

پتانسیل یابی میزان کارستی شدن چشمه‌ها از منظر هیدروژئوشیمیایی در محدوده مطالعاتی هشتگرد

مهسا جمعدار^۱، مهدی سرائی تبریزی^{۲*}، حسین یوسفی^۳

۱- کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران.

۳- دانشیار دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فنون نوین، تهران.

* نویسنده مسئول: mahdisarai@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۱

چکیده

ویژگی‌های ساختاری و لیتولوژیکی در محدوده مطالعاتی هشتگرد شرایط مناسبی را برای شکل‌گیری پدیده‌های کارستی در منطقه فراهم آورده است. بالا بودن تقریبی سطح آب زیرزمینی در ناحیه، نشانه‌ای برای عدم گسترش کارست در عمق است. اشکال ژئومورفولوژی کارست هم‌چون غار، فروچاله و پونر مشاهده نمی‌شود. تنها پدیده‌های کارستی مشاهده شده در منطقه کارنها، چشمه‌های کارستی و حفرات انحلالی می‌باشند. این تحقیق با هدف مطالعه هیدروژئوشیمیایی چشمه‌ها با تأکید بر جنس سازند انجام شد. بدین منظور، ۵ نمونه‌ی آب از چشمه‌های دائمی منطقه در دوره کم‌آبی (مهر ماه ۱۳۹۷) جمع‌آوری و تجزیه شیمیایی شد. نتایج حاصل از هیدروژئوشیمی چشمه‌های کارستی و XRF موجود در منطقه نشان داد که آب‌های کارستی در یک سیستم شدیداً توسعه یافته جریان دارند. میانگین نسبت یون کلسیم به منیزیم چشمه‌های منتخب برابر ۲/۲۹ می‌باشد. بنابراین، جنس سفره‌ی آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز چشمه‌های مورد مطالعه عمدتاً آهکی است. میزان شاخص اشباع دولومیت در چشمه‌های ولیان درویش چشمه (۲)، ورده (۴) و یمانجلیق (۵) منفی است که شرایط تحت اشباع را نشان می‌دهد و منعکس‌کننده تراکم بیشتر شکستگی سطحی و زیرسطحی و هم‌چنین نشان‌دهنده‌ی نوع جریان مجرای - انتشاری در مسیر جریان آب این چشمه‌ها است. شیمی آب‌های زیرزمینی در سنگ‌های کربناته تابع انحلال کلسیت و دولومیت بود. بالاتر بودن دمای آب در چشمه‌ی نمک آلان در قابلیت اشباع دولومیت در سازند دالان تأثیر گذاشته است. نتایج تحلیل عاملی نشان داد که مهم‌ترین عامل به انحلال کربنات و پس از آن به میزان منیزیم و هدایت الکتریکی بستگی دارد که بیش‌ترین تأثیر را روی میزان انحلال گذاشته است. بنابراین، میزان انحلال به سرعت جریان و نوع جریان (آشفته و یا خطی)، که کنترل‌کننده ضخامت لایه مرزی است، وابسته است. در نتیجه، امکان تعیین زمان رسیدن انحلال به شرایط تعادل وجود ندارد. برای انحلال کلسیت اغلب مشاهده می‌شود که اشباع تا میزان ۹۰ درصد به سرعت انجام می‌شود، لکن پس از آن میزان انحلال به شدت کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: چشمه‌های کارستی، سازند، کیفیت آب، هیدروژئوشیمیایی، تحلیل عاملی.

۱- مقدمه

مطالعه‌ی منابع آب سازندهای کارستی، به دلیل این که این سازندها تقریباً ۲۰ درصد از سطح کره‌ی زمین را می‌پوشانند و جمعیت قابل توجهی از جهان آب مورد نیاز خود را از آن تأمین می‌کنند، دارای اهمیت فوق‌العاده زیادی است (صاحب‌دل، ۲۰۰۹). بسیاری از رودخانه‌ها در جهان در فصول کم آب از طریق سفره‌های کارستی تغذیه می‌شوند. با استفاده از روش‌های ایزوتوپی می‌توان تاثیر چشمه‌های کارستی بر روند آبدی رودخانه‌ها را برآورد کرد (عبدالله شمس، ۲۰۱۹). شناخت خصوصیات هیدروژئوشیمی و کیفیت آب سفره کارست اطلاعات مفیدی برای استفاده پایدار و حفاظت از آب‌های زیرزمینی در منطقه است (باربارا، ۲۰۱۲). رفتار آبخوان کارستی به دو نوع پارامترهای کیفی آب بستگی دارد. اول نوع جریان و دوم درجه‌ی کارستی شدن. تجزیه و تحلیل هیدروگراف‌های چشمه روش مناسبی برای بررسی نوع جریان است. درجه‌ی کارستی شدن درونی از روش‌های زیادی استنباط شدنی است، هرچند هیدروژئوشیمی اطلاعات قابل قبول تری نسبت به سایر پارامترها به دست می‌دهد (اولاجیر و همکاران، ۲۰۰۱). کارستی شدن در آبخوان‌های کربناته مشروط به ترکیبات شیمیایی و معدنی لیتولوژی، فرآیندهای ژئوشیمیایی مهم، زمان ماندگاری آب و دیگر فاکتورهای اصلی است که وظیفه‌ی هیدروژئولوژیکی سیستم را تعیین می‌کند. تنوع زمانی پارامترهای فیزیکی شیمیایی، به عنوان تابعی از شرایط هیدرودینامیکی، ویژگی‌های سیستم آبخوان‌ها را مطابق با درجه‌ی کارستی شدن و سلسله مراتبی از زهکشی کارست مجاز می‌کند (مندا و همکاران، ۲۰۰۷). برای استفاده از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه کارستی ابتدا باید تاثیر عوامل خارج از سیستم بر روی چشمه‌ها را حذف و سپس تاثیر عوامل داخلی را بر روی سفره بررسی کنیم. خصوصیات زمین‌شناسی مهم‌ترین عامل تاثیرگذار داخلی بر روی چشمه کارستی است (جووانگ، ۲۰۱۹). با این حال، گاهی اوقات استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی در تفسیر

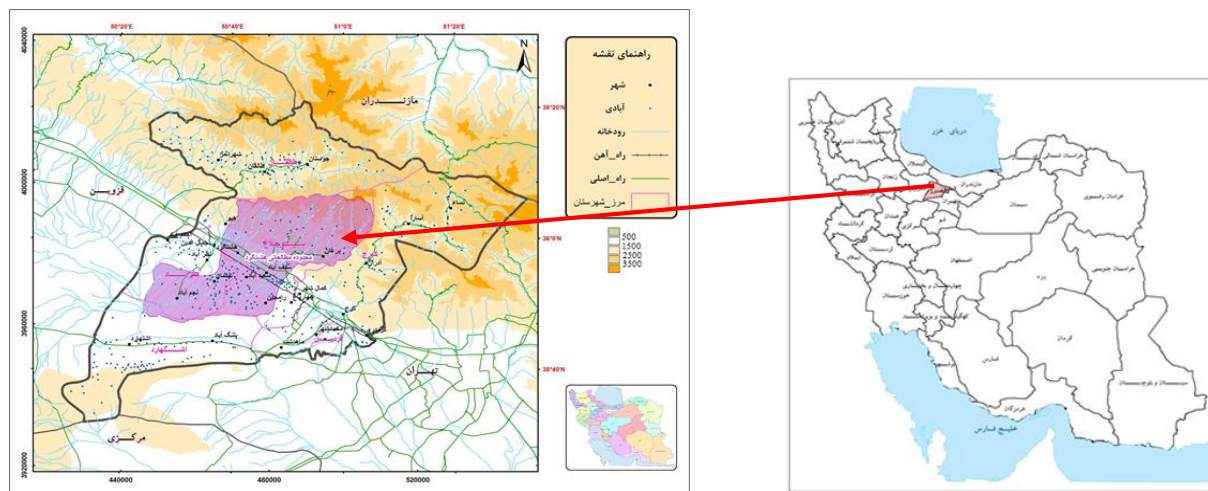
نتایج ابهام ایجاد می‌کند. تجزیه و تحلیل پارامترهای انحلالی نشان می‌دهد که اساساً تکامل ژئوشیمیایی آب‌های کارستی به در دسترس بودن مواد تشکیل دهنده سنگ آبخوان و زمان ماندگاری در آبخوان‌ها بستگی دارد. شیمی اولیه آب وارد شده به حوزه‌های بسته متأثر از لیتولوژی سنگ‌ها و رسوبات هوازده و مدت زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی با سنگ‌ها است (تاد، ۲۰۰۵). کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی نتیجه‌ی کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از لحظه‌ی ورود آب جوی تا زمان خروج آن از چشمه بر روی آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. تشخیص مجموعه‌ای از شرایط هیدروژئولوژیکی و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی، که در آبخوان کارستی کیفیت آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دشوار است. هنگامی که آب در امتداد خطوط جریان از منطقه تغذیه به سمت منطقه تخلیه حرکت می‌کند، شیمی آن توسط انواع گوناگونی از فرآیندهای ژئوشیمیایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (محمدی و همکاران، ۲۰۱۴). این فرآیندها عبارت‌اند از: شیمی آب نفوذی، که عمدتاً به وسیله درجه حرارت هوا و درجه حرارت نزولات جوی کنترل می‌شود (که هر دو کنترل کننده تبخیر آب ورودی به سازندهای نفوذپذیر هستند)، تناوب، میزان و مدت زمان بارش، کانی‌شناسی، پوشش گیاهی، خاک، و میزان تولید گاز خاک. عوامل دیگری که بر روی شیمی آب‌های زیرزمینی تأثیرگذارند عبارت‌اند از: ضخامت سازندهای زمین‌شناسی، نوع تخلخل، و وضعیت توپوگرافی. در حقیقت، این عوامل میزان تغذیه، مسیر جریان، و زمان ماندگاری آب چشمه‌ها را کنترل می‌نمایند (جلالی، ۲۰۰۶). معمولاً در مناطق کارستی، کل آب سیستم توسط چند چشمه‌ی محدود خارج می‌شود. همین امر باعث می‌شود که مطالعه‌ی خصوصیات مختلف چشمه‌ها نقش مهمی در شناسایی ویژگی‌های درونی کارست داشته باشد. تکنیک‌های هیدروژئوشیمیایی اطلاعات مهمی درباره‌ی سیستم‌های کارستی در اختیار ما قرار می‌دهد. در این تحقیق، ضمن مطالعه‌ی هیدروژئوشیمی ۵ چشمه

منتخب دارای آبدهی در سری زمانی بلند مدت، طی نمونه‌گیری در مهر ماه ۱۳۹۷ (که میزان هدایت الکتریکی با EC متر، دما با دماسنج و میزان اسیدیته (PH) با PH سنج اندازه‌گیری شد. خصوصیات هیدروشیمیایی نمونه‌های چشمه‌ها پس از نمونه‌گیری در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای استان البرز آنالیز شد. مقادیر آبدهی چشمه‌ها نیز با استفاده از روش خط‌کش جت برآورد شد. ارتباط هیدروژئوشیمی چشمه‌های منطقه بررسی شد. هدف از این تحقیق مطالعه‌ی میزان انحلال کاتیون‌ها، آنیون‌ها و کیفیت منابع آب چشمه‌های کارستی محدوده مطالعاتی هشتگرد با استفاده از داده‌های هیدروشیمیایی است، که میزان کارستی شدن را در سازندهای آهکی با درصد متفاوت آهک و منیزیم نشان می‌دهد.

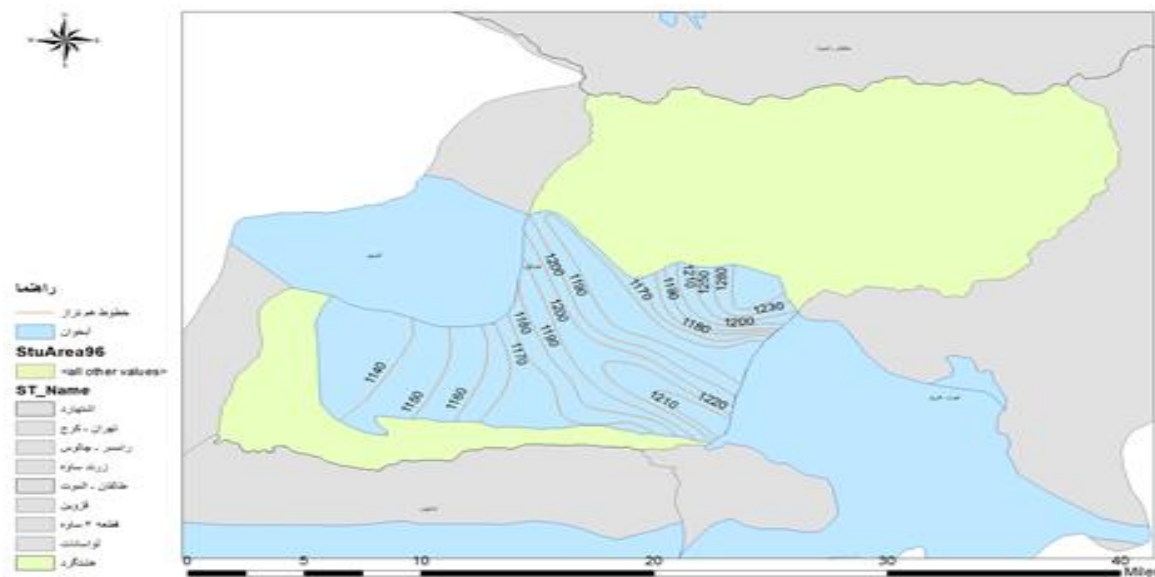
مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی هشتگرد با مساحت ۱۱۷۰/۵ کیلومترمربع در استان البرز با کد ۴۱۰۵ در تقسیم‌بندی شرکت مدیریت منابع آب ایران شناخته شده است و از شرق به محدوده مطالعاتی تهران-کرج و از غرب به محدوده مطالعاتی قزوین متصل می‌گردد. جریان‌های سطحی خروجی از این محدوده مطالعاتی وارد شوره‌زار قزوین می‌شود. مهم‌ترین رودخانه موجود در این محدوده مطالعاتی، رودخانه کردان می‌باشد. دره اصلی حوضه آبریز هشتگرد، دره رودخانه کردان است که از ابتدا تا انتها دارای سه جهت اصلی شمالی - جنوبی، شمال شرق - جنوب غرب، شرقی - غربی است و دره‌ها در آن به صورت V شکل و U شکل است. دشت سیلابی هشتگرد در قسمت جنوبی حوضه آبریز قرار گرفته و شامل رسوبات آبرفتی رودخانه‌های مختلف از کردان تا هیو می‌باشد. در دشت مزبور شیب زمین از شمال به جنوب و حدود ۲/۱ تا ۶/۱ درصد می‌باشد. مساحت دشت سیلابی هشتگرد حدود ۶۵۱ کیلومترمربع بوده و غنی از آب زیرزمینی است. از منظر زمین‌شناسی در حوضه آبریز هشتگرد رسوبات و سنگ‌های پرکامبرین،

پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک وجود دارند. سنگ کف دشت به اعتبار پروفیل‌های ژئوالکتریکی در قسمت شمالی کنگلومرای پلیوکواترنر (قسمت شرقی)، سازند کرج (قسمت میانی) و سازند شمشک و آهک‌های لار (غرب) است که هیچ‌کدام دارای تأثیر منفی بر کیفیت آب زیرزمینی نیستند. در قسمت جنوبی، سنگ کف رسوبات میوسن است که رسوبات مذکور دارای گچ بوده و از نظر کیفی دارای تأثیر منفی بر آب زیرزمینی می‌باشند که مرز آب شور و شیرینی را در قسمت جنوبی دشت هشتگرد ایجاد نموده‌اند. نحوه رسوب‌گذاری و وجود رودخانه‌های بزرگ و کوچک در این منطقه باعث شده که سفره آب زیرزمینی موقعیت بسیار خوبی پیدا نماید و شرایط بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی را در اولویت قرار دهد. بررسی‌های آب زیرزمینی این محدوده مطالعاتی مشخص می‌نماید که در این محدوده مطالعاتی یک آبخوان آبرفتی با وسعت ۴۱۰/۷ کیلومترمربع ۶۹/۴ درصد از گستره دشت را فرا گرفته است (وسعت دشت ۵۹۱ کیلومترمربع)، تشکیل گردیده است و وسعت ارتفاعات این محدوده مطالعاتی ۵۷۹ کیلومترمربع می‌باشد. براساس آخرین اطلاعات و آمار دریافتی از شرکت مدیریت منابع آب ایران، تعداد ۱۸۲ دهنه چشمه در محدوده مطالعاتی هشتگرد وجود دارد. در شکل شماره ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی هشتگرد در استان البرز و ایران و در شکل شماره ۲ نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد مشخص شده است. خطوط هم‌تراز و موقعیت چشمه‌ها در منطقه با نرم‌افزار ARC GIS ترسیم شد. کلیه چشمه‌ها در ارتفاعات شمال و شمال خاوری محدوده مطالعاتی واقع هستند و بیش‌تر این چشمه‌ها در سرشاخه‌های رودخانه کردان به‌ویژه رودخانه برغان و هزار بند قرار داشته و تامین‌کننده جریان پایه این رودخانه می‌باشند. تعداد و میزان بهره‌برداری از چشمه‌های منطقه براساس آخرین آمار منابع آب، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله در جدول شماره ۱ درج گردیده است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی هشتگرد در استان



شکل ۲- نقشه خطوط هم تراز آب زیرزمینی آبخوان. هشتگرد

جدول ۱- تعداد و میزان بهره‌برداری از چشمه‌ها در محدوده مطالعاتی هشتگرد.

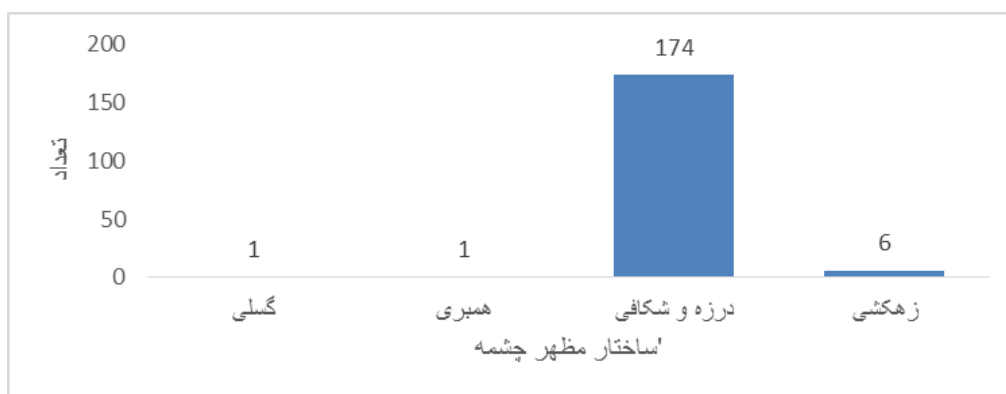
نوع مصرف	تعداد	فراوانی (درصد)	بهره‌برداری	
			MCM	درصد
کشاورزی	82	45.05	0.74	30.99
شرب	18	9.89	1.41	59.29
دام و طیور	4	2.20	0.05	1.90
خدمات	1	0.55	0.01	0.32
نامشخص	77	42.31	0.18	7.50
مجموع	182	100	2.38	100

آبدهی لحظه‌ای چشمه‌های این محدوده در شکل شماره ۳ مشخص شده است. براساس نتایج زمین‌شناسی اخذ شده از شرکت مدیریت منابع آب ایران، ساختار مظهر چشمه‌ها در محدوده مطالعاتی هشتگرد در شکل شماره ۴ مشخص شده است.

با بررسی اطلاعات چشمه‌های کمی که به‌طور ماهانه توسط شرکت آب منطقه‌ای البرز آبدهی آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود و چشمه‌های منتخب در محدوده مطالعاتی مشخص شد مقدار آبدهی لحظه‌ای این چشمه‌ها بین ۰/۰۲ تا ۸/۵ لیتر بر ثانیه متغیر بوده و به‌طور متوسط دارای آبدهی پایین و برابر ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه می‌باشند. هیستوگرام فراوانی



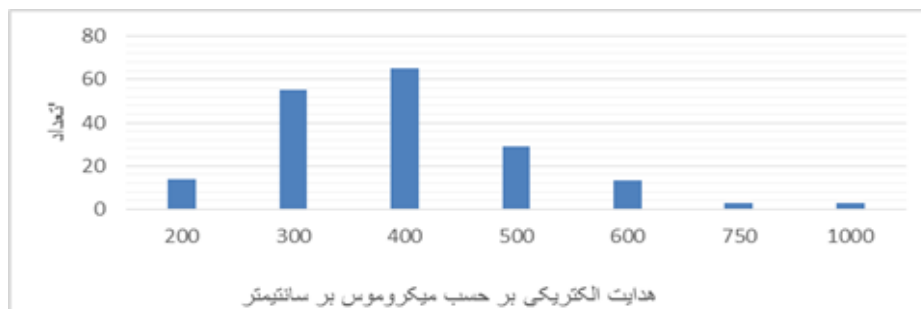
شکل ۳- هیستوگرام فراوانی آبدهی لحظه‌ای چشمه‌ها در محدوده



شکل ۴- ساختار مظهر چشمه‌ها در محدوده. مطالعاتی هشتگرد

جنس سنگ‌های سفره‌های آب‌زیرزمینی سازند سختی است که در بین آن‌ها توف و سنگ‌های آذرآواری توسعه قابل توجهی دارند. تقریباً کلیه چشمه‌هایی که هدایت الکتریکی آن‌ها در رده ۲۰۰ میکروموس و کم‌تر قرار دارند. شکل ۵ هیستوگرام فراوانی چشمه‌ها از نظر هدایت الکتریکی در محدوده مطالعاتی هشتگرد را نشان می‌دهد.

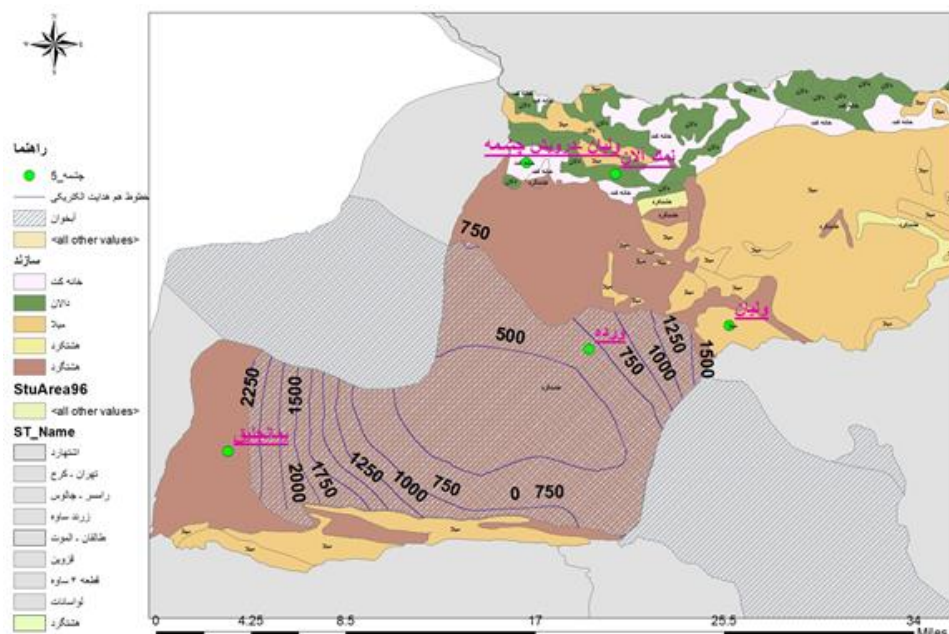
در این محدوده چشمه‌های دارای هدایت الکتریکی پایین از فراوانی قابل توجهی برخوردار هستند، بطوریکه در ۸۹/۶ درصد از موارد، هدایت الکتریکی آب آن‌ها برابر و کمتر از ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. گسترش مقادیر پایین هدایت الکتریکی در بین چشمه‌های محدوده مطالعاتی که در ارتفاعات شمالی آن واقع هستند به دلیل



شکل ۵- هیستوگرام فراوانی چشمه‌ها از نظر هدایت الکتریکی در محدوده مطالعاتی هشتگرد

قابلیت انحلال ندارند. این تحقیق به منظور بررسی میزان انحلال کاتیون‌ها، آنیون‌ها، و به ویژه میزان کارستی شدن در منطقه صورت گرفته است. برای ارزیابی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در منطقه از ۵ چشمه (نمک آلان، ولیان درویش چشمه، ولیان، ورده و یمانجلیق) با ساختار درزی شکافی، شامل آهک‌های دولومیتی و آهک‌های کلسیتی، نمونه آب گرفته شد. چشمه‌های انتخابی از بین منابع با آبدی بالاتر و در سازند‌های مختلف منطقه با ساختار درزی شکافی، شامل آهک‌های دولومیتی و آهک‌های کلسیتی انتخاب شد. میزان هدایت الکتریکی با EC متر، دما با دماسنج و میزان اسیدیته با PH سنج اندازه‌گیری شد. خصوصیات هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های چشمه‌ها طی نمونه‌گیری در مهر ماه ۱۳۹۷ در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای استان البرز آنالیز شد. در شکل شماره ۶ نقشه سازندها، موقعیت ۵ چشمه منتخب در سازندها و خطوط هم هدایت الکتریکی در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

چشمه‌هایی که در نزدیکی روستای برغان واقع هستند دارای بیشینه آبدی در بین چشمه‌های محدوده مورد بررسی می‌باشد. این چشمه‌ها از نظر زمین‌شناسی در گستره رخنمون سنگ‌های آندزیتی و توف‌های ائوسن واقع است. سنگ‌های مجاور این چشمه‌ها به دلیل وارد آمدن فشارهای تکتونیکی خرد شده هستند و پتانسیل ایجاد سفره‌های کارستی را دارند. هدایت الکتریکی آب این چشمه‌ها بسیار پایین بوده و به میزان ۲۸۰ میکروموس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. بخش زیادی از منطقه شامل آهک‌های دولومیتی و آهک‌های کلسیتی است. آهک‌های مذکور در اثر عملکرد نیروهای تکتونیکی (گسله‌ها) برشی و به شدت خرد شده و پر درز و شکاف‌اند. به‌طور کلی، فعال بودن منطقه، از نظر تکتونیکی، باعث وجود درز و شکاف در سازندهای آهکی شده و شرایط مساعدی را برای تشکیل منابع آبی کارست فراهم کرده است. سازندهای مختلف منطقه، که حاوی کربنات کلسیم و یا سایر سنگ‌های قابل انحلال‌اند، همگی به یک اندازه



کربناته و غیرکربناته) از یکدیگر تفکیک نمی‌شوند و به صورت مجموع محاسبه می‌شوند که به آن سختی کل گفته می‌شود. برای محاسبه‌ی سختی کل نمونه‌های آب از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود:

۲. ابطه

که در آن H مقدار سختی بر حسب میلی گرم در لیتر کربنات کلسیم است. Mg و Ca به ترتیب غلظت‌های کلسیم و منیزیم بر حسب میلی گرم در لیتر است. برای تعیین نوع آب، بر اساس سختی، از رابطه‌ی رایج تاد ۱۹۸۰ استفاده شد. در این طبقه‌بندی آب‌ها به ۴ گروه بر اساس سختی کل تقسیم می‌شوند (جدول ۲). مقادیر مثبت SI نشان دهنده فوق اشباع بودن آب نسبت به کانی است، مقادیر منفی نشان‌دهنده تحت اشباع بودن است، و مقدار صفر نشان‌دهنده حالت تعادل است.

۱. ابطه

سختی آب به غلظت یون‌های آب کلسیم و منیزیم وابسته است و معمولاً واحد آن میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم است. سختی آب به دو گروه تقسیم می‌شود: سختی کربناته؛ سختی غیرکربناته. سختی کربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم است که با آنیون‌های کربنات و بی‌کربنات ترکیب می‌شوند. سختی غیرکربناته مربوط به آن بخش از کلسیم و منیزیم است که با آنیون‌های غیر از کربنات و بی‌کربنات ترکیب می‌شوند (مانند سولفات). در مطالعه‌ی سختی آب معمولاً این دو نوع سختی (سختی

جدول ۲- طبقه‌بندی آب‌ها به ۴ گروه بر اساس سختی کل.

گروه	۱	۲	۳	۴
میزان سختی کل	کمتر از ۷۵	۷۵-۱۵۰	۱۵۰-۳۰۰	بیش تر از ۳۰۰
نوع آب	نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت

معنای $P > 0.01$ محاسبه شد. نخست با استفاده از آماره‌ی

در طی مطالعه‌ی فوق داده‌های هیدروشیمیایی منابع آب توسط نرم‌افزار SPSS ۱۹ پردازش و تحلیل آماری شد.

خلاصه کنند یا همبستگی‌های (کواریانس‌های) مشاهده شده بین متغیرها را به شیوه‌ی رضایت بخشی توضیح دهند. در این تحقیق با روش رایج قاعده یا معیار مقدار ویژه تعداد عامل‌های مناسب استخراج شد. مجموع مجذورات بارهای عاملی هر عامل را مقدار ویژه‌ی آن عامل می‌نامند، که اهمیت اکتشافی عامل‌ها را در ارتباط با متغیرها نشان می‌دهند. بنابراین، هر قدر این ضریب عاملی بزرگ‌تر باشد، اهمیت و تأثیر آن عامل نیز بیش‌تر می‌شود.

نتایج و بحث

برای ارزیابی هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی نمونه آب از ۵ چشمه‌ی دائمی منطقه تهیه شد. از آن‌جا که نمونه‌ی آب چشمه‌ها در سازندهای متفاوتی قرار گرفته است، برای تحلیل میزان انحلال کلسیت و دولومیت نیاز به داده‌های دقیق‌تری از نظر میزان Mg و Ca است و نمونه‌ی سنگ از هر سازند، که چشمه‌ی آب دائمی در آن قرار گرفته بود، گرفته شد. جدول ۳، XRF هر سازند و بررسی و نتایج آن را نشان می‌دهد.

جدول ۳- XRF سازندهای مربوط به چشمه‌ها.

LOI	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	سازند
43.87	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.8	53.6	0.2	0.5	1.7	سازند دالان
53.07	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	11.4	33.4	0.3	0.4	1.3	سازند خانه کت
43.83	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	5.2	48.2	0.3	0.5	1.8	سازند میلا
53.82	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.5	42.6	0.3	0.6	2	سازند هشتگرد

جدول ۴- نتایج نمونه آنالیز آب چشمه‌های منتخب در منطقه.

Ec	TDS	pH	No3	Co3	Hco3	Cl	So4	Ca	Mg	Na	K	Utmy	Utmx	محل
332	212.48	7.94	0	0	2.6	0.6	0.31	8.7	1.3	0.51	0	3989096	479409	نمک آلان
749	479.36	7.19	0	0	6.5	1	0.78	5.7	4.8	0.78	0	3989940	473011	ولیان - درویش چشمه
948	606.72	7.19	0	0	6.7	2	1.92	7.8	6.1	0.72	0	3978127	487636	ولیان
602	385.28	7.34	0	0	4.8	0.6	1.13	4.2	2.5	0.68	0.15	3976439	477511	ورده
3060	1958	7.27	0	0	7	16.5	11.76	7.1	12.1	15.95	0.11	3969056	451425	یمانجلیق

KMO مناسب بودن داده برای تحلیل عاملی بررسی شد. تشخیص مجموعه‌ای از شرایط هیدروژئولوژیکی و فرآیندهای هیدروشیمیایی، که کیفیت آب چشمه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند، مشکل است. به همین جهت، محققان هیدروژئوشیمی از تحلیل‌های عاملی برای این بررسی استفاده می‌کنند. تحلیل عاملی دارای سه مرحله است: تهیه‌ی ماتریس همبستگی از تمام متغیرها، استخراج عامل‌ها، تفسیر نتایج. در گام بعد، پس از آماده‌سازی ماتریس اطلاعات شامل متغیرهای کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، کربنات، سولفات، کلر، هدایت الکتریکی و pH ماتریس ضرایب آن‌ها بر اساس ضریب همبستگی پیرسون تهیه شد. مرحله‌ی بعدی در تحلیل‌های عاملی استخراج عامل‌ها است. در واقع، در تحلیل عاملی و متغیرهایی که با هم همبستگی بالایی دارند آن‌ها را با یک عامل نشان می‌دهیم و به جای چندین متغیر فقط یک عامل را در تحلیل‌ها به کار می‌بریم. یکی از مراحل اصلی در تحلیل عاملی یافتن تعداد عامل‌هایی است که می‌توانند داده‌ها را

چشمه‌ها کمتر از ۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است، که نشان‌دهنده‌ی آن است که ناخالصی‌های محلی در کیفیت آب این چشمه‌ها دخالت کرده‌اند.

تغییرات نسبت‌های Cl و HCO_3 با HCO_3 و SO_4 و نسبت‌های Na و HCO_3 با K و HCO_3 محاسبه شد. شکل ۱۱ تغییرات نسبت کلسیم و منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر و سولفات را، نسبت به بی‌کربنات نشان می‌دهد؛ بر اساس شکل ۸ رابطه‌ی خطی مستقیم و معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که آب چشمه‌ها دارای منشأ یکسان است.

با توجه به مقادیر سختی کل نمونه‌ی آب چشمه‌ها برای تعیین نوع آب بر اساس سختی از رابطه‌ی تاد استفاده شد. با توجه به میانگین سختی کل نمونه‌ی آب چشمه‌ها، ملاحظه می‌شود که آب این چشمه‌ها در گروه آب‌های نسبتاً سخت و سخت قرار می‌گیرد. جدول ۶ میزان سختی‌های کربناته و غیرکربناته چشمه‌های منتخب در محدوده مطالعاتی هشتگرد را نشان می‌دهد.

لانگمویر

بر آن است که آب زیرزمینی در درجه اشباع یا تحت اشباع، بیان‌کننده وضعیت هیدروژئولوژیکی است. وضعیت هیدروژئولوژیکی زیرسطحی نیز می‌تواند تابعی از سیمای سطحی در منطقه کارستی باشد. در جدول ۷ شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، آراگونیت، و هالیت نشان داده شده است. شاخص اشباع مثبت منعکس‌کننده جریان انتشاری است و جریان انتشاری نیز نشان‌دهنده عدم گسترش زیاد شکستگی در حوزه آبخیز چشمه‌های مورد نظر است. شاخص اشباع منفی منعکس‌کننده تراکم بیش‌تر شکستگی سطحی و زیرسطحی و هم‌چنین نشان‌دهنده نوع جریان مجرای و انتشاری در مسیر جریان آب این چشمه‌ها است. هم‌چنین، مقادیر شاخص اشباع هالیت در منطقه نشان می‌دهد که آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه نسبت به هالیت غیراشباع است. نمایه اشباع آراگونیت فقط در چشمه نمک آلان بالای صفر است. رسوب کانی‌های کربناته کلسیت و آراگونیت می‌تواند نتیجه

نسبت غلظت یون کلسیم به منیزیم در سفره‌های کارستی کربناته شاخص بسیار مناسبی برای تشخیص سفره‌های کارستی آهکی از سفره‌های کارستی دولومیتی است. به‌طور کلی، نسبت‌های نزدیک به ۱ مربوط به سفره‌های کارستی دولومیتی و نسبت‌های بین ۲ تا ۱۰ مربوط به سفره‌های کارستی آهکی است. در صورتی که نسبت‌های بالای ۱۰ در آب‌های کارستی مشاهده شود، نشان‌دهنده‌ی درصد خلوص بالاتر آهک و یا وجود کانی‌های ژپس یا انیدرید در تشکیلات آهکی است. معمولاً نسبت‌های کمتر از ۱ در تشکیلات کربناته مشاهده نمی‌شود. به استثنای مواردی که فرار گاز دی‌اکسید کربن از آب زیرزمینی در لایه‌ی آبدار دولومیتی موجب رسوب آراگونیت یا کلسیت شود و بدین ترتیب غلظت یون منیزیم در آب بالا می‌رود. برای محاسبه‌ی این پارامتر، غلظت‌های دو کاتیون کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌کی‌والان برلیتر در نظر گرفته می‌شود. چشمه نمک آلان (۱) سازند دالان (آهک و دولومیت)، چشمه ولیان درویش چشمه (۲) خانه کت (آهک و دولومیت)، ولیان (۳) میلا (آهک و شیل)، ورده (۴) و یمانجلیق (۵) هشتگرد (آهک و دولومیت) است. منشأ کلسیم سازندهایی است که آهکی‌اند و منشأ دولومیت سازند هشتگرد است. یون بی‌کربنات از انحلال کانی‌های کربناته تأمین می‌شود. سولفات دارای ۲ منشأ است: انحلال کانی‌های تبخیری موجود در رسوبات، اکسیداسیون کانی پیریت موجود در لایه‌های شیلی واقع در آهک. برای محاسبه‌ی این پارامتر، غلظت‌های دو کاتیون کلسیم و منیزیم بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود که میانگین نسبت یون کلسیم به منیزیم برابر ۲/۲۹ می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که جنس سفره‌ی آب زیرزمینی در حوزه آبخیز چشمه‌های مورد مطالعه عمدتاً آهکی است.

شکل ۷ رابطه‌ی بین هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول را نشان می‌دهد. میانگین کل مواد جامد محلول در آب ۷۲۸/۳۶۸ محاسبه شد. هدایت الکتریکی همه‌ی این

فرسایش و هوازدگی سنگ‌های آهکی موجود در منطقه باشد.

در جدول ۸ هر چقدر آماره KMO به ۱ نزدیک‌تر باشد همبستگی داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب‌تر است. این مقدار برای داده‌های هیدروشیمیایی چشمه‌ها نزدیک به ۱ و قابل قبول است. آزمون بارتلت نیز فرض یکه بودن ماتریس ضرایب همبستگی را نشان می‌دهد. با رد این فرض نیز، صحت داده‌ها برای تحلیل عاملی تأیید شد.

جدول ۹ بیش‌ترین میزان همبستگی بین یون‌های کلسیم و کربنات با ضریب همبستگی ۰/۹۰۴ و ضریب اطمینان ۰/۹۸ را نشان می‌دهد. همچنین، بین یون‌های کلسیم و سولفات با ضریب همبستگی ۰/۸۵۲ و ضریب اطمینان ۰/۹۹ رابطه‌ی معکوس وجود دارد. بین سولفات و کربنات با ضریب همبستگی ۱ و ضریب اطمینان ۰/۹۹ رابطه‌ی معکوس وجود دارد. جدول ۱۰ درصد واریانس و فراوانی تجمعی درصد را نشان می‌دهد.

در روش پیشنهادی کایسر (کایسر، ۱۹۶۰) براساس جدول ۱۱، تعداد مقادیر ویژه بیش‌تر از ۱ را به عنوان تعداد عامل‌ها در نظر می‌گیرند، بنابراین، با این تعریف، تعداد عامل‌ها برابر ۲ خواهد بود. بنابراین، در این روش به عامل‌هایی که مقادیر ویژه آن‌ها کم‌تر از ۱ باشد توجهی نمی‌شود و به نظر می‌رسد که معلول خطا باشند. جدول ۱۱ سهم متغیرها را در عامل‌های بعد از چرخش نشان می‌دهد. هر متغیر در عاملی قرار می‌گیرد که با آن عامل همبستگی بالای معنی‌داری داشته باشد. به‌طوری‌که عامل ۱، ۵۳ درصد و عامل ۲، ۳۲ درصد بر کیفیت آب چشمه‌های کارستی تأثیر گذاشته است. بر این اساس، عامل ۱ را می‌توان به انحلال کربنات نسبت داد، زیرا در این عامل یون‌های کلسیم و کربنات دارای بار عاملی بالایی هستند. اما عامل ۲ به اندازه‌ی عامل ۱ مؤثر نیست و تأثیر بسیار کم تری دارد. در عامل ۲ منیزیم و هدایت الکتریکی بیش‌ترین همبستگی را نشان می‌دهند. دو منشأ احتمالی را می‌توان برای آن در نظر گرفت. اول افزایش زمان ماندگاری آب در تماس با سازندهای آهکی و دولومیتی و دوم، غنی شدن یون‌های مزبور در نتیجه فرآیند

تبخیر در درون توده‌های برف فشرده‌ای که در تماس با نور خورشید و جو قرار دارند. ارتباط مستقیم پارامتر کلسیم و سولفات در جدول ۱۱ بیش‌ترین همبستگی را با احتمال ۹۹ درصد تحت پوشش دارد، که نشان دهنده انحلال کانی‌های کلسیم است. رابطه معنی‌دار و معکوس بی‌کربنات و سولفات نشان‌دهنده آن است که با افزایش انحلال کانی‌های کربناته در آب میزان سولفات کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از این تحقیق وابستگی زیاد انحلال بر روی لیتولوژی سازندها را نشان می‌دهد. همچنین، تحلیل کمی داده‌های هیدروشیمیایی آب کمک فراوانی به تشریح ویژگی‌های کارستی منطقه می‌کند. به‌طور کلی، ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب همراه با ترکیبات سازندهای زمین‌شناسی بازگوکننده میزان انحلال ترکیبات آهکی است. با تحلیل اطلاعات هیدروشیمیایی، مشخص شد که بهترین فاکتور برای شناسایی حوزه‌های آبخیز و تفکیک دو سازند از یکدیگر نسبت Mg به Ca است. بین هدایت الکتریکی با املاح موجود در آب رابطه مستقیم وجود دارد. هدایت الکتریکی همه این چشمه‌ها کمتر از ۳۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است که نشان‌دهنده دخالت ناخالصی‌های محلی در کیفیت آب این چشمه‌هاست. اکثر سازندها از ترکیب آهک و دولومیت تشکیل یافته‌اند. تفاوت اصلی آن‌ها در میزان Ca و Mg است. درصد بالای CaO نسبت به MgO در نتایج XRF در جدول ۳، در سازند دالان نشان‌دهنده میزان انحلال بیش‌تر کلسیت نسبت به سایر سازندهای مورد مطالعه است. نتایج نمایه اشباع نیز صحت این امر را اثبات می‌کند. از آنجا که نمایه‌ی اشباع در چشمه‌ی نمک آلان مثبت است و انحلال بالای کلسیت را در دمای ۱۴ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد، بالا بودن دما به انحلال دولومیت کمک می‌کند و نتایج XRF میزان بالای درصد CaO نسبت به MgO را نشان می‌دهد. چون کلسیت سریع‌تر از دولومیت انحلال می‌یابد، بالا بودن دمای آب در مقایسه با دیگر نمونه‌ها به انحلال دولومیت کمک می‌کند و نمایه‌ی اشباع دولومیت فقط در چشمه‌ی نمک آلان مثبت است. با توجه به پایین بودن دمای آب و به‌رغم

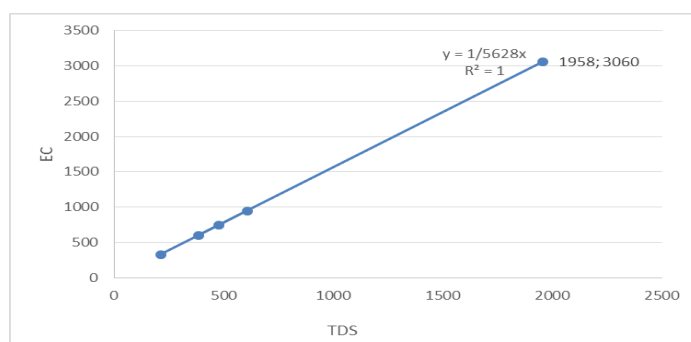
سیستم شدیداً توسعه یافته جریان دارند. شیمی آب‌های زیرزمینی در سنگ‌های کربناته مؤکداً تابع انحلال کلسیت و دولومیت است. نتایج تحلیل عاملی نشان داد که مهم‌ترین عامل به انحلال کربنات و پس از آن به میزان منیزیم و هدایت الکتریکی بستگی دارد، که بیش‌ترین تأثیر را روی میزان انحلال گذاشته است. بنابراین، میزان انحلال به سرعت جریان و نوع جریان (آشفته و یا خطی)، که کنترل‌کننده ضخامت لایه مرزی است، وابسته است. در نتیجه، امکان تعیین زمان رسیدن انحلال به شرایط تعادل وجود ندارد. برای انحلال کلسیت اغلب مشاهده می‌شود که اشباع تا میزان ۹۰ درصد به سرعت انجام می‌شود، لیکن پس از آن میزان انحلال به شدت کاهش می‌یابد.

بالابودن درصد MgO در سازند میلا نسبت به سازند دالان، نمایه‌ی اشباع دولومیت تحت اشباع است. دو نمونه‌ی آب (چشمه ورده و یمانجلیق) از یک سازند (هشتگرد) گرفته شده‌اند. کلیه‌ی نمایه‌ها تحت اشباع است، فقط دمای آب اندازه‌گیری شده‌ی آن‌ها متفاوت است. نمایه‌ی اشباع دولومیت در چشمه‌ی یمانجلیق، که دمای بالاتری دارد، بیش‌تر است. نمایه‌ی اشباع آراگونیت فقط در چشمه‌ی نمک آلان بالای صفر است. رسوب کانی‌های کربناته کلسیت و آراگونیت می‌تواند نتیجه‌ی فرسایش و هوازدگی سنگ‌های آهکی موجود در منطقه باشد.

با توجه به زمان نمونه‌گیری آب در دوره کم آبی، نتایج حاصل از هیدروژئوشیمی چشمه‌های کارستی و XRF موجود در منطقه نشان می‌دهد که آب‌های کارستی در یک

جدول ۵- نسبت یون کلسیم به منیزیم در نمونه آنالیز آب چشمه‌های منتخب در منطقه.

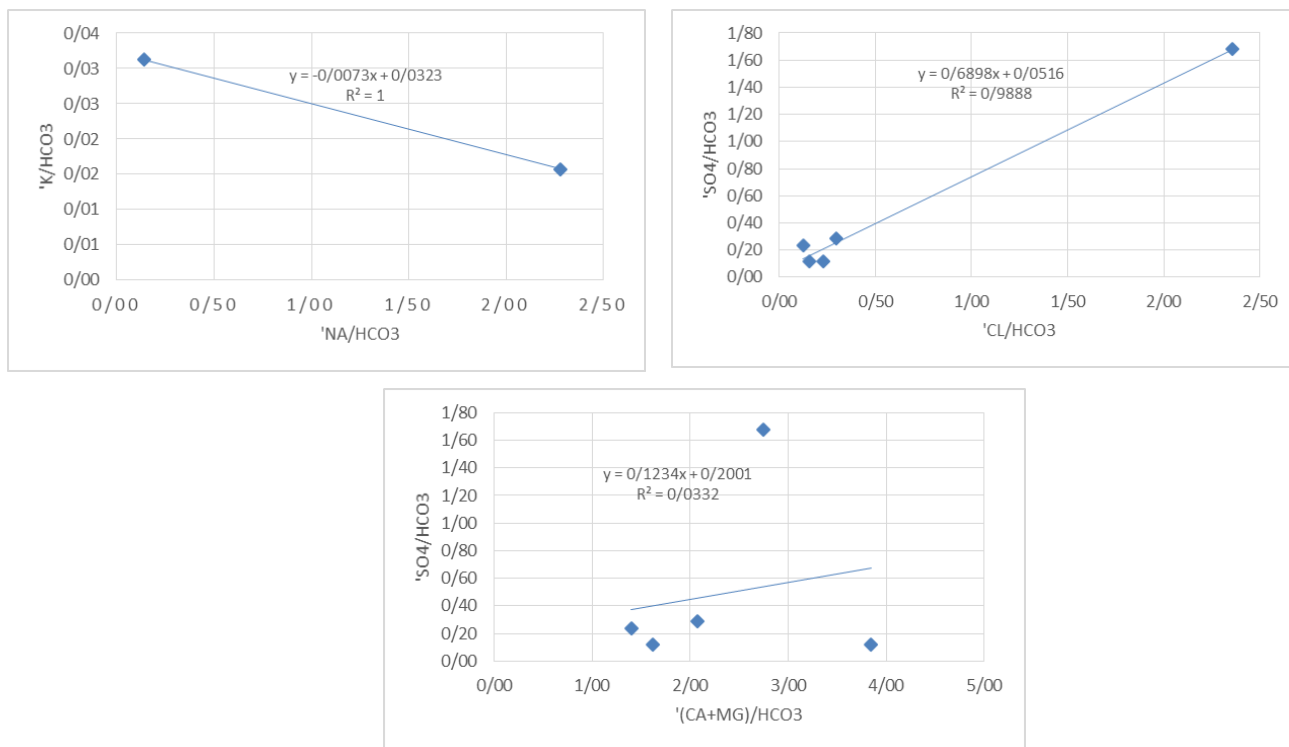
محل	utm x	utm y	Mean Q (L/s)	mg	ca	نسبت Mg به Ca
نمک آلان	479409	3989096	6	1.3	8.7	6.69
ولیان - درویش چشمه	473011	3989940	8.3	4.8	5.7	1.19
ولیان	487636	3978127	7.45	6.1	7.8	1.28
ورده	477511	3976439	5.6	2.5	4.2	1.68
یمانجلیق	451425	3969056	8.25	12.1	7.1	0.59
میانگین	-	-	5.64	5.36	6.7	2.29



شکل ۷- رابطه‌ی بین هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول.

جدول ۶- میزان سختی‌های کربناته و غیرکربناته چشمه‌های منتخب.

چشمه	تراکم (g/cm ³)	سختی (mg/L)	کربناته (mg/L)	غیرکربناته (mg/L)
نمک آلان	0.99	240.19	192.17	48.019
ولیان - درویش چشمه	0.99	120.09	120.09	0
ولیان	0.99	160.12	160.12	0
ورده	0.99	180.14	5.004	175.14
یمانجلیق	0.99	140.11	130.12	9.99



شکل ۸- تغییرات نسبت کلسیم و منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر و سولفات، نسبت به بی کربنات.

جدول ۶- میزان سختی‌های کربناته و غیرکربناته چشمه‌های منتخب.

چشمه	تراکم (g/cm ³)	سختی (mg/L)	کربناته (mg/L)	غیرکربناته (mg/L)
نمک آلان	0.99	240.19	192.17	48.019
ولیان - درویش چشمه	0.99	120.09	120.09	0
ولیان	0.99	160.12	160.12	0
ورده	0.99	180.14	5.004	175.14
یمانجلیق	0.99	140.11	130.12	9.99

جدول ۷- میزان شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، آراگونیت، و هالیت.

محل	SIa	SIh	SIc	SIc	utmy	utmx
نمک آلان	0.12	-9.45	0.21	0.27	3971415	472011
ولیان - درویش چشمه	-0.32	-9.72	-1.13	-0.17	3985651	485409
ولیان	0	-9.72	-0.67	0.15	3986002	485682
ورده	-2.06	-9.56	-4.35	-1.91	3981802	491486
یمانجلیق	-0.73	-9.55	-2.33	-0.57	3982140	452588

جدول ۸- نتایج آزمون کروییت بارتلت.

KMO and Bartlett's Test [^]		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure. of Sampling Adequacy [^]		0.81
Bartlett's Test of Spheric	Approx. Chi-Square	1750.66
	df	28
	Sig	0.001

جدول ۹- ماتریس همبستگی بین متغیرهای شیمیایی چشمه‌ها.

Correlation	Ca	Mg	Co ₃	Hco ₃	Cl	So ₄	pH	EC
Ca	0.672	-0.124	0.904	0.504	-0.439	-0.852	0.113	1
Mg	0.572	0.628	0.306	-0.474	0.663	0.059	1	0.113
Co ₃	-0.459	0.341	-0.924	-0.666	0.753	1	0.059	-0.852
Hco ₃	0.139	0.615	-0.452	-0.735	1	0.753	0.663	-0.459
Cl	0.353	-0.885	0.454	1	-0.735	-0.666	0.474	0.504
So ₄	0.673	-0.067	1	0.454	-0.452	-0.924	0.306	0.904
pH	-0.122	1	-0.067	-0.885	0.615	0.341	0.628	-0.124
EC	1	-0.122	0.673	0.353	0.139	-0.459	0.572	0.672

جدول ۱۰- درصد واریانس کل و تجمعی

Component	Loadings	Squared	Extraction Sums of
	Cumulative %	% of Variance	Total
1	4.25	53.23	53.232
2	2.6	32.56	85.8

جدول ۱۱- ماتریس عاملی دوران یافته.

Component	2	1
یون‌ها		
Ca	0.421	0.984
Mg	0.934	-0.214
Co ₃	-0.155	-0.944
Hco ₃	0.519	-0.771
Cl	-0.365	0.858
So ₄	0.516	0.825
pH	0.626	-0.587
EC	0.686	0.52

- Kaiser, H.F. 1960. The application of electronic computers to factor analysis. Educational and Psychological.
- Langmuir, D. 1997. Aqueous Environmental geochemistry, Prentice Hall, New Jersey.
- Menda, A., astroga, A. and Neumann, D. 2007. Strategy for groundwater management indeveloping countries: A case study in northern Costa Rica. Journal of Hydrology. 334: 109-124.
- Mohammadi-Behzad H, Cherchi GH, Kalantari N. 2014. Assessing the hydrogeological behavior of Sabz-Abad karstic spring, north of Khozestan province. Advanced applied geology journal. 15 (5): 10-19.
- Olajire, A.A. and Imeokparia F.E. (2001). Water quality assessment of Osun river. Studies oninorganic nutrients. Environ Monitoring assess. 69: 17-28.
- Sahebdel, M. 2009 . Hydro chemical study of the Karst spring of ShirinBahar, Ms Thesis, department of earth sciences Chamran University of Ahvaz. 8: 125-141.
- Todd, D.K. 2005. Groundwater hydrology, 3rd New York: John Wiley and Sons.
- Abdollah Shamsi, Gholam Hossein Karami, Daniel Hunkeler & Azizollah Taheri, 2019. Isotopic and hydrogeochemical evaluation of springs discharging from high-elevation karst aquifers in Lar National Park, northern Iran, Hydrogeology Journal volume 27: 655–667.
- Barberá, J.A. & B. Andreo. 2012. Functioning of a karst aquifer from Spain under highly variable climate conditions, deduced from hydrochemical records. - Environ Earth Sci. 65: 2337–2349.
- Guo, Y.; Qin, D.; Li, L.; Sun, J.; Li, F.; Huang, J. A. 2019. Identified by Karst Springs Using Water Level, Hydrogeochemical, and Isotopic Data in Jinan, China. Water. 11: 947-956.
- Jalali, M. (2006). Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region Alvand, Hamadan, Iran. Environ. Geol. 51: 433-446.