

هیدروشیمی منابع آب زیرزمینی در مناطق بزمان، ایرانشهر و اسپکه، جنوب شرق ایران

فرخنده عسکری ملک‌آباد؛ دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی گرایش آب‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران
رضا جهانشاهی*؛ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران
سپیده مالی؛ دانشجوی دکتری زمین‌شناسی گرایش آب‌شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴

چکیده

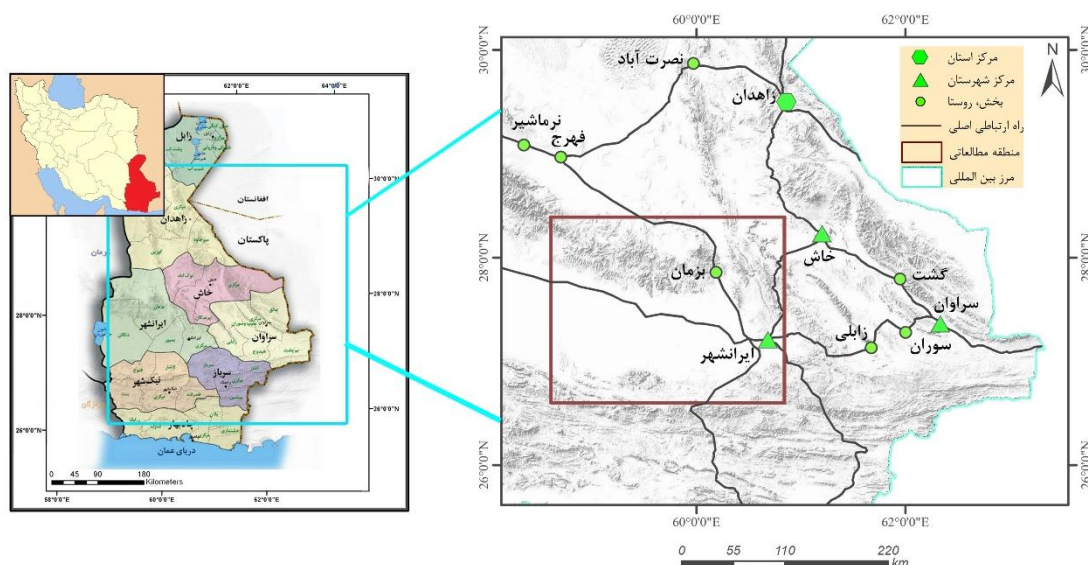
در این پژوهش منابع آب زیرزمینی منطقه آتشفشانی بزمان و مناطق نزدیک به آن، به تعداد ۶۹ محل چشمه و چاه کشاورزی با استفاده از روش‌های گرافیکی، نسبت یونی و شاخص‌های کیفی ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد، پنج تیپ Na-Cl، Na-Cl-SO₄، Na-Cl-HCO₃، Na-SO₄ و Na-HCO₃ در آب زیرزمینی منطقه وجود دارد و نوع غالب عمدتاً آب‌های کلرو بیکربناته سدیک و کلرو سولفات سدیک است. علاوه بر آن، تمامی نمونه‌ها نسبت به انیدریت، هالیت، تناردیت و اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به کلسیت، دولومیت، ژپس و آراگونیت تحت اشباع بود. نتایج حاصل از نسبت‌های یونی نشان می‌دهد که هر سه نوع کانی‌های کلسیت، دولومیت و ژپس در منطقه خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه را کنترل می‌کند. بر مبنای نمودارهای تعیین منشأ شوری، عامل شوری آب زیرزمینی چشمه‌های منطقه، انحلال کانی‌های نمک تشخیص داده شد. با توجه به نمودار شولر مشاهده می‌شود که اکثر نمونه‌های آب چاه‌ها و بیشتر نمونه‌های آب چشمه‌ها- به جز چشمه‌های S₄، S₅، S₁₁ و S₁₄- از نظر شرب در محدوده خوب و قابل قبول قرار می‌گیرد، در حالی که برخلاف انتظار و بر اساس نمودار ویلکوکس، بیشتر نمونه‌های آب زیرزمینی برای کشاورزی مناسب نیست. دلیل این امر، نسبت بالای جذب سدیم در آب‌های با هدایت الکتریکی پایین است، که سبب تخریب بافت خاک می‌شود.

کلیدواژه‌ها: اندیس اشباع، تحلیل عاملی، تیپ آب، منشأ شوری، نسبت یونی.

مقدمه

منطقه بزمان، در جنوب خاوری سرزمین ایران، در باختر و شمال باختری شهرستان ایرانشهر، استان سیستان و بلوچستان در حاشیه جنوبی کویر لوت و شمال فرورفتگی جازموریان قرار دارد. مختصات جغرافیایی آن از سمت خاور و باختر، به ترتیب به طول‌های جغرافیایی ۶۰ تا ۶۰/۳۰ درجه خاوری و از جنوب و شمال به ترتیب به عرض‌های ۲۷/۳۰ تا ۲۸ درجه شمالی محدود می‌شود (شکل ۱). این منطقه آتشفشانی چشمه‌های آبگرم و آبسرد فراوانی دارد. از آنجا که استان سیستان و بلوچستان از جمله نواحی خشک و کم‌باران کشور است، تداوم اندک آب‌های جاری در ناحیه‌ای همچون بزمان نقشی کلیدی در رونق کشاورزی دارد.

استفاده از منابع آب ژئوترمال در زمین‌های کشاورزی، با توجه به محدودبودن این منابع، تجربه‌ای است که در کشورهای جهان کمتر انجام شده است. نقش این گونه آب‌ها به علت دارا بودن هیدروژئوشیمی متفاوت در بین کشاورزان شناخته شده نیست. لذا، این پژوهش به بررسی هیدروژئوشیمی منابع آبگرم و سرد محدوده آتشفشان بزمان، ایرانشهر و اسپکه می‌پردازد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

در ایران و جهان نیز مطالعات و تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است، از جمله لشکری و لشکری پور (۱۳۹۰)، نورعلیئی و لاری (۱۳۸۱)، مر و شاکری (۱۳۸۵)، قریشی نیا و همکاران (۱۳۹۱)، فرج پور خزایی و همکاران (۱۳۹۳)، براون (۱۹۹۵)، شاکری و مر (۲۰۰۸)، محمدی و همکاران (۲۰۱۰)، پانتی و همکاران (۲۰۱۵)، بلهایی و همکاران (۲۰۱۷)، یانگ و همکاران (۲۰۱۷)، نگری و همکاران (۲۰۱۸)، پسوانگلو و کلیک (۲۰۱۸).

مواد و روش‌ها

زمین شناسی منطقه

قدیمی ترین و جوان ترین رسوبات این منطقه به ترتیب مربوط به زمان پرکامبرین و کواترنری است. سنگ‌های آذرین در ارتباط با کمان ماگمایی بلوچستان و کوه بزمان بر اثر فرورانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر مکران حاصل شده است. در بخش باختری منطقه سنگ‌های آذرین گسترش بیشتری دارد. قسمت میانی بخش باختری از مجموعه سنگ‌های آذرین نفوذی بزمان و سنگ‌های رسوبی تخریبی و کربناته به سن کربونیفر و پرمین تشکیل می‌شود. قسمت جنوبی بخش باختری را انباشته‌های مخروطه افکنه می‌سازد و زمین‌های هموار و دشت را تشکیل می‌دهد. ارتفاع این آتشفشان از سطح دریا ۳۴۹۰ متر و نسبت به زمین‌های اطراف آن ۲۱۰۰ متر است (آقانباتی، ۱۳۸۳).

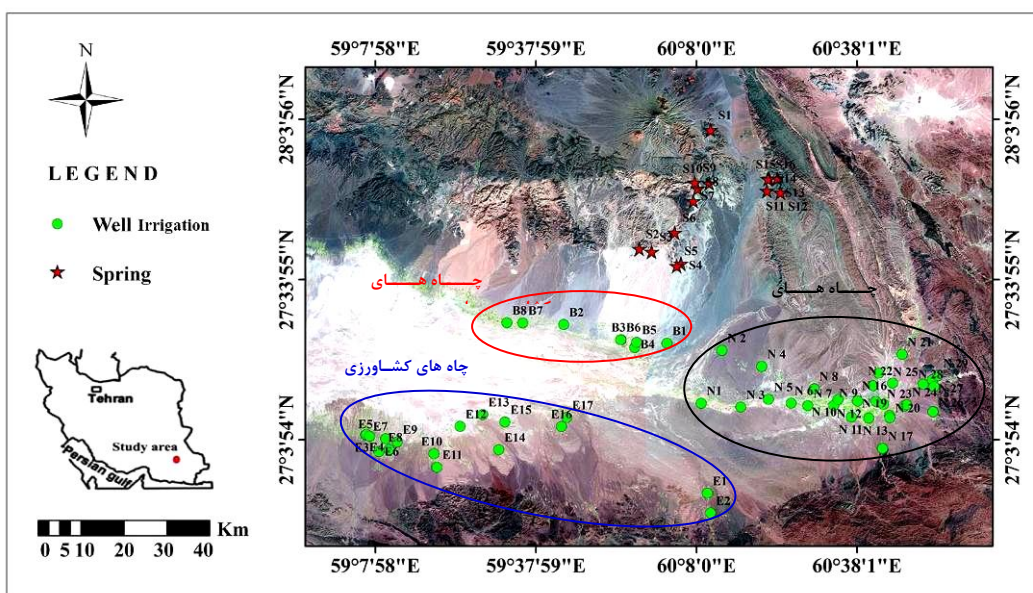
نمونه برداری

به منظور اندازه گیری مقدار یون‌های اصلی در آب زیرزمینی و مشخص کردن شرایط هیدروشیمی محدوده مطالعاتی، از ۱۶ دهانه چشمه اقدام به نمونه برداری شده است. چهارده محل مربوط به چشمه‌های آب سرد و دو محل مربوط به چشمه‌های آب گرم است. همچنین، برای تکمیل بررسی هیدروشیمی آب زیرزمینی منطقه، از اطلاعات داده‌های کیفی ۵۳ حلقه چاه مربوط به چاه‌های کشاورزی و بهره‌برداری شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان استفاده شد. چاه‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه مربوط به سه محدوده بزمان - سردگال، ایرانشهر - بمپور و اسپکه - مسکوتان است. تمام چاه‌ها در توپوگرافی‌های پست و در آبرفت‌های منطقه حفر شده و از نوع چاه عمیق و نیمه عمیق است. این چاه‌ها از سازندهای سخت شمالی و جنوبی منطقه تغذیه می‌شود (شکل ۲).

ظروف نمونه برداری ۳۰۰ سی سی پلی اتیلن نو و تمیز با اسید HCl، آب مقطر و آب محل نمونه برداری شستشو داده شد، سپس با استفاده از فیلترهای ۰/۴۵ میکرومتر تحت یا سر سرنگی، آب هر محل فیلتر و ظروف مربوط پر شد. نمونه‌ها به دو دسته ظروف مربوط به کاتیون‌ها و آنیون‌ها تقسیم بندی شد. به آب نمونه‌های کاتیونی بعد از فیلتر حدود ۱

سانتی متر مکعب اسید نیتریک غلیظ ۶۵ درصد افزوده شد و به آب ظروف آبیونی هیچ ماده افزودنی اضافه نشد. همچنین، به منظور شناسایی نمونه‌ها، هنگام نمونه‌برداری، ظروف برچسب‌گذاری شد. برچسب‌ها حاوی اطلاعات کد نمونه، نوع منبع و تاریخ نمونه‌برداری بود (شکل ۳).

پارامترهای دمای آب، هدایت الکتریکی (EC) و pH نمونه‌های آب در محل نمونه‌برداری با دستگاه‌های EC Meter مدل AQUA-TC 485 و pH Meter مدل WalkLAB-TI900 اندازه‌گیری شد. میزان کلرید و بی‌کربنات نمونه‌های آب با روش تیتراسیون و یون سولفات به طریق کدرسنجی در دانشگاه سیستان و بلوچستان و دیگر یون‌ها با دستگاه ICP-MS مدل HP Agilent 4500 در آزمایشگاه شرکت مطالعاتی مواد معدنی زرآما، تهران، اندازه‌گیری شد. در جدول ۱ خلاصه آماری پارامترهای فیزیکی-شیمیایی و نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه دیده می‌شود.



شکل ۲. موقعیت محل‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. نحوه نمونه‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی-شیمیایی، غلظت یون‌های اصلی، فرعی و کل مواد جامد محلول بر حسب میلی گرم بر لیتر

نوع محل	معیار	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	pH	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	K	Mg	Na	Si	Li	Br	TDS
حداکثر		10250	8.89	363	2723	2435.4	623.5	22	74.6	1400	28.6	2.1	20.	5276
چشمه‌ها	حداقل	1102	7.08	45.63	64.88	138.9	28.15	1.50	6.88	142	6.5	0.1	0.08	631
	میانگین	3293	7.82	219.87	582.31	569.3	162.5	8.75	29.7	422	12.6	0.4	3.4	1995
حداکثر		6834	8.14	485.6	1520.9	844.15	158.59	24.94	67.19	1237	-	-	-	5671.1
چاه‌ها	حداقل	630	7.18	124.8	57.17	12.00	7.43	1.95	3.71	91	-	-	-	394.00
	میانگین	2349.60	7.66	216.3	415.96	289.10	39.47	8.53	18.33	403.	-	-	-	1571.5

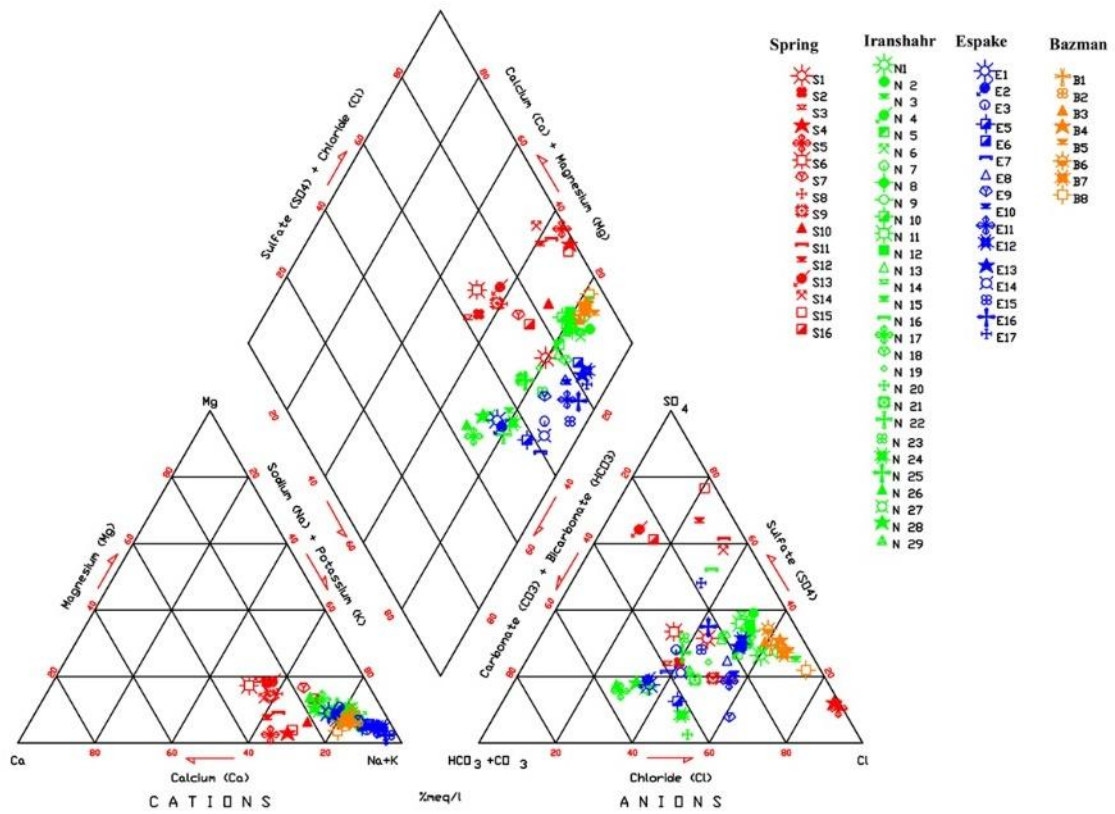
یافته‌ها

در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، مقدار EC در محدوده‌ای بین ۵۰۷ تا ۱۰۲۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. بیشترین مقدار آن مربوط به چشمه‌های S4 و S5 با مقادیر بالای ۱۰ هزار میکروزیمنس بر سانتی‌متر و کمترین مقدار، مربوط به آب زیرزمینی چاه‌های N22 و N26 به ترتیب برابر ۶۳۰/۸ و ۶۴۳/۹ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. مقادیر Cl در آب زیرزمینی منطقه محدوده‌ای بین ۵۷/۲ تا ۲۷۲۳ میلی‌گرم بر لیتر را در برمی‌گیرد. با توجه به سدیم اندازه‌گیری شده از نمونه‌های منابع آب منطقه، بیشترین مقدار سدیم در آب زیرزمینی بخش‌های میانی اطراف کفه نمکی جازموریان و در چشمه‌های S4 و S5 وجود دارد.

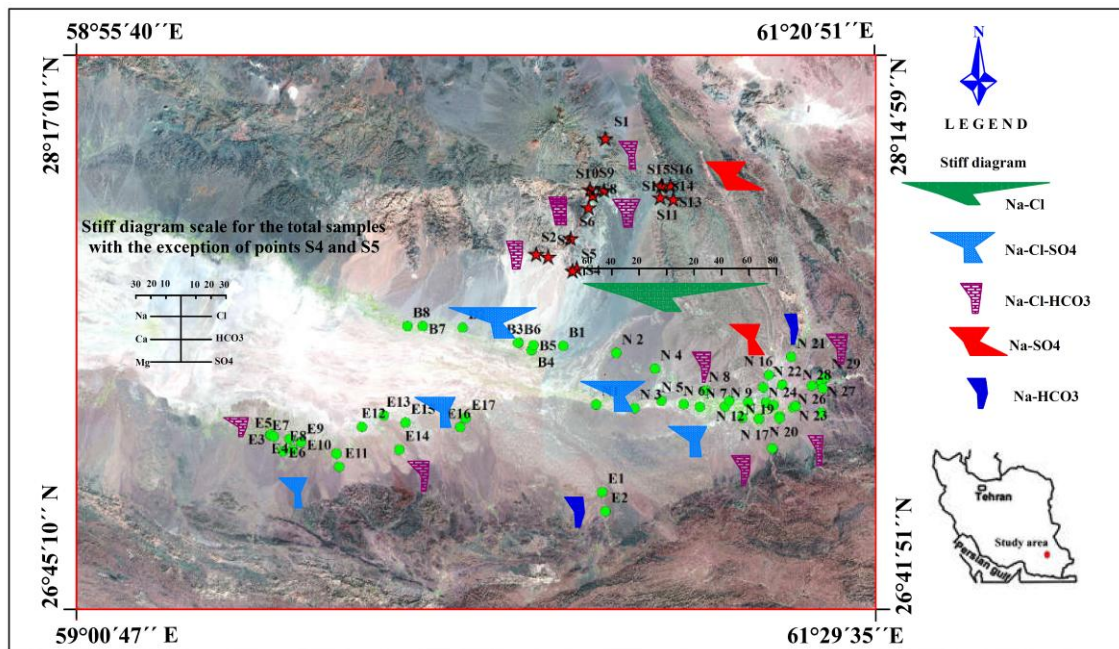
با ترسیم نتایج آنالیز یون‌های اصلی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه روی نمودار پایپر (شکل ۴)، پنج تیپ آب Na-Cl، Na-Cl-SO₄، Na-Cl-HCO₃، Na-SO₄، Na-HCO₃ تشخیص داده شد. همچنین، با ترسیم نمودار استیف برای تمامی نقاط نمونه‌برداری و شباهت‌های الگویی به دست آمده، آب‌های زیرزمینی مشابه هم مشخص و گروه‌بندی شده است (شکل ۵). در تمامی نمونه‌ها سدیم کاتیون غالب منابع آب زیرزمینی است و یون کلر عمدتاً نقش مهمی در آنیون غالب دارد. تیپ آب‌های از نوع Na-Cl، با حالت $\text{Cl} > \text{Na}$ تنها در دو چشمه آب گرم S4 و S5 دیده می‌شود. تیپ آب چشمه‌های آب سرد غربی منطقه بزمان Na-Cl-HCO₃ است و بیکربنات نشانه‌ای از وجود سازندهای کربناته در مسیر حرکت آب زیرزمینی است. چشمه‌های شرقی بزمان، واقع در واحدهای رسوبی، تیپ Na-SO₄ دارد. این واحدهای رسوبی شامل شیل، ماسه‌سنگ و مارن‌های ژپس‌دار است. لذا، به دلیل انحلال‌پذیری بالای کانی‌های تبخیری سولفات‌دار، وجود آب زیرزمینی سولفات بالا در این چشمه‌ها دور از انتظار نیست. آب زیرزمینی چاه‌های کشاورزی با نوع Na-Cl-SO₄ با حالت $\text{Na} > \text{Cl}$ و مقدار سولفات قابل ملاحظه، عمدتاً در بخش میانی منطقه مورد نظر و اطراف کفه نمکی جازموریان دیده می‌شود. به نظر می‌آید به دلیل ذرات آواری حاصل از کانی‌های سولفات‌دار، سازندهای رسوبی در افزایش سولفات نقش ایفا کرده باشد. تیپ Na-HCO₃ به صورت محدود و تنها در بخش‌های شرقی و جنوبی منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. این نوع آب، اثر آهک جمال و پلاژیوکلازهای سدیم توده‌های آذرین بر کیفیت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. در نمودار پایپر مشاهده می‌شود در آب زیرزمینی این منطقه، به ترتیب از محل چشمه‌ها، چاه‌های ایرانشهر و چاه‌های بزمان به سمت اسپکه، درصد سدیم افزایش یافته است، در حالی که در نمودار مربوط به آنیون‌ها، این روند دیده نمی‌شود.

طبقه‌بندی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از نظر مصارف شرب و کشاورزی

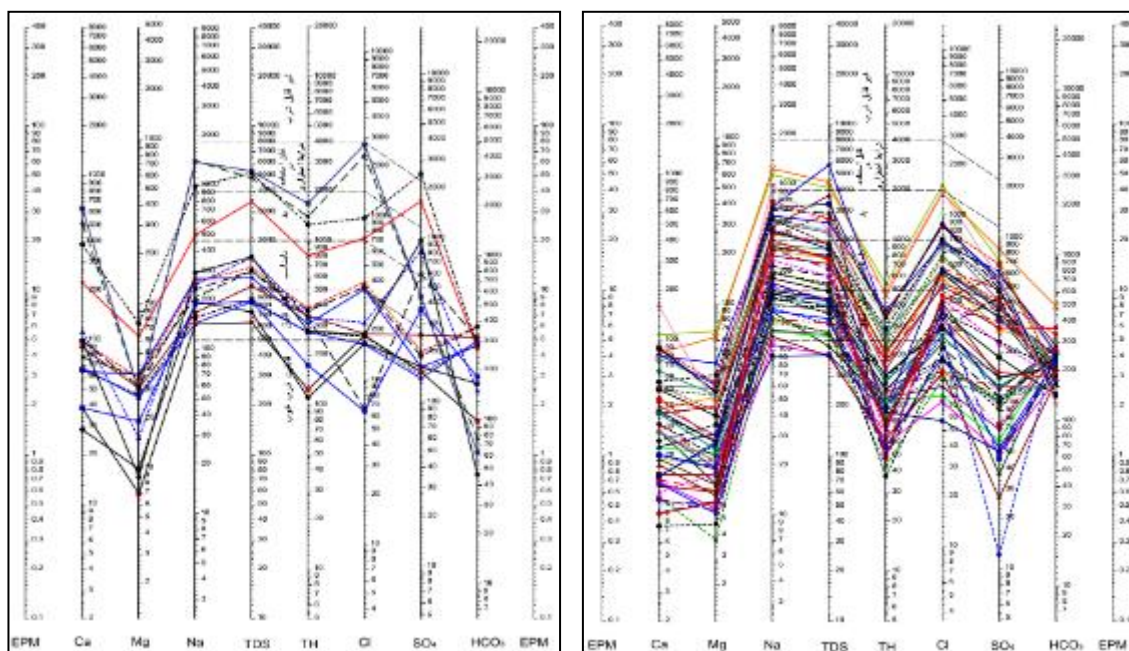
برای تعیین امکان استفاده از آب در مصارف شرب، از نمودار شولر استفاده می‌شود. بر اساس نمودار شولر مربوط به چاه‌های کشاورزی، نمونه‌های آب چاه‌های کشاورزی در ردیف آب‌های خوب و قابل قبول است. تعدادی محل، از جمله آب زیرزمینی چاه‌های N3 و B8 در ردیف آب‌های نامناسب قرار دارد. نمودار شولر مربوط به چشمه‌ها نیز نشان می‌دهد اکثر نمونه‌های آب چشمه‌ها در ردیف آب‌های خوب و قابل قبول است. نمونه S4، S14، S5 و S11 در ردیف آب‌های نامناسب و بد قرار می‌گیرد (شکل ۶).



شکل ۴. نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. نمودار استیف نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

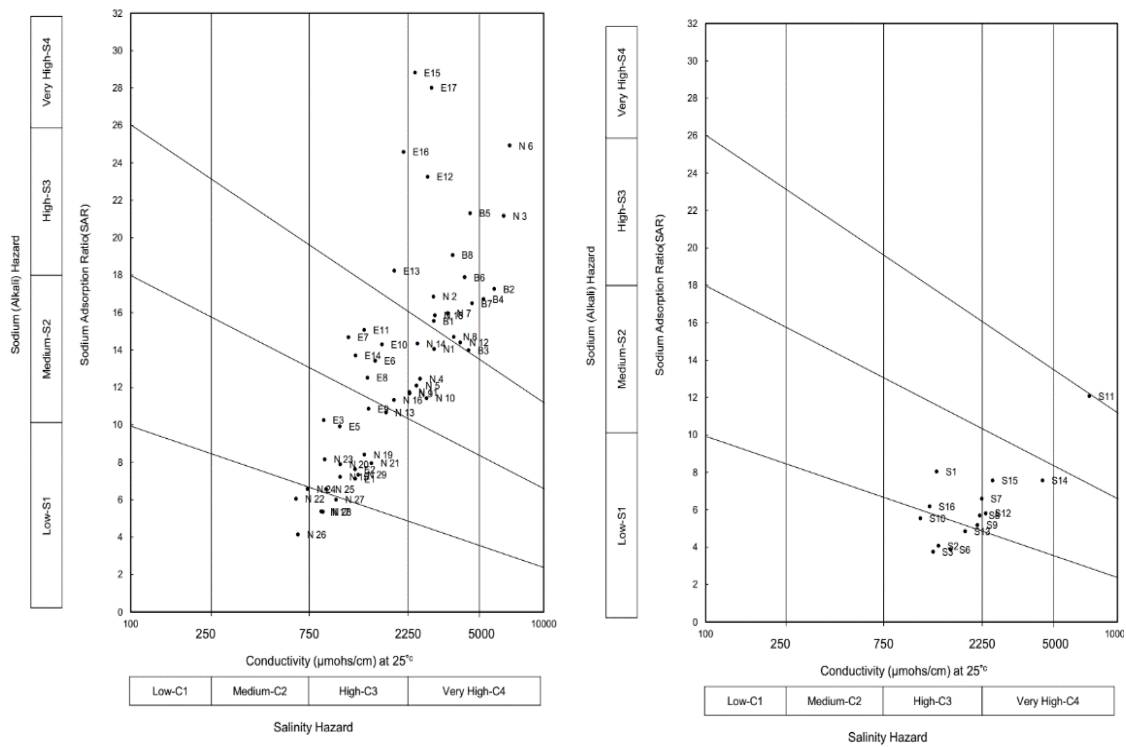


شکل ۶. تعیین موقعیت آب چاه‌ها و چشمه‌های منطقه در نمودار شولر، در طبقه‌بندی آب از نظر شرب

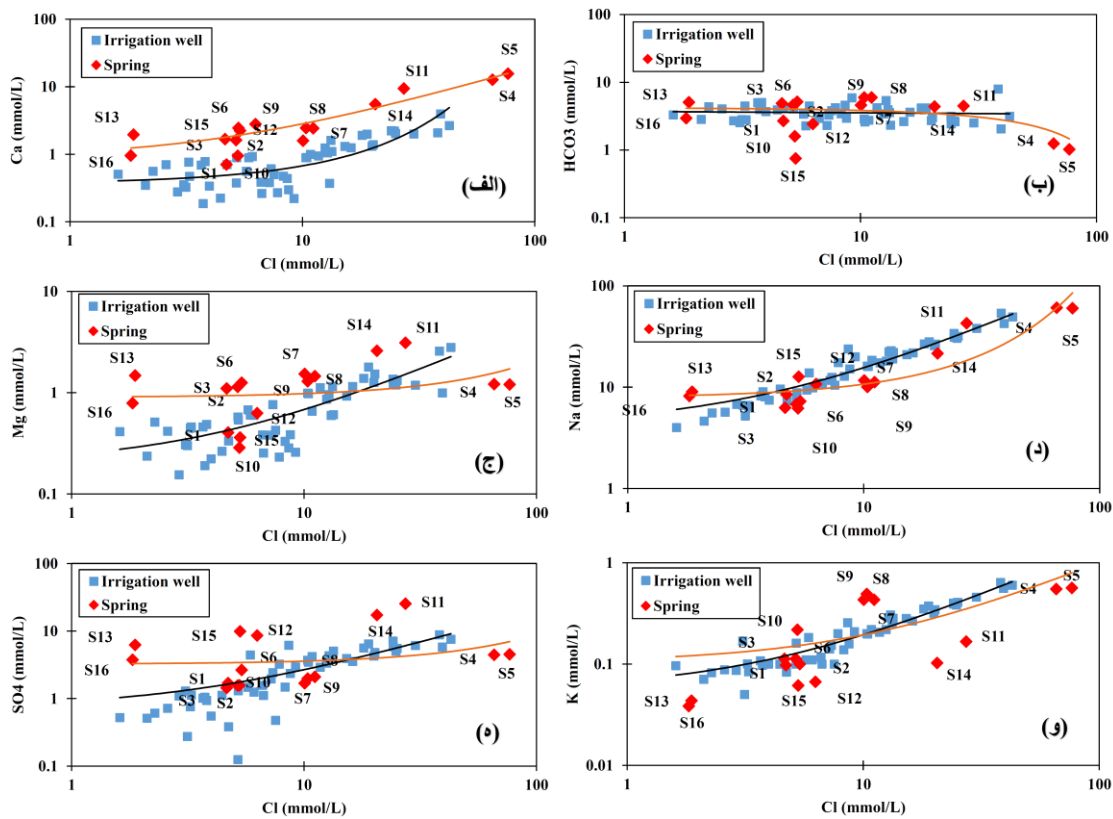
با توجه به اینکه در ایران بخش عظیمی از منابع آب زیرزمینی به مصرف کشاورزی و آبیاری می‌رسد، کیفیت آب زیرزمینی آبخوان‌ها از نظر بهره‌برداری آبی و استفاده کشاورزی نیز باید بررسی و گروه‌بندی شود. نمایش داده‌های مربوط به آب زیرزمینی چاه‌های کشاورزی و چشمه‌های منطقه مورد مطالعه روی نمودار ویلکوکس در شکل ۷ نشان می‌دهد که نمونه‌های آب چاه‌ها بیشتر در کلاس‌های آبیاری C3S1، C3S2 و C3S3، سپس در کلاس‌های C4S3 و C4S4 قرار می‌گیرد. هر چند کشاورزان منطقه از آب زیرزمینی برای آبیاری مزارع استفاده می‌کنند، بیشتر نمونه‌ها دارای کیفیت مشکوک تا نامناسب است و در مجموع کیفیت خوبی برای کشاورزی ندارد. نمودار ویلکوکس مربوط به چشمه‌ها نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها در کلاس‌های C3S1، C3S2 و C4S2 قرار دارد و دارای کیفیت قابل استفاده تا نامناسب است.

نسبت‌های یونی

برای شناخت فرایندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، رابطه بین یون‌های مختلف و نسبت‌های یونی آن‌ها بررسی شده است. با توجه به پایستار بودن یون کلراید و عدم شرکت این یون در واکنش‌های شیمیایی، نمودارهای دو متغیره غلظت کلر در مقابل غلظت‌های بی‌کربنات، سولفات، سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تهیه شده است. معمولاً افزایش یون کلر معیار طول مسیر طی شده آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود و می‌توان روند کاهش و افزایش عناصر دیگر یا نسبت یون‌ها در مسیر حرکت آب را بررسی کرد. در ادامه، به تغییرات عناصر اصلی نسبت به کلر اشاره می‌کنیم (شکل ۸). نمودارها نشان می‌دهد غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در آب زیرزمینی چشمه‌ها و چاه‌های کشاورزی با افزایش شوری، افزایش یافته است. حرکت آب زیرزمینی در طول مسیر و با گذشت زمان، افزایش عناصر را در پی خواهد داشت. اما، در مورد یون بی‌کربنات دیده می‌شود که با افزایش شوری آب زیرزمینی، غلظت این آنیون افزایش پیدا نکرده است. به سبب انحلال کانی‌های کربنات‌دار در طول مسیر آب زیرزمینی، آب نسبت به بی‌کربنات/کربنات در مقایسه با کلراید زودتر به حالت اشباع می‌رسد و بعد از مدتی، انحلال بیشتر بی‌کربنات/کربنات رخ نمی‌دهد یا حتی تمایل به رسوب دیده می‌شود. یکی دیگر از عوامل کاهش بی‌کربنات/کربنات در طول مسیر حرکت آب زیرزمینی، کاهش غلظت CO_2 محلول در آب، به دلیل مصرف طی انحلال کانی‌های کربنات‌دار است. لذا، مشاهده می‌شود با افزایش کلراید در آب زیرزمینی، غلظت بی‌کربنات/کربنات یا ثابت مانده یا کاهش یافته است.



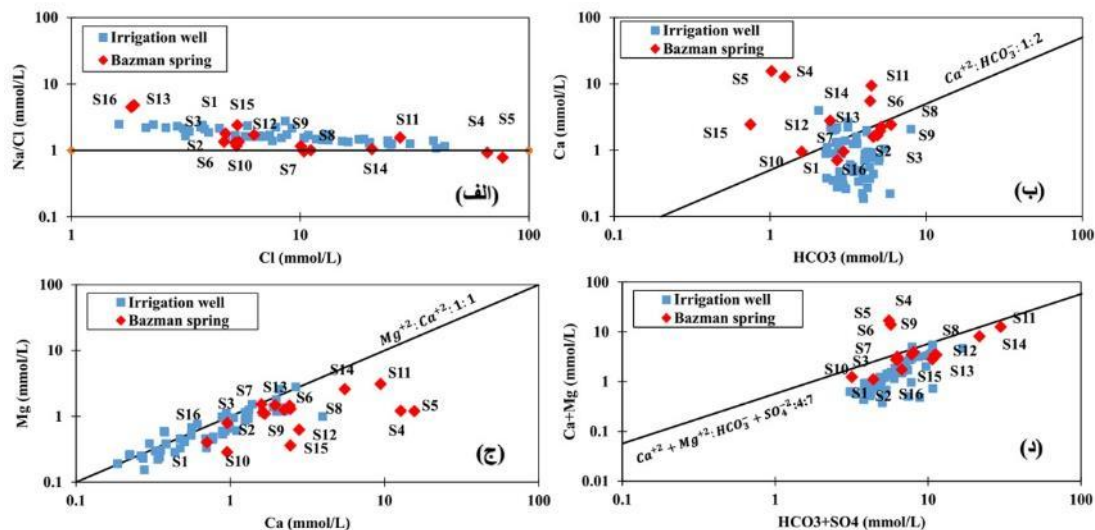
شکل ۷. تعیین موقعیت آب چاه‌های کشاورزی منطقه در نمودار ویلکوکس، در طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی



شکل ۸. نمودار تغییرات یون‌های اصلی. الف) کلسیم، ب) بی‌کربنات، ج) منیزیم، د) سدیم، ه) سولفات، و) پتاسیم در مقابل کلر

نسبت غلظت مولی سدیم به کلرید برابر با ۱ در آب نشان‌دهنده انحلال کانی‌ها است. شکل ۹ الف این نسبت را در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. به‌طور کلی، اکثر نمونه‌های آب در بالای نسبت ۱ قرار دارد. افزایش غلظت مولی سدیم نسبت به کلرید نشان‌دهنده تبادل یونی سدیم با کلسیم/ منیزیم، همچنین ورود سدیم از منشأهای دیگر همچون هوازدگی کانی‌های پلاژیوکلازهای سدیم‌دار سنگ‌های نفوذی منطقه مورد مطالعه به آب زیرزمینی است. چنین حالتی در آب‌های شیرین یا شور با سن جوان رخ می‌دهد، در حالی که این نسبت در آب زیرزمینی دو چشمه آب گرم S4 و S5 کمی از ۱ کمتر شده است. کاهش این نسبت در چشمه‌های آب گرم بیانگر تبادل یونی معکوس سدیم با کلسیم/ منیزیم است. معمولاً، در آب‌های شور، در تماس با رس‌ها یا آب‌های قدیمی، این نسبت به شدت کاهش پیدا می‌کند. لذا، در نمودار دیده می‌شود افزایش شوری معیاری از زمان ماندگاری بیشتر است و این نسبت از حالت بیش از ۱ به سمت حالت کمتر از ۱ تمایل دارد.

رابطه مولی بیکربنات و کلسیم منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در شکل ۹ ب ترسیم شده است. پراکندگی نمونه‌های آب روی این نمودار نشان می‌دهد انحلال کلسیت تنها عامل کنترل‌کننده کربنات و کلسیم در منطقه نیست، زیرا اکثر نمونه‌ها روی خط انحلالی کلسیت قرار نگرفته است. لذا، رابطه مولی کلسیم با منیزیم در نظر گرفته شده است (شکل ۹ ج). بسیاری از نمونه‌های آب زیرزمینی چاه‌های کشاورزی روی خط انحلالی دولومیت واقع شده است. اما نمونه‌های آب زیرزمینی چشمه‌ها، عمدتاً کلسیم بیش از منیزیم دارد. بنابراین، یا بخشی از یون کلسیم از منبع دیگری وارد آب زیرزمینی شده است؛ یا اینکه بخشی از منیزیم از محیط خارج شده است. با پلات کردن نمونه‌های آب زیرزمینی روی نمودار «کلسیم + منیزیم» در مقابل «بیکربنات + سولفات» (شکل ۹ د)، نقش انحلال ژپس در آزادسازی یون کلسیم بررسی شده است. با این نمودار می‌توان دید که نمونه‌های آب زیرزمینی چشمه‌ها تقریباً روی خط انحلال ژپس، کلسیت و دولومیت قرار دارد. به عبارت دیگر، هر سه نوع از این کانی‌ها در منطقه، خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه را کنترل می‌کند.

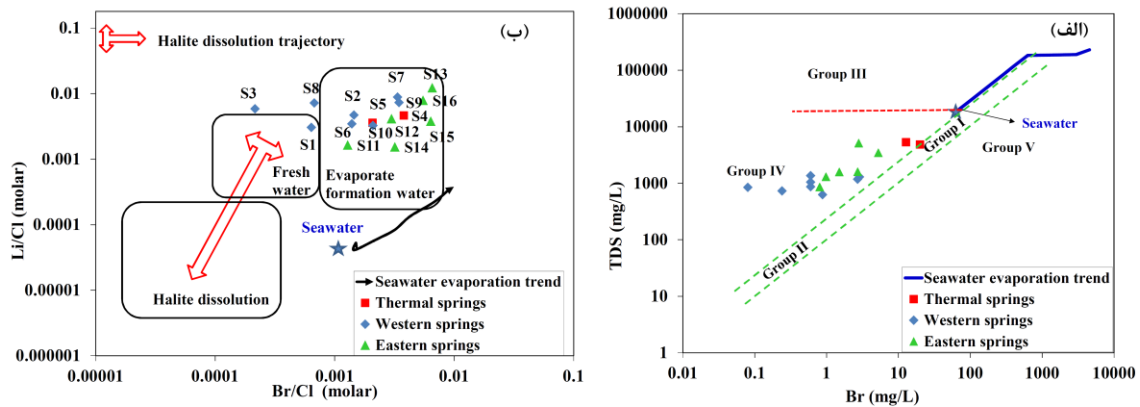


شکل ۹. نمودار نسبت‌های یونی. الف) Na/Cl، ب) بیکربنات با کلسیم، ج) کلسیم با منیزیم، د) بیکربنات + سولفات با کلسیم + منیزیم در منطقه مورد مطالعه

با توجه به اینکه در بخش‌هایی از منطقه شوری بسیار بالاست، در ادامه در تعیین منشأ شوری، علاوه بر نسبت Na/Cl که در بالا ذکر کردیم و نشان‌دهنده انحلال کانی‌ها است، نسبت‌های Li و Br به Cl، همچنین TDS در مقابل Br بررسی شده است. بر اساس نمودار غلظت TDS در مقابل برمید، ریتنهاوس (۱۹۶۷) منابع آب را به پنج گروه طبقه‌بندی کرده است که در تعیین منشأ آب استفاده می‌شود. شکل ۱۰ الف، نمونه‌های مربوط به چشمه‌ها را نشان می‌دهد که در گروه IV قرار می‌گیرد. بر مبنای این نمودار، عامل شوری آب زیرزمینی چشمه‌های منطقه، انحلال

کانی‌های نمک است که دچار رقیق‌شدگی با آب‌های شیرین شده است. آب زیرزمینی چشمه‌های آبگرم ضمن اینکه در گروه IV قرار دارد، نشانه‌هایی از منشأ گروه I نیز دارد (نشان‌دهندهٔ تبخیر آب دریا یا اختلاط آب دریا با آب‌های با مقدار Br و TDS پایین).

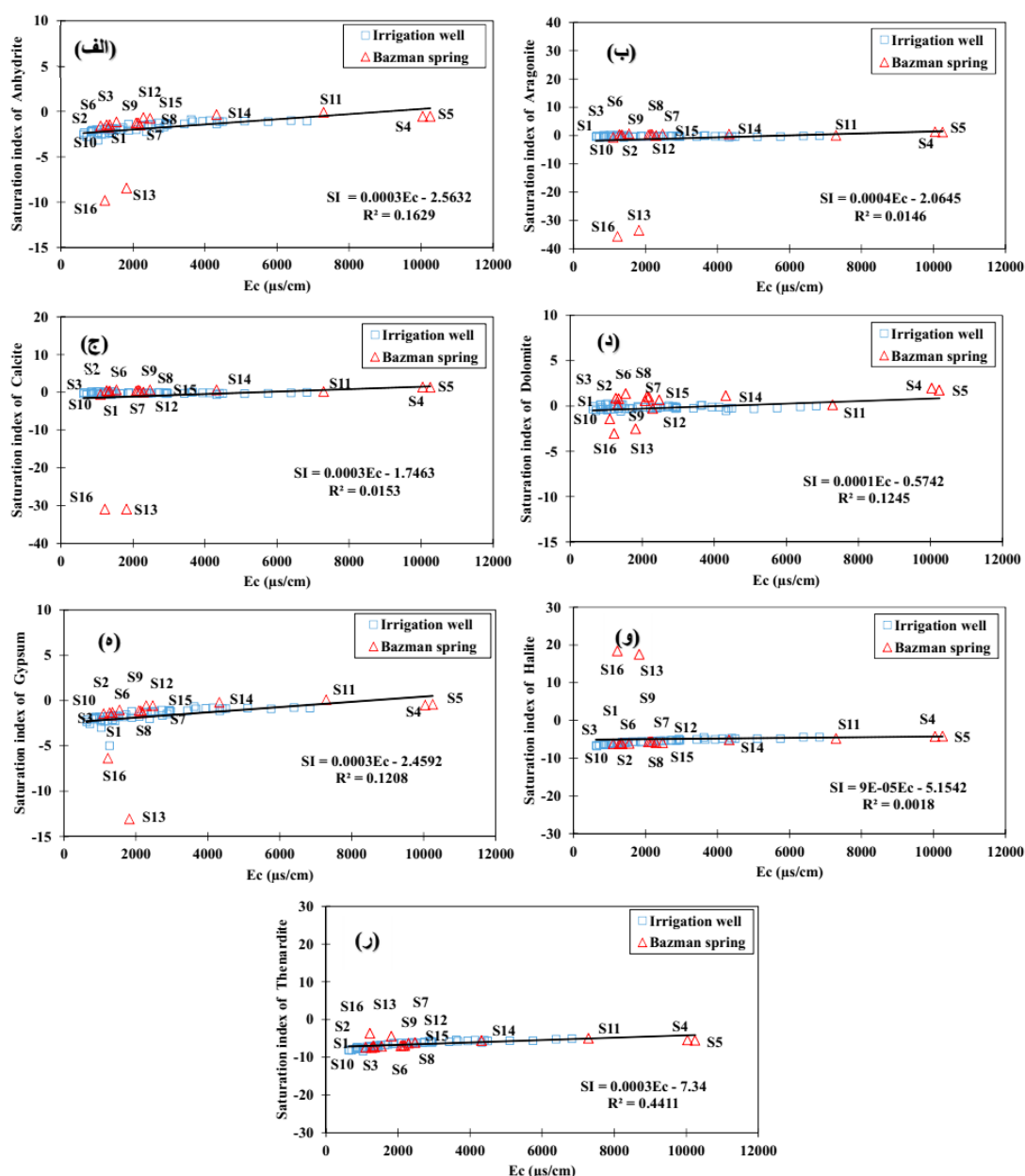
معمولاً عنصر Li ردیاب مناسبی در سیر تکاملی فرایندهای تبخیر در محلول‌های اولیه به کار می‌رود. به همین منظور، نمونه‌های آب مربوط به چشمه‌ها روی نمودار Li/Cl در مقابل Br/Cl (باقری و همکاران، ۲۰۱۴) پلات شده است (شکل ۱۰ ب). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌ها در محدودهٔ شوری حاصل از سازندهای تبخیری و آب شیرین قرار دارد. در این میان چشمه‌های S1، S3 و S8 از مجموعه چشمه‌های غربی منطقه در محدودهٔ آب‌های شیرین واقع شده است.



شکل ۱۰. الف) نمودار لگاریتمی کل مواد جامد محلول (TDS) در مقابل Br: طبقه‌بندی نمونه‌های آب مربوط به چشمه‌ها بر اساس نمودار ریتنهاوس (۱۹۶۷). ب) نمودار ارتباط بین Br/Cl و Li/Cl در نمونه‌های آب مربوط به چشمه‌ها بر مبنای نمودار (باقری و همکاران، ۲۰۱۴)

اندیس اشباع

اندیس اشباع مثبت بیانگر فوق‌اشباع بودن کانی در آب و تمایل آن به رسوب‌گذاری است، در حالی که اندیس اشباع منفی نشان‌دهندهٔ تحت‌اشباع بودن آن کانی و قابلیت انحلال بیشتر آن است. اندیس اشباع کلسیت آب زیرزمینی در ۲۳ محل نمونه‌برداری مثبت و در اکثر نقاط منفی محاسبه شده است. آراگونیت نیز مانند کلسیت در اکثر نقاط منفی است. اندیس اشباع دولومیت نیز مانند اندیس اشباع کلسیت در اکثر نقاط منفی و در ۲۲ محل مثبت است. افزایش غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم از منشأهایی غیر از انحلال کلسیت و دولومیت، مانند هوازدگی کانی‌های فلدسپاته و سایر کانی‌های کلسیم و منیزیم‌دار، باعث فوق‌اشباع شدن نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به کلسیت و دولومیت در چند محل شده است. مثبت بودن اندیس اشباع کلسیت و دولومیت در نمونه‌های قسمت شمالی و بعضی نمونه‌های قسمت شرقی چاه‌های کشاورزی منطقه نشان می‌دهد که از سمت جنوب به سمت شمال و شرق از پتانسیل انحلال این کانی‌ها کاسته و بر پتانسیل رسوب آن‌ها افزوده می‌شود. اندیس اشباع انیدریت، هالیت و تترادیت در تمام نقاط نمونه‌برداری منفی است و نشان می‌دهد که نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به این دو کانی تحت‌اشباع است و تمایل به حل کردن آن‌ها دارد. اندیس اشباع ژپس در تمام نقاط به جز S11 منفی است و نشان می‌دهد که تقریباً تمام نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به ژپس تحت‌اشباع است و تمایل به حل شدن آن دارد. نمودارهای اندیس اشباع کانی‌هایی که در بالا ذکر کردیم، در مقابل هدایت الکتریکی ترسیم شده است (شکل ۱۱) و مشاهده می‌شود که با افزایش هدایت الکتریکی، اندیس اشباع تمام کانی‌ها نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۱. اندیس اشباع کانی‌ها در مقابل هدایت الکتریکی، انیدریت (الف)، آراگونیت (ب)، کلسیت (ج)، دولومیت (د)، ژپس (ه)، هالیت (و) و تئاردیت (ز)

نتیجه‌گیری

چشمه‌های آب گرم در منطقه ترکیب شیمیایی متفاوتی را نسبت به نمونه‌های آب سرد نشان می‌دهد. از نظر شیمیایی، دو چشمه آب گرم تیپ Na-Cl دارد، با حالتی که کلر بیش از سدیم است. بنابراین، با توجه به اینکه آب زیرزمینی این دو چشمه طی فرایند نفوذ آب‌های جوی به عمق و گرم‌شدن در اثر گرمایش زمین‌گرمایی و صعود به بالا یا با منشأگرفتن از آب‌های قدیمی در عمق، زمان کافی برای تبادل کاتیونی سدیم با محیط را دارد، مقدار مولی آن بسیار کمتر از کلر شده است. بررسی تیپ آب چشمه‌های آب سرد غربی منطقه بزمان نشان می‌دهد، با این حالی که نوع آب Na-Cl است، غلظت کلر، برخلاف دو چشمه آب گرم کمتر از سدیم است. تیپ آب زیرزمینی این چشمه‌ها Na-Cl-HCO₃ است و بیکربنات نشانه‌ای از وجود سازندهای کربناته در مسیر حرکت آب زیرزمینی است. علاوه بر این، چشمه‌های آب سرد شرقی بزمان، واقع در واحدهای رسوبی، تیپ Na-SO₄ دارد که به دلیل انحلال‌پذیری بالای کانی‌های تبخیری سولفات‌دار

است. همچنین، شوری آب زیرزمینی چشمه‌های منطقه حاصل سازندهای تبخیری و اختلاط با آب شیرین است. با توجه به نمودار شولر، مشاهده می‌شود که اکثر نمونه‌های آب چاه‌ها، به‌جز دو چاه N3 و B8 و بیشتر نمونه‌های آب چشمه‌ها، به‌جز چشمه‌های S4، S5، S11 و S14 از نظر شرب در محدوده خوب و قابل قبول قرار می‌گیرد. بر اساس نمودار ویلکوکس، بیشتر نمونه‌های آب زیرزمینی چاه‌ها و چشمه‌ها کیفیت نامناسب دارد، در حالی که برخلاف انتظار بر اساس نمودار ویلکوکس، بیشتر نمونه‌های آب زیرزمینی در کشاورزی مناسب نیست. هر چند کیفیت منابع آب از لحاظ مواد محلول در مصارف شرب مناسب است، به دلیل نسبت بالای جذب سدیم (نسبت یون سدیم به یون‌های کلسیم و منیزیم)، خاک سدیم را جذب می‌کند و سبب تخریب بافت آن می‌شود. بنابراین، از این دیدگاه منابع آب برای مصارف کشاورزی مناسب نیست.

منابع

- آقابیاتی، س.ع. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- فرج‌پور خزاعی، گ.، یزدی، م. و ناوی، پ. (۱۳۹۳). هیدروشیمی چشمه آبگرم ایستی سوی سلماس. همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع شیراز.
- قریشی‌نیا، س.ک.، شاکری، ع.، نجم‌الدینی، ح.، دهواری، ع.ا. و شهرکی، م. (۱۳۹۱). بررسی غلظت عناصر بالقوه سمناک در چشمه‌های گرمایی (سنگان و تفتان) و معمولی دامنه‌های تفتان. سی‌ویکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- لشکری، م. و لشکری‌پور، غ. (۱۳۹۰). بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت ایرانشهر و تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت آب. سی‌امین گرد همایی علوم زمین، تهران.
- مر، ف. و شاکری، ع. (۱۳۸۵). زمین‌شیمی زیست‌محیطی چشمه‌های گرمایی و معدنی دامنه جنوبی تفتان. دهمین همایش زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- نورعلیئی، ج. و لاری، ح.ر. (۱۳۸۱). اکتشاف اولیه انرژی زمین‌گرمایی در استان خراسان. هفدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران.
- Aqanbati, S.A. (2004). Geology of Iran Mineral Explorations of Iran (GSI). [in Persian]
- Bagheri, R., Nadri, A., Raeisi, E., Eggenkamp, H.G.M., Kazemi, G.A. and Montaseri, A. (2014). Hydrochemical and isotopic ($\delta^{18}O$, δ^2H , $87Sr/86Sr$, $\delta^{37}Cl$ and $\delta^{81}Br$) evidence for the origin of saline formation water in a gas reservoir. *Chemical Geology*. 384: 62-72.
- Belhai, M., Fujimitsu, Y., Nishijima, J. and Bersi, M. (2017). Hydrochemistry and gas geochemistry of the northeastern Algerian geothermal waters. *Arabian Journal of Geosciences*. 10(1).
- Brown, K. (1995). Environmental aspect of geothermal energy development. Pre-Congress of World Geothermal Congress.
- Farajpour Khazaei, G., Yazdi, M. and Navi, P. (2014). Hydrochemistry of the springs of the Istighi Salmas Spa. National Conference on Geology and Resources Exploration, Shiraz. [in Persian]
- Quraishi Nia, S.K., Shakeri, A., Najmeedini, H., Dehviri, A.A. and Shahraki, M. (2012). Investigating the concentration of potentially contaminated elements in hydrothermal springs (Sangan and Taftan) and ordinary slopes of Iran, Taftan. 31th Gathering of Earth Sciences, Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Lashkari, M. and Lashkaripur, Gh. (2011). Investigation of groundwater quality of Iranshahr plain and effects of geological formations on water quality. Thirteenth Earth Science Conference, Tehran. [in Persian]
- Mohammadi, Z., Bagheri, R. and Jahanshahi, R. (2010). Hydrogeochemistry and geothermometry of Changel thermal springs, Zagros region, Iran. *Geothermics*. 39(3): 242-249.
- More, F. and Shakeri, A. (2006). Environmental biomass of hydrothermal and mineral springs of southern Taftan. 10th Iranian Geology Conference, Tarbiat Modarres University. [in Persian]
- Negri, A., Daniele, L., Aravena, D., Muñoz, M., Delgado, A. and Morata, D. (2018). Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysen thermal springs (Southern Patagonia, Chile). *Journal of Geochemical Exploration*. 185: 1-13.
- Noor Alii, J. and Lari, H.R. (2002). Primary exploration of geothermal energy in Khorasan province. 17th International Power Conference, Tehran. [in Persian]
- Pantić, T.P., Birke, M., Petrović, B., Nikolov, J., Dragišić, V. and Živanović, V. (2015). Hydrogeochemistry of thermal groundwaters in the Serbian crystalline core region. *Journal of Geochemical Exploration*. 159: 101-114.
- Pasvanoğlu, S. and Çelik, M. (2018). A conceptual model for groundwater flow and geochemical evolution of thermal fluids at the Kızılcahamam geothermal area, Galatian volcanic Province. *Geothermics*. 71: 88-107.
- Rittenhouse, G. (1967). Bromine in oil-field waters and its use in determining possibilities of origin of these waters. *AAPG Bull.* 51: 2430-2440.
- Shakeri, A. and Moore, F. (2008). Geochemistry of the thermal springs of mount Taftan, southeastern Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Reserch*. 178: 829-836.
- Yang, P., Cheng, Q., Xie, S., Wang, J., Chang, L., Yu, Q. and Chen, F. (2017). Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China. *Journal of Hydrology*. 549: 50-61.