی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه را بررسی کردند. نتایج مطالعات این محققان نشان داد که چشمه‌های زون زاگرس شکسته با یک تاخیر زمانی سه ماهه نسبت به حداکثر بارش واکنش نشان داده و تقریبا به‌طور کامل خشک گردیده‌اند، ولی تاثیرپذیری چشمه‌های زاگرس چین‌خورده از خشکسالی، محدود به کاهش آبدهی بوده است. بهرامی و همکاران (۱۳۹۵) چشمه های کارستی تاقدیس قلاجه و توده پراو بیستون را بررسی کردند. نتایج این مطالعات نشان‌دهنده ارتباط نزدیک بین سنگ‌شناسی و شکستگی‌ها با رفتار هیدرولوژیکی در زاگرس چین خورده و عدم ارتباط این عوامل در زاگرس رورانده است. روحی و کلانتری (۱۳۹۸) از هیدروگراف چندساله به منظور مقایسه رژیم هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی تاقدیس کوه سفید در استان خوزستان استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مخازن کارستی تشکیل شده در تاقدیس کوه سفید رفتارهای هیدرولیکی متفاوتی را نشان می‌دهند. همچنین بررسی هیدروگراف چشمه‌ها نشان داد که دوره‌های چند ساله بارندگی و خشکسالی بر افزایش و کاهش حجم ذخیره آبخوان چشمه برم جمال بطور قابل ملاحظه‌ای موثر بوده‌اند و سبب نوسانات قابل ملاحظه دبی پایه چشمه شده‌اند، اما در مورد چشمه پوتو به دلیل جریان کانالی و تخلیه سریع، دوره‌های ترسالی اثر زیادی در افزایش ذخیره مخزن نداشته‌اند.

سیویل[1] و همکاران (۲۰۱۹) تبادل جریان آب بین سیستم درز و شکاف و مجراهای انحلالی در دو حوضه کارستی در فرانسه را با استفاده از مدل KarstMod بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تبادل آب بین سیستم درز و شکاف سنگ‌های آهکی و مجاری انحلالی در طول بارندگی‌های مهم رخ می‌دهد. این مطالعه نقش درز و شکستگی‌ها در دبی کلی چشمه‌را نیز مشخص کرد. ملیک[2] و همکاران (۲۰۱۹) تاثیر تغذیه ناگهانی[3] بر آبدهی یک چشمه کارستی در کوه‌های کارپات[4] اسلواکی را با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی توصیف کردند. با توجه به نتایج این تحقیق، بین بالارفتن ناگهانی سطح آب زیرزمینی در آبخوان کارستی و افزایش دبی چشمه یک تاخیر زمانی وجود دارد، به خصوص در دوره‌هایی که درجه حرارت آب بالا است. ژانگ[5] و همکاران (۲۰۱۹) پیوستگی هیدرولیکی بخش‌های متفاوت آبخوان کارستی در حوضه چشمه جینان[6] در چین را بررسی کردند. این محققان از داده‌های سطح آب‌زیرزمینی در حوضه کارستی استفاده کردند. با توجه به نتایج این تحقیق، ارتباط هیدرولیکی زون‌های مختلف آبخوان کارستی تعین گردید.

بررسی مطالعات مختلف آبخوان‌های کارستی بیانگر تاثیرگذاری عواملی مانند ژئوموفولوژی سطحی، فیزیوگرافی حوضه تغذیه، ارتفاع، بارندگی، دما، وضعیت تکتونیکی، زمین‌شناسی و ... بر ویژگی های هیدرودینامیکی آبخوان-

[1] Sivelle
[2] Malik
[3] Sudden recharge
[4] Carpathian mountains
[5] Zhang
[6] Jinan

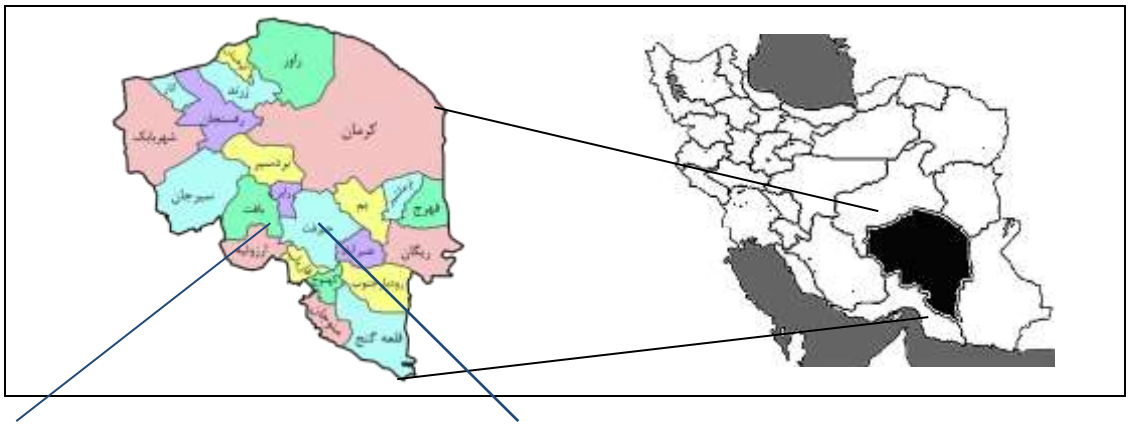
های کارستی است. هدف این تحقیق، بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های موجود در توده آهکی دوساری در جنوب شرق دشت جیرفت و تعیین علل تفاوت رفتار زمانی آنها است. این چشمه‌ها برای اولین بار در این تحقیق، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

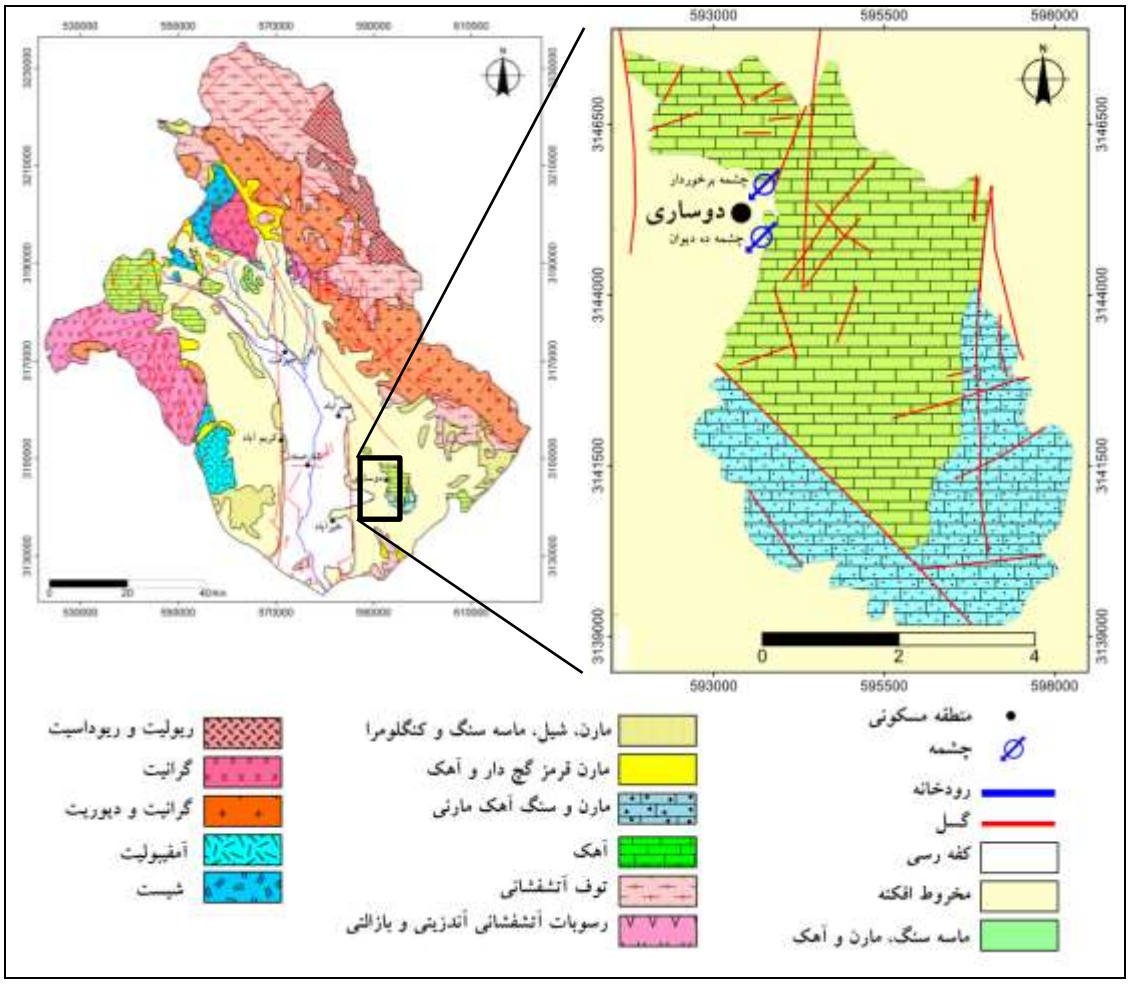
روش تحقیق:

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه دوساری در جنوب شرق دشت جیرفت در استان کرمان واقع شده است و بخشی از حوضه آبریز دشت جیرفت است. مهمترین شهر موجود در این منطقه، شهر دوساری است که در ۲۵ کیلومتری شهرستان جیرفت قرار دارد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم گرم و خشک بوده و متوسط بارندگی آن ۱۷۰ میلی‌متر است.

زمین شناسی: مهمترین واحدهای چینه‌شناسی موجود منطقه مورد مطالعه، واحد OMm، OM1 و رسوبات آبرفتی (Qt) هستند (شکل ۱). واحد OMm شامل مارن و آهک مارنی است. این واحد هم ارز سازند قرمز زیرین در کمربند ارومیه- دختر در نظر گرفته می‌شود. این واحد سنگی نفوذپذیری کمی دارد و در زیر واحد OM1 قرار گرفته است. مرز بین این دو واحد در بخش غربی منطقه به صورت یک گسل با شیب زیاد مشاهده می‌شود. این گسل باعث ایجاد پرتگاه‌هایی نیز شده است. لیتولوژی واحد OM1 شامل سنگ آهک ریفی مربوط به دوره الیگومیوسن (معادل سازند آهک قم) است. این واحد در زیر کنگلومرای سست نئوژن قرار گرفته است که سنگ کف آبخوان دشت جیرفت را تشکیل می‌دهد.

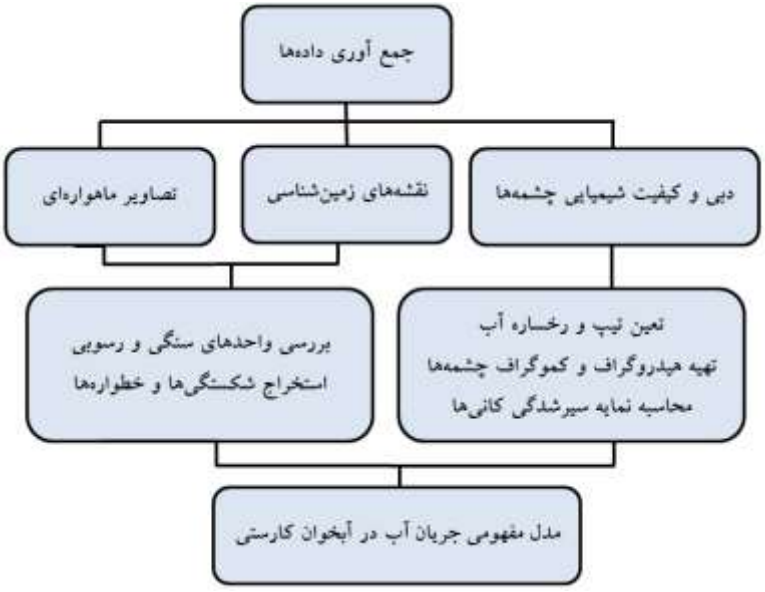




شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه همراه با واحدهای چینه‌شناسی و موقعیت چشمه‌ها (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۳).

وجود گسل‌ها و درز و شکاف‌های متعدد در واحد آهکی OM1 و نفوذ آب به داخل آن باعث انحلال این سنگ‌ها شده است. این آهک‌ها در بخش‌های عمیق خود، دارای آب هستند و چشمه‌هایی را در منطقه دوساری ایجاد کرده‌اند. چشمه‌های ده‌دیوان و برخوردار دوساری دو مورد از مهمترین چشمه‌های موجود در سنگ‌های آهکی منطقه مورد مطالعه هستند. رسوبات آبرفتی دوره کواترنری نیز شامل محصولات ناشی از هوازدگی و تخریب سنگ‌های آهکی، مارنی و رسوباتی هستند که توسط سیلاب‌ها از مناطق بالادست منتقل شده‌اند (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۳).**روش تحقیق:** در این مطالعه برای بررسی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی ده‌دیوان و برخوردار دوساری از آمار و اطلاعات دبی و کیفیت شیمیایی آب این چشمه‌ها استفاده شده است. این داده‌ها توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان به صورت فصلی اندازه‌گیری شده است. داده‌های دبی و کیفیت شیمیایی از سال ۱۳۸۷ تا سال ۱۳۹٤ موجود هستند. از داده‌های دبی چشمه‌ها به همراه

داده‌های بارندگی برای بررسی تغییرات زمانی دبی چشمه‌ها و ارتباط آن با بارندگی استفاده شده است. داده‌های کیفی آب چشمه‌ها نیز برای تعین تیپ و رخساره شیمیایی آب و نمایه سیرشدگی[1] کانی‌های کربناته و بررسی تغییرات زمانی آن استفاده شده است. نمایه سیرشدگی نشان‌دهنده وضعیت تعادل بین کانی‌ها و آب موجود در آبخوان است. در صورتیکه مقدار این نمایه برای یک کانی کمتر از صفر باشد، آب‌زیرزمینی نسبت به آن کانی در وضعیت اشباع قرار دارد و کانی مورد نظر در محیط آبی تمایل به ته‌نشینی و ایجاد رسوب خواهد داشت. اگر مقدار نمایه سیرشدگی برای یک کانی کمتر از صفر باشد، آب‌زیرزمینی نسبت به آن کانی در وضعیت غیراشباع قرار دارد و کانی مورد نظر در محیط آبی انحلال می‌یابد. در این مطالعه از داده‌های ایزوتوپی (^{18}O، ^{2}H، ^{3}H و ^{14}C) که توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران در سال ۱۳۶۵ اندازه‌گیری شده، نیز کمک گرفته شده است. با توجه به غلظت این ایزوتوپ‌ها در آب، می‌توان در مورد سن و زمان ماندگاری آب در آبخوان اظهار نظر کرد. جهت بررسی سیستم جریان در آبخوان کارستی منطقه مورد مطالعه، شکستگی‌ها و خطواره‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به این منظور با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای، شکستگی‌ها، گسل‌ها و خطواره‌های موجود شناسایی و استخراج شده است. به منظور بررسی ارتباط شکستگی‌ها و ظهور چشمه‌ها، نقشه چگالی طولی خطواره‌ها و نقشه چگالی کرنل[2] آنها نیز استخراج شد و مورد بررسی قرار گرفت. فلوچارت روش تحقیق نیز در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل۲. فلوچارت تحقیق

[1] Saturation Index (SI)
[2] Kernel density

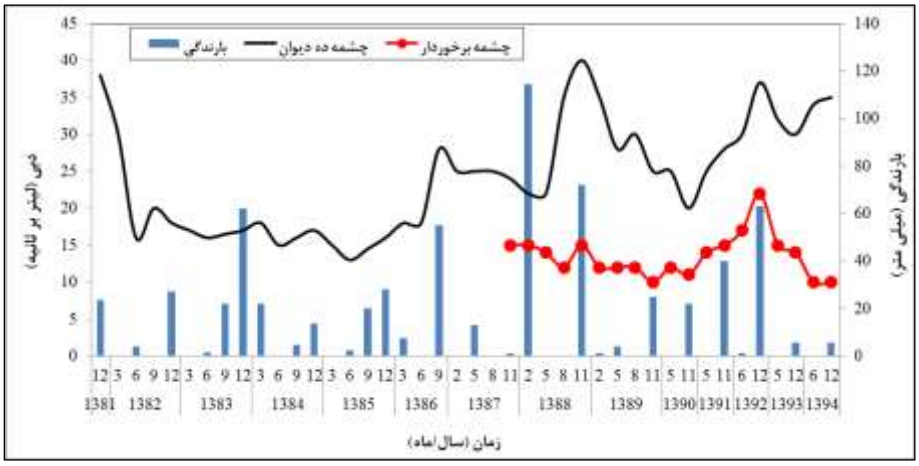
نتایج و بحث

میانگین پارامترهای کمی و کیفی آب چشمه ده‌دیوان و برخوردار دوساری در جدول ۱ ارائه شده است. به جز پارامتر دبی، سایر پارامترهای کمی و کیفی چشمه‌ها، تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. میزان حداقل، متوسط و حداکثر دبی چشمه ده‌دیوان به ترتیب برابر با ۲۰، ۲۹/٦ و ۳۷ لیتر در ثانیه است. این پارامترها برای چشمه برخوردار به ترتیب برابر با ٦، ۱۳/۵ و ۲۲ لیتر در ثانیه است.

جدول ۱. متوسط پارامترهای کمی و کیفی چشمه‌های مورد مطالعه در دوره آماری ۹٤-۱۳۸۷

نام چشمه	دبی	هدایت الکتریکی	سختی کل	کلسیم	سدیم	بی‌کربنات	سولفات	کلراید
	l/s	µmoh/cm	mg/l	meq/l				
ده دیوان	۲۹/٦	٦۸۷	۲۱۳/۸	۲/۷۱	۲/۷۹	۳/۰۳	۲	۲/۰۳
برخوردار	۱۳/۵	٦۷۳	۲۱٤/۲	۲/۷٦	۲/٦٤	۳/۰۸	۲/۰۷	۱/۷٦

هیدروگراف چشمه‌ها: هیدروگراف چشمه‌های ده‌دیوان و برخوردار دوساری در شکل ۳ ارائه شده است. برای بررسی تاثیر بارندگی بر آبدهی چشمه‌ها، بارندگی ایستگاه باران‌سنجی میانده جیرفت نیز در نمودار شکل ۳ نشان داده شده است. میزان وابستگی آبدهی (دبی) چشمه برخوردار به بارندگی بسیار زیاد است. آبدهی این چشمه سریعاً به بارندگی واکنش نشان می‌دهد. به طوریکه در ماه‌های با بارش بیشتر، دبی چشمه برخوردار افزایش واضحی را نشان می‌دهد اما با کاهش بارندگی یا میزان ناچیز آن در ماه‌های خشک، دبی چشمه سریعاً کاهش می‌یابد. روند تغییرات زمانی آبدهی چشمه ده‌دیوان با چشمه برخوردار مقداری متفاوت است. میزان نوسانات دبی این چشمه در اثر بارندگی بیشتر است. این روند متفاوت در سال‌های ۸۸ تا ۹۰ به طور واضح دیده می‌شود. در این بازه زمانی نوسانات دبی چشمه ده‌دیوان نسبت به چشمه برخوردار بسیار بیشتر است. به نظر می‌رسد که آبدهی چشمه ده‌دیوان دارای یک آستانه ماکزیمم است که دبی آن بیش از این مقدار آستانه نمی‌تواند افزایش یابد. در هنگام بارندگی نیز تا وقتی که میزان آبدهی چشمه ده‌دیوان به این مقدار آستانه نرسد، آبی بیش از جریان پایه به چشمه برخوردار نمی‌رسد (بازه زمانی ۸۸ تا ۹۰). هنگامی که بارندگی افزایش یابد و دبی چشمه ده‌دیوان به آستانه ماکزیمم خود برسد، آب بیشتری به سمت چشمه برخوردار هدایت شده و باعث نوسانات بیشتر آبدهی آن می‌شود (بازه زمانی ۹۱ تا ۹٤). این فرضیه پیشنهاد می‌کند که چشمه ده دیوان فاصله کمتری تا منطقه اصلی آبگیر چشمه‌ها دارد و جهت اصلی جریان آب زیرزمینی در سنگ‌های آهکی منطقه دوساری از سمت منطقه تغذیه به سمت چشمه ده‌دیوان و سپس چشمه برخوردار می‌باشد.



شکل ۳. هیدروگراف چشمه‌های مورد مطالعه

کیفیت آب چشمه‌ها: ویژگی‌های آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب چشمه‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. با توجه به این جداول مشاهده می‌شود که پارامترهای کیفی آب در دوره مورد مطالعه، تغییرات زیادی را نشان نداده‌اند. تغییرات نسبتاً کم پارامترهای کیفی آب چشمه‌ها عمدتاً مربوط به جریان آب در شبکه‌ای از درز و شکاف‌های مرتبط با هم است. تشابه پارمترهای کیفی چشمه‌ها با یکدیگر نشان‌دهنده منشاء یکسان آب چشمه‌ها و سنگ‌شناسی یکسان مسیر جریان عبور آب از محل تغذیه تا محل ظهور آب در چشمه‌ها است.

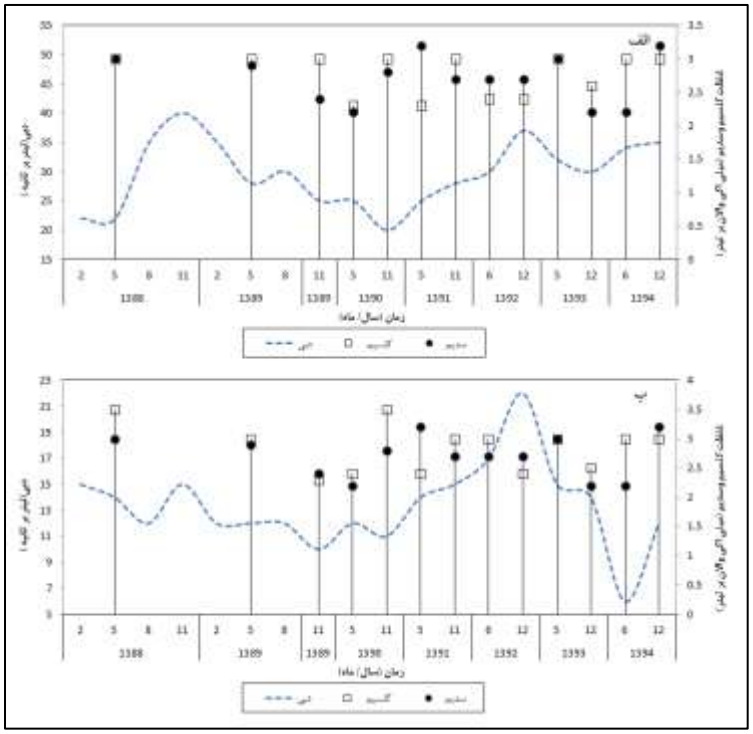
جدول ۲. ویژگی‌های آماری پارامترهای کیفی آب چشمه ده‌دیوان دوساری

پارامتر	هدایت الکتریکی	سختی کل	کلسیم	منیزیوم	سدیم	بی‌کربنات	سولفات	کلراید
	µmoh/cm	mg/l	meq/l					
میانگین	٦٨٦/٩٢	٢١٣/٧٥	٢/٧١	١/٥٧	٢/٧٩	٣/٠٣	٢	٢/٠٣
حداقل	٦٥٥	٢٠٠	٢/٣	١	٢/٢	٢/٤	١/٢	١/٤
حداکثر	٧٢٣	٢٥٠	٣	٢/٤	٣/٤	٣/٨	٣	٢/٧
انحراف معیار	٢٤/٢٧	١٥/٣٣	٠/٣١	٠/٥	٠/٤٢	٠/٣٤	٠/٥٣	٠/٣٢

جدول ۳. ویژگی‌های آماری پارامترهای کیفی آب چشمه برخوردار دوساری

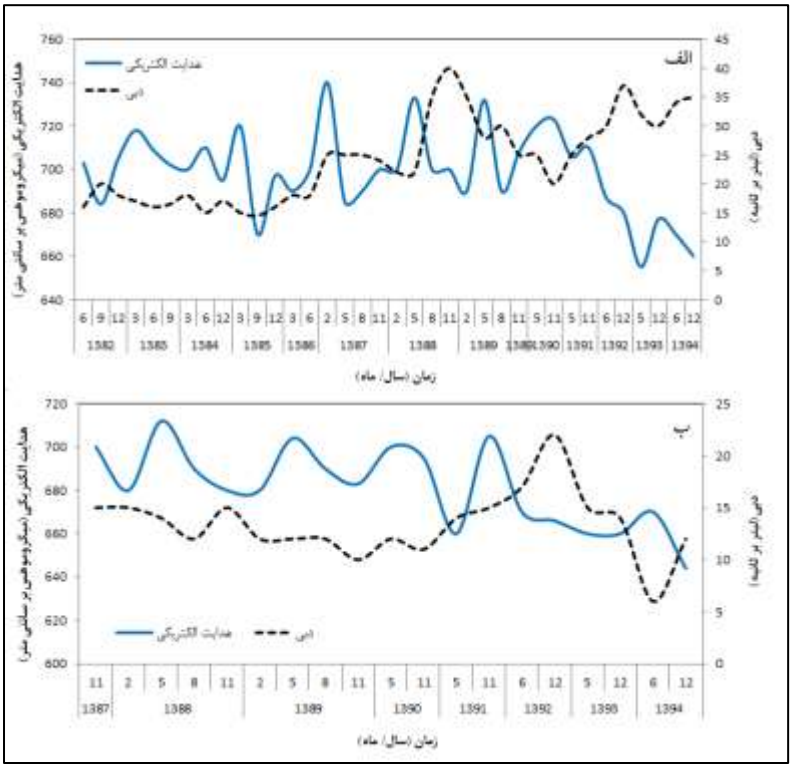
پارامتر	هدایت الکتریکی	سختی کل	کلسیم	منیزیوم	سدیم	بی‌کربنات	سولفات	کلراید
	µmoh/cm	mg/l	meq/l					
میانگین	٦٧٢/٩٢	٢١٤/٢٣	٢/٧٦	١/٥٢	٢/٦٤	٣/٠٨	٢/٠٧	١/٧٦
حداقل	٦٢٠	١٩٠	٢/٣	١	٢/٢	٢/٨	١/٦	١/٤
حداکثر	٧١٢	٢٥٠	٣/٥	٢	٣/٢	٣/٦	٢/٧	٢
انحراف معیار	٢٢/٥٢	١٣/٥٦	٠/٣٨	٠/٣٥	٠/٢٨	٠/١٨	٠/٣٢	٠/١٥

با توجه به جدول‌های ۲و ۳ مشخص می‌شود که آنیون غالب آب چشمه‌ها، بی‌کربنات است. بنابراین تیپ عمده آب چشمه‌ها، تیپ بی‌کربناته است. دو رخساره اصلی در آب چشمه‌ها مشاهده می‌شود: رخساره کلسیک (با غالب بودن یون کلسیم) و رخساره سدیک (با غالب بودن یون کلسیم). به عبارت بهتر، نوع کاتیون غالب آب چشمه‌ها در طول زمان متفاوت است، به طوری که کاتیون غالب بین کلسیم و سدیم متغیر است. فراوانی رخساره سدیک در آب چشمه‌ها در دوره زمانی ۹۰-۱۳۸۸ نسبت به دوره زمانی ۹۵-۱۳۹۱ کمتر است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی این تحقیق اشاره شد، دبی چشمه ده‌دیوان دارای یک آستانه ماکزیمم است که پس از آن نوسانات آبدهی چشمه برخوردار افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که این آستانه دبی، کیفیت آب چشمه‌ها را نیز تحت تاثیر قرا می‌دهد. به عبارت بهتر رسیدن دبی چشمه ده‌دیوان به مقدار ماکزیمم خود باعث افزایش جریان آب به سمت چشمه برخوردار و ایجاد تغییراتی در کیفیت شیمیایی آب چشمه‌ها می‌شود. شکل ٤ الف، تغییرات زمانی کاتیون‌های غالب آب چشمه ده‌دیوان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش دبی چشمه، غلظت یون سدیم در آب آن افزایش یافته و تیپ و رخساره آب از بی‌کربناته کلسیک به بی‌کربناته سدیک تغییر می‌کند. در مورد چشمه برخوردار این روند به صورت واضح دیده نمی‌شود. تنها در هنگام اوج دبی چشمه برخوردار، غلظت یون سدیم بیش از یون کلسیم است (شکل ٤ ب). دلیل این موضوع را می‌توان به امکان تماس بیشتر آب با نهشته‌های مارنی موجود در واحد OMm در هنگام افزایش جریان آب در آبخوان مربوط دانست. در ترکیب این نهشته مارنی کانی‌های حاوی سدیم نیز وجود دارد (فاریابی، ۱۳۷۲).



شکل ٤. نمودار تغیرات زمانی دبی و غلظت کاتیون‌های غالب چشمه ده‌دیوان (الف) و برخوردار (ب)

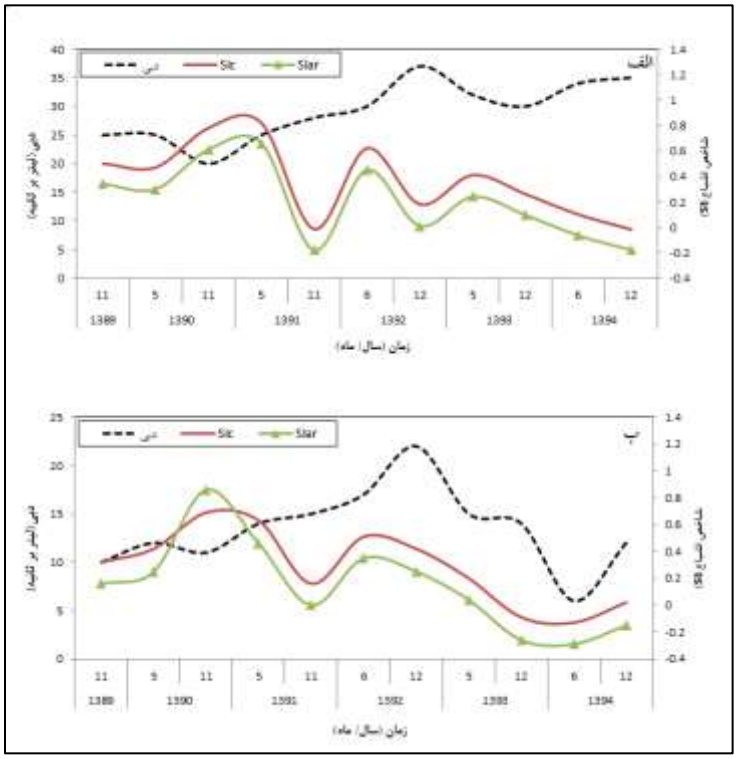
سری زمانی تغییرات هدایت الکتریکی آب و دبی چشمه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. به طور کلی افزایش دبی باعث کاهش میزان هدایت الکتریکی آب می‌شود. در مورد چشمه ده‌دیوان این روند معکوس به خوبی دیده می‌شود و با افزایش دبی چشمه، هدایت الکتریکی آب آن کاهش یافته و روند عکس آن نیز تکرار می‌شود (شکل ۵ الف). اما در مورد چشمه برخوردار این روند به خوبی چشمه ده دیوان مشاهده می‌شود (شکل ۵ ب). این موضوع نیز می‌تواند دلیلی بر آبدهی تاخیری چشمه برخودار باشد.



شکل ۵. نمودار تغیرات زمانی دبی و هدایت الکتریکی آب چشمه ده‌دیوان (الف) و برخوردار (ب)

نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته: با توجه به این که سنگ‌شناسی محیط جریان آب از منطقه تغذیه به سمت منطقه تخلیه (چشمه‌ها) عمدتاً شامل سنگ‌های آهکی است، نمایه سیرشدگی کانی‌های کلسیت (SIc) و آراگونیت (SIar) در آب چشمه‌ها محاسبه شده است. نمایه سیرشدگی کانی‌های کلسیت و آراگونیت در آب چشمه‌ها در محدوده اشباع و فوق اشباع قرار دارد (مقدار نمایه سیرشدگی بیش از صفر است). تغییرات زمانی نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته و دبی آب چشمه‌های مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ٦ الف نشان داده شده، رابطه بین دبی و نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته در چشمه ده‌دیوان یک رابطه معکوس است و با افزایش دبی، نمایه سیرشدگی کانی‌ها کاهش می‌یابد. این روند در طول دوره مطالعاتی تکرار شده است. اما در چشمه برخوردار دو روند متفاوت مشاهده می‌شود: از سال ۱۳۸۹ تا پایان سال ۱۳۹۱ رابطه بین نمایه‌سیرشدگی و

دبی چشمه یک رابطه معکوس است اما در فاصله سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹٤ رابطه تقریباً مستقیمی بین دبی چشمه و نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته مشاهده می‌شود (شکل ٦ ب). این روندهای متفاوت نیز بیانگر منابع متفاوت تغذیه چشمه‌ها است. می‌توان گفت که تغذیه چشمه دوساری توسط بارندگی انجام می‌شود اما چشمه برخوردار هم تحت تاثیر تغذیه بارندگی و هم تحت تاثیر دبی آستانه چشمه ده‌دیوان قرار دارد. افزایش ورود آب ناشی از بارندگی به چشمه ده‌دیوان، باعث حرکت آب‌های قدیمی ذخیره شده در آبخوان به سمت چشمه برخوردار می‌شود. ورود این آب‌های قدیمی منجر به تغییرات غیرعادی پارامترهای کیفی و وضعیت تعادلی کانی‌های کربناته در آب چشمه برخوردار می‌شود.



شکل ٦. تغیرات زمانی نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته و دبی چشمه ده‌دیوان (الف) و برخوردار (ب)

ترکیب ایزوتوپی آب چشمه‌ها: نتایج آنالیز ایزوتوپی آب چشمه‌ها و بارندگی دشت جیرفت در جدول ٤ ارائه شده است. غلظت ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ آب چشمه‌ها با هم تشابه زیادی دارد (‰ ۰/۰۳ ± ٤/۸٦-). تفاوت محتوی ایزوتوپی چشمه‌ها در حدود ‰ ۰/۰٦ می‌باشد. اما محتوی ایزوتوپی چشمه‌ها و آب باران کاملاً متفاوت است. آب چشمه‌ها نسبت به بارندگی از لحاظ ایزوتوپی تهی‌شدگی زیادی را نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده نقش عامل دیگری علاوه بر بارندگی در تغذیه چشمه‌ها باشد. بر طبق مطالعات تماب (۱۳٦۵) چشمه ده‌دیوان و چشمه برخوردار از نوع چشمه‌های گسلی بوده و در مرز تماس بین سنگ‌های آهکی الیگومیوسن و

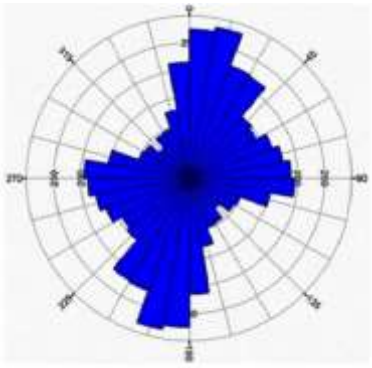
سنگ‌های آذرین و دگرگونی زیرین ایجاد شده‌اند. با توجه به تفاوت محتوی ایزوتوپی چشمه‌ها و آب باران می‌توان این نظریه را تایید کرد. به ویژه در مورد چشمه ده دیوان که در گذشته بسیار پرآب تر بوده و آبدهی آن در حدود ۱۱۷ لیتر در ثانیه نیز گزارش شده است. در صورتی‌که دبی سایر چشمه ها کم (در حدود ۱۰ تا ۱۷ لیتر بر ثانیه) بوده است. غلظت تریتیم آب چشمه‌های ده‌دیوان و برخوردار به ترتیب برابر با ۲۰/٥٤ و ۱۲/۹۵ واحد تریتیم[1] است. این غلظت‌ها نشان‌دهنده آب‌های جوان در چرخه هیدرولوژی هستند. غلظت تریتیم آب در چشمه ده‌دیوان بیشتر از چشمه برخوردار است. این موضوع بیانگر زمان ماندگاری بیشتر آب در چشمه برخوردار است. با توجه به محتوی ایزوتوپی کربن ١٤چشمه‌ها (جدول ٤)، آب چشمه‌های مورد مطالعه از نوع آب‌های فعال در چرخه هیدرولوژی هستند. به طور کلی بررسی غلظت ایزوتوپی چشمه‌ها نشان می‌دهد که این آب‌ها از یک نوع هستند.

جدول ٤. نتایج آنالیز ایزوتوپی آب چشمه‌های ده دیوان و برخوردار دوساری (تماب،١٣٦٦)

نام منبع	^{18}O	^{2}H	d-excess	^{3}H	^{14}C
	(‰SMOW)	(‰SMOW)	(‰)	(TU)	(pmc)
چشمه برخوردار دوساری	-٤/٨٣	-	-	۱۲/۹٥	۷۱/۰۲
چشمه ده‌دیوان دوساری	-٤/٨٩	-۲٥/۹۷	۱۳/۱٥	۲۰/٥٤	۷٥/۹۹
آب باران دشت جیرفت	۱/۲۸۲	٦/۰۱	-٤/٨	-	-

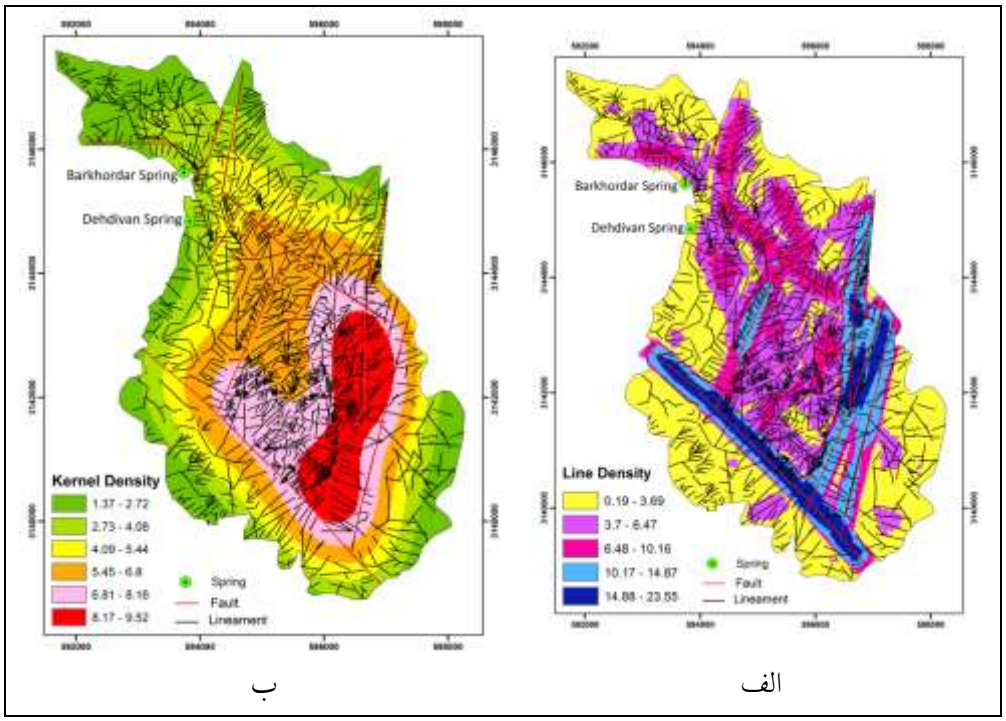
بررسی خطواره‌ها: خطواره‌های موجود توده آهکی مورد مطالعه با استفاده از نقشه زمین شناسی و تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده‌اند. رزدیاگرام خطواره‌ها در شکل ۷ و چگالی آن‌ها در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین تراکم طولی خطواره‌ها در راستای گسل‌هایی دیده می‌شود که مرز بین واحد آهکی و مارنی را تشکیل داده‌اند. این گسل‌ها دارای شیب زیادی بوده و پرتگاه‌هایی با طول زیاد را ایجاد کرده‌اند. توزیع مکانی خطواره ها نشان‌دهنده ایجاد جریان آب در یک محیط درز و شکافی و تجمیع آن به سمت محل چشمه‌ها است. این موضوع در شکل ۸ ب واضح تر است. در این شکل توزیع مکانی تابع چگالی کرنل خطواره‌ها نشان داده شده است. با توجه به این شکل مناطق دارای بیشترین مقدار تابع که با رنگ قرمز مشخص شده اند، بیشترین نقش را در تغذیه آبخوان آهکی دارند. گسترش و جهت گیری تابع چگال کرنل خطواره‌ها نیز به سمت محل ظهور چشمه‌هاست.

[1] Tritium Unit (TU)



شکل ۷. رزدیاگرام خطواره‌های موجود در توده آهکی دوساری

سیستم جریان آب در آبخوان کارستی: برای تعیین نوع سیستم جریان در یک آبخوان کارستی عمدتاً پارامترهایی مانند اشکال ژئومرفولوژی سطحی، تغیرات آبدهی و پارامترهای کیفی چشمه‌ها در نظر گرفته می‌شود (رئیسی و همکاران، ۱۹۹۳). سنگ‌های آهکی در منطقه مورد مطالعه به صورت برهنه و در برخی نقاط با پوشش نه چندان ضخیم خاک مشاهده می‌شوند. با توجه به جداول ۲و ۳ تغییرات سختی کل آب چشمه‌ها نیز در حدود ۷ درصد است. بخش زیادی از آبدهی چشمه‌ها نیز مربوط به جریان پایه است. بنابراین با توجه به تقسیم‌بندی رئیسی و همکاران (۱۹۹۳)، سیستم جریان در آبخوان کارستی مورد مطالعه از نوع افشان بوده و عمدتاً مربوط به جریان آب در شبکه‌ای از درز و شکاف‌ها مربوط می‌شود. گسل‌های موجود در مرز سنگ‌های آهکی و سنگ‌های مارنی از لحاظ هیدرولیکی به صورت مرزهای نفوذناپذیر عمل کرده و باعث هدایت جریان آب به داخل سنگ‌های آهکی می‌شوند. با توجه به نحوه پراکنش خطواره‌ها (شکل ۸)، جهت جریان آب زیرزمینی به از توده آهکی به سمت محل چشمه‌ها است. بدیهی است که گسل‌های موجود نقش مهمی در تعین جهت جریان آب زیرزمینی دارند. با توجه به مطالب بالا، مدل مفهومی جریان آب در آبخوان آهکی مورد مطالعه تهیه و در شکل ۹ ارائه شده است.



ب الف

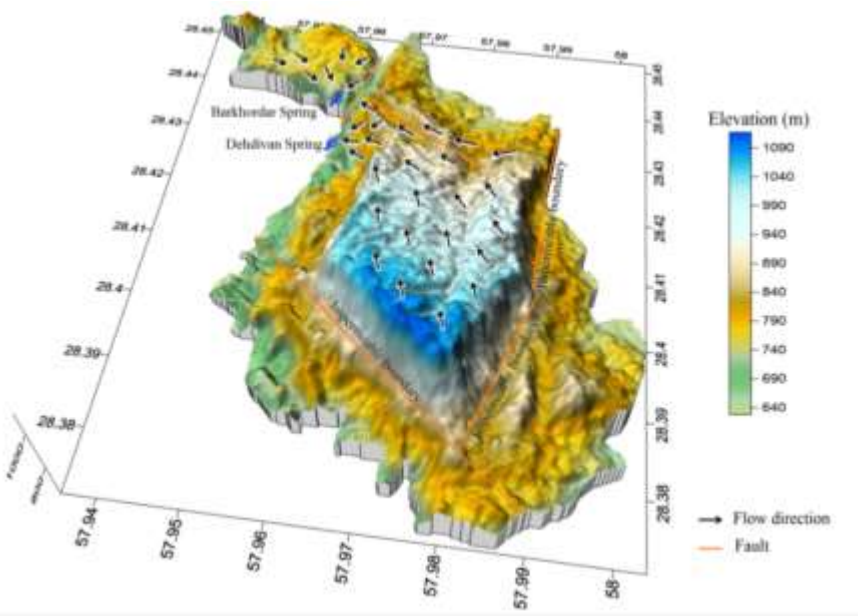
شکل ۸ چگالی طولی خطواره ها (الف) و توزیع مکانی تابع چگالی کرنل خطواره‌ها (ب)

نتیجه‌گیری

۱- چشمه‌های ده‌دیوان و دوساری دارای یک رژیم جریان انتشاری هستند و آب در شبکه‌ای از درز و شکستگی‌ها در توده آهکی جریان می‌یابد.

۲- چشمه ده‌دیوان فاصله کمتری تا منطقه تغذیه آبخوان آهکی دارد. جهت غالب جریان آب زیرزمینی در آبخوانی آهکی دوساری از سمت منطقه تغذیه به سمت چشمه ده‌دیوان و سپس چشمه برخوردار است.

۳- آبدهی چشمه ده‌دیوان دارای یک آستانه ماکزیمم است. در هنگام وقوع بارندگی‌های مهم (با مقدار بیش از میانگین ماهانه بارندگی) دبی این چشمه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در نتیجه آب بیشتری به سمت چشمه برخوردار جریان یافته و باعث نوسانات بیشتری در آبدهی آن می‌شود. رسیدن دبی چشمه ده‌دیوان به مقدار ماکزیمم خود باعث ایجاد تغییراتی در کیفیت شیمیایی آب چشمه‌ها نیز می‌شود. چشمه ده‌دیوان روند معکوس تغییرات زمانی دبی و هدایت الکتریکی را به خوبی نشان می‌دهد، اما در مورد چشمه برخوردار این روند متفاوت است. رابطه بین دبی و نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته در چشمه‌ها نیز مشابه با روند تغییرات زمانی دبی و هدایت الکتریکی است. این روندهای متفاوت می‌تواند دلیلی بر آبدهی تاخیری چشمه برخودار باشد.



شکل ۹. مدل مفهومی جریان آب در آبخوان آهکی مورد مطالعه

٤- افزایش تغذیه آبخوان آهکی در نتیجه بارندگی، باعث افزایش دبی چشمه دهدیوان و جریان یافتن آب‌های زیرزمینی ذخیره شده در آبخوان به سمت چشمه برخوردار می‌شود. ورود این آب‌ها به چشمه برخوردار باعث تغییرات غیرعادی هدایت الکتریکی و نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته در آب این چشمه می‌شود. به طوری که در هنگام افزایش دبی چشمه برخوردار، میزان هدایت الکتریکی و نمایه سیرشدگی کانی‌های کربناته افزایش می‌یابد.

٥- چشمه دوساری توسط بارندگی تغذیه می‌شود اما چشمه برخوردار هم تحت تاثیر بارندگی و هم تحت تاثیر دبی آستانه چشمه دهدیوان قرار دارد.

٦- چشمه دهدیوان دارای حوضه آبگیر وسیع‌تری بوده و مهمترین راه خروج آب‌زیرزمینی از آبخوان آهکی دوساری است.

References:

Bahrami, Sh., Zangane Asadi, M.A. & Jahanfar, A. (2016). Evaluation of Karst development using hydrodynamic and hydrochemical characteristics of Zagros Karst springs (case study: Ghalaje anticline and Parva body). Geography and Development, 14 (44), 107-122, (in Farsi).

Bagheri Seyyed Shokri , S., Yamani, M., Jafarbeygluo, M., Karimi, H, & Moghimi, E. (2013). Evaluation of hydrodynamic characteristics of Karst aquifers using time series analysis (case study: Karst aquifers of Gilan e Gharb and Khorin, Kermanshah province). Quantitative Geomorphology Research, 2(3), 1-16, (in Farsi).

Faryabi, A. (1993). Stratigraphy and paleontology of Qom formation in Jiroft and Sarduiyeh areas. Kharazmi University, Unpublished thesis, (in Farsi).

Fiorillo, F. & Malik, P. (2019). Hydraulic behavior of Karst aquifers. Water, 11 (1563), 1-6.

Ford, D. C. & Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. Washington DC: John Wiley and Sons Ltd.

Geological survey and mineral exploration of Iran (2004). Geological map of Sabzevaran.

Kalantari, N., Khobyari, A. & Dorraninejad, S. (2012). Assessing the role of fractures in water discharge from Chamasiab spring, SE of Khuzestan province. Geotechinical Geology, 8 (1), 65-71, (in Farsi).

Khoshakhlagh, F., Bagheri Seyyed Shokri, S. & Safarrad, T. (2014). The analysis of severe droughts influences on Karst springs discharge in Kermanshah province (case study: severe drought of year 2007-2008). Geographical Space, 14 (48), 1-19, (in Farsi).

Kuhta, M., Brkic, Z. & Stroj, A. (2012). Hydrodynamic characteristics of Mt. Biokovo foothill springs in Croatia. Geologia Croatica, 65 (1), 41-52.

Malik, P., Coplak, M., Kuvik, M. & Svasta, J. (2019). Recharge impulse spreading in western Carpathian's mountainous Karst aquifer. Water, 11, 763.

Mohammdi Behzad, H.R., Charchi, A. & Kalantari, N. (2019). Evaluation of the hydrogeological behavior of Sabzab Karst spring, SE of Khuzestan province. Advanced Applied Geology, 5 (11), 10-19, (in Farsi).

Raeisi, E., Pezeshkpoor, P. & Moore, F. (1993). Characteristics of Karst aquifer as indicated by temporal changes of the springs physicochemical parameters. Iranian Journal of science & technology, 17(1), 17-28.

Rouhi, H. & Kalantari, N. (2019). Using multi-year hydrograph to comparison the hydrogeological regimes of Karstic springs in Kuhe-safid anticline, Khuzestan, Iran. Hydrogeology, 4(1), 14-25, (in Farsi).

Sivelle, V., Labat, D., Mazzilli, N., Massei, N. & Jourde, H. (2019). Dynamics of the flow exchanges between matrix and conduits in karstified watersheds at multiple temporal scales. Water, 11, 569.

Tamab, Iranian Water Resource Research Institute (1982). Isotopic study of water resources of Jiroft plain. Report No 98. 35 p, (in Farsi).

Torresan, F., Fabbri, P., Piccinini, L., Dalla Libera, N., Pola, M. & Zampieri, D. (2020). D efining the hydrogeological behavior of karst springs through an integrated analysis: a case study in the Berici Mountains area (Vicenza, NE Italy). Hydrogeology Journal, 28, 1229–1247.

Zhang, Z., Wang, W., Qu, S., Huang, Q., Liu, S., Xu, Q. & Ni, L. (2019). A new perspective to explore the hydraulic connectivity of Karst aquifer system in Jinan spring catchment, China. Water, 10, 1368.

Investigating the causes of difference among the hydrogeological behavior of karst springs in arid regions: A case studyof Dosari limestone body in the SE of Iran

Mohammad Faryabi[1*]

1- Assistant professor, Department of Ecological Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

Recieved: 2020 June 5 Accepted: 2021 October 16

Introduction:

In many areas in the world, karst springs constitute the main source of water supply. In recent years, the decline in the groundwater storage of alluvial aquifers has led to a bulk of research on the water resources in hard formations. From a hydrogeological point of view, limestone is one of the most important types of hard formations. Karstification of limestone rocks leads to the development of conduit and fracture networks, which causes drainage to karst springs. These springs are the most common path of groundwater discharge from limestone rocks. Sometimes, karst springs with similar geological conditions show different hydrogeological behaviors. The study of different karst aquifers indicates the influence of factors such as surface geomorphology, altitude, rainfall, temperature, tectonic status and geology on the hydrodynamic characteristics of karst aquifers.
The Dosari limestone body, belonging to the Oligo-Miocene, is located in the southeast of Jiroft plain. The Dehdivan and Barkhordar springs are the most important springs in the Dosari area. Despite the same origin of the springs, there are differences between the spring discharge rates and their temporal changes. This study has been conducted to investigate the hydrogeological characteristics of the Dosari limestone rocks and their springs.

Methodology:

The objective of this study is to delineate the karst hydrogeology and hydrogeological behavior of the karst springs in the Dosari limestone body. For this purpose, the discharge data and the water quality of the springs there have been used. Fractures and lineaments have also been extracted and analyzed using geological maps and satellite images. The saturation index of carbonate minerals is calculated to delineate the equilibrium status of Calcite and Aragonite minerals in the groundwater. With respect to the data, a primary conceptual model is presented for the groundwater flow in limestone aquifers.

Results and discussion:

The dependence of the Barkhordar Spring discharge on rainfall is very high. The discharge of this spring reacts to rainfall very quickly, but the Dehdivan Spring shows more discharge fluctuations versus rainfalls. There have been relatively low temporal changes in the springs'

Email: Faryabi753@yahoo.com

chemical parameters during the study period. The low temporal changes in the chemical characteristics of the springs indicate the similarity of the discharge regime of the Dehdivan and Barkhordar springs. The discharge of the Dehdivan Spring has a maximum threshold, after which the fluctuations of the Barkhordar Spring discharge increases. It seems that this discharge threshold also affects the water quality of the springs. In other words, reaching its maximum discharge, the Dehdivan Spring increases the flow of water to the Barkhordar Spring and changes the chemical quality of its water. In the case of the Dehdivan Spring, there is a reverse temporal trend of spring discharge and its electrical conductivity. In the case of the Barkhordar Spring, however, the trend is different. The difference of these trends accounts for the delayed discharge of the Barkhordar Spring. The Dosari Spring is recharged by rainfall, but the Barkhordar Spring is affected by both rainfall and the discharge threshold of the Dehdivan Spring.

Conclusion:

According to the results, the springs recharge regime is of the diffuse type. The Dehdivan Spring has a short distance to the main recharge catchment of the springs, and the main direction of groundwater through the Dosari limestone is from the recharge area to the Dehdivan Spring and then the Barkhordar Spring. The difference in the catchment area of the springs and the water paths in the aquifer have caused a difference in the discharge of the springs and its temporal changes. Increasing recharge to the Dehdivan Spring due to rainfall leads to the flow of old stored groundwater to the Barkhordar Spring. The entry of these waters into the Barkhordar Spring causes abnormal changes in the spring discharge, water quality (e.g., ion concentration and electrical conductivity) and balance of the carbonate minerals in the Barkhordar Spring water. So, when the discharge of the Barkhordar Spring increases, the electrical conductivity and the saturation index of carbonate minerals increase too. This indicates the discharge of old water stored in the karst aquifer.

Keywords: Groundwater, Karst spring, Discharge, Chemical parameters, Dosari limestone body

Email: Faryabi753@yahoo.com