

بررسی برهمکنش سنگ، رسوب و آب زیرزمینی در محدوده کویر درانجیر با استفاده از مدل سازی ژئوشیمیایی

محمد فاریابی^{۱*}، محمد حسین رحیمی^۲

^۱استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت

^۲مهندسین مشاور سرزمین قنات، تهران

* نویسنده مسئول، faryabi753@yahoo.com

چکیده: در بسیاری موارد واکنش بین اجزاء سازنده محیط متخلخل و آب زیرزمینی مهمترین عامل تعیین کننده کیفیت آب- زیرزمینی است. در این مطالعه برای بررسی برهمکنش سنگ‌ها، رسوبات و آب زیرزمینی در محدوده کویر درانجیر از روش مدل- سازی ژئوشیمیایی استفاده شده است. برای این کار نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی در محیط نرم‌افزار PHREEQC بکار گرفته شده‌اند. در این مطالعه، مدل سازی ژئوشیمیایی به دو روش انجام شد. در روش اول مدل سازی ژئوشیمیایی برای مشخص کردن وضعیت تعادلی کانی‌های مختلف در آب زیرزمینی صورت گرفت و شاخص اشباع کانی‌ها محاسبه شد. در روش دوم مدل- سازی ژئوشیمیایی معکوس در برخی از مسیرهای جریان آب زیرزمینی انجام گرفت تا وضعیت تعادلی کانی‌ها در مسیر جریان آب بررسی گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که تیپ آب زیرزمینی در همه بخش‌های منطقه مورد مطالعه به صورت کلروره- سدیک است. کانی‌های کلسیت، دلویت و آراگونیت در حال رسوبگذاری و کانی‌های ژپس، انیدریت و هالیت در حال انحلال در آبخوان محدوده مورد مطالعه می‌باشند.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، محدوده کویر درانجیر، مدل سازی ژئوشیمیایی.

۱- مقدمه

سنگ‌ها و رسوبات توانایی بی نظیری برای تغییر دادن کیفیت شیمیایی آب دارد. 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 تاثیر قرار می‌گیرد. این عوامل شامل

هشتمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران



8th Symposium of Sedimentological Society of Iran / 31 Jan - 1 Feb 2024
University of Hormozgan

۱۱ و ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲
دانشگاه هرمزگان

شیمی آب نفوذی، که عمدتاً به وسیله درجه حرارت هوا کنترل می شود، تناوب، میزان و مدت زمان بارش، کانی شناسی، پوشش گیاهی، خاک و نرخ تولید گاز خاک می باشند. عوامل دیگری که بر روی شیمی آب زیرزمینی مؤثر هستند، شامل ضخامت لایه های زمین شناسی، نوع تخلخل و وضعیت توپوگرافی می باشند. در حقیقت این عوامل نرخ تغذیه، مسیر جریان، و زمان ماندگاری آب زیرزمینی را کنترل می نمایند. انحلال سنگ ها و رسوبات تبخیری در مناطق خشک، اصلی ترین عامل کنترل کننده کیفیت آب زیرزمینی است. تعیین رابطه بین واحدهای زمین شناسی و آب موجود در آنها، اهمیت زیادی در مدیریت منابع آب دارد. مدل ژئوشیمیایی نشان می دهد که چه فرآیندهای ژئوشیمیایی در طول مسیر جریان آب زیرزمینی رخ می دهد. با توجه به نتایج مدل سازی ژئوشیمیایی می توان نوع کانی و واکنش هایی که مؤثر بر کیفیت آب های زیرزمینی هستند را تشخیص داد (عصاری و محمدی، ۱۳۹۱). البته صحت یا اعتبار نتایج در مدلسازی معکوس به مدل مفهومی سیستم آب زیرزمینی، داده های ورودی به مدل و سطح درک فرآیندهای ژئوشیمیایی در منطقه بستگی دارد (Guler and Thyne, 2004). مدل سازی هیدروژئوشیمیایی معکوس یکی از ابزارهای مهم برای پی بردن به فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی سیستم آب زیرزمینی می باشد (عصاری و محمدی، ۱۳۹۱). در این روش دو نمونه آب به عنوان ترکیب محلول اولیه و محلول نهایی به مدل معرفی می شود. سپس با استفاده از محاسبات انجام شده، نحوه تبادلات بین محیط متخلخل و آب زیرزمینی شبیه سازی می گردد.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، محدوده کویر در انجیر در استان یزد می باشد. شهر بافق مهمترین مرکز جمعیتی در این محدوده مطالعاتی می باشد. راه آسفalte یزد - بافق ادامه آن به شهرستان بهاباد مهمترین محور ارتباطی منطقه است و در مسیر خود از معدن چغارت می گذرد. منطقه مورد مطالعه از نظر زمین شناسی دارای سازندهای متنوعی است (شکل ۱). سنگ های آذرین و دگرگونی گسترش قابل ملاحظه ای داشته و عمدتاً در شمال و شرق منطقه مورد مطالعه مشاهده می شوند. این نوع سنگ ها معمولاً نفوذ ناپذیر و متراکم بوده و تنها تحت تاثیر نیروهای تکتونیکی و هوازدگی، درز و شکاف هایی در آنها ایجاد می شود که می تواند حاوی آب باشد. سنگ های کربناته (آهک و دولومیت) نیز گسترش قابل ملاحظه ای داشته و از نظر کمیت و کیفیت آب زیرزمینی دارای اهمیت زیادی هستند. این سنگ ها بطور یکنواخت از آهک کرتاسه زیرین و در بعضی مناطق از دولومیت تشکیل شده اند. اسید کربنیک حاصل از انحلال گاز دی اکسید کربن در آب باران باعث انحلال سنگ های کربناته شده و معابر کارستیک را در داخل این نوع سنگ ها گسترش می دهد. رسوبات شیلی و مازنی بخش اعظم منطقه مورد مطالعه را پوشانده و به دلیل گسترش زیاد و ماهیت لیتولوژی نقش اساسی در کیفیت منابع آب دارند (مهندسین مشاور سرزمین قنات، ۱۳۹۱). تخلخل کل این نوع رسوبات زیاد و از نوع بین دانه ای می باشد، ولی تخلخل مفید و نفوذپذیری آن ها کم است. رسوبات مازنی، تبخیری و کنگلومرایی که عموماً تحت عنوان رسوبات پالئوژن و نئوژن شناخته می شوند، بطور گسترده به خصوص در غرب و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند و حدود ۱۰ درصد از مساحت کل منطقه را پوشانده اند. به دلیل گسترش زیاد و ماهیت لیتولوژی سنگ های نئوژن و پالئوژن و وجود لایه های ژپس و نمک و لایه های رسی، حالیت این رسوبات بسیار بالا است. رسوبات آبرفتی در سطح دشت دارای ضخامت نسبتاً زیادی بوده و از نظر برداشت آب زیرزمینی اهمیت زیادی دارند. رسوبات آبرفتی شامل مجموعه ای از قطعات دانه درشت تا دانه ریز سنگ های رسوبی قدیمی از قبیل آهک و ماسه و شیل و قطعاتی از سنگ های حاصل از فرسایش سنگ های آذرین و دگرگونی می باشند. چون در

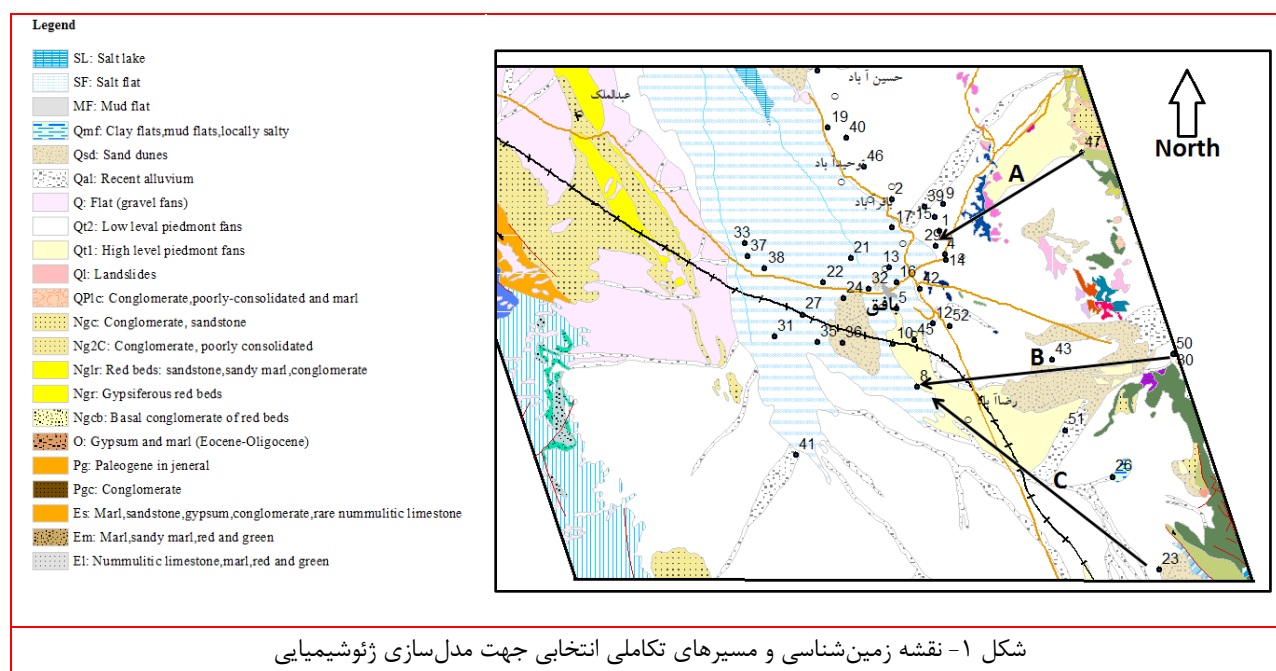
هشتمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران



8th Symposium of Sedimentological Society of Iran / 31 Jan - 1 Feb 2024
University of Hormozgan

۱۱ و ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲
 دانشگاه هرمزگان

رسوبات آبرفتی نفوذپذیری از نوع بین دانه‌ای است، معمولاً آب زیرزمینی با این رسوبات به طور واضحی به حد تعادل رسیده و سفره‌های آبدار را تشکیل می‌دهند. همچنین به دلیل سرعت کم آب و بر اساس روند تکاملی کیفیت از نظر نوع آنیون‌ها در طول مسیر حرکت آب از محل تغذیه به محل تخلیه، میزان املاح موجود در آنها به تدریج افزایش می‌یابد.



۳- روش تحقیق

برای مدل‌سازی ژئوشیمیایی سیستم آب‌زیرزمینی از نرم افزار PHREEQC استفاده شده است. نتایج آنالیز شیمیایی آب‌زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در سال ۱۳۹۹ به عنوان داده‌های ورودی به مدل وارد شده‌اند. در مدل‌سازی ژئوشیمیایی مستقیم، وضعیت تعادل فازهای مختلف کانی از طریق محاسبه شاخص اشباع آن‌ها در نمونه‌های آب بررسی می‌گردد. جهت شناسایی عوامل مؤثر بر هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی استفاده از شاخص اشباع کانی‌های مختلف و بررسی روابط بین شاخص‌های اشباع بسیار مفید است. ذکر این مطلب ضروری است که شاخص اشباع فقط نشان می‌دهد که چه واکنشی به لحاظ ترمودینامیکی اتفاق می‌افتد، ولی نرخ انجام فرآیند را مشخص نمی‌نماید. در مورد مقدار شاخص اشباع یک کانی سه حالت در نظر گرفته می‌شود:

- شاخص اشباع کمتر از صفر است، در اینصورت کانی مورد نظر در حال انحلال در آب زیرزمینی است.
- شاخص اشباع تقریباً مساوی صفر است، در اینصورت کانی مورد نظر در حال تعادل با آب زیرزمینی است.
- شاخص اشباع بیشتر از صفر است، در اینصورت کانی مورد نظر در حال رسوب‌گذاری در آب زیرزمینی است.

برای بررسی وضعیت تعادلی کانی‌ها در مسیر جریان آب‌زیرزمینی از مدل‌سازی ژئوشیمیایی معکوس استفاده شده است. در این روش، ترکیب شیمیایی یک نمونه آب در ابتدای مسیر جریان آب‌زیرزمینی به عنوان محلول اولیه و ترکیب شیمیایی یک نمونه آب در انتهای مسیر جریان آب-زیرزمینی به عنوان محلول نهایی به مدل معرفی شود. سپس نرم‌افزار PHREEQC، محاسباتی را انجام داده و مدل‌های ممکن برای تبدیل محلول اولیه به محلول نهایی را ارائه می‌دهد.

۴- نتایج و بحث

۵۲ نمونه آب از چاه‌های بهره‌برداری محدوده کویر درانجیر در سال ۱۳۹۹ جمع‌آوری شده است. خلاصه نتایج آنالیز این نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس این جدول، یون‌های سدیم، کلراید و سولفات بیشترین غلظت را در بین یون‌های اصلی دارند. بیشترین میزان تغییرات غلظت در نمونه‌های آب نیز مربوط به همین یون‌ها است. یون‌های پتاسیم و بی‌کربنات نیز کمترین غلظت و میزان تغییرات را نشان می‌دهد. میزان کل جامدات محلول آب‌زیرزمینی بین ۸۳۹ تا ۴۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. کمترین میزان این پارامتر در مخروط-افکنه‌های حاشیه شرقی محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شود. حداکثر میزان کل جامدات محلول نیز در بخش شمالی منطقه در حاشیه پلایای نمکی مشاهده شده است. به نظر می‌رسد که مهمترین عامل افزایش کل جامدات محلول آب‌زیرزمینی، انحلال رسوبات تبخیری حاوی گچ و نمک است. برای تعیین تیپ و رخساره آب‌زیرزمینی از کاتیون‌ها و آنیون‌های عمده استفاده می‌شود. آنیون‌ها و کاتیون‌هایی که دارای بیشترین مقدار هستند، تعیین کننده تیپ و رخساره آب زیرزمینی هستند. تیپ و رخساره نمونه‌های آب‌زیرزمینی به صورت کلروره-سدیک است. دلیل این موضوع وجود رسوبات تبخیری دانه‌ریز در سطح دشت است. حضور واحدهای زمین‌شناسی مانند رسوبات لایه‌های قرمز نشوژن، رسوبات تبخیری سازند قم، گچ‌ها و مارن‌های ائوسن و کفه‌ها و دریاچه‌های نمکی در ایجاد تیپ کلروره نقش اساس دارد. تبخیر از آب‌های سطحی و زیرزمینی نیز در ایجاد تیپ کلروره نقش مهمی دارد.

جدول ۱- پارامترهای آماری ویژگی‌های کیفی نمونه‌های آب‌زیرزمینی

پارامتر	EC	TDS	pH	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄
میانگین حسابی	13496	7330.8	7.75	362.88	220.2	2030	22.37	119.3	3268	1325.9
انحراف معیار	5295.4	2883.6	0.21	153.82	98.17	783.6	12	40.34	1301	623.65
ضریب تغییرات (درصد)	39.24	39.34	2.71	42.39	44.58	38.59	53.64	33.82	39.8	47.04
حداکثر	27300	15052	8.2	688	393	4299	57	268	6345	3392
حداقل	1450	839	7.2	56	12.5	240	3.6	60	222.7	175
مد	11500	-	7.7	440	309	-	21	100	-	1208
میان	14288	7510.5	7.75	395	229	2145	22	108	3444	1330
دامنه تغییرات	25850	14213	1	632	380.5	4059	53.4	208	6123	3217
واریانس	3E+07	8E+06	0.04	23661	9637	6E+05	144.03	1627	2E+06	388937

هشتمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران



8th Symposium of Sedimentological Society of Iran / 31 Jan - 1 Feb 2024
University of Hormozgan

۱۱ و ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲
دانشگاه هرمزگان

۴-۱- شاخص اشباع

برای هر کدام از نمونه‌های آب‌زیرزمینی مقادیر شاخص‌های اشباع کانی‌های آراگونیت کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به این جدول اغلب نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به کلسیت، آراگونیت و دولومیت اشباع و فوق اشباع می‌باشند. آبخوان محدوده کویر درانجیر نسبت به ژپس، انیدریت و هالیت تحت اشباع است. در مباحث مربوط به نمایه‌های اشباع ذکر این مطلب ضروری است که شاخص اشباع فقط نشان می‌دهد چه واکنشی به لحاظ ترمودینامیکی اتفاق می‌افتد، ولی نرخ انجام فرآیند را مشخص نمی‌نماید. تفسیر شاخص‌های اشباع جهت بررسی فاکتورهای زمین‌شناسی موثر بر کیفیت آبهای زیرزمینی و با استفاده از نمودارهای دو متغیره صورت می‌گیرد. نمودارهای دو متغیره شاخص اشباع کانی‌های کلسیت، دولومیت و... نمونه‌های آب زیرزمینی در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش شاخص اشباع کلسیت مقدار شاخص اشباع دولومیت و آراگونیت افزایش می‌یابد و تقریباً رابطه مستقیمی بین شاخص اشباع کلسیت، دولومیت و آراگونیت وجود دارد. مقدار شاخص اشباع ژپس و انیدریت نیز با افزایش غلظت یون سولفات و مقدار شاخص اشباع هالیت با افزایش یون کلراید افزایش می‌یابد. در مجموع از این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که در حال حاضر در آبخوان محدوده مورد مطالعه کلسیت، دولومیت و آراگونیت در حال رسوبگذاری بوده و ژپس، انیدریت و هالیت در حال انحلال می‌باشند.

جدول ۲- شاخص اشباع کانی‌های مختلف برای نمونه‌های آب‌زیرزمینی

	Anhydrite	Aragonite	Calcite	CO ₂ (g)	Dolomite	Gypsum	H ₂ (g)	H ₂ O(g)	Halite	O ₂ (g)
میانگین	-0.81	0.24	0.39	-2.82	0.90	-0.60	-23.50	-1.51	-4.02	-36.05
حداقل	-1.79	-0.28	-0.13	-3.25	-0.13	-1.57	-24.40	-1.58	-5.88	-38.56
حداکثر	-0.38	0.58	0.73	-2.02	1.62	-0.18	-22.40	-1.42	-3.36	-33.75
دامنه تغییرات	1.41	0.86	0.86	1.23	1.75	1.39	2.00	0.16	2.52	4.81
انحراف معیار	0.33	0.18	0.18	0.28	0.37	0.33	0.41	0.03	0.47	0.97
ضریب تغییرات	0.40	0.76	0.47	0.10	0.41	0.55	0.02	0.02	0.12	0.03

۴-۲- مدل سازی ژئوشیمیایی معکوس

جهت بررسی کمی تکامل شیمیایی آب زیرزمینی، مدل سازی ژئوشیمیایی معکوس در سه مسیر انجام گرفته است که این مسیرهای تکاملی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. این مسیرها با حروف A، B و C مشخص شده‌اند. داده‌های شیمی محلول‌های اولیه و نهایی مربوط به سال ۱۳۹۹ برای مدل سازی معکوس بکار گرفته شده است. نمونه‌هایی که در هر مسیر به عنوان محلول اولیه و محلول نهایی در مدل سازی بکار گرفته شده‌اند در جدول ۳ ارائه شده‌اند. محل این نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

محاسبات مدل سازی معکوس (موازنه جرمی) تعادل شیمیایی ترکیبات آب‌زیرزمینی، با استفاده از کد کامپیوتری PHREEQC انجام گرفته است. فرض شده که تفاوت در ترکیب شیمیایی آب دو چاه انتخابی ناشی از واکنش‌های آب و کانی‌های در تماس با آب باشد. هدف از مدل-سازی معکوس آب‌های زیرزمینی، یافتن دسته‌ای از انتقال‌های مولی کانی‌ها و گازهای در تماس با آب می‌باشد. فازهایی که می‌بایست در

هشتمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران



8th Symposium of Sedimentological Society of Iran / 31 Jan - 1 Feb 2024
University of Hormozgan

۱۱ و ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲
دانشگاه هرمزگان

محاسبات مدل سازی مورد استفاده قرار گیرند با شاخص phases تعریف گردیده اند. در این مدل فازهای کلسیت، دلومیت، ژپس، انیدریت و هالیت در بلوک داده phases مفروض گردیده اند.

جدول ۳- مشخصات مسیرهای تکاملی انتخابی جهت مدل سازی ژئوشیمیایی معکوس

نام مسیر تکاملی	محل اولیه	محلول نهایی
A	۴۷	۲۹
B	۵۰	۸
C	۲۳	۸

مدل سازی ژئوشیمیایی در مسیر A

در این مسیر نمونه ۴۷ به عنوان محلول اولیه و نمونه ۲۹ به عنوان محلول نهایی در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج مدل سازی مسیر A مشخص شد که آب زیرزمینی در طی مسیر جریان به تدریج از کلسیت اشباع شده و آن را رسوب می دهد، به طوری که در انتهای مسیر A در حدود ۰/۰۰۲۷۵ میلی گرم در لیتر کلسیت در آب زیرزمینی رسوب کرده است. آب زیرزمینی در مسیر تکاملی A، ۰/۰۰۲۶۱ میلی گرم در لیتر انیدریت و ۰/۰۷۰۲۳ میلی گرم در لیتر هالیت را در خود حل کرده است.

مدل سازی ژئوشیمیایی در مسیر B

در این مسیر نمونه ۵۰ به عنوان محلول اولیه و نمونه ۸ به عنوان محلول نهایی در نظر گرفته شده اند. نتایج انتخابی مدل معکوس در این مسیر در شکل ۴۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج مدل سازی مسیر B، آب زیرزمینی در طی مسیر جریان به تدریج از کلسیت اشباع شده و آن را رسوب می دهد، به طوری که در انتهای مسیر B در ۰/۰۰۲۱۶ میلی گرم در لیتر کلسیت آب زیرزمینی رسوب کرده است. آب زیرزمینی در مسیر تکاملی B، ۰/۰۰۲۲۸ میلی گرم در لیتر ژپس و ۰/۰۲۲۶ میلی گرم در لیتر هالیت را در خود حل می کند. انحلال هالیت و ژپس باعث افزایش غلظت های کلر و سولفات محلول نهایی گردیده است.

مدل سازی ژئوشیمیایی در مسیر C

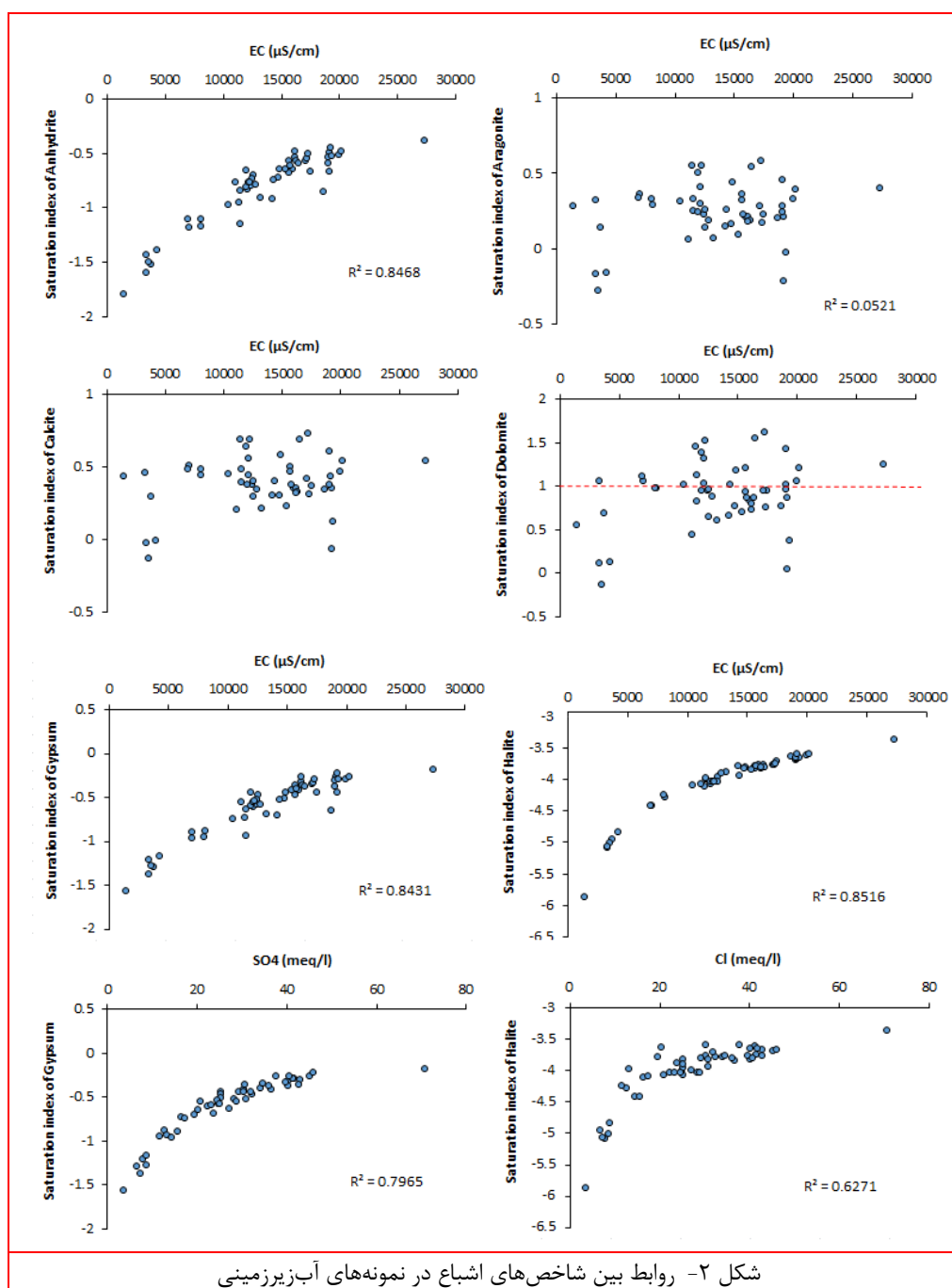
در این مسیر نمونه ۲۳ به عنوان محلول اولیه و نمونه ۸ به عنوان محلول نهایی در نظر گرفته شده اند. نتایج انتخابی مدل معکوس در این مسیر در شکل ۴۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج مدل سازی مسیر C، آب زیرزمینی در طی مسیر جریان به تدریج از آراگونیت اشباع شده و آن را رسوب می دهد، به طوری که در انتهای مسیر C در حدود ۰/۰۰۰۴۲۷ میلی گرم آراگونیت در آب زیرزمینی رسوب کرده است. آب زیرزمینی در مسیر تکاملی C، ۰/۰۰۲۶۷ میلی گرم در لیتر ژپس و ۰/۰۲۳۲ میلی گرم در لیتر هالیت را در خود حل می کند. انحلال این کانی ها باعث افزایش غلظت های کلر و سولفات در محلول نهایی شده است.

هشتمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران



8th Symposium of Sedimentological Society of Iran / 31 Jan - 1 Feb 2024
University of Hormozgan

۱۱ و ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲
دانشگاه هرمزگان



شکل ۲- روابط بین شاخص های اشباع در نمونه های آب زیرزمینی

هشتمین همایش ملی انجمن رسوب شناسی ایران



8th Symposium of Sedimentological
Society of Iran / 31 Jan - 1 Feb 2024
University of Hormozgan

۱۱ و ۱۲ بهمن ماه ۱۴۰۲
دانشگاه هرمزگان

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه رفتار ژئوشیمیایی آبخوان محدوده کویر درانجیر با استفاده از نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی شبیه‌سازی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که پلایاهای نمکی در مرکز محدوده مطالعه تاثیر بسیار مهمی بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی دارند. انحلال رسوبات تیخیری کلروره و سولفات در پلایاهای نمکی اصلی ترین عامل موثر بر کیفیت آب زیرزمینی است. نتایج مدل‌سازی ژئوشیمیایی نشان داد که انحلال رسوبات حایوی کانی‌های ژپس، انیدریت و هالیت اصلی ترین فرآیندی است که باعث تخریب کیفی آب زیرزمینی می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی ژئوشیمیایی معکوس بیانگر این است که انحلال کانی‌های هالیت در مسیرهای مختلف جریان آب زیرزمینی بسیار بیشتر از انحلال کانی ژپس رخ می‌دهد. بنابراین فرآیند نفوذ آب شور از پلایای مرکزی و دریاچه‌های آب شور نقش مهمی در آلودگی آب زیرزمینی دارد.

مراجع

- شرکت سهامی آب منطقه ای یزد (۱۴۰۱). نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب منابع انتخابی.
- عصاری، امین، محمدی، ضرغام. (۱۳۹۱). مدلسازی هیدروژئوشیمیایی معکوس آبخوان دشت چاه‌دراز با استفاده از نرم افزار PHREEQC. سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، تهران، ایران، ۱۱ ص.
- مهندسین مشاور سرزمین قنات (۱۴۰۱). گزارش زمین شناسی محدوده کویر درانجیر، ۱۲۰ ص.
- Güler, C., & Thyne, G. D. (2004). Hydrologic and Geologic Factors Controlling Surface and Groundwater Chemistry in Indian Wells-Owens Valley Area, Southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*, 225, 177-198.
- Parkhurst, D., & Appelo, C. (1999). *Users guide to PHREEQC: a computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Denver, Colorado: United States Geological Survey, 350 p.