

تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت ایرانشهر

چکیده

در این تحقیق به بررسی هیدروشیمی و کیفیت منابع آب زیرزمینی در ۲۷ محل از چاه‌های عمیق، نیمه‌عمیق و قنات در دشت ایرانشهر، استان سیستان و بلوچستان، پرداخته شده است. طبق نتایج و یافته‌های این تحقیق ارتفاع دشت از شرق به غرب کاهش یافته و جهت حرکت آب زیرزمینی از شرق به سمت غرب و تقریباً موازی مسیر رودخانه فصلی منطقه می‌باشد. تاخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی نشان می‌دهد در محدوده شهر ایرانشهر و بمپور و همچنین در چاه‌های مشاهده‌ای دورتر از رودخانه این تاخیر زمانی افزایش یافته است. میزان برداشت از آبخوان در مناطق پایین دست بیشتر از بالادست می‌باشد. در آب زیرزمینی دشت سه نوع تیپ آب کلروسدیک، بی‌کربنات سدیک و سولفات سدیک مشاهده می‌شود. میزان EC از حدود ۶۴۹ تا ۷۰۴۷ میکروموس بر سانتیمتر از سمت شرق به غرب منطقه افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان pH از شرق به غرب کاهش پیدا می‌کند. هم‌زمان با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت از آبخوان، روند افزایش هدایت الکتریکی و کاهش کیفیت در آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع هستند و این کانی‌ها تمایل به ته نشست دارند اما نسبت به انیدریت، ژپس و هالیت تحت اشباع هستند و آب زیرزمینی تمایل به حل کردن این کانی‌ها دارد. بطور کلی می‌توان گفت که فاکتورهای تاثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی واحدهای زمین‌شناسی و برداشت از آبخوان می‌باشد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، اندیس اشباع کانی، تاخیر زمانی، هیدروشیمی

Hydrogeochemical evolution in aquifer of Iranshahr plain

Abstract

This research investigated the hydrochemistry and quality of the groundwater resources in the Iranshahr plain, Sistan and Baluchestan Province, South East of Iran. Major ions, electrical conductivity and pH of groundwater have been studied in 27 points of deep, semi-deep wells and qanats in the study area. According to the results, the topographic elevation of the plain decreased from east to west and the direction of ground water flow was from east to west too (almost parallel to direction of the seasonal river in the study area). The lag time between rainfall and water table showed that around of Iranshahr and Bampur cities and observation wells far from river were increased. In the of plain groundwater extraction amount in the downstream of plain was more than upstream. There were three types of Na-Cl, Na-HCO₃, and Na-SO₄ in the groundwater of study area. The amount of EC increased from about 649 to 7047 $\mu\text{S}/\text{cm}$ from east to west of plain, while the pH decreases in this direction. Simultaneously with the decrease in the level of water table due to extraction from the aquifer, the process of increasing the electrical conductivity and decreasing the

quality of the groundwater had happened. Most of the groundwater samples in the study area were supersaturated with respect to calcite and dolomite (tend to precipitate), while they were undersaturated with respect to anhydrite, gypsum, and halite (tend to dissolution). Generally, geology setting and groundwater are factors effecting the quality groundwater.

Keywords: Groundwater, Hydrochemistry, Lag time, Mineral saturation index.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهمترین منابع تامین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. با توجه به محدودیت منابع آب در کل دنیا، مطالعه کیفیت آب در جهت شناسایی و استفاده هر چه بهتر آن کمک می‌کند. ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی توسط فاکتورهای زیادی کنترل می‌شود که شامل ترکیب شیمیایی باران و آب‌های سطحی، ساختارهای زمین‌شناسی و کانیایی آبخوان و حوضه آبریز و فرایندهای ژئوشیمیایی زیرسطحی در آبخوان و زمان ماندگاری آب می‌باشد. تغییرات زمانی در منشأ و ترکیبات آب تغذیه کننده، فاکتورهای انسانی و هیدرولوژیکی می‌تواند باعث تغییرات پرریودیک در کیفیت آب زیرزمینی شود. افزایش اطلاعات از تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی در مناطق خشک، منجر به شناخت بیشتر سیستم هیدروشیمیایی و مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی می‌شود [1] و [2]. درخصوص بررسی آب‌زمین‌شیمی، تکامل هیدروژئوشیمیایی و عوامل مؤثر بر کیفیت منابع آب پژوهش‌های زیادی در سطح دنیا انجام شده است. برمبنای پژوهش انجام شده در دشت سمنان، در این دشت ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی به وسیله نفوذ آب شور رودخانه آبگرم، انحلال نمک‌ها، زمان ماندگاری، هوازدگی سیلیکات‌ها، تبادل کاتیونی، تبخیر و آب برگشت کشاورزی کنترل می‌شود [2]. مطالعه‌ای با هدف بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و طبقه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی دشت هرزندات انجام شده است [3]. نتایج حاکی از آن بود که اغلب آب‌های کیفیت پایین از نظر شرب، کشاورزی و صنعت در بخش‌های مرکزی و شمالی دشت قرار دارند و از لحاظ مصارف صنعتی برخی از منابع آب دارای خاصیت رسوبگذاری و بخشی نیز خورنده هستند. براساس ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه معدنی اردستان، استان اصفهان [4] کیفیت آب زیرزمینی در بیشتر این منطقه برای کشاورزی و آشامیدن مناسب است؛ اما، با توجه به پتانسیل تولید زهاب اسیدی در اثر اکسایش کانی‌هایی همانند پیریت در هنگام استخراج ماده معدنی در آینده، ممکن است کیفیت منابع آب اردستان تحت تأثیر قرار گیرد. درخصوص تکامل هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود [5] واکنش آب-سنگ، تبخیر و نفوذ آب شور دریای خزر از مهمترین عوامل کنترل کننده شیمی آب رودخانه تشخیص داده شده است. در تحقیقی دیگر در آبخوان حسن آباد شهرستان نیریز [6] احتمال داده می‌شود با توجه به کاهش بارندگی و زمان ماندگاری بالای آب‌های زیرزمینی در اعماق زیاد، افزایش هدایت الکتریکی و

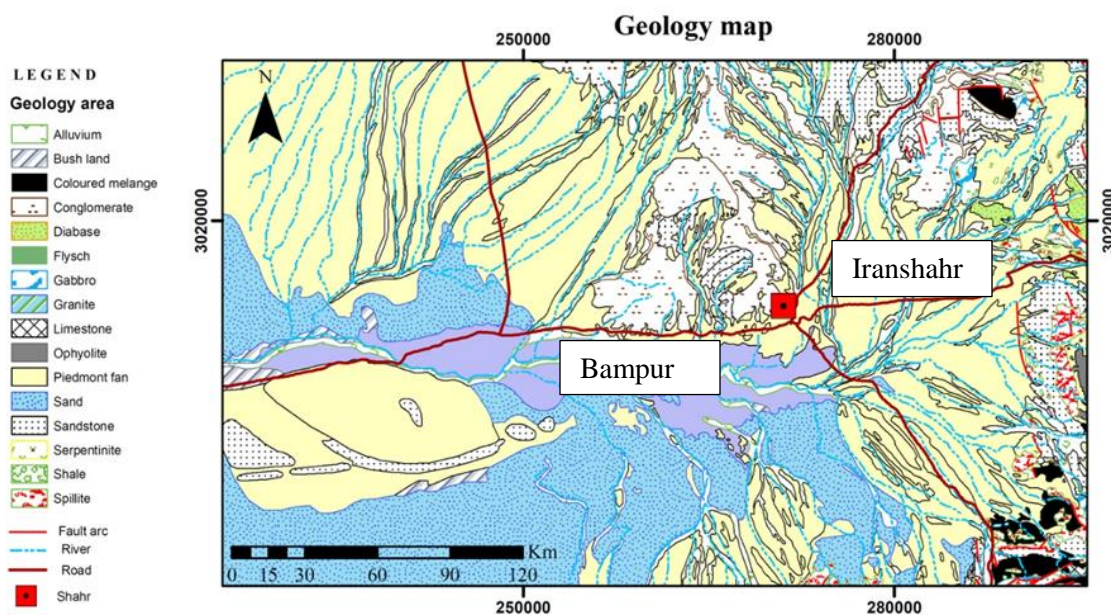
کاهش کیفیت آب منطقه بخصوص در چاه‌های شمال و شمال غربی ایجاد شده است. براساس پژوهش انجام شده در خصوص فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی بر خصوصیات هیدروشیمیایی آب زیرزمینی در دشت گرمسار فرآیندهای اصلی دخیل در شیمی آب‌های زیرزمینی عبارتند بود از انحلال در طول مسیر جریان، تبخیر، برهمکنش آب سنگ، تبادل یونی و فرآیندهای اختلاط [7]. ویژگی‌های هیدروشیمیایی آبخوانی کم عمق در منطقه ای نیمه خشک واقع در شمال غربی الجزایر و شناسایی عوامل اصلی حاکم بر کیفیت آب زیرزمینی بررسی شده است و مشخص شد که هوازدگی سنگ‌های کربناته و سیلیکاتها، انحلال و تبخیر هالیت و تبخیر و تبادل کاتیونی عوامل طبیعی تاثیرگذار بر شیمی آب منطقه هستند [8].

دشت ایرانشهر با وسعت ۹۴۳۶/۶ کیلومترمربع در ناحیه گرم و خشک جنوب شرق ایران در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. به علت ریزدانه بودن بافت دشت ایرانشهر سرعت حرکت آب‌های زیرزمینی کاهش پیدا کرده و منجر به افزایش زمان ماندگاری آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین فرصت زیادی برای انجام واکنش‌های شیمیایی و انحلال نهشته‌های قابل انحلال در آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. منطقه ایرانشهر از لحاظ فعالیت‌های کشاورزی دارای حدود سی هزار هکتار اراضی کشاورزی است و کود مصرفی در کشاورزی منطقه عمدتاً اوره و سوپرفسفات‌تریپل است. بنابراین بررسی تکامل شیمیایی منابع آب منطقه با توجه به گسترش اراضی کشاورزی و برداشت بی رویه از آب‌های زیرزمینی منطقه با توجه به کاهش نزولات جوی در محدوده شهر ایرانشهر، می‌تواند در تعیین کیفیت مطلوب فیزیکی و شیمیایی آب در راستای نوع استفاده و ارزیابی میزان کاهش کیفیت منابع زیرزمینی، اطلاعات مفیدی در اختیار قرار دهد.

منطقه مورد مطالعه

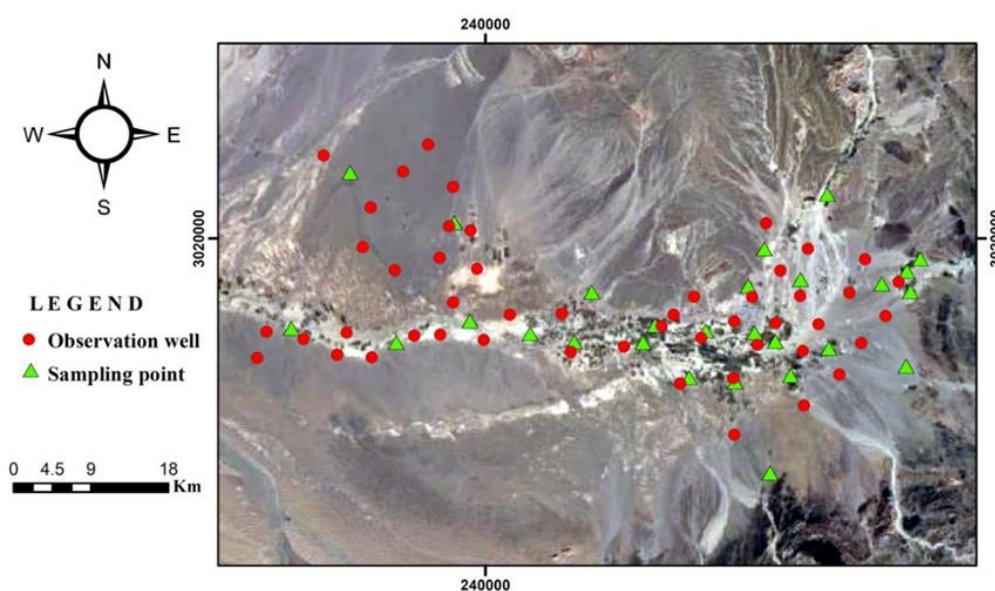
دشت ایرانشهر، بخشی از حوزه آبریز هامون-جازموریان می‌باشد که در شرق این حوزه قرار گرفته است. در واقع این محدوده شامل یک دشت می‌باشد که از شمال شرق به کارواندر و ایرندگان، و از غرب و شمال غرب به بزمان-سردگال، از جنوب غرب به اسپکه-مسکوتان، از جنوب به قصرقند و راسک-سرباز و از شرق به زابلی محدود می‌شود. حداقل و حداکثر ارتفاع در دشت به ترتیب ۴۱۹ و ۱۰۱۳ متر و در ارتفاعات ۴۹۷ و ۲۲۲۲ متر می‌باشد [9]. متوسط بارندگی سالانه در دشت ایرانشهر - بمپور ۱۰۱/۳۳ میلی‌متر براساس ایستگاه باران‌سنجی دامن ثبت شده است. در محدوده‌ی مطالعاتی ایرانشهر رودخانه‌های کنارو، بمپور و دامن جریان دارند. در منطقه ایرانشهر از نظر زمین شناسی می‌توان سری سنگ‌های رسوبی اواخر دوران دوم تا عهد حاضر و همچنین

بیرون زدگی هایی از سنگ های آذرین بیرونی و درونی را در منطقه مشاهده نمود (شکل ۱). سنگ های آهکی تیره کراتسه شامل یکسری سنگ های آهکی تیره رنگ می باشد که فرسودگی نسبتاً زیادی را تحمل کرده اند، که گسترش آنها بیشتر در قسمت جنوب شرقی منطقه در ارتفاعات جاده ایرانشهر به سر باز می باشد. سنگ های فلیش ائوسن با تناوبی از شیل و مارن و ماسه سنگ، مهترین گسترش های واحد فلیش در شمال ایرانشهر به حساب می آید. واحد رسوبی الیگوسن تناوبی از آهک دولومیتی و مارن، همراه لایه های ضخیم کنگلومرایی می باشد، در شمال غربی و همچنین در شمال ایرانشهر در غرب ارتفاعات دامن دیده می شود. رسوبات میوسن در این ناحیه دارای مورفولوژی مشخصی هستند و همانند سری رسوبات میوسن ایران مرکزی آثاری از رخساره تبخیری (گچ و نمک) در تناوب رسوب گذاری دیده می شود. رسوبات آبرفتی که اکثراً شامل ماسه، قلوه سنگ و رس می باشند و بسیار نفوذ پذیر بوده و کلیه حواشی دشت بصورت مخروط افکنه های به هم پیوسته قابل رؤیت هستند و پهنه وسیعی در منطقه از لحاظ مناطق تغذیه ای سفره آبدار منطقه را شامل می شوند. آبخوان اصلی دشت ایرانشهر که حاصل فرسایش ارتفاعات بوده و از نوع آبخوان آزاد می باشد و در حال حاضر با ترکیبی از قلوه سنگ، شن، ماسه، سیلت و رس تشکیل یافته است. منابع آب زیرزمینی منطقه چاه و قنات می باشند.



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

در دشت ایرانشهر داده‌های کیفی مربوط به ۲۷ محل نمونه برداری (چاه و قنات) از آب زیرزمینی (شکل ۲)، داده‌های زمانی تغییرات سطح ایستابی در ۵۰ حلقه چاه مشاهده‌ای (شکل ۲) و میزان زمان پمپاژ و برداشت آب زیرزمینی از آبخوان از شرکت آب منطقه ای سیستان و بلوچستان اخذ شده است. در این تحقیق از میانگین داده‌های کمی و کیفی سال آبی ۱۴۰۰ برای ارزیابی و بحث پیرامون منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. مبنای پژوهش بررسی نقشه جهت جریان، توپوگرافی، پراکندگی یون‌ها، تیپ آب زیرزمینی، میزان EC و pH، میزان برداشت از آبخوان، نمودار اندیس اشباع کانی‌ها، پایپر، تغییرات سطح ایستابی، تحلیل عاملی و خوشه‌ای می باشد.



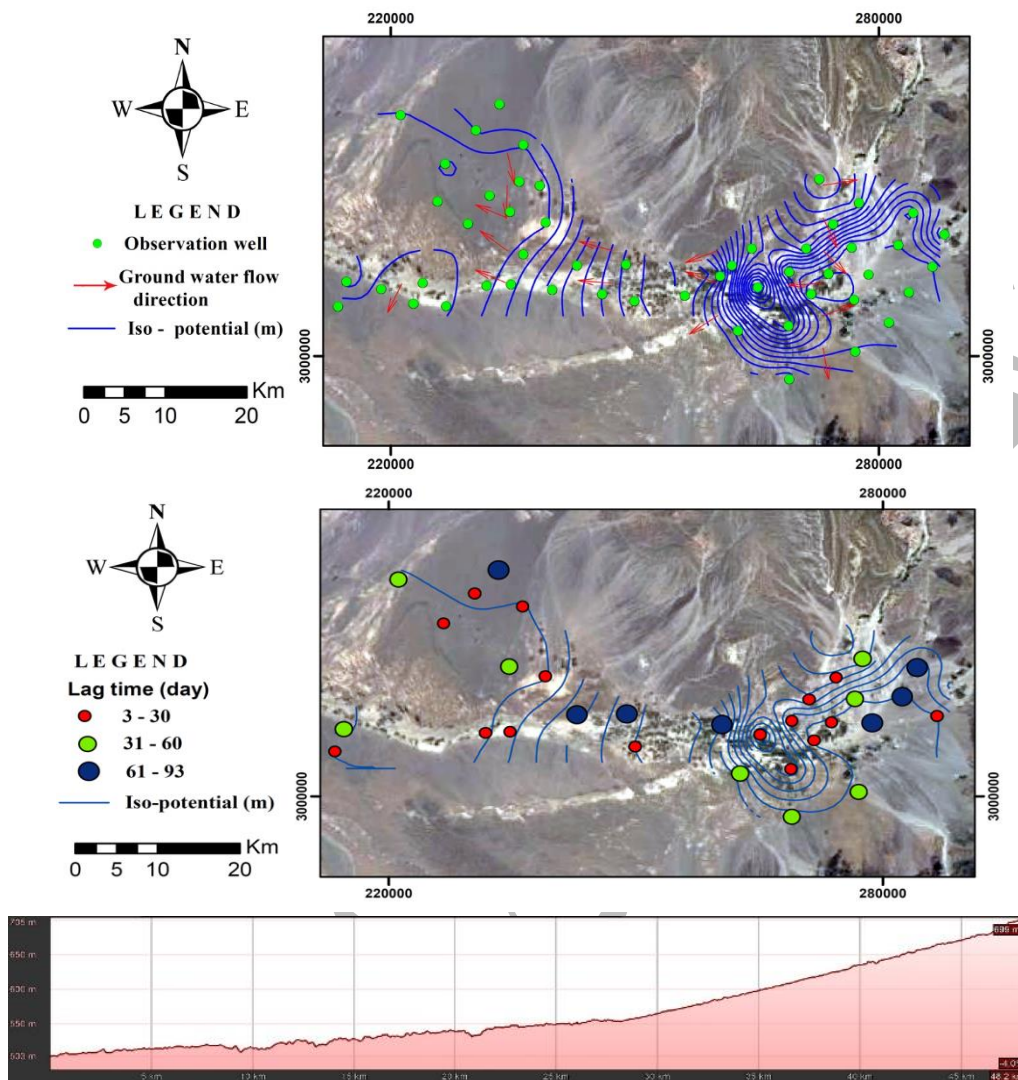
شکل ۲- نقشه پراکندگی نقاط نمونه برداری کیفی و اندازه‌گیری سطح ایستابی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

یافته ها و تجزیه و تحلیل

سطح ایستابی و جریان آب زیرزمینی

براساس نقشه هم‌ارزش تراز سطح ایستابی و جهت جریان آب زیرزمینی در دشت ایرانشهر (شکل ۳) مشاهده می‌شود آب زیرزمینی به‌طور کلی از سمت شرق به‌طرف غرب جریان دارد که تقریباً موازی مسیر رودخانه فصلی (رودخانه بمپور) منطقه می‌باشد. علاوه بر آن دیده می‌شود در محدوده دو شهر ایرانشهر و بمپور مخروط افت بزرگی (خطوط بسته) در سطح ایستابی ایجاد شده است که نشان از برداشت آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره برداری بوده که یک نوع چاه میدانی را ایجاد نموده است. همچنین

مشاهده می‌شود شیب هیدرولیکی سطح ایستابی از شرق دشت به سمت غرب کاهش می‌یابد؛ که می‌تواند به تغییرات توپوگرافی سطح زمین، تغییرات اندازه و جنس ذرات آبخوان و تاثیر تغییرات مکانی، زمانی میزان برداشت از آب زیرزمینی و یا عواملی مانند تغذیه در بالادست [10, 11] مربوط باشد. سطح مقطع ترسیم شده از توپوگرافی سطح زمین در (شکل ۳) نشان می‌دهد توپوگرافی نیز از شرق به سمت غرب کاهش می‌یابد و لذا کاهش شیب هیدرولیکی در این جهت امری طبیعی خواهد بود. به منظور بررسی واکنش آب زیرزمینی در دشت ایرانشهر به تغییرات بارش، اقدام به محاسبه تاخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی شده است. در شکل ۳ پراکندگی تاخیر زمانی نشان می‌دهد در محدوده شهر ایرانشهر و بمپور به دلیل کاهش نفوذپذیری سطح زمین در اثر توسعه شهرنشینی (مناطق با پوشش سیمان، آسفالت و ایزوگام) تاخیر زمانی بین نفوذ بارش و اثر آن در افزایش تراز سطح ایستابی، افزایش یافته است. همچنین در چاه‌های مشاهده‌ای دورتر از رودخانه این تاخیر زمانی نیز افزایش یافته است.

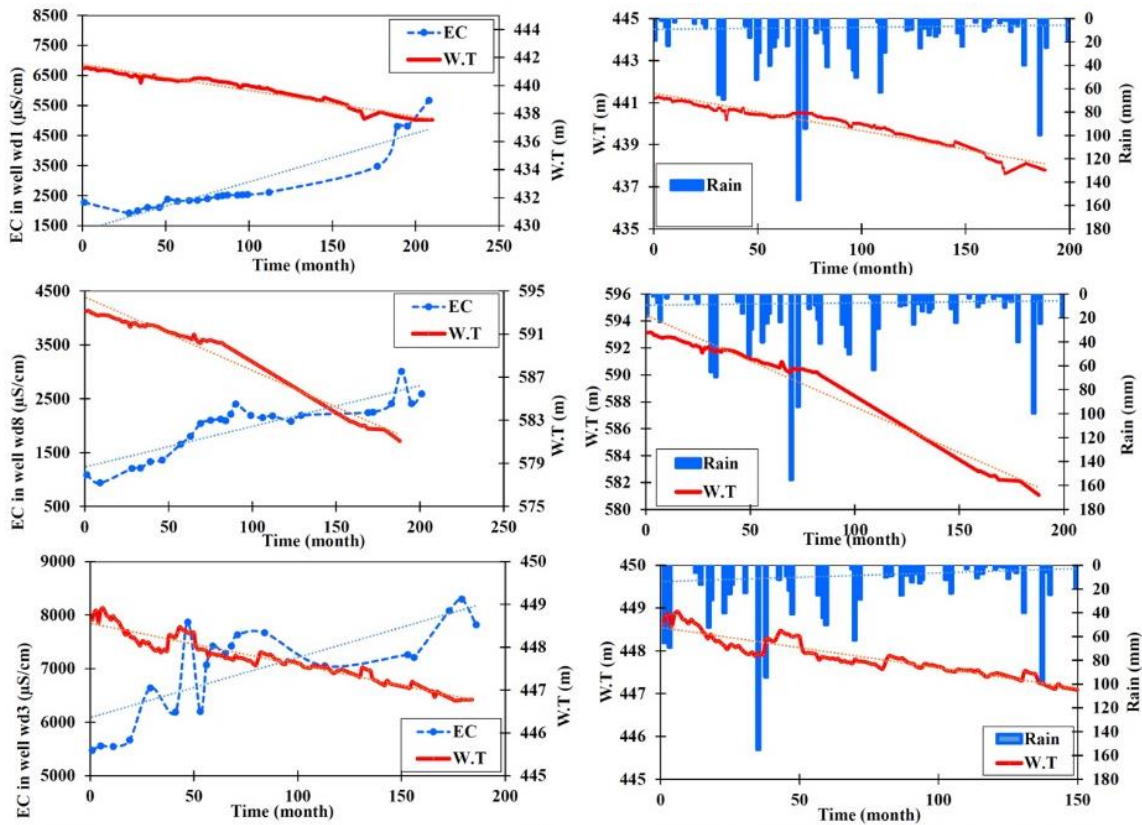


شکل ۳. خطوط هم‌تراز سطح ایستابی و جریان آب زیرزمینی در سال ۱۴۰۰، سطح مقطع توپوگرافی و نقشه پراکندگی تاخیر

زمانی بین بارش و سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه

نمودار تغییرات زمانی سطح ایستابی تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای، بارش و هدایت الکتریکی آب زیرزمینی مربوط به چاه‌های بهره‌برداری منطقه مورد مطالعه از سال ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰ در شکل ۴ نشان داده شده است. در میزان تغییرات زمانی بارش روند فصلی مشاهده می‌شود اما روند کاهشی یا افزایش طی این سال دیده نمی‌شود. در حالی‌که روند کاهشی سطح ایستابی در دشت ایرانشهر مشاهده می‌شود. همچنین در این شکل دیده می‌شود هم‌زمان با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت از آبخوان، روند

افزایش هدایت الکتریکی (افزایش شوری) و یا کاهش کیفیت آب زیرزمینی (احتمالاً در اثر استخراج آب زیرزمینی در اعماق بیشتر با زمان ماندگاری طولانی تر) نیز اتفاق افتاده است.

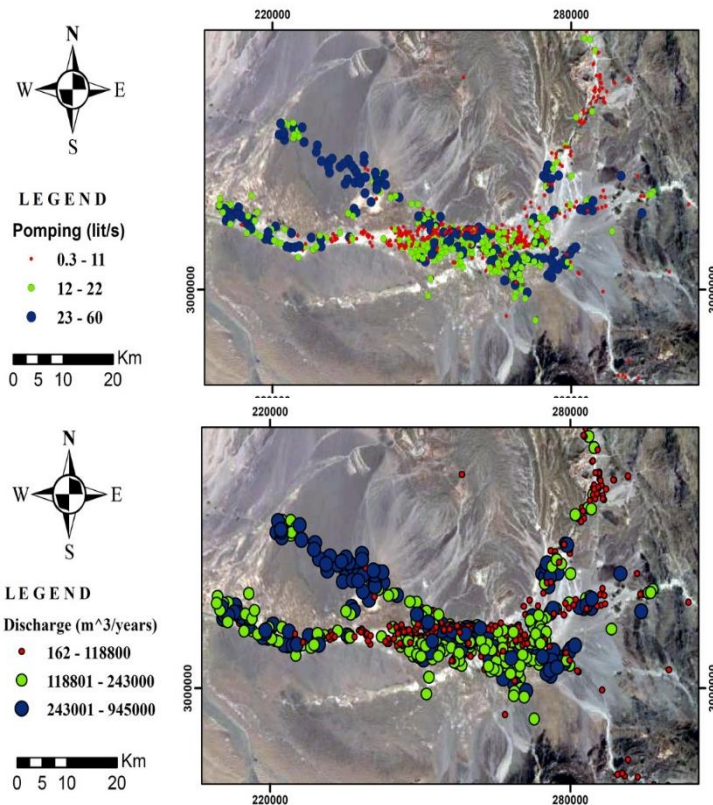


شکل ۴- نمودار تغییرات زمانی هدایت الکتریکی، بارش و سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه

خصوصیات برداشت از آبخوان

نقشه پراکندگی مقدار نرخ پمپاژ و تخلیه سالیانه در شکل ۵ ارائه شده است و مشاهده می شود که در مناطق پایین دست میزان

برداشت از آبخوان افزایش یافته است. به عبارت دیگر از شرق به غرب دشت، حجم استخراج آب زیرزمینی بیشتر می شود.

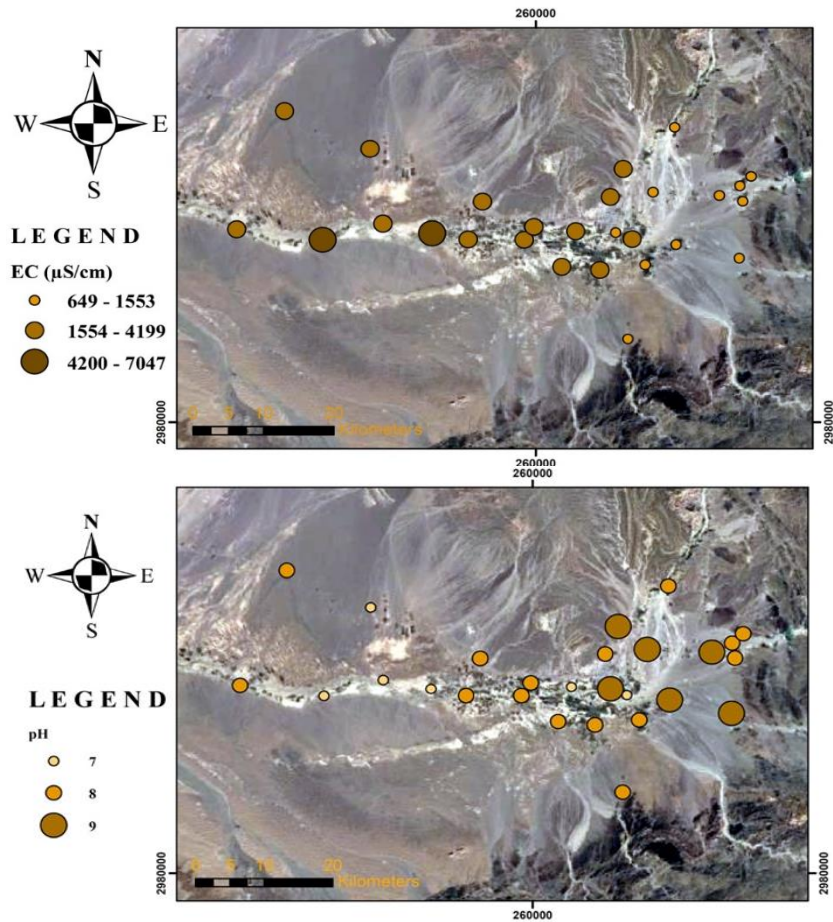


شکل ۵- نقشه پراکندگی نرخ پمپاژ و تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه

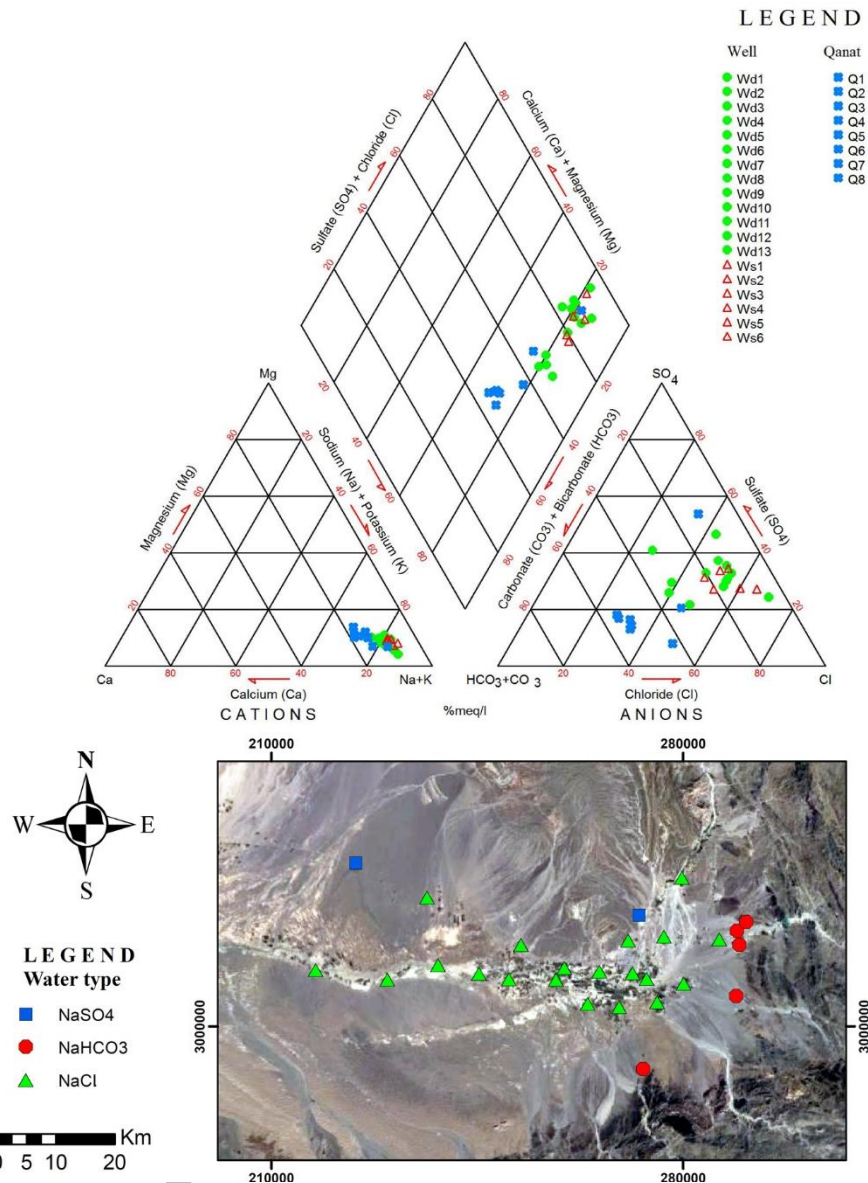
آب زمین‌شیمی

بر اساس داده‌های کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، میزان هدایت الکتریکی در منابع آب زیرزمینی بین ۶۴۹ تا ۷۰۴۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. نقشه توزیع پراکندگی هدایت الکتریکی (شکل ۶) نشان می‌دهد که در قسمت شرق منطقه میزان هدایت الکتریکی کم است و در نواحی مرکزی و غرب منطقه میزان هدایت الکتریکی افزایش پیدا کرده است که تقریباً با جهت جریان آب زیرزمینی منطبق می‌باشد. میزان pH در آب‌های زیرزمینی منطقه بین ۷/۲ تا ۸/۱ متغیر است و بیشترین میزان آن در قسمت شرق منطقه دیده می‌شود و به سمت غرب منطقه مورد مطالعه مقدار آن کاهش پیدا یافته است که احتمالاً به دلیل دور شدن از واحدهای کربناته سمت شرق منطقه باشد (شکل ۶). براساس نمودار پایپر (شکل ۷) سه نوع تیپ آب کلروسدیک، بی‌کربنات‌سدیک و سولفات‌سدیک در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. موقعیت سه نوع آب بر روی منطقه مورد مطالعه (شکل ۷) بیشتر نمونه‌ها از نوع کلروسدیک می‌باشد. نمونه آب بی‌کربنات‌سدیک در آب قنوات خارج شده از مخروطه افکنه‌ها و در غرب

(بالادست) و جنوب منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. نوع آب سولفات سدیک فقط در دو محل مشاهده می‌شود لذا در منطقه مورد مطالعه گسترش چندانی ندارد.



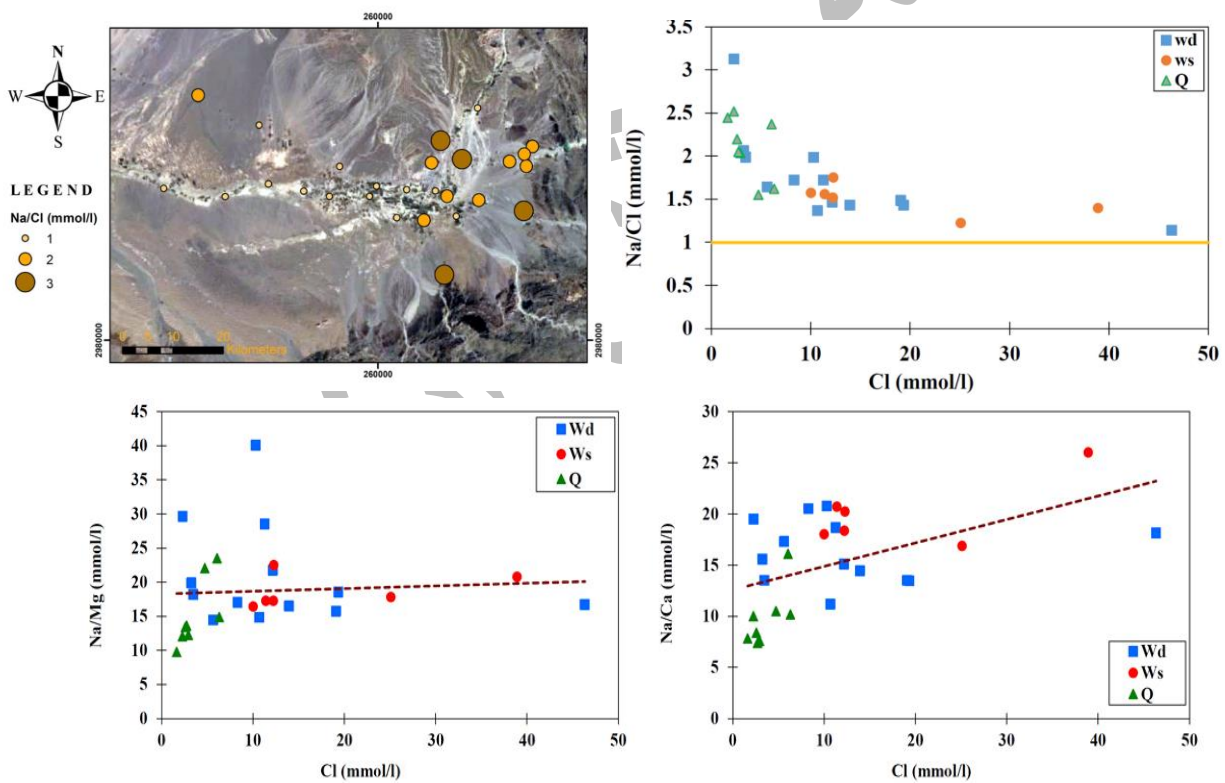
شکل ۶- نقشه پراکندگی EC و pH در منابع آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه



شکل ۷- نمودار پایپر منابع آب زیرزمینی و نقشه پراکنده گی نوع آب در منطقه مطالعاتی

با توجه به نسبت‌های یونی می‌توان فرآیندهای ژئوشیمیایی موثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی را مشخص کرد. از نسبت مولی کلراید/سدیم می‌توان برای تعیین منشأ سدیم در آب‌های زیرزمینی استفاده کرد. در صورتی که نسبت مولی سدیم به کلراید بیشتر از یک باشد، سدیم از هوازدگی‌های سیلیکات نیز منشأ گرفته است و در صورتی که این نسبت کمتر از یک و یا نزدیک به یک باشد نشان‌دهنده انحلال نمک طعام است و معمولا در آب‌های شور دیده می‌شود. با توجه به شکل ۸ و رسم نمودار کلراید/سدیم در مقابل کلراید مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌ها در بالای خط ۱ قرار گرفته‌اند؛ لذا علاوه بر انحلال کانی‌ها، ترکیب شیمیایی

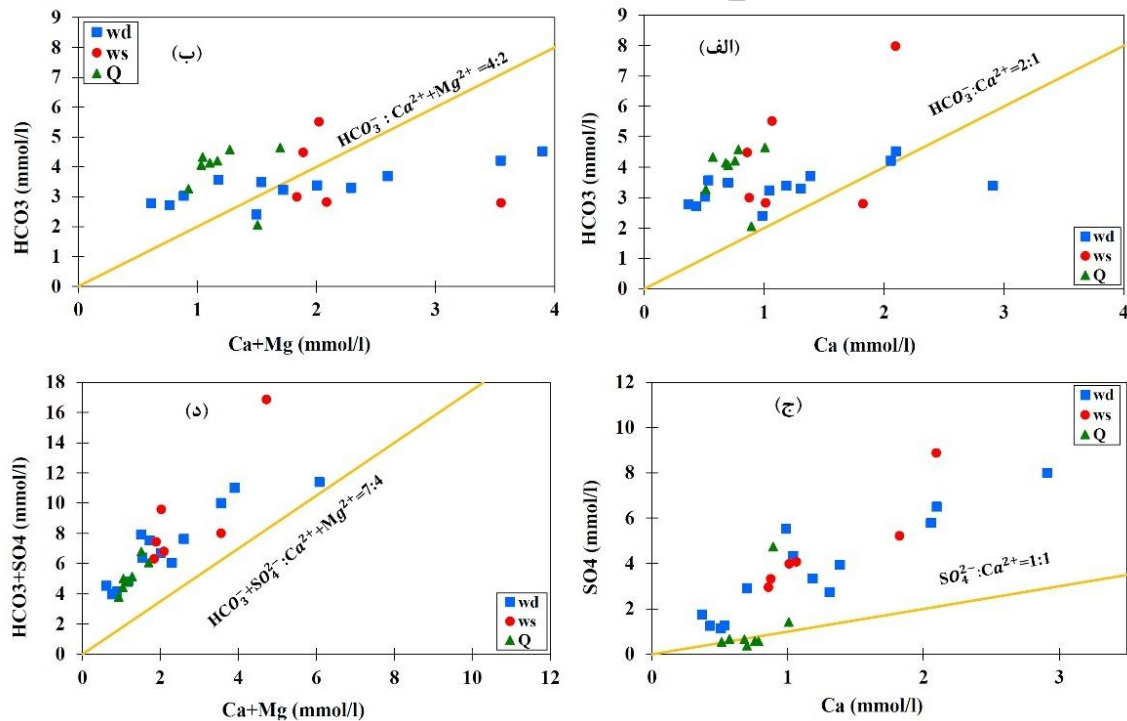
آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی تحت تاثیر هوازدگی سیلیکات و تبادل کاتیونی نیز می‌باشد. با توجه به نقشه پراکندگی نسبت کلراید/سدیم در منطقه (شکل ۸) مشاهده می‌شود که این نسبت در شرق منطقه بالا است و یک روند کاهشی از شرق به غرب منطقه دیده می‌شود. در واقع جهت جریان آب زیرزمینی این نسبت کاهش می‌یابد و دلیل احتمالی آن می‌تواند هوازدگی کانی‌های رسی، فاضلاب‌های صنعتی و یا فعالیت‌های کشاورزی در شرق منطقه باشد. همچنین جهت تشخیص اثر کاتیونی، نسبت سدیم به کلسیم و سدیم به منیزیم (شکل ۸) ترسیم شد و مشاهده می‌شود این نسبت‌ها نیز افزایش یافته است. بنابراین تبادل کاتیونی در کاهش نسبت سدیم در جهت جریان آب زیرزمینی نقش چندانی نداشته است؛ بنابراین فقط انحلال هالیت و پلاژیوکلازها کنترل‌کننده میزان سدیم در آب زیرزمینی منطقه هستند. همچنین در بالادست منطقه مورد مطالعه کانی‌های پلاژیوکلاز سدیم‌دار نقش بیشتری در ورود سدیم به آب زیرزمینی دارند.



شکل ۸- نمودار نسبت مولی کلراید/سدیم در مقابل کلراید، نقشه پراکندگی این نسبت و نمودار نسبت منیزیم/سدیم و

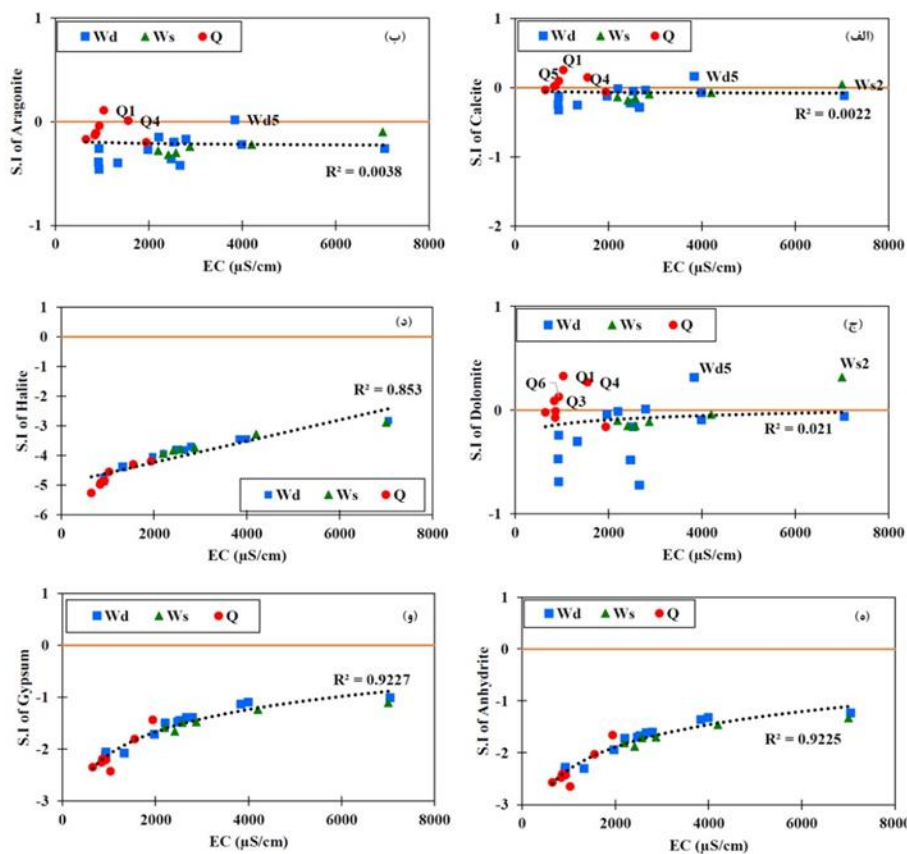
کلسیم/سدیم در مقابل کلراید نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

با توجه به رابطه مولی بیکربنات و کلسیم در شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که اکثر نمونه‌ها در بالای خط ۲:۱ قرار دارند. لذا کانی‌های کربنات‌دار دیگری همانند دولومیت در آب زیرزمینی انحلال یافته است. نسبت مولی $\text{Ca} + \text{Mg}$ در برابر HCO_3^- (شکل ۹) نشان می‌دهد بخشی از کربنات آب زیرزمینی از انحلال دولومیت حاصل شده است. با رسم نسبت مولی کلسیم در برابر سولفات (شکل ۹) مشاهده می‌شود بعضی از نمونه‌ها روی خط نسبت ۱:۱ قرار دارند؛ یعنی مقدار کلسیم با سولفات برابر و نسبت ۱:۱ دارند و نشان‌دهنده انحلال ژپس است. در نمونه‌های که در پایین خط نسبت قرار دارند نشان‌دهنده این است که کلسیم از منشاهایی غیر از ژپس مثل انحلال کانی کلسیت یا دولومیت نیز می‌تواند حاصل شده باشد. در نمونه‌ها بالا خط نسبت ۱:۱ غلظت سولفات بیشتر از کلسیم بوده و کلسیم به احتمال زیاد بر اثر تبادل کاتیونی از محیط خارج شده است. نسبت مولی $\text{Ca} + \text{Mg}$ و $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ (شکل ۹) نشان داد تمامی نمونه‌ها در بالا خط نسبت ۷:۴ قرار دارند و بیان‌کننده هوازگی سیلیکات‌ها می‌باشند. تمام نمونه‌ها در بالای خط ۷:۴ قرار دارند که نشان‌دهنده انحلال کانی‌های کلسیت و دولومیت و در نتیجه افزایش یون‌های کلسیم و منیزیم می‌باشد.

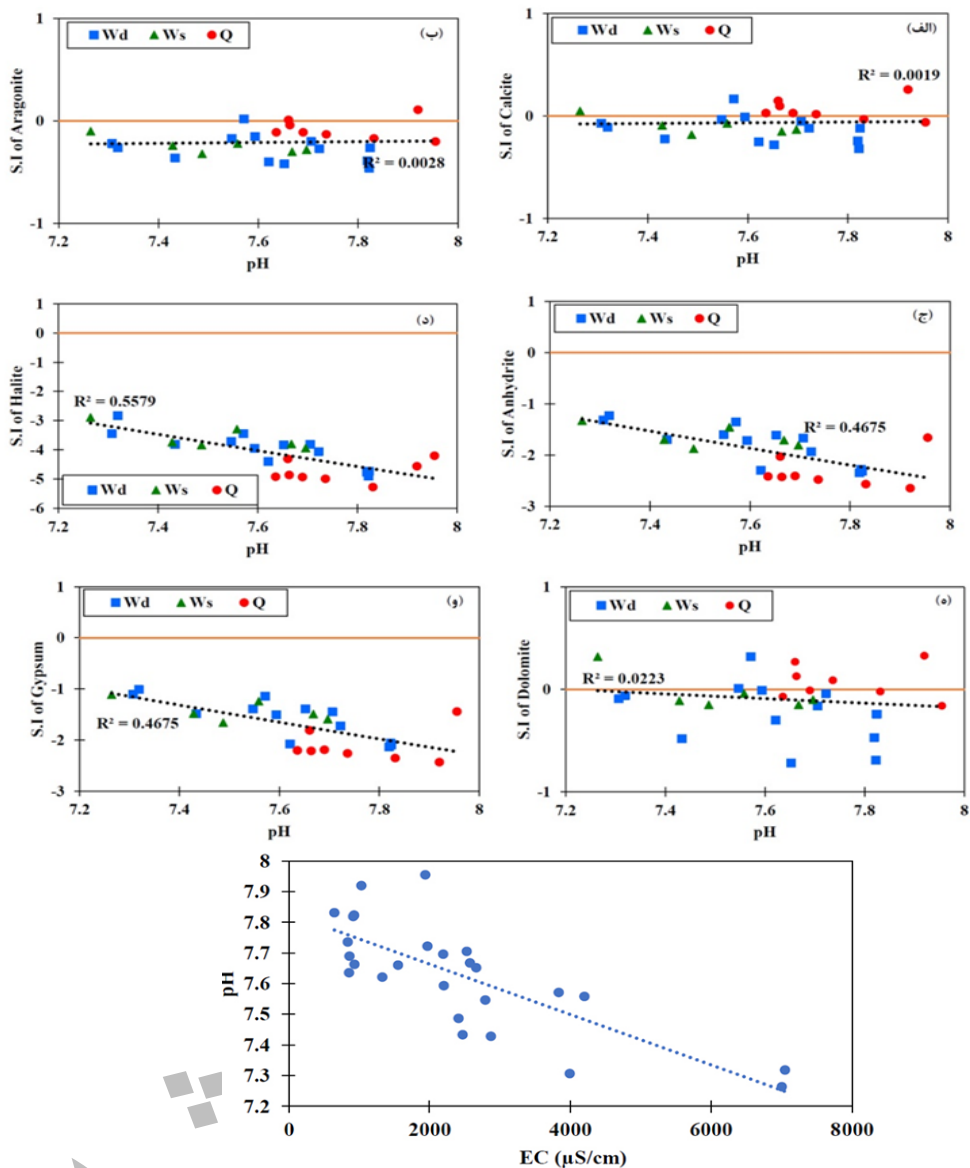


شکل ۹- نمودار نسبت‌های یونی مختلف نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

در شکل ۱۰ اندیس اشباع کانی‌های کلسیت، آراگونیت، انیدریت، هالیت، دولومیت و ژیپس در مقابل هدایت الکتریکی ترسیم شده است. با توجه اندیس اشباع کلسیت، مشاهده می‌شود که نمونه‌های چاه Wd5, Ws2, Q1, Q4, Q5 به صورت فوق اشباع، و بقیه نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند. افزایش یون کلسیم در نمونه‌های فوق اشباع از منشاهایی غیر از انحلال کلسیت مانند نقش کانی‌های رسی در تبادل کاتیونی و انحلال پلاژیوکلازهای کلسیم دار، باعث فوق اشباع شدن آب‌های زیرزمینی منطقه شده است. در نمودار اندیس اشباع آراگونیت مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند و فقط Q1 به صورت فوق اشباع، و Wd5 و Q4 به صورت اشباع می‌باشند که کانی آراگونیت در این دو نقطه‌ی اشباع تمایل به انحلال و رسوبگذاری دارد. همانطور که در نمودار اندیس اشباع دولومیت نشان داده شده است، نمونه‌های Q1, Q3, Q4, Q6, Wd5, Ws2 به صورت فوق اشباع هستند و منیزیم منشایی غیر از انحلال دولومیت مانند کانی‌های رسی و فلدسپاته، که باعث فوق اشباع شدن آب‌های زیرزمینی منطقه شده است؛ و بقیه نمونه‌ها به حالت تحت اشباع و یا اشباع در منطقه مشاهده می‌شوند که ممکن است به دلیل ته نشست دولومیت و یا خروج آن به صورت تبادل کاتیونی از آب‌های زیرزمینی منطقه باشد و اندیس اشباع دولومیت با افزایش هدایت الکتریکی در ابتدا افزایش یافته و سپس به حالت ثابت قرار گرفته است. به دلیل ته نشست رسوبات کربناته اندیس اشباع کانی‌های کلسیت و آراگونیت با افزایش هدایت الکتریکی به صورت ثابت است. در نهایت مشاهده می‌شود که نمودار اندیس اشباع هالیت، انیدریت و ژیپس تحت اشباع است و با افزایش هدایت الکتریکی اندیس اشباع این کانی‌ها هم افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰- اندیس اشباع محاسبه شده کانی‌های مختلف در مقابل هدایت الکتریکی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بررسی‌ها نشان می‌دهد اندیس اشباع کانی‌های کلسیت، آراگونیت و دولومیت چندان تحت تأثیر pH آب نبوده است (شکل ۱۱)؛ در حالی‌که اندیس اشباع کانی‌های هالیت، انیدریت و ژپس با افزایش pH کاهش یافته است و از آنجاییکه انحلال این کانی‌ها چندان وابسته به مقدار pH نیست، رخداد چنین حالتی معمول نمی‌باشد. جهت توجیه آن، مقادیر pH با EC هم در شکل ۱۱ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود بین این دو پارامتر همبستگی منفی خوبی دیده می‌شود. از طرفی دیگر طیف pH خنثی تا قلیایی (۸) است و چندان سبب نمی‌شود که EC از حدود ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر افزایش یابد. لذا احتمالاً دلیل این رفتار هم‌زمانی افزایش EC و کاهش pH در جهت جریان آب زیرزمینی باشد. همانطور که در نقشه زمین‌شناسی و منابع آب دیده می‌شود در بالادست منابع قنوات تحت تأثیر واحدهای کربناته بوده و pH کمی قلیایی دارند و چاه‌های پایین‌دست در آبرفت، pH خنثی دارند. از طرفی دیگر به طور معمول در جهت جریان آب زیرزمینی در مسیر هیدروژئولوژیکی مقادیر TDS و EC افزایش می‌یابد و این سبب شده که pH و EC به ظاهر رابطه منفی خوبی داشته باشند.



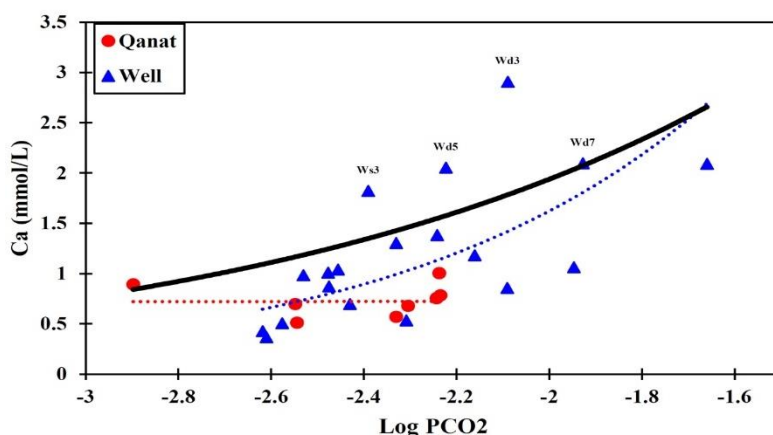
شکل ۱۱- رابطه اندیس اشباع و EC با pH در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی اثر دی اکسید کربن در مقادیر کلسیم نمونه های آب با توجه به نحوه استخراج آب زیرزمینی (قنات و چاه)، منحنی رابطه بین فشار دی اکسید کربن (محاسبه شده) و غلظت کلسیم براساس معادله (۱) [12] در شکل ۱۲ ترسیم شده است.

$$m_{ca} = \sqrt[3]{10^{-6} [P_{CO_2}]/4} \quad (1)$$

خط تعادلی تئوری است در فشار ۱ اتمسفر، دما ۲۵ درجه و pH، ۷ نیز ترسیم شده است. از آنجایی که در شرایط واقعی میزان فشار، دما و pH در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه متفاوت است؛ مشاهده می شود که اکثر نمونه ها در پایین خط تعادلی فشار دی اکسید کربن قرار گرفته اند و در یک فشار دی اکسید کربن ثابت، میزان کلسیم در آب زیرزمینی منطقه کمتر از حالت تعادلی می باشد.

همچنین مشاهده می‌شود میزان فشار دی اکسید کربن در قنات‌های منطقه نسبت به چاه‌ها بسیار کمتر است. به نظر می‌رسد علت آن مکانیسم متفاوت استخراج آب زیرزمینی از قنات و چاه باشد. در چاه‌ها آب زیرزمینی از مسیر با فاصله کوتاهی تری پمپاژ می‌شود. در حالی که در قنات، آب از مسیر طولانی کوره قنات خارج می‌شود؛ بنابراین در طول این مسیر، گاز دی اکسید کربن از آب خارج شده و میزان آن کم می‌شود در نتیجه این رخداد، یون کلسیم رسوب می‌کند. نمونه‌های Wd3, Wd5, Wd7, Ws3 در بالای خط تعادلی قرار گرفته‌اند و این نشان‌دهنده فوق اشباع بودن منابع آب در این چاه‌ها نسبت به یون کلسیم است.



شکل ۱۲- رابطه فشار دی اکسید کربن محاسبه شده در برابر غلظت کلسیم در نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

در منطقه مورد مطالعه نقشه هم پتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی نشان داد بخشی زیادی از آب زیرزمینی از واحدهای کربناته در شرق دشت وارد آبخوان شده و به سمت غرب منطقه حرکت می‌کند و طی این حرکت، کیفیت آب زیرزمینی منطقه کاهش پیدا کرده است. تکامل هیدروشیمیایی آب زیرزمینی نشان داد که تیپ آب زیرزمینی ورودی در شرق منطقه کربناته بوده در نهایت به تیپ غالب کلوروسدیک تبدیل شده است. قرارگیری چاه‌های بهره‌برداری با نرخ پمپاژ بالاتر و هدایت الکتریکی زیاد در مرکز و سمت غرب آبخوان باعث افت سطح ایستابی و کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده است. براساس مقادیر تاخیر زمانی بین بارش و اثر آن در آب زیرزمینی می‌توان گفت جهت جریان آب زیرزمینی عمدتاً از توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند و در مناطق شهری به دلیل کاهش نفوذپذیری و برداشت زیاد (ایجاد مخروط افت) و در پایین دست آبخوان به دلیل ذرات دانه ریزتر، این زمان تاخیر

افزایش یافته است. در نهایت می‌توان گفت عوامل طبیعی زمین شناسی و برداشت از آب زیرزمینی هم‌زمان فاکتورهای تاثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه می‌باشند.

منابع

- [1] N. Aghazadeh, A. A. Mogaddam, "Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran,". *Environmental monitoring and assessment*, vol. 176, no. 1-4, pp. 183-195, 2011.
- [2] S. Karimi, Z. Mohammadi, N. Samani, "Evaluation of Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Salinity Evolution in Semnan Plain,". *Hydrogeology*, vol. 2, no. 1, pp. 1-19, 2017. (In Persian).
- [3] J. Rozrokh, A. Asghari Moghaddam, A. A. Nadiri, "Investigation of hydrogeochemical characteristics and qualitative classification of Harzandat plain groundwater resources for various purposes, using hydrochemical methods,". *Scientific and Research Journals Management System*, vol. 19, no. 5, pp. 77-92, 2017. (In Persian).
- [4] S. Ahmadi, R. Jahanshahi, V. Moeini, S. Mali, "Assessment of hydrochemistry and heavy metals pollution in the groundwater of Ardestan mineral exploration area, Iran,". *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, pp. 212. 2018.
- [5] M. Ghareh Mahmoodlu, N. Jandaghi, M. Sayadi, "Hydrochemical Evaluation and Qualitative Deterioration Assessment of Gorganrud River,". *Iranian Journal of Geology*, vol. 14, no. 55, pp. 129-145. 2020. (In Persian).
- [6] M. S. Hosseini, R. Jahanshahi, N. Asadi, M. A. Nasiri, "Qualitative study of groundwater resources in the Hassanabad-Dehchah, Northeast of Neyriz, Fars province,". *Hydrogeology*, vol. 5, no. 1, pp. 150-165. 2020.
- [7] E. Fijani, S. Meysami, "Assessment of hydrochemical characteristics and groundwater suitability for drinking and irrigation purposes in Garmsar Plain, Iran,". *Geopersia*, vol. 17, no.1, pp. 83-102. 2023.
- [8] L. Benadela, B. Bekkoussa, L. Gaidi, "Multivariate analysis and geochemical investigations of groundwater in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria,". *Journal of Groundwater Science and Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 233-249. 2022.
- [9] Sistan and Baluchestan Regional Water Authority, *Report of statistics and information of meteorological and hydrometric stations*, 2019.
- [10] E. Fijani, S. Meysami, M. Mozafari, "Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods,". *Ferdowsi Civil Engineering*. vol. 36(1), no. 41, pp. 1-18. 2023.
- [11] M. Mozafari, M. Jamali Dizji, E. Fijani, R. Eskandari, "Estimation of hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using empirical equations based on particle size distribution,". *Ferdowsi Civil Engineering*. vol. 35(2), no. 38, pp. 63-74. 2022.
- [12] C. A. J. Appelo, and D. Postama, *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press, Amsterdam, 2006.