

بررسی سیستم غالب جریان و سازوکار تخلیه چشمه‌های کارستی غرب مجن

سیما توکلی^{۱*} و غلامحسین کرمی^۲

چکیده

منطقه مورد مطالعه در هشت کیلومتری غرب مجن در جنوب آبشار مجن، از توابع شهرستان شاهرود واقع شده است. برای بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های موجود در منطقه، دی، هدایت الکتریکی و دما از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. هم‌چنین، غلظت یون‌های اصلی شامل کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، سولفات و کلر در آزمایشگاه آب و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه‌گیری شدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که ضریب تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برای تمام چشمه‌ها اندک است و تأییدکننده رژیم غالب سیستم جریان افشان در منطقه مورد مطالعه هستند. منحنی فرود چشمه‌های مورد مطالعه دارای یک ضریب بده (α) با شیب $0/009$ که بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان کارستی مورد نظر است. از دلایل اصلی ظهور چشمه‌های منطقه مورد مطالعه، برخورد آب زیرزمینی حوضه کارستی این چشمه‌ها (سنگ‌های آهکی سازندهای کرتاسه بالایی و لار) با واحدهای غیرقابل نفوذ (مارن‌ها و آهک‌های مارنی) می‌باشد. بر این اساس چشمه‌های منطقه، از نوع چشمه‌های سرریزی (Overflow Springs) هستند و تمامی این چشمه‌ها از یک آبخوان تخلیه می‌شوند. نمودارهای هیدروشیمیایی مربوط به نمونه‌های تهیه شده از چشمه‌های مورد مطالعه در خرداد ماه ۱۳۹۶ نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای کلسیم و بی‌کربنات بالایی بوده و در محدوده خاص آب‌های کارستی واقع شدند. از نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم برای تعیین جنس غالب آبخوان در مناطق کارستی استفاده می‌شود. میانگین نسبت یون کلسیم به منیزیم برای نمونه‌های مورد مطالعه حدود $2/60$ است که می‌توان نتیجه گرفت لیتولوژی غالب آبخوان کارستی مورد مطالعه، آهک است. همچنین در این پژوهش حوضه چشمه‌ها به صورت مقدماتی ترسیم شد. سپس با استفاده از روش بیلان و مقایسه مقادیر حجم تخلیه و تغذیه سالانه از حوضه، دقت حوضه مقدماتی ترسیم و ارزیابی شد. بر اساس مقایسه‌ی مذکور، خطای نسبی $0/8$ درصد به دست آمد که با توجه به خطای نسبی اندک بین حجم‌های تغذیه و تخلیه و همچنین وضعیت چینه‌شناسی منطقه، حوضه آبرگیر ترسیم شده از دقت مناسبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: سیستم جریان افشان، چشمه‌های کارستی مجن، هیدروژئولوژیکی، هیدروژئوشیمیایی.

ارجاع: سیما توکلی س. و کرمی غ. ۱۴۰۰. بررسی سیستم غالب جریان و سازوکار تخلیه چشمه‌های کارستی غرب مجن. مجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۲۱-۱۳.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۲- دانشیار گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

* نویسنده مسئول: sima_tavakkoli@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

مقدمه

آبخوان‌های کارستی از منابع آبی مهم دنیا هستند و با توجه به موقعیت خاص آب و هوای ایران و همچنین کمبود بارش و توزیع نامتناسب مکانی و زمانی بارش‌ها، منابع آب زیرزمینی و به خصوص منابع کارستی اهمیت ویژه‌ای دارند؛ بنابراین با توجه به گسترش وسیع سازندهای کارستی در کشور از یک سو، و افزایش جمعیت کشور و متعاقب آن نیاز روزافزون به منابع جدید آب از سوی دیگر، انجام مطالعات روی منابع کارستی مهم است. اهمیت سفره‌های کارستی از آن‌جا مشخص می‌شود که حدود ۲۵ درصد از آب شرب جمعیت جهان را فراهم می‌کنند (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). از طرف دیگر منابع آب موجود در سنگ‌های آهکی کارستی دارای کیفیت بسیار مطلوب است و از بهترین و سالم‌ترین منابع آب شرب هستند. چشمه‌ها از مهمترین عارضه‌های هیدروژئولوژیکی چرخه هیدرولوژیکی هستند که می‌توانند اطلاعات ارزشمندی در مورد سیستم جریان آب زیرزمینی در محیط‌های کارستی ارائه دهند (مالک و وجتکووا، ۲۰۱۲؛ فیوریلو، ۲۰۱۴؛ فیوریلو و همکاران، ۲۰۱۵).

چشمه‌های کارستی محل تخلیه طبیعی آبخوان‌های کارستی است که بهره‌برداری از آن‌ها در مقایسه با استحصال آب از طریق حفاری و پمپاژ به مراتب آسان‌تر و کم هزینه‌تر است. در این سیستم‌ها بیشتر مجاری انحلالی در ارتباط با چشمه‌های کارستی است؛ بنابراین تجزیه و تحلیل، تغییرات و شیوه فروکش دبی، همچنین غلظت یون‌های محلول در چشمه‌ها می‌تواند منعکس‌کننده خصوصیات کل سیستم باشد (رضایی، ۱۳۷۹). برای بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی سیستم‌های جریان آب زیرزمینی از یکسری اطلاعات جامع در مورد شیمی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود که وابسته به عوامل مختلفی از جمله زمین‌شناسی محل، میزان هوازدگی سنگ و نوع آن‌ها، کیفیت آب تغذیه‌ای به داخل سفره و واکنش‌های هیدروژئوشیمیایی است (کوتیس و والورونز، ۲۰۰۶). بررسی خواص هیدروژئولوژیکی سفره‌های کارستی به دلیل ناهمگنی زیاد این سفره‌ها بسیار مشکل است (محمدی و رئیسی، ۲۰۰۷؛ محمدی و فیلد، ۲۰۰۹). بنابراین، از روش‌های رایج و کم هزینه مطالعه سفره‌های کارستی در دهه اخیر، بررسی تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی است (رئیس و

همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه‌ها، می‌توان به بعضی از خصوصیات مسیر حرکت آب و نوع سیستم جریان غالب پی برد. تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی، یک معیار مهم برای تفکیک آبخوان‌های کارستی با سیستم غالب جریان مجرای از آبخوان‌های کارستی با سیستم غالب جریان افشان است (کرمی و همکاران، ۱۳۸۷). دلیل استفاده گسترده از پارامتر دبی چشمه‌های کارستی در مطالعات کارست توسط پژوهشگران مختلف این است که تفسیر قابل اطمینانی از ویژگی‌های سفره‌های کارستی فراهم می‌آوردند و همچنین اندازه‌گیری آنها آسان است (محمدی و فیلد، ۲۰۰۹).

مطالعات متعددی روی ویژگی‌های هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمیایی جریان خروجی از چشمه‌های کارستی و تغییرات زمانی آن‌ها و تجزیه و تحلیل منحنی فرود چشمه‌ها انجام شده است. ابراهیمی (۱۳۹۶) به بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخوران، فیروزکوه پرداختند. بدین منظور خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب چشمه و منحنی فرود چشمه بررسی شد. با توجه به ضریب تغییرات اندک پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه، این چنین اظهار نظر کرد که سیستم غالب جریان در این چشمه از نوع مجرای - افشان است. باقری و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه‌های کارستی خراسان شمالی بر اساس منحنی فرود، سری زمانی دبی - بارش، هدایت الکتریکی - بارش پرداختند. آنان با توجه به تغییرپذیری اندک خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه‌ها به این نتیجه دست یافتند که چشمه‌های منطقه دارای سیستم جریان افشان است. شمسی و همکاران (۲۰۱۹) با تجزیه و تحلیل منحنی فرود چشمه‌های کارستی منطقه لاسم به نوع سیستم جریان و توسعه کارست در منطقه پی بردند. آنان با توجه به نتایج اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها و تجزیه و تحلیل منحنی فرود آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تمام چشمه‌های بخش جنوبی دارای سیستم جریان مجرای و چشمه‌های بخش شمالی دارای سیستم جریان افشان است.

در غرب منطقه مجن، رخنمون‌های گسترده‌ای از سازندهای آهکی وجود دارد که آبخوان‌های کارستی در آن‌ها تشکیل شده‌اند. از آبخوان‌های کارستی مذکور

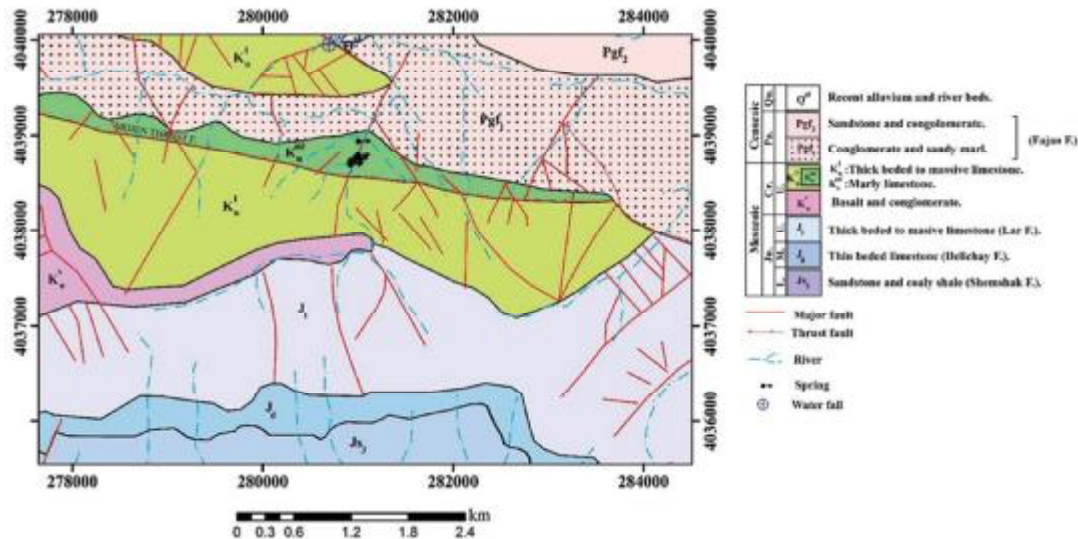
کرتاسه بالایی را روی توالی‌های سازند لار براند. برای حرکت فوق نیز تقریباً از سمت شمال به طرف جنوب است. مهمترین سازندها در منطقه مورد مطالعه، از قدیم به جدید، شامل سازندهای شمشک، دلیچای، لار، سنگ‌های کرتاسه بالایی، فجن و رسوبات کواترنری است که عمده چشمه‌های این منطقه در آهک‌های کرتاسه بالایی واقع شده‌اند. در منطقه مورد مطالعه، به دلیل بالا بودن سهم برف از بارش سالانه و وجود سنگ آهک برهنه، درز و شکافدار، درصد تغذیه سالانه به طور نسبی بالا است. بالا بودن درصد تغذیه و مقدار بارش موجب ظهور تعدادی چشمه (سه چشمه اصلی و چند چشمه فرعی) در این حوضه کوچک شده که متوسط دبی آن‌ها حدود ۵۱ لیتر بر ثانیه است.

با توجه به بازدیدهای صحرایی و آزمایش‌های انجام شده مشخص شد که تمامی این چشمه‌ها از یک آبخوان تخلیه می‌شوند. شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

تعدادی چشمه بزرگ و کوچک کارستی خارج می‌شود که تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای روی آن‌ها انجام نشده است؛ بنابراین، هدف اساسی از انجام این پژوهش بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی غرب مجن و تعیین سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی تأمین‌کننده آب این چشمه‌ها است.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه

از نظر تقسیمات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، در واحد ساختمانی البرز و بخشی از رشته کوه البرز شرقی واقع شده است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌ساختی البرز، منطقه در زمان گذشته دستخوش رویدادها و پدیده‌های مختلفی مانند عملکرد رویدادهای کوهزایی، چین‌خوردگی و گسل‌های متعدد بوده و ساختمان‌های جالبی را ایجاد کرده است. از جمله گسل‌های مهم در منطقه، گسل رورانده مجن که در جنوب غربی شهر مجن واقع شده است و توانسته توالی‌های سازند فجن و سنگ آهک‌های



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی مجن (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود)

دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه‌گیری شده است. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود و بازدیدهای صحرایی صورت گرفته در نرم‌افزار Arc GIS 10.3 ترسیم و رقمی شد. آمار بارش و دمای مربوط به منطقه مجن از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سمنان و اداره هواشناسی شاهرود برای ترسیم نمودار بارش و ارتفاع منطقه

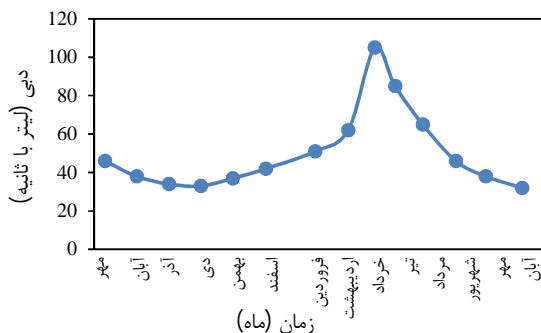
مواد و روش‌ها

برای محاسبه و تجزیه و تحلیل پارامترهایی همچون هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌ها، ضریب بده، نوع سیستم جریان، تعیین منشأ تغذیه و همچنین کیفیت آب چشمه‌ها، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها شامل دبی، هدایت الکتریکی و دما در محل چشمه‌ها و غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها در آزمایشگاه آب و محیط‌زیست

یافته‌های پژوهش

هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی

برای ارزیابی تغییرات زمانی دبی چشمه‌ها، هیدروگراف مجموع جریان چشمه‌ها از مهرماه ۱۳۹۵ تا آذرماه ۱۳۹۶ ترسیم و در شکل ۲ هیدروگراف چشمه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲- هیدروگراف چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶

همان‌گونه که در این هیدروگراف ملاحظه می‌شود، مجموع دبی چشمه‌ها از ۳۳ لیتر بر ثانیه در دی ماه تا ۱۰۵ لیتر بر ثانیه در خرداد ماه تغییر می‌کند. با توجه به جدول ۱ میانگین مقادیر دبی چشمه‌ها ۵۱ لیتر بر ثانیه و انحراف معیار ۲۱ و ضریب تغییرات آن‌ها ۴۱ درصد است. با توجه به ضریب تغییرات دبی چشمه‌ها و همچنین عدم وجود عوارض ژئومورفولوژیکی مهم معرف کارست‌های توسعه‌یافته (مانند فروچاله‌ها، گودی‌های مسدود و پلایه‌ها) در حوضه چشمه‌ها، سیستم غالب جریان در این چشمه‌ها از نوع افشان است. اگرچه ضریب تغییرات ۴۱ درصد برای دبی بیانگر سیستم جریان افشان است، از دلایل بالا بودن ضریب تغییرات دبی، شیب بسیار بالای حوضه و کوچک بودن حوضه می‌باشد.

تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه‌های کارستی، از روش‌های عملی برای تعیین رژیم جریان افشان یا مجرای است و به کمک آن می‌توان ضرایب بده و حجم ذخیره دینامیکی را محاسبه کرد. ضریب بده (α) بیانگر توانایی آبخوان در ذخیره‌سازی آب زیرزمینی است. این ضریب تابعی از تخلخل مؤثر و قابلیت انتقال آبخوان می‌باشد. جهت تعیین ضریب بده (α)، منحنی فرود چشمه‌ها (Recession curve) ترسیم شده است. شکل ۳ منحنی فرود چشمه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳

جمع‌آوری شد. بازدیدهای صحرایی برای بررسی ژئومورفولوژی کارست و ارزیابی عوامل مؤثر بر درصد تغذیه سالانه کارست‌های منطقه انجام شده است. در بررسی‌های ژئومورفولوژی کارست سعی شده است تا با ارزیابی درصد پوشش خاک، نوع بارش و عوارض کارستی، درصد تغذیه سالانه در منطقه مورد مطالعه برآورد شود. حجم تغذیه سالانه در حوضه مقدماتی (حوضه‌ای که بر اساس زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی مشخص شده است) با توجه به مقادیر بارش سالانه، مساحت حوضه و درصد تغذیه سالانه با استفاده از معادله (۱) به دست آمده است:

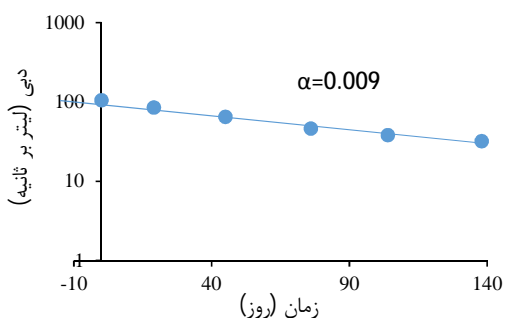
$$A = \frac{V}{P.I} \quad (1)$$

در این معادله، A مساحت حوضه بر حسب مترمربع، P میانگین بارش سالانه در حوضه چشمه بر حسب متر، I درصد تغذیه سالانه و V حجم تغذیه سالانه چشمه بر حسب مترمکعب است.

حجم تخلیه سالانه از چشمه‌ها از طریق محاسبه حجم زیر هیدروگراف چشمه‌ها تعیین شد. برای محاسبه ضریب بده (α) از معادله مایلت (مایلت، ۱۹۰۵) استفاده شده است:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (2)$$

در این معادله، Q آبدهی چشمه‌ها در زمان T بر حسب مترمکعب بر ثانیه، Q_0 آبدهی چشمه در زمان شروع فروکش، e پایه لگاریتم طبیعی، α ضریب بده و T مدت زمان بین دبی اولیه و ثانویه است. هنگامی که منحنی فرود دارای شیب کم باشد، تخلیه ذخیره دینامیکی آبخوان به کندی انجام می‌شود و چشمه‌های این نوع آبخوان اکثر دائمی هستند. برعکس وقتی که ضریب بده (α) زیاد باشد، منحنی فرود دارای شیب تند و ذخایر دینامیکی در این حالت موقتی است و خیلی سریع تخلیه می‌شود. به طور کلی هنگامی که ضریب بده (α) در مرتبه (10^{-2}) قرار داشته باشد، نشان‌دهنده زهکشی سریع از شکستگی‌ها و مجاری کارستی می‌باشد و هنگامی که این ضریب کوچکتر باشد (مرتبه 10^{-3}) نشان‌دهنده تخلیه از حفره‌ها و درزه و شکستگی‌های کوچک است (میلانوویچ، ۱۹۸۱). در پایان با ترسیم منحنی فرود چشمه‌ها، مقدار ضریب بده (α) و بررسی نتایج شیمیایی چشمه‌ها، به نوع سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه، ارزیابی حوضه چشمه‌های کارستی، تیپ غالب آب و جنس غالب آبخوان پرداخته شده است.



شکل ۳- منحنی فرود چشمه‌های غرب مجن از اواخر ۹۵ تا اوایل آبان ۹۶

ملاحظه می‌شود که منحنی فرود چشمه‌ها دارای یک شیب می‌باشند. شیب خط ایجاد شده به عنوان ضریب بده (α) در نظر گرفته می‌شود. بر اساس محاسبات انجام شده، ضریب بده (α) چشمه‌های غرب مجن در طول دوره فرود ۱۳۸ روزه حدوداً برابر با ۰/۰۰۹ می‌باشد که بیانگر تخلیه از درزه و شکاف و شکستگی‌های کوچک می‌باشد و همچنین بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان تغذیه‌کننده چشمه‌های مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۱- دبی اندازه‌گیری شده در محل نمونه‌برداری چشمه‌های غرب مجن

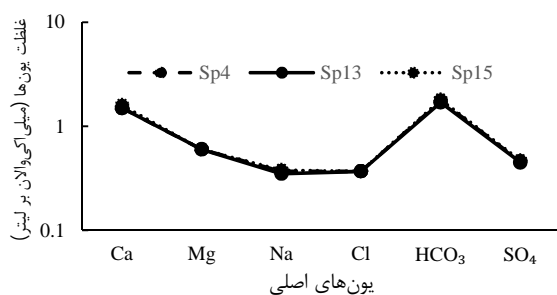
زمان (ماه)	دبی (لیتر بر ثانیه)	هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)
مهر	۴۶	۲۱۵
آبان	۳۸	۲۱۶
آذر	۳۴	۲۱۷
دی	۳۳	۲۱۸
بهمن	۳۷	۲۱۶
اسفند	۴۲	۲۱۲
فروردین	۵۱	۲۰۸
اردیبهشت	۶۲	۲۰۷
خرداد	۱۰۵	۲۱۲
تیر	۸۵	۲۱۳
مرداد	۶۵	۲۱۶
شهریور	۴۶	۲۱۹
مهر	۳۸	۲۲۰
آبان	۳۲	۲۱۷

بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها

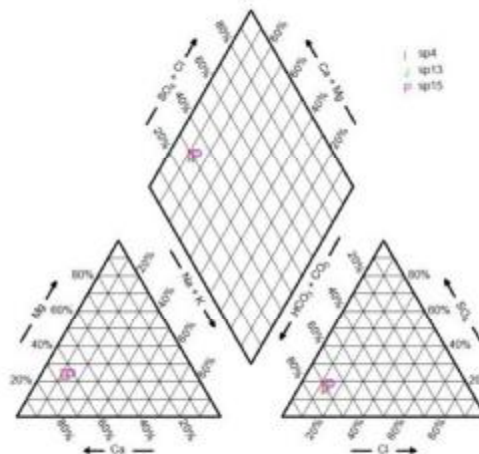
خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها به منظور تعیین منشأ تغذیه، تشخیص نوع سیستم جریان در چشمه‌ها و کیفیت آب چشمه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر هدایت الکتریکی چشمه‌های غرب مجن از مهر ماه سال ۱۳۹۵ تا آبان ماه ۱۳۹۶ در مظهر چشمه‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. برای بررسی تغییرات هدایت الکتریکی در چشمه‌های مورد مطالعه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات این پارامتر در طول دوره آماری محاسبه شده‌اند. با توجه به جدول ۱ میزان تغییرات هدایت الکتریکی بسیار ناچیز است، به این ترتیب که میانگین مقادیر هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها ۲۱۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، انحراف معیار ۴ و ضریب تغییرات آن‌ها ۱/۸ درصد است. با مقایسه این ضریب تغییرات و ضریب تغییرات مربوط به

سیستم‌های کارستی افشان و مجرای که به ترتیب کمتر و بیشتر از ۵ درصد می‌باشد (شاستر و وایت، ۱۹۷۱؛ جاکوبسن و لانگمویر، ۱۹۷۴)، ملاحظه می‌شود که در این چشمه‌ها سیستم غالب جریان، سیستم افشان می‌باشد. از نمودارهای هیدروشیمیایی جهت نمایش کیفی نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه و تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی استفاده می‌شود. در این مطالعه، جهت تعیین رخساره‌ها و بررسی منشأ نمونه آب از نمودارهای پایپر و شولر استفاده می‌شود. یکی از کاربردی‌ترین نمودارهایی که جهت بررسی تیپ آب مورد استفاده قرار می‌گیرد نمودار پایپر است. شباهت‌ها و تفاوت‌های نمونه‌ها از طریق نمودار پایپر به خوبی مشخص می‌شود زیرا نمونه‌هایی که دارای خصوصیات مشابه هستند به صورت گروهی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. همچنین نمودار پایپر عمدتاً جهت تعیین تیپ آب، انحلال یا رسوب‌گذاری،

پارامتر، غلظت‌های دو کاتیون کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر در نظر گرفته می‌شوند. میانگین نسبت کلسیم به منیزیم برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده برابر با ۲/۶۰ است؛ در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که جنس آبخوان در حوضه چشمه‌های مورد مطالعه، عمدتاً آهکی است. محاسبه شاخص‌های اشباع کانی‌های مختلف برای توصیف تکامل شیمیایی آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. شاخص‌های اشباع کانی‌های کلسیت، دولومیت، ژیبس و هالیت برای نمونه‌های آب چشمه‌های مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC و نتایج به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر شاخص اشباع کانی کلسیت برای چشمه‌های مورد مطالعه بسیار به حالت اشباع نزدیک و کانی‌های دولومیت، ژیبس و هالیت به ترتیب دارای مقادیر شاخص اشباع منفی تری است که تحت اشباع بودن آب چشمه‌ها برای این کانی‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به وجود سازند آهکی در منطقه مورد مطالعه، می‌توان تغییرات شاخص اشباع کلسیت را توجیه کرد.



اختلاط نمونه‌های آب و تبادل یونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۴ نمودار پایپر مربوط به نمونه آب چشمه‌های مورد مطالعه در خرداد ماه سال ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار پایپر سه دهانه از چشمه‌های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶

با توجه به موقعیت قرارگیری نمونه‌های آب چشمه‌ها در نمودار پایپر مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌ها کلسیم و بی‌کربنات بالایی دارند و دارای سختی موقت هستند. بر اساس این نمودار تمام نمونه‌ها سختی کربناته بیش از ۵۰ درصد دارند و در آن‌ها غلبه با اسیدهای ضعیف و عناصر قلیایی خاکی است و تمام نمونه‌ها، در محدوده خاص آب‌های کارستی واقع شده‌اند. از نمودار شولر برای بررسی یکسان بودن یا نبودن منشأ نمونه‌ها، بررسی روند مقادیر یون‌های اصلی آب و مقایسه بین نمونه‌ها استفاده شد. با توجه به شکل ۵، تمام نمونه‌ها دارای روند یکسانی بوده که بیانگر منشأ یکسان آن‌هاست. تمام چشمه‌های مورد مطالعه دارای تیپ بی‌کربناته و رخساره کلسیک هستند که با لیتولوژی آهکی منطقه مطابقت داشت.

استفاده از نسبت‌های یونی روش مناسبی برای تعیین منشأ کاتیون و آنیون‌های محلول در آب هستند. نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم در سفره‌های کارستی شاخص بسیار مناسبی برای تشخیص آبخوان‌های کارستی آهکی از آبخوان‌های کارستی دولومیتی است. به طور کلی نسبت‌های نزدیک به یک مربوط به آبخوان‌های کارستی دولومیتی و نسبت‌های بین دو تا ده مربوط به آبخوان‌های کارستی آهکی است (وایت، ۱۹۸۸). برای محاسبه این

شکل ۵- نمودار شولر سه دهانه از چشمه‌های غرب مجن در خرداد ماه ۱۳۹۶

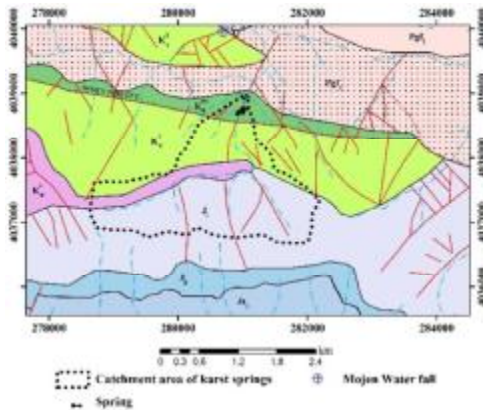
جدول ۲- میانگین شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیبس و هالیت برای چشمه‌های مورد مطالعه

شاخص اشباع	۱۳۹۶/۷/۲	۱۳۹۶/۳/۲۲
SI _c	۰/۰۲	-۰/۰۶
SI _d	-۰/۲۴	-۰/۳۹
SI _g	-۲/۴۵	-۲/۴۹
SI _h	-۶/۹۱	-۶/۹۵

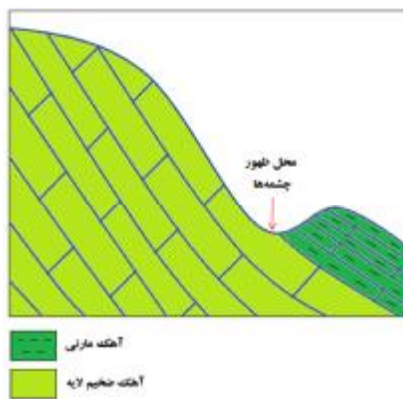
تعیین حوضه چشمه‌های کارستی

در این پژوهش، برای تعیین محدوده مقدماتی حوضه چشمه‌ها از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و هیدروژئولوژی استفاده شد. به این ترتیب که بر اساس

که مانع از حرکت رو به جلو آب زیرزمینی شده‌اند. به این ترتیب که برخورد جریان آب زیرزمینی با واحد غیرقابل نفوذ باعث بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و تشکیل چشمه‌های این منطقه شده است و به همین دلیل این چشمه‌ها از نوع چشمه‌های سرریزی (Overflow Springs) هستند. دلیل سرریزی بودن چشمه‌های کارستی مورد مطالعه، مثبت بودن شیب لایه غیرقابل نفوذ زیرین است که موجب شده جریان‌های زیرزمینی تغذیه شده در آبخوان کارستی با برخورد به این لایه ناتراوا متوقف شوند و به تدریج سطح آب بالا بیاید و در نهایت در مرز بالایی لایه ناتراوا تخلیه شوند. در شکل ۷ نیمرخ زمین‌شناسی آبخوان کارستی و لایه ناتراوا نشان داده شده است.



شکل ۶- نقشه حوضه چشمه‌های غرب مجن



شکل ۷- نیمرخ زمین‌شناسی آبخوان کارستی در غرب مجن

پیشنهادهایی برای افزایش دبی چشمه‌ها در فصل خشک

تغذیه آبخوان کارستی تأمین‌کننده آب چشمه‌های مورد مطالعه عمدتاً توسط ذوب برف‌های زمستانه در حوضه

شیوه قرارگیری لایه‌های زمین‌شناسی به ویژه مرز سازندهای تراوا و ناتراوا، گسل‌ها، موقعیت دره‌های عمیق و تغذیه منطقه و لحاظ کردن چشمه‌های مجاور، حوضه اولیه چشمه‌های مورد مطالعه ترسیم شده است.

محدوده حوضه با استفاده از DEM منطقه و مشاهدات صحرایی به کمک نرم‌افزارهای Google Earth و Arc GIS به صورت مقدماتی ترسیم و مساحت حوضه مقدماتی ترسیم شده برای این چشمه‌ها حدود ۴/۲۷ کیلومترمربع برآورد شد. برای محدوده حوضه، میانگین ارتفاع با استفاده از منحنی هیپسومتری محدوده، ۳۰۹۰ متر تعیین شد. سپس با توجه به میانگین ارتفاع به دست آمده و با استفاده از نمودار ارتفاع- بارش ایستگاه‌های مجاور، میانگین بارش سالانه حوضه مورد نظر ۵۵۰ میلی‌متر برآورد شد.

درصد تغذیه سالانه در حوضه با توجه به معیارهای مختلف مانند توسعه کارست، نوع بارش غالب، شیب توپوگرافی و درصد سنگ‌های برهنه ۰/۶۸ برآورد شد. سپس با داشتن مقادیر بارش، درصد تغذیه سالانه و مساحت حوضه، حجم تغذیه سالانه حوضه مقدماتی حدود ۱/۶۰ میلیون مترمکعب محاسبه شد. علاوه بر این، حجم تخلیه سالانه چشمه‌ها نیز از طریق هیدروگراف حدود ۱/۶۱ میلیون مترمکعب به دست آمد. با مقایسه حجم‌های تغذیه و تخلیه سالانه، خطای نسبی حدود ۰/۸ درصد محاسبه شد. با توجه به خطای نسبی اندک بین حجم‌های تغذیه و تخلیه و همچنین شیوه قرار گرفتن واحدهای سنگی مختلف در منطقه، حوضه ترسیم شده از دقت مناسبی برخوردار است. شکل ۶ نقشه حوضه چشمه‌های غرب مجن نشان داده شده است.

نوع چشمه‌ها به لحاظ سازوکار تخلیه

چشمه‌های کارستی مهم‌ترین عارضه هیدروژئولوژیکی گستره‌های کارستی را تشکیل می‌دهند که نشان‌دهنده تخلیه آب زیرزمینی در سطح زمین هستند. با توجه به بازدیدهای صحرایی انجام شده، چندین چشمه با آبدی کم در منطقه مورد مطالعه مشاهده شده که بیانگر توسعه نسبتاً متوسط کارست در منطقه است. از دلایل اصلی ظهور این چشمه‌ها، برخورد آب زیرزمینی حوضه کارستی این چشمه‌ها (سنگ‌های آهکی کرتاسه بالایی و سازند لار) با واحدهای غیرقابل نفوذ (مارن‌ها و آهک‌های مارنی) است

همچنین شیوه قرار گرفتن واحدهای سنگی مختلف در منطقه، حوضه ترسیم شده از دقت مناسبی برخوردار است. نمودارهای هیدروشیمیایی مربوط به نمونه‌های تهیه شده از چشمه‌های مورد مطالعه در خرداد ماه ۱۳۹۶ نشان می‌دهد تمامی نمونه‌ها دارای کلسیم و بی‌کربنات بالایی هستند و تمام نمونه‌ها در محدوده خاص آب‌های کارستی واقع شده‌اند. از نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم برای تعیین جنس غالب آبخوان در مناطق کارستی استفاده می‌شود. به طور کلی نسبت‌های نزدیک به یک مربوط به آبخوان‌های کارستی دولومیتی و نسبت‌های بین دو تا ده مربوط به آبخوان‌های کارستی آهکی هستند. میانگین نسبت یون کلسیم به منیزیم برای نمونه‌های مورد مطالعه حدود ۲/۶۰ است که می‌توان نتیجه گرفت لیتولوژی غالب آبخوان کارستی مورد مطالعه، آهکی است. با توجه به مطالب بالا، خصوصیات ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و بیلان هیدروژئولوژیکی یکدیگر را تأیید می‌کنند.

منابع

۱. ابراهیمی ح. ۱۳۹۶. بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران، فیروزکوه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود. ۹۳ ص.
۲. باقری ف. کرمی غ. باقری ر. مشکینی ج. و رونقی ا. ۱۳۹۸. ارزیابی توسعه کارست در چشمه‌های کارستی خراسان شمالی با استفاده از خصوصیات فیزیکوشیمیایی. سی و هشتمین گردهمایی علوم زمین ایران. تهران. ۱۰-۱۱ اردیبهشت. ۶ ص.
۳. رضایی م. ۱۳۷۹. پیش‌بینی تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی در دوره‌های خشکسالی. اولین کنفرانس ملی مقابله با کم‌آبی و خشکسالی. کرمان. دانشگاه باهنر کرمان. ۹-۱۰ اسفند. ۸۸۶-۸۸۰.
۴. کرمی غ. رجائی ا. و کمالی‌نسیانی م. ۱۳۸۷. کاربرد مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی در بررسی آب‌بندی سازندهای کارستی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز. ۲۵-۲۳ اسفند. ۹ ص.

5. Coetsiers M. and Walraevens K. 2006. Chemical characterization of the Neogene

انجام می‌شود. با توجه به زمان ذوب برف‌ها و زمان دبی اوج چشمه‌ها، می‌توان این چنین اظهار نظر کرد که آب ناشی از ذوب برف‌های زمستانه با یک تأخیر زمانی حدود ۴، ۵ ماهه به چشمه‌ها می‌رسد. به هر حال بخشی از بارش منطقه در فصل بهار به صورت باران است و بیشتر به صورت رواناب از دسترس خارج می‌شود. در صورتی که اقداماتی برای جلوگیری از ایجاد رواناب در منطقه انجام شود یا رواناب‌های ایجاد شده در بندهای تغذیه‌ای جمع‌آوری و به تدریج به فضاهای خالی سنگ‌های آهکی کارستی شده هدایت شوند، می‌توان درصد تغذیه منطقه را به طور قابل توجهی افزایش داد. با توجه به زمان تغذیه ناشی از بارش‌ها در فصل بهار و فاصله زمانی برای رسیدن به مظهر چشمه‌ها، تأثیر چنین تغذیه‌ای باعث افزایش دبی چشمه‌ها در اواسط و اواخر تابستان خواهد شد.

نتیجه‌گیری

برای تعیین نوع جریان در آبخوان‌های کارستی از تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی آب خروجی از چشمه‌ها استفاده می‌شود. تغییرات زمانی خواص فیزیکی (دبی) و شیمیایی (هدایت الکتریکی) آب خروجی از چشمه‌های غرب مجن نسبتاً کم است؛ به گونه‌ای که ضریب تغییرات تمامی پارامترها بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان کارستی این چشمه‌ها است. همچنین منحنی فرود چشمه‌های مورد مطالعه دارای یک ضریب بده با شیب ۰/۰۰۹ که این نیز بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان کارستی مورد نظر است و با خصوصیات ژئومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه که بیانگر توسعه نسبتاً متوسط کارست در حوضه چشمه‌های مجن می‌باشد، همخوانی دارد. چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه، از نوع چشمه‌های سرریزی (Overflow Springs) هستند که از دلایل اصلی ظهور این چشمه‌ها، برخورد آب زیرزمینی حوضه کارستی این چشمه‌ها (سنگ‌های آهکی توده‌ای و ضخیم لایه سازند لار) با واحدهای غیرقابل نفوذ (مارن‌ها و آهک‌های مارنی) است. برای تعیین محدوده مقدماتی حوضه چشمه‌ها از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و هیدروژئولوژی استفاده شد. سپس با استفاده از روش بیلان و مقایسه حجم تغذیه و تخلیه سالانه، خطای نسبی ۰/۸ درصد محاسبه شد که با توجه به خطای نسبی اندک بین حجم‌های تغذیه و تخلیه و

- Aquifer, Belgium. *Hydrogeology Journal*. 14: 1556-1568.
6. Fiorillo F. 2014. The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers. *Water Resource Management*. 28: 1781-1805.
 7. Fiorillo F. Vakanjac R. V. Jemcov I. Milanović S. And Stevanović Z. 2015. Karst groundwater availability and sustainable development. *Karst Aquifers-Characterization and Engineering*. 421-530.
 8. Ford D. C. and Williams P. W. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley and Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester. 562 p.
 9. Jacobson R. L. and Langmuir D. 1974. Controls on the quality variations of some carbonate spring waters. *J. Hydrol*. 23:247-265.
 10. Maillat E. 1905. *Essais di'hydraulique souterraine et fluviale*. Hermann et Cie, Paris. 218 p.
 11. Malik P. And Vojtkova S. 2012. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environmental Earth Science*. 65:2245-2257.
 12. Milanovic P. T. 1981. *Karst Hydrogeology*. Water Resources Publication. 434 p.
 13. Mohammadi Z. and Field M. 2009. On the Temporal Behavior of Karst Aquifers, Zagros Region, Iran, A Geostatistical Approach. *Journal of Cave and Karst Studies*. 71(3): 210-226.
 14. Mohammadi Z. and Raeisi E. 2007. Hydrogeological uncertainties in delineation of leakage at karst dam sites, the Zagros Region, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies*. 69(3): 305-317.
 15. Raeisi E. Groves C. and Meiman J. 2006. Effects of partial and full pipe flow on hydrochemographs of Logsdon River, Mammoth Cave Kentucky USA. *Journal of Hydrology*. 337: 1-10.
 16. Shamsi A. Karami G. H. Taheri A. 2019. Recession curve analysis of major karstic springs at the Lasem area (north of Iran). *Carbonates and Evaporites*. 34: 845-856.
 17. Shuster E. T. and White W. B. 1971. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing aquifers. *Journal of Hydrology*. 14: 93-128.
 18. White W. D. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst Terrains*. Oxford University Press. 464 p.

