

شواهد هیدروشیمیایی و سن سنجی تریتیوم در شناخت الگوی هیدروژنولوژیکی آبخوان آبرفتی شاهرود

زهرا بوسلیک؛ دانشجوی دکتری هیدروژنولوژی، دانشگاه صنعتی شاهرود

هادی جعفری*؛ استادیار هیدروژنولوژی، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵

چکیده

بررسی رابطه الگوی جریان و کیفیت آب از عوامل مهم کمک کننده در مدیریت کمی و کیفی آب های زیرزمینی است. تحقیق حاضر به منظور استفاده از شواهد هیدروشیمیایی و ایزوتوپی در تعیین الگوی جریان آب زیرزمینی در آبخوان شاهرود و بررسی آثار هیدروژنولوژی بر کیفیت آب منطقه انجام گرفت. جهت جریان کلی آب در آبخوان شاهرود از مناطق شمال شرقی به جنوب غربی است. به وجود آمدن یک خط تقسیم آب در منطقه باعث ایجاد تغییراتی در جهت جریان کلی آب در برخی بخش ها و انحراف جریان به سمت شرق شده است. بررسی های هیدروشیمیایی ۱۲۰ نمونه آب نشان داد در این آبخوان پیوستگی ژئوشیمیایی، به ویژه در بخش جنوب شرقی، وجود ندارد؛ به گونه ای که بخش شرقی و بخش جنوب شرقی اختلاف کیفیت فاحشی با بخش های شمالی، غربی، و مرکزی نشان می دهد. جریان ورودی قوی تر از مرز شمالی همراه خط تقسیم آب زیرزمینی باعث جدا افتادن و ساکن شدن آب های شور جنوب شرق منطقه شده است. در نتیجه، به مرور زمان، تغییر تیپ آب از سولفات به کلروره در این توده آب نسبتاً راکد رخ داده است. جدا افتادن جریان آب در بخش جنوب شرقی باعث شده آب شور آن تأثیر چندانی بر شیمی آبخوان نگذارد. آنالیز ۳ نمونه تریتیوم وجود حداقل دو منبع تغذیه با سنین مختلف در آبخوان را اثبات می کند. نمونه های شور جنوب شرقی با میزان تریتیوم کمتر از ۰/۸ TU نشان دهنده آب نسبتاً قدیمی تغذیه شده قبل از سال ۱۹۵۲ است؛ در حالی که آب شیرین شمال منطقه با میزان تریتیوم ۲/۲ TU آبی است که به تازگی تغذیه شده است. سن بیشتر آب در بخش جنوب شرقی به دلیل عدم ارتباط هیدرولیکی با آب های جوان، سرعت کمتر جریان، و نیز عدم خروج آب قدیمی از این بخش از آبخوان به دلیل کم بودن میزان بهره برداری است.

کلیدواژگان: ناپیوستگی هیدروژنوشیمیایی، هیدروژنولوژی، هیدروشیمی.

مقدمه

بررسی سطوح آب زیرزمینی و مدل سازی جریان آب زیرزمینی روش هایی است که برای تعیین جهت جریان آب زیرزمینی به کار می رود (زوی و لی ۲۰۱۱). الگوهای آب زیرزمینی و ماهیت تغذیه این آب ها همچنین از طریق مطالعه هیدروشیمی (دالتون^۲ و آپکورچ ۱۹۷۸؛ کبیدی^۳ و همکاران ۲۰۰۵) و ایزوتوپ های محیطی (کبیدی ۲۰۱۳) قابل شناخت است. با تحلیل داده های هیدروشیمیایی می توان به تغییرات هیدروژنولوژیکی و ناهمگنی آبخوان ها و جهت و مسیر جریان آب زیرزمینی و منابع تغذیه کننده آبخوان پی برد. جریان آب زیرزمینی از منطقه تغذیه به منطقه تخلیه به صورت

Email: h_jafari@shahroodut.ac.ir

* رایانامه نویسنده مسئول:

1. Zhou
2. Dalton
3. Kebede

محلی، منطقه‌ای، و ناحیه‌ای دیده می‌شود (تاد^۱ ۱۹۶۳؛ بوگلیوسی^۲ ۱۹۹۹). در هر یک از این جریان‌ها، آب ممکن است در مجاورت سنگ‌های متفاوتی قرار گیرد که باعث شود ترکیب شیمیایی آن تغییر کند. به عبارت دیگر، ترکیب آب با توجه به نوع جریان می‌تواند متغیر باشد و از این تغییرات ترکیب هیدروشیمیایی آب می‌توان به خصوصیات چگونگی عمق و جهت گردش آب تا حدودی پی برد. از طرفی، درک الگوهای جریان آب زیرزمینی نقش قابل توجهی در مکان‌یابی بهترین بخش آبخوان‌ها از نظر کیفیت (تاد ۱۹۸۴) و کمیت (فورلونگ^۳ و همکاران ۲۰۱۱) دارد. بررسی ارتباط الگوی جریان آب زیرزمینی با کیفیت آب و به عبارت بهتر بررسی هیدروژئولوژی و هیدروشیمی آبخوان‌ها از فاکتورهای بسیار مهم برای مدیریت کمی و کیفی آب زیرزمینی در مناطق مختلف است. بعد از سنگ‌شناسی، فاکتورهای هیدروژئولوژیکی آبخوان - از جمله نوع و میزان تغذیه، تغییرات سطح آب، جهت جریان، عملکرد گسل‌ها و درز و شکاف‌های مختلف در آبخوان - بیشترین نقش را در تعیین کیفیت آب زیرزمینی دارند. وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان از عوامل مهم کنترل‌کننده شوری آب‌های زیرزمینی است. مثلاً جریان آب زیرزمینی به سمت یک لایه نفوذناپذیر می‌تواند شوری را در آب‌های زیرزمینی افزایش دهد (رجب‌پور و همکاران ۱۳۸۲). زیرا مرز یا لایه نفوذناپذیر باعث توقف آب در یک بخش از آبخوان می‌شود. توقف یا ماندگاری طولانی آب باعث می‌شود آب مدت زمان بیشتری در تماس با سنگ‌ها و زمینه آبخوان قرار گیرد و در نتیجه کانی‌های بیشتری را در خود حل کند و شوری آن به مرور زمان افزایش یابد. رابطه بین جریان آب زیرزمینی و خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی را محققان زیادی در سراسر جهان بررسی کرده‌اند (شولر^۴ ۱۹۶۲؛ بک^۵ ۱۹۶۶؛ فریز^۶ و چری^۷ ۱۹۷۹؛ دومنیکو^۷ و شوارتر^۸ ۱۹۹۰). حامد^۸ و همکارانش (۲۰۱۱) با استفاده از روش‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپی به بررسی منشأ و الگوی اختلاط آب زیرزمینی در یک سیستم آبخوان چندلایه در منطقه معدنی گافسای جنوبی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که الگوی ژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه عمدتاً تحت تأثیر انحلال هالیت، گچ، یا انیدریت و تا حدودی انحلال نامتجانس دولومیت قرار دارد. توزیع ایزوتوپی در آبخوان نشان داد آبخوان محبوس عمیق عمدتاً با آخرین بارش‌ها تغذیه می‌شود؛ درحالی‌که آبخوان آزاد کم‌عمق تحت شرایط پالئوکلیماتولوژی سردتر، مانند دوره‌های مرطوب اواخر پلیستوسن یا اوایل هولوسن، تغذیه شده است. بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت قوچان نشان داد عواملی از قبیل سازندها و گسل بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه تأثیر می‌گذارند. وجود سازند شوربجه و مارن‌های آن باعث تنزل کیفیت آب شده است. ولی در مناطقی که گسل از این سازند عبور کرده مانند معبری جهت انتقال آب عمل کرده و با افزایش تغذیه باعث کاهش غلظت کلر شده است (بهزادی‌فر و همکاران ۱۳۸۳). رقیمی و همکارانش (۱۳۸۵) با مطالعه و بررسی کیفیت آب زیرزمینی در گرگان به این نتیجه رسیدند که وجود گسل خزر در شمال گرگان در غلظت یون‌ها و نمایه‌های اشباع آب زیرزمینی این منطقه تغییرات بسیار ایجاد کرده است. باقری^۹ و

1. Toth
2. Bugliosi
3. Furlong
4. Schoeller
5. Back
6. Freeze
7. Domenico
8. Hamed
9. Bagheri

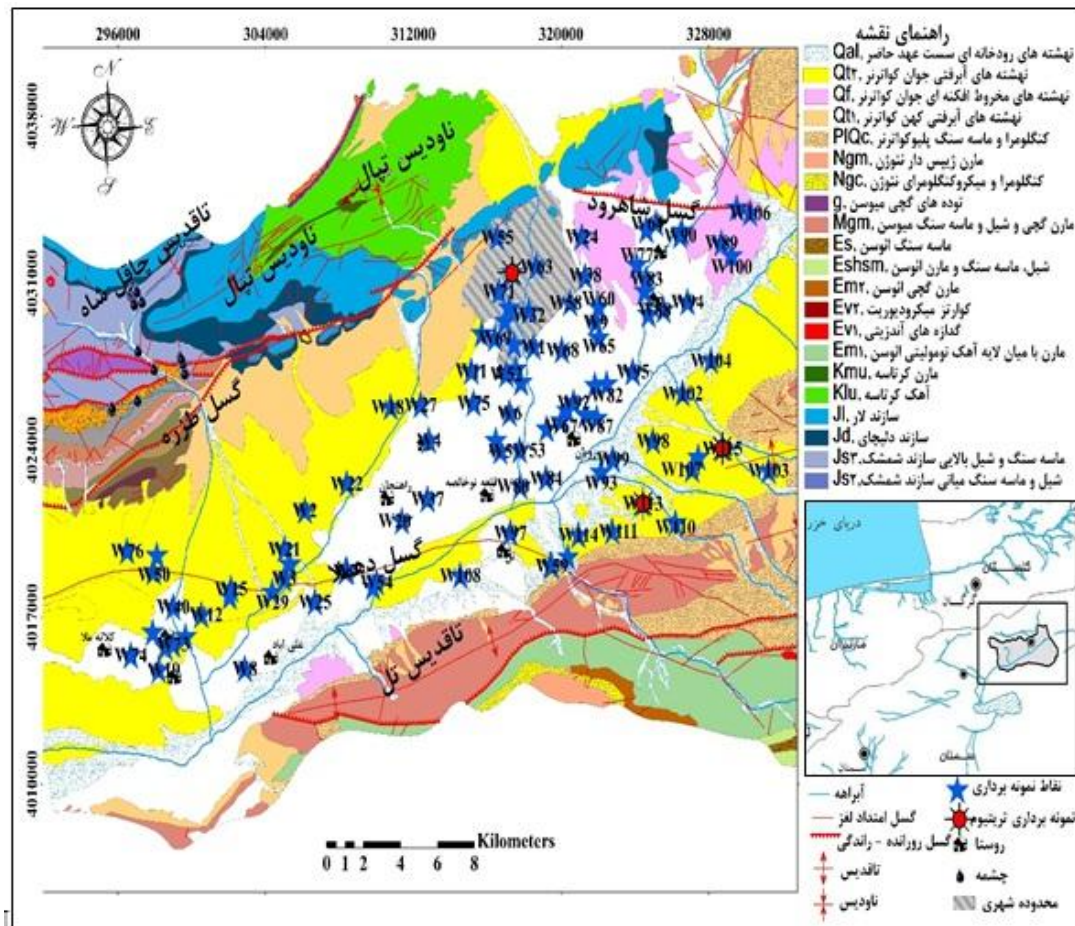
همکارانش (۲۰۱۹)، با استفاده از داده‌های ایزوتوپی و هیدروشیمیایی، ارتباط هیدروژنولوژی و هیدروشیمی دشت بسطام را بررسی کردند. نتایج پژوهش این محققان نشان داد بهره‌برداری بیش از حد از آب زیرزمینی باعث تغییر وضعیت هیدروژنولوژی آبخوان بسطام شده است. سطح آب این آبخوان ۰/۹ متر در سال کاهش می‌یابد و در نتیجه این کاهش آب شور از مرزهای شرقی و غربی به آبخوان نفوذ می‌کند. در دشت مجاور یا آبخوان شاهرود نیز تنوع منابع تغذیه‌کننده و توزیع مکانی چاه‌های بهره‌برداری سبب پیچیدگی الگوی جریان آب زیرزمینی در این آبخوان شده است. با توجه به تفاوت در ویژگی‌های زمین‌شناسی مناطق تغذیه آبخوان، هدف تحقیق حاضر بررسی خصوصیات هیدروشیمیایی و ایزوتوپی به منظور تعیین الگوی جریان آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی شاهرود و نیز بررسی اثر هیدروژنولوژی بر کیفیت آب و آنامولی‌های ژئوشیمیایی منطقه بود.

مواد و روش‌ها و معرفی زمین‌شناسی منطقه شاهرود

منطقه مطالعاتی شاهرود در جنوب کوه‌های البرز در شمال شرق ایران واقع شده است (عرض جغرافیایی $36^{\circ} 11' - 36^{\circ} 36'$ درجه شمالی، $54^{\circ} 35' - 55^{\circ} 35'$ درجه شرقی). این منطقه با کوه‌های آهکی / دولومیتی در شمال و رخنمون‌های مارنی - ژیبسی در جنوب محدود شده است. دشت شاهرود مساحتی حدود ۷۱۵ کیلومتر مربع دارد. میانگین درجه حرارت و بارش سالیانه (مجموع برف و باران) در این منطقه به ترتیب ۱۴ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۵ میلی‌متر است. سن واحدهای سنگی حوضه شاهرود به دوره پرکامبرین برمی‌گردد. قدیمی‌ترین واحدها ماسه‌سنگ، شیل، و دولومیت‌های سازند بایندر هستند و جوان‌ترین آن‌ها رسوبات آبرفتی و رودخانه‌ای است که سطح دشت شاهرود را می‌پوشانند. رسوبات در قسمت مرکزی دشت عمدتاً سیلتی و لومی است و در نزدیکی لبه‌ها رسوبات شن و شن و ماسه است. واحدهای سنگی عمده این منطقه شامل سنگ آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ و شیل پالئوزوئیک، تشکیلات شیلی و ماسه‌سنگی شمشک (ژوراسیک پایین)، سازندهای سنگ آهک و مارن دلیچای (ژوراسیک بالایی)، آهک لار (کرتاسه)، مارن گچی، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (ترشیاری)، رسوبات آبرفتی کواترنری قدیمی و جوان، و رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر است. توالی چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ می‌آید. آبخوان آبرفتی شاهرود آبخوانی تک‌لایه و آزاد است که ورودی‌های اصلی آن تغذیه از بارش، جریان بازگشتی فاضلاب از مناطق شهری، جریان برگشتی کشاورزی، و جریان آب زیرزمینی از آبخوان‌های کارستی مجاور است. ۲۱۶ حلقه چاه بهره‌برداری فعال در آبخوان آبرفتی شاهرود وجود دارد. اغلب این چاه‌ها عمیق‌اند و عمق بعضی از آن‌ها به ۳۰۰ متر می‌رسد. تعداد چاه‌های بهره‌برداری شاهرود هر ساله، به علت خشک شدن یا دلایل دیگر مانند کاهش شدید عملکرد و تعمیق و جابه‌جایی، تغییر می‌کند (اژدری^۱ و کاظمی^۲، ۲۰۱۴). بیشتر این چاه‌ها برای آبیاری زمین‌های کشاورزی حفر شده‌اند و بخش کوچکی از آن‌ها برای مصرف فضای سبز شهری استفاده می‌شود (برنجی^۲، ۱۹۹۸). بنا بر گزارش سازمان آب منطقه‌ای استان سمنان، مصرف آب در این محدوده مطالعاتی شامل ۷۷/۷۵ میلیون متر مکعب از آب‌های زیرزمینی (چاه و قنات) و ۱/۷۹ میلیون متر مکعب از جریان‌های سطحی است که به

1. Ajdary
2. Berenji

ترتیب ۷۱/۲۳ میلیون متر مکعب به مصرف کشاورزی، ۴/۸۴ میلیون متر مکعب به مصرف شرب، و ۳/۴۷ میلیون متر مکعب به مصرف صنعت می‌رسد (مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب محدوده مطالعاتی شاهرود ۱۳۸۹).



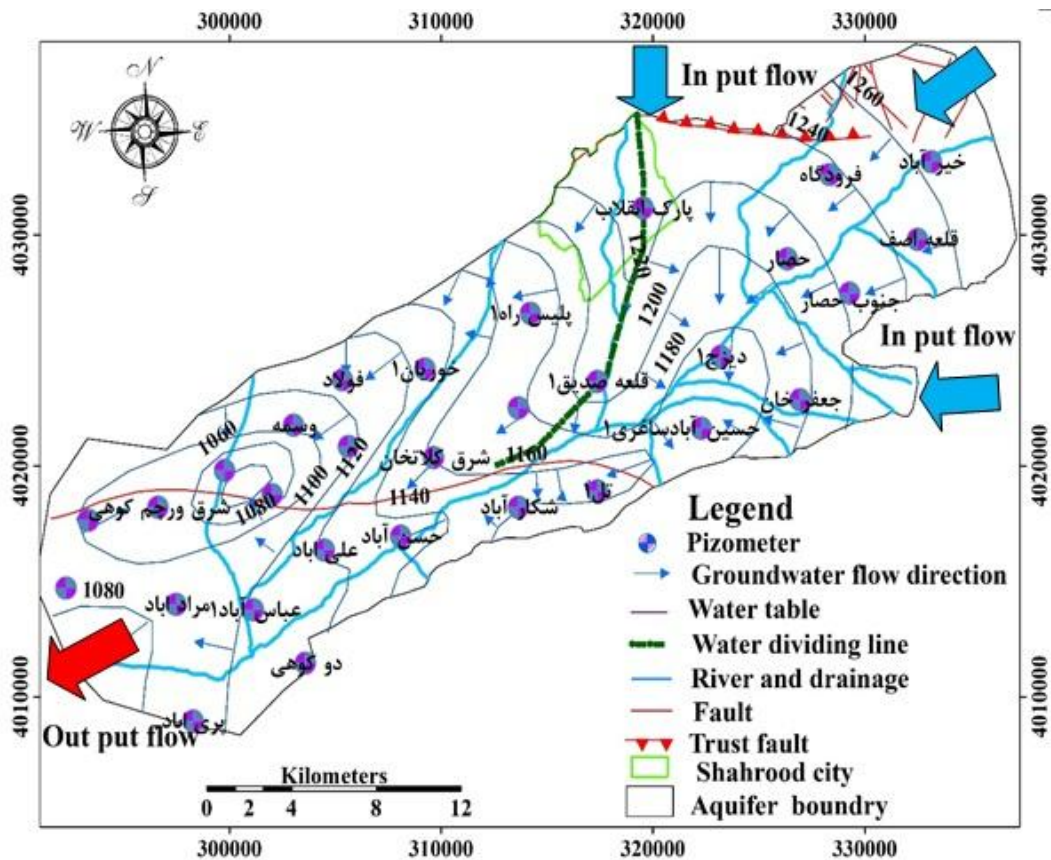
شکل ۱. نقشه زمین شناسی شاهرود (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور) و موقعیت نقاط نمونه برداری

جهت مطالعه هیدروژئولوژی آبخوان شاهرود، با استفاده از داده‌های سطح آب ۳۱ چاه مشاهده‌ای موجود در آبخوان، نقشه هم‌پتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی به صورت دستی ترسیم شد (شکل ۲). به منظور بررسی‌های هیدروشیمی آبخوان ۱۲۰ نمونه آب زیرزمینی از چاه‌های بهره‌برداری موجود در دشت برداشت شد (شکل ۱). پارامتر EC در محل نمونه برداری و نیز در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها جهت تعیین میزان عناصر عمده در آزمایشگاه هیدروژئوشیمی دانشگاه اتاوا کشور کانادا آنالیز شد. در پژوهش حاضر از روش‌های هیدروشیمیایی مختلف - از جمله نمودار پایپر، نقشه‌های پراکندگی EC، تیپ و پراکندگی یون‌ها، و نمودارهای ترکیبی - به منظور بررسی هیدروشیمی آبخوان استفاده شده است. به منظور تعیین سن و بررسی رابطه هیدروژئولوژی و هیدروشیمی با استفاده از داده‌های ایزوتوپی، ۳ نمونه آب (شامل ۱ نمونه آب شیرین در شمال منطقه و ۲ نمونه آب شور در جنوب منطقه) برداشت شد. این نمونه‌ها جهت تعیین میزان ایزوتوپ تریتیوم به آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه اتاوا ارسال

شد. پس از تعیین شرایط کیفی، از شواهد هیدروشیمیایی و ایزوتوپی برای تأیید الگوی جریان ترسیم شده بر اساس داده‌های پیزومتری استفاده شد.

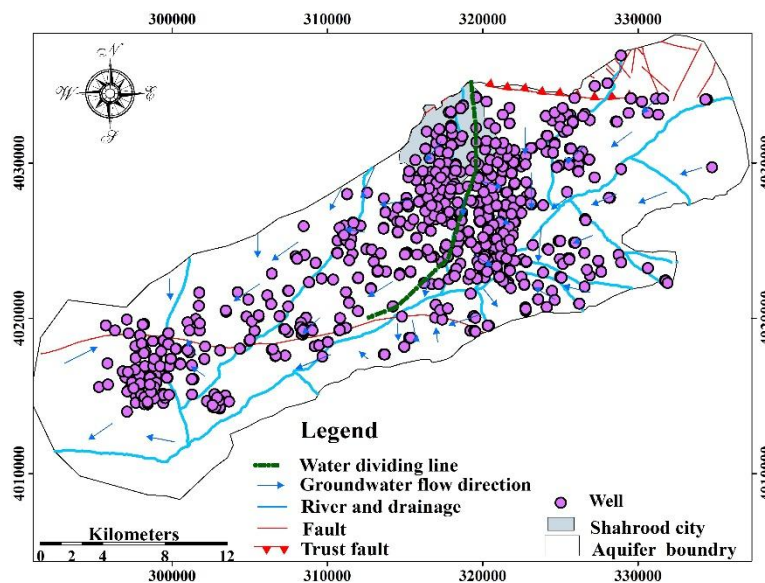
یافته‌های پژوهش

طبق مطالعات انجام شده در دشت شاهرود (ولی‌زاده ۱۳۹۲؛ کلاتگی ۱۳۹۳؛ کاظمی^۱ ۲۰۰۴؛ اژدری و کاظمی ۲۰۱۴) عملکرد گسل‌های متعدد به جابه‌جایی سنگ‌ها و سازندهای منطقه انجامیده و با برش آبخوان‌های کارستی جریان‌های محدود و محلی ایجاد شده است. با این حال، حرکت عمومی آب در آبخوان آبرفتی شاهرود از ارتفاعات شمال شرقی به مناطق جنوب غربی است. در پژوهش حاضر به منظور بررسی هیدروژئولوژی آبخوان شاهرود نقشه سطح ایستابی و جهت جریان آب زیرزمینی، با استفاده از اطلاعات سطح آب پیزومترها و به روش دستی و با دید کارشناسی، ترسیم شد. در نقشه هیدروژئولوژیکی ترسیم شده آبخوان شاهرود (شکل ۲) جریان‌های تغذیه‌کننده یا ورودی‌های آبخوان با فلش آبی‌رنگ و جریان خروجی با فلش قرمز رنگ نشان داده شده است. در این نقشه همچنین مهم‌ترین خط تقسیم آب (آب‌پخشان) آبخوان با علامت خط‌چین سبز رنگ متمایز شده است.



شکل ۲. جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان شاهرود (فروردین ۱۳۹۷)

با توجه به نقشه ترسیم شده جهت جریان کلی آبخوان از مناطق شمال شرقی به سمت مناطق جنوب غربی است. اما تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری در بخش مرکزی سبب به وجود آمدن خط تقسیم آب در این بخش از آبخوان (خط چین سبز رنگ) شده است (شکل ۳). این خط تقسیم تغییراتی در روند کلی جریان آب ایجاد کرده است؛ طوری که جهت جریان در اطراف روستای رویان به سمت شرق منحرف می‌شود. فاصله بیشتر خطوط هم‌پتانسیل در بخش جنوبی و در اطراف روستای حسین‌آباد ساغری نشان‌دهنده شیب هیدرولیکی کم و در نتیجه سرعت کمتر جریان آب در این بخش از آبخوان است. این موضوع با رجوع به مطالعات قبلی (ولی‌زاده ۱۳۹۲) تأیید شد.



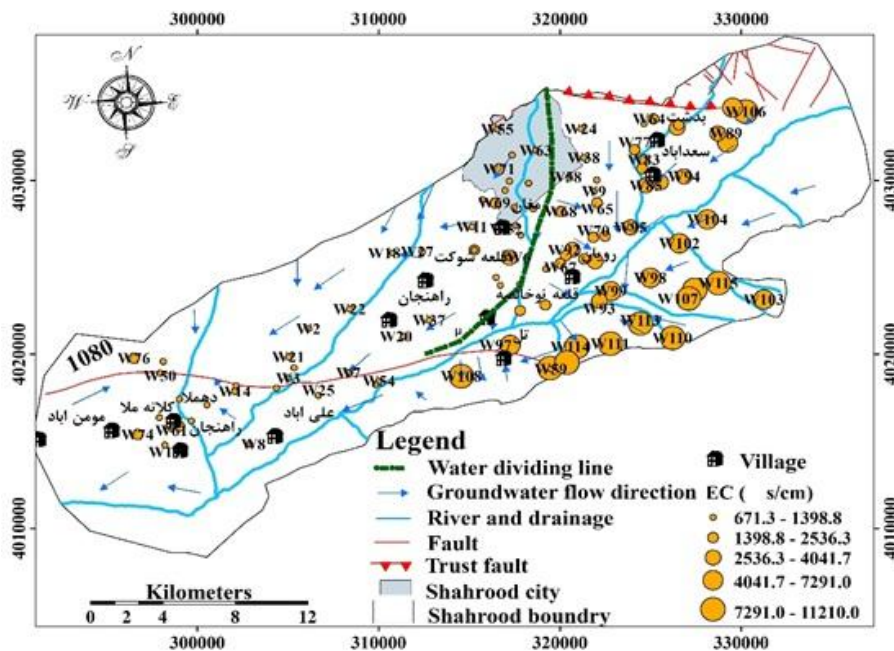
شکل ۳. تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان شاهرود

در بخش انتهایی دشت نیز بهره‌برداری بیشتر، تغییر جنس رسوبات، کاهش ظرفیت انتقال در بخش جنوب غربی دشت، و همچنین تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در شمال غربی دشت سبب ایجاد منحنی‌های بسته و تغییر جهت یا انحراف بخشی از جریان به سمت داخل دشت در قسمت شمال غربی شده است. طبیعتاً این پیچیدگی هیدروژئولوژیکی می‌تواند بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان نیز تأثیرگذار باشد. در نتیجه می‌توان با بررسی‌های هیدروشیمیایی به شناخت بهتری از الگوی جریان دست یافت.

شواهد هیدروشیمیایی

جهت به دست آوردن تصویری کلی از وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان شاهرود، از نقشه تغییرات مکانی هدایت الکتریکی (EC) آبخوان استفاده شد. میزان EC در آبخوان شاهرود از $671 \mu\text{s/cm}$ در نمونه‌های شمال آبخوان تا $12000 \mu\text{s/cm}$ در نمونه‌های شرق و جنوب شرق متغیر است. بر اساس نقشه پراکندگی EC آبخوان شاهرود (شکل ۴)، در این آبخوان پیوستگی ژئوشیمیایی، به‌ویژه در بخش جنوب شرقی، وجود ندارد. به عبارت بهتر دو آنامولی شوری متفاوت در

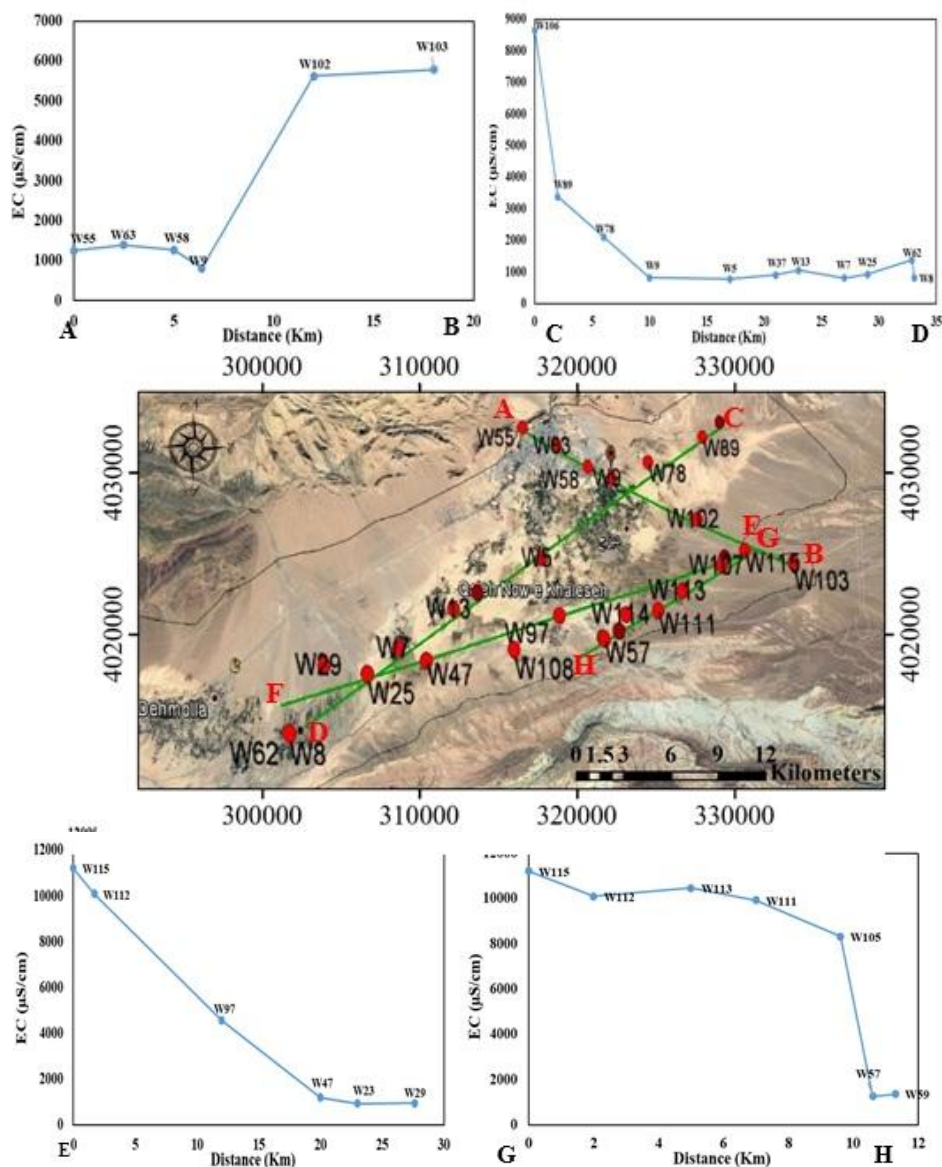
آبخوان شاهرود وجود دارد. این آنامولی‌ها به بخش شرقی-شمال شرقی و بخش جنوب شرقی آبخوان مربوط است که اختلاف کیفیتی فاحشی با بخش‌های شمالی، غربی، و مرکزی نشان می‌دهند. مثلاً نمونه W109 دارای EC بیش از $9000 \mu\text{s/cm}$ در نزدیکی و بالادست نمونه W59 با EC حدود $1200 \mu\text{s/cm}$ قرار دارد.



شکل ۴. میزان و تغییرات مکانی EC آبخوان شاهرود

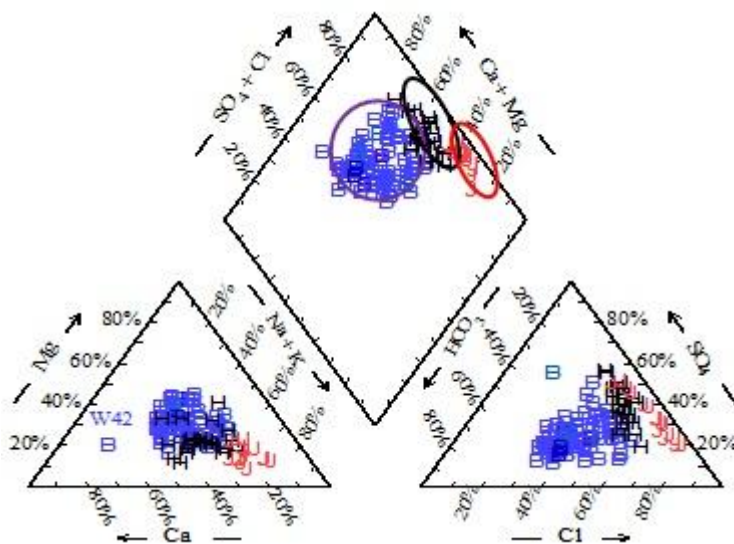
به منظور ارائه و درک بهتر ناپیوستگی هیدروشیمیایی در آبخوان شاهرود، پروفیل‌های EC در چهار مسیر مختلف (خطوط سبز رنگ) با استفاده از تصویر هوایی تهیه شده از گوگل ارث ترسیم شد (شکل ۵). در این نمودارها تغییر ناگهانی EC در نمونه‌هایی که فاصله کوتاهی از هم دارند نشان‌دهنده پیچیدگی هیدروژئوشیمیایی آبخوان شاهرود است. شوری زیاد آب زیرزمینی در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی آبخوان می‌تواند به دلیل انحلال سنگ‌ها و رسوبات تبخیری، واکنش‌های متداول آب و سنگ، مانند پدیده تبادل کاتیونی، فعالیت‌های انسانی، تبخیر از آب‌های زیرزمینی، و آب‌های برگشتی کشاورزی باشد. با توجه به اینکه حداقل عمق سطح آب زیرزمینی شاهرود بیش از ۶ متر است، فرایند تبخیر در شوری این آبخوان بی‌تأثیر است. با توجه به قرارگیری نمونه‌های شور در مجاورت سازندهای مارنی-ژیپسی در شرق و جنوب شرق و بخش کوچکی از جنوب غربی منطقه، می‌توان گفت یکی از دلایل اصلی شوری آبخوان مورد مطالعه در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی انحلال ژپس و نمک موجود در این سازندهاست که بعد از انحلال با ورود به آب زیرزمینی باعث افزایش میزان EC آب می‌شود. آب شور حاصل از انحلال این سازندهای تبخیری، در اثر جریان آب زیرزمینی با نمونه‌های آب شیرینی که در مسیر جریان قرار دارند، اختلاط پیدا می‌کند و باعث بالا رفتن میزان EC آن‌ها می‌شود. در نتیجه در بخشی از مرکز آبخوان یک زون اختلاط آب شور و شیرین قابل مشاهده است. علاوه بر انحلال سازندهای تبخیری، دلیل دیگر افزایش EC در بخش جنوب شرقی می‌تواند کاهش حرکت آب یا حتی راکد شدن آن به

دلیل ایجاد یک سد هیدرولیکی طبیعی ناشی از خط تقسیم آب باشد. فاصله زیاد خطوط هم‌تراز سطح ایستابی در بخش جنوب‌شرقی، که نشان‌دهنده کاهش شیب هیدرولیکی و در نتیجه کاهش سرعت حرکت آب است، تأییدی بر این فرضیه است. دلیل کاهش ناگهانی میزان هدایت الکتریکی یا شوری در بخش‌های مرکزی و غربی آبخوان نیز می‌تواند عملکرد سدگونه این خط تقسیم آب باشد که از ورود آب شور تولیدشده در بخش جنوب‌شرقی آبخوان به مناطق پایین‌دست جریان جلوگیری می‌کند. همچنین، با ورود دوباره جریان‌های تغذیه‌کننده از سمت واحدهای کارستی شمالی، میزان EC نمونه‌های بخش مرکزی و غربی کاهش و تیپ آب به سمت بی‌کربناته تغییر می‌یابد.



شکل ۵. تغییرات ناگهانی EC قابل مشاهده بر تصویر گرفته‌شده از گوگل ارث شاهدهی بر ناپیوستگی هیدروشیمیایی در اثر تغییرات هیدروژئولوژیکی در آبخوان شاهرود

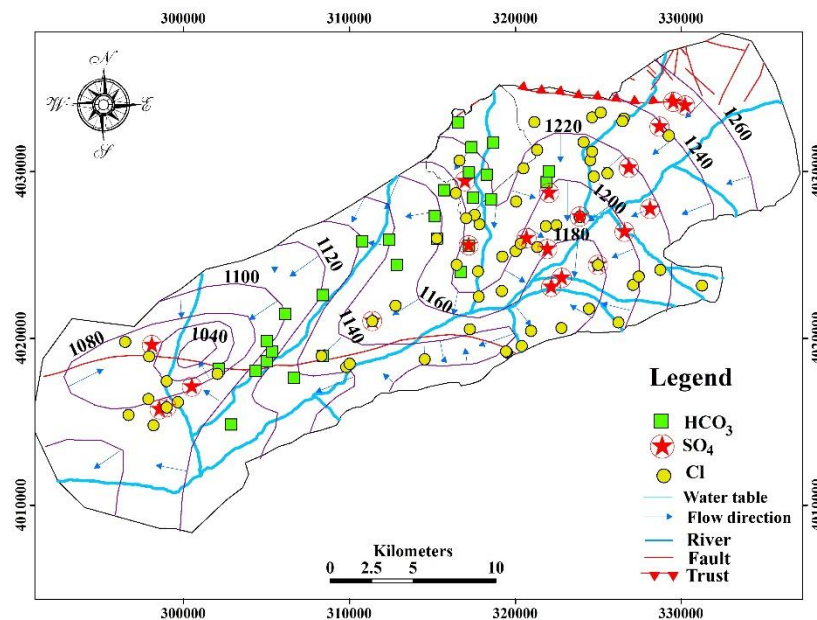
با توجه به اینکه نمونه‌های برداشت شده از نظر میزان شوری بسیار متفاوت‌اند، می‌توان انتظار داشت که تحت تأثیر فرایندهای متفاوت فرار گرفته باشند. در نتیجه، به منظور متمایز کردن نمونه‌های برداشت شده و رفتارسنجی آن‌ها در گراف‌های هیدروشیمیایی و در نتیجه تعیین فاکتورهای مؤثر بر شیمی آن‌ها، نمونه‌های برداشت شده بر حسب میزان یون پایدار کلر به ۳ گروه تقسیم شدند. بر این اساس در دیاگرام پایپر ترسیم شده (شکل ۶) از آبخوان شاهرود، بر حسب میزان کلر، ۳ گروه نمونه از هم قابل تفکیک‌اند. گروه ۱ نمونه‌های شیرین با میزان کلر کمتر از 10 meq/l که با دایره‌های آبی‌رنگ مشخص شده‌اند، گروه ۲ نمونه‌های دارای شوری کم تا متوسط و میزان کلر بین 10 meq/l تا 40 که با ستاره‌های مشکی مشخص شده‌اند، و گروه ۳ نمونه‌های شور با میزان کلر بیش از 40 meq/l که با دایره‌های قرمز مشخص شده‌اند.



شکل ۶. گروه‌های مختلف آب در نمودار پایپر آبخوان شاهرود

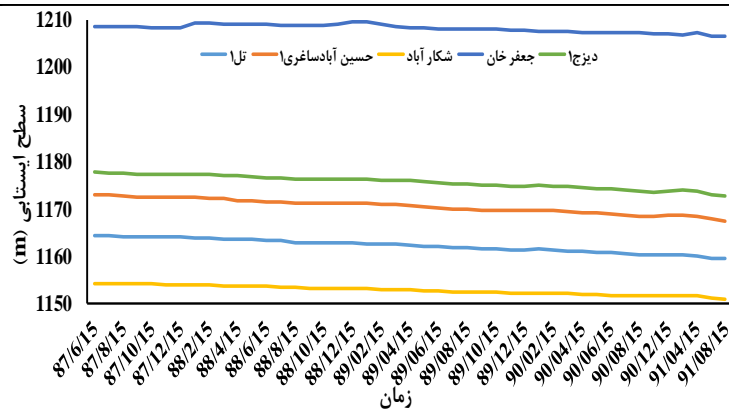
در نمونه‌های برداشت شده $27/8$ درصد دارای تیپ بی‌کربناته، $56/5$ درصد دارای تیپ کلروره، و $15/6$ درصد دارای تیپ سولفات‌اند. هر سه نوع تیپ مشاهده شده سه نوع رخساره سدیک، کلسیک، و منیزیک را شامل می‌شود. تغییرات تیپ آب زیرزمینی در آبخوان شاهرود در شکل ۷ می‌آید. به طور خلاصه می‌توان گفت تیپ آب زیرزمینی در مناطق ورودی شرقی تا نواحی مرکزی آبخوان تا حدودی سولفات، در نواحی شمالی و غربی بی‌کربناته، و در نواحی جنوبی کلروره است. با توجه به نحوه قرارگیری نمونه‌ها در نمودار پایپر و نیز نقشه پراکندگی تیپ آب نمونه‌ها، اختلاط آب‌های شور سولفات و بی‌کربناته بدیهی است و با جهت جریان آب زیرزمینی مطابقت دارد. جدا افتادن نمونه‌های کلروره (قرمز رنگ) از نمونه‌های شیرین و بی‌کربناته (آبی‌رنگ) در نمودار پایپر نشان‌دهنده عدم ارتباط هیدرولیکی یا ارتباط هیدرولیکی کم این دو دسته از نمونه‌هاست که خود می‌تواند به دلیل عملکرد خط تقسیم آب باشد. نمونه‌های بی‌کربناته با سازندهای کارستی شمال منطقه مرتبط‌اند؛ در حالی که ظهور تیپ‌های سولفات و کلروره با انحلال مارن و ژپس‌های رخنمون یافته در شرق و

جنوب شرق مرتبط است. با توجه به اینکه سازندهای مارن و ژپسی در مناطق شرقی و جنوب شرقی یکسان است، انتظار می رود تیپ آب این نواحی مشابه و عمدتاً از نوع سولفات باشد. ولی در بخش جنوبی تیپ همه آبها کلروره است. علت این وضعیت می تواند ماندگاری بیشتر آب در بخش جنوبی و رسیدن به تکامل ژئوشیمیایی در اثر واکنش با سنگهای آبخوان طی زمان باشد. بیشترین حجم جریان ورودی و تغذیه کننده دشت شاهرود از ناحیه شمال منطقه و از دشت بسطام منشأ می گیرد. حجم این جریان در برابر حجم جریان ورودی از جنوب شرق منطقه بسیار چشمگیر است. این جریان ورودی قوی از مرز تغذیه کننده شمالی منطقه همراه خط تقسیم آب زیرزمینی در جنوب شرقی آبخوان باعث کم شدن ارتباط هیدرولیکی و جدا افتادن جریانات شور وارد شده از جنوب شرق منطقه می شود. در نتیجه، به مرور زمان تغییر تیپ آب از سولفات به کلروره در این توده آب نسبتاً راکد رخ می دهد.



شکل ۷. پراکندگی تیپ آب زیرزمینی در آبخوان شاهرود

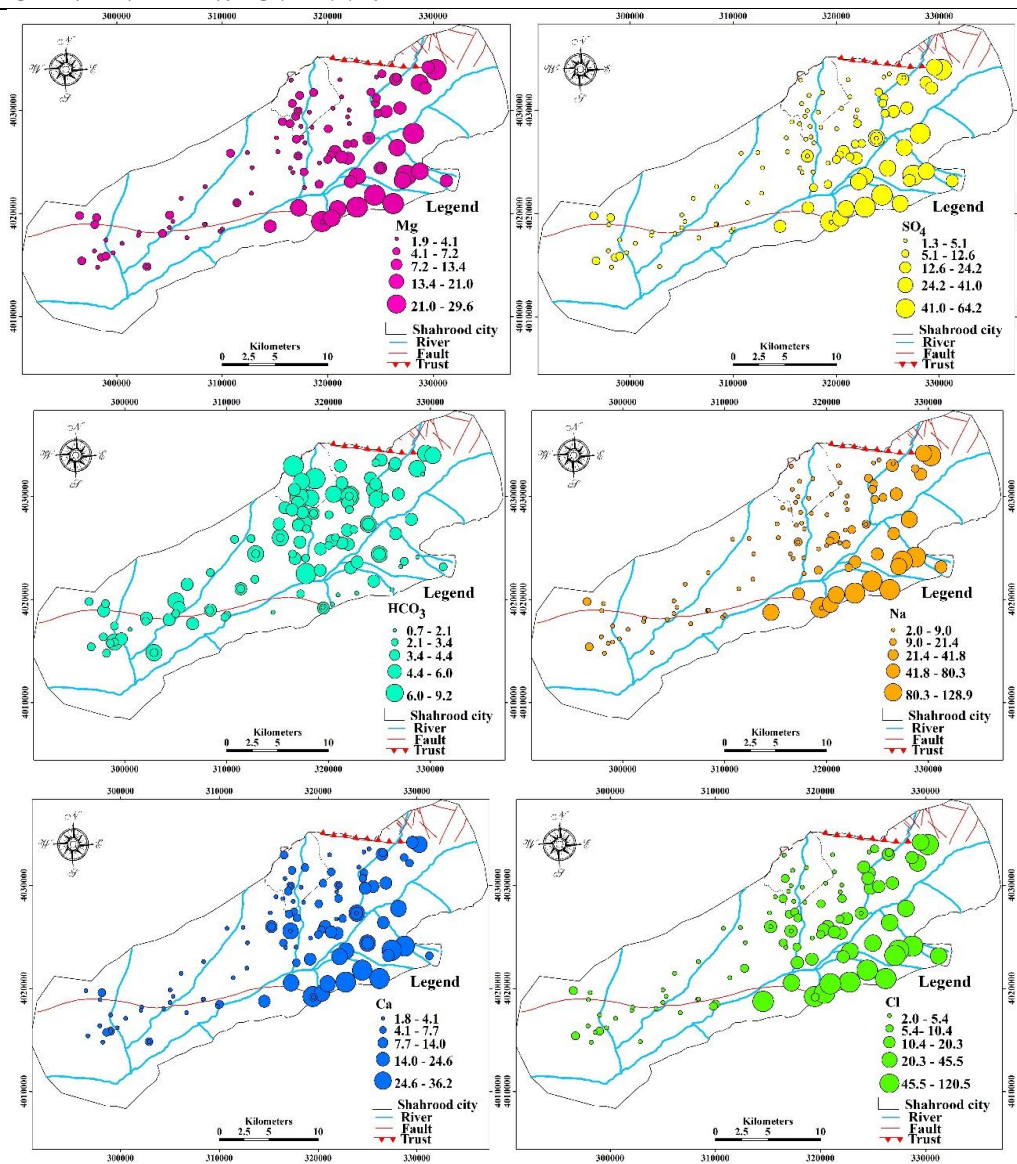
به منظور تأیید کم بودن ارتباط هیدرولیکی توده آب شور جنوب شرقی با دیگر بخش های آبخوان، نوسانات زمانی سطح ایستابی چاه های مشاهده ای این بخش از آبخوان بررسی شد (شکل ۸). نبود نوسانات زیاد در هیدروگراف چاه های پیزومتری ارتباط هیدرولیکی اندک آب شور در بخش جنوب شرقی با سایر بخش های آبخوان را تأیید می کند و نشان می دهد جریان این بخش از آبخوان تا حدودی از نوع پایدار است. راکد یا کند بودن جریان آب در بخش جنوب شرقی باعث شده نمونه های آب شور جنوبی تأثیر چندانی بر شیمی آبخوان شاهرود نگذارند. در واقع، کنترل هیدروژئولوژیکی در تغییر تیپ آب آبخوان شاهرود بسیار اثرگذار است.



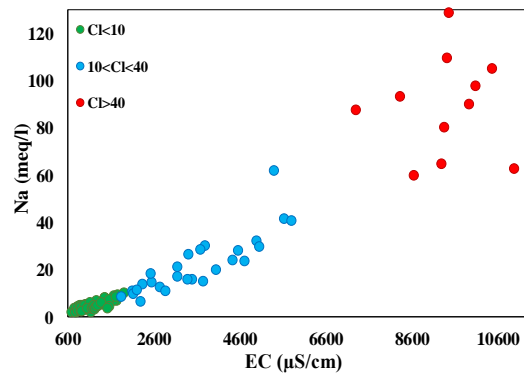
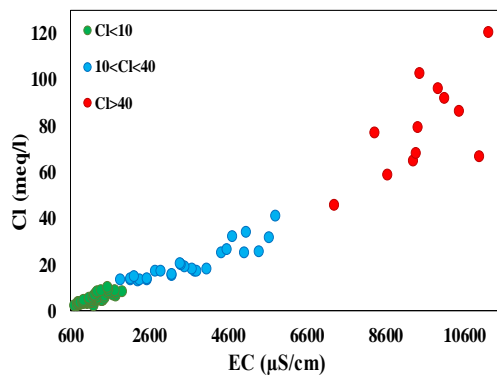
شکل ۸. هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای در بخش جنوب شرقی آبخوان شاهرود

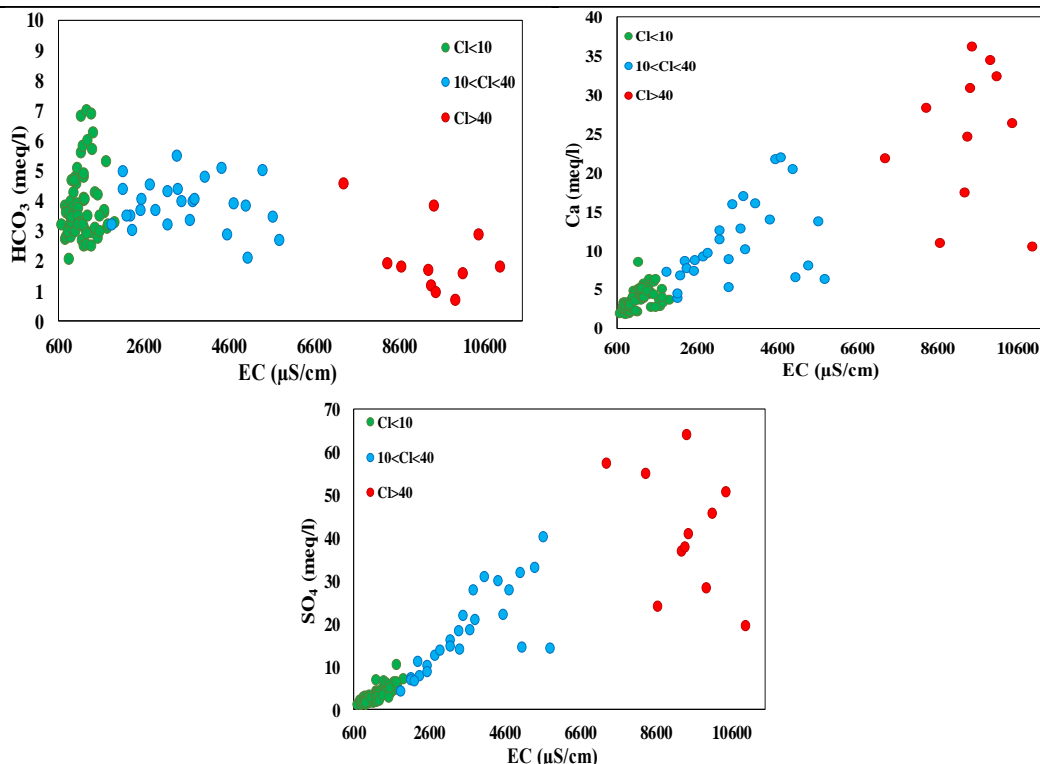
از آنجا که موقعیت خط تقسیم آب زیرزمینی در اثر تغییر تعداد چاه‌ها و میزان بهره‌برداری از آن‌ها و ... طی سال‌های مختلف دچار تغییر می‌شود، طبیعتاً می‌تواند باعث تغییراتی در کیفیت آب آبخوان شود (برای مطالعه بیشتر ← بوسلیک و جعفری ۱۳۹۸). مهم‌ترین عامل تغییر تیپ آب تغییر غلظت یون‌هاست. ازین‌رو، جهت تعیین دقیق عوامل مؤثر بر تغییر تیپ و کیفیت آبخوان، شناخت منشأ یون‌ها و روابط بین آن‌ها ضروری است. در بخش‌های شمالی آبخوان شاهرود، که در مجاورت ارتفاعات کربناته قرار دارد و از آن‌ها تغذیه می‌شود، بی‌کربنات آنیون و کلسیم و منیزیم کاتیون غالب است. در نمونه‌های برداشت‌شده از بخش‌های شرقی، جنوب شرقی، و شمال شرقی و برخی از نمونه‌های غربی آبخوان نیز کلر و سولفات آنیون و سدیم کاتیون غالب است. این نمونه‌ها می‌تواند متأثر از انحلال سازندهای تبخیری موجود در منطقه باشد. الگوی پراکنش مشابه دو یون سدیم و کلر با هم و نیز نسبت سدیم به کلر نمونه‌های آب منطقه که نزدیک ۱ است نشان‌دهنده منشأ یکسان آن‌ها در آبخوان است. این منشأ یکسان می‌تواند انحلال کانی‌ها در آبخوان باشد. همچنین، سه یون کلسیم و منیزیم و سولفات نیز روندهای مشابهی را نشان می‌دهند که می‌تواند منعکس‌کننده انحلال کلسیت، دولومیت، یا ژپس باشد (شکل ۹). الگوی پراکنش و وجود آنامولی‌های غلظت یون‌های عمده موجود در آب زیرزمینی شاهرود، به جز یون بی‌کربنات، مشابه الگوی پراکنش EC است و تأثیر هیدروژنولوژی بر هیدروشیمی آبخوان شاهرود را تأیید می‌کند. به دلیل فقدان واحدهای کربناته در بخش‌های دارای EC بالا، پراکنش EC و بی‌کربنات روند مشابهی از خود نشان نمی‌دهند.

به منظور بررسی ارتباط یا عدم‌ارتباط توده آب شور شرق و جنوب شرق با آب‌های کل آبخوان، از نمودار ترکیبی عناصر عمده استفاده شد (شکل ۱۰). با توجه به روند خطی نمودارهای ترکیبی، اختلاط آب‌های شیرین با آب‌های شور در بخش مرکزی آبخوان شاهرود بدیهی است. اما نمونه‌های بسیار شور جنوب شرقی، با وجود اختلاط کمی که با آب‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند، به نظر می‌رسد یک توده آب متفاوت‌تر با کل توده آب آبخوان باشد. این مجزا بودن می‌تواند به دلیل ماندگاری طولانی‌تر توده آب جنوب شرقی باشد. این توده آب شور ممکن است در اثر ماندگاری طولانی به تکامل ژئوشیمیایی رسیده باشد.



شکل ۹. الگوی پراکنش یون‌های مختلف در آبخوان شاهرود





شکل ۱۰. نمودارهای ترکیبی آبخوان شاهرود

شواهد ایزوتوپی و سن سنجی

به منظور بررسی ارتباط هیدرولیکی و تأثیر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی بر هیدروشیمی آبخوان و همچنین تعیین منشأ آب زیرزمینی آبخوان شاهرود، علاوه بر شواهد هیدروشیمیایی، سن سنجی ایزوتوپ ناپایدار تریتیوم نیز انجام شد. با توجه به تقسیم‌بندی سن آب‌ها بر اساس غلظت تریتیوم (جدول ۱) و متفاوت بودن نتایج آنالیز تریتیوم در نمونه‌های شور و شیرین مورد مطالعه، حداقل دو منبع تغذیه با سنین مختلف در آبخوان وجود دارد. نمونه‌های شور جنوب آبخوان با میزان تریتیوم کمتر از ۰/۸ TU نشان‌دهنده آب نسبتاً قدیمی تغذیه شده قبل از سال ۱۹۵۲ است. میزان تریتیوم در نمونه شیرین بالای منطقه ۲/۲ TU است که نشان می‌دهد آب به‌تازگی تغذیه شده است. سن زیاد آب در بخش جنوب‌شرقی می‌تواند ناشی از راکد ماندن آب زیرزمینی در این بخش از آبخوان به دلیل ایجاد خط تقسیم هیدرولیکی باشد. از آنجا که آب این بخش از آبخوان بسیار شور است، برداشت و بهره‌برداری از آن کمتر صورت می‌گیرد و چون برداشت از طریق چاه‌های بهره‌برداری تنها خروجی این بخش از آبخوان است، زمان بیشتری برای خروج کامل آب و در نتیجه تجدید آن نیاز است و مجموع این عوامل باعث بالا رفتن سن آب بخش جنوب‌شرقی آبخوان شده است.

جدول ۱. توصیف سن بر اساس غلظت ایزوتوپ تریتیوم (محمدزاده و سلیمانی ولیکندی ۱۳۹۷)

غلظت تریتیوم (TU)	توصیف سن
< 0.8	آب نسبتاً قدیمی تغذیه شده قبل از سال ۱۹۵۲
0.8 تا 4	مخلوطی از آب نسبتاً قدیمی و آب به تازگی تغذیه شده
5 تا 15	آب جدید > 5 تا 10 سال
15 تا 30	اندکی تریتیوم مربوط به بمب هسته‌ای وجود دارد ۱۹۵۰ \approx تا ۱۹۶۳
> 30	بخش قابل توجهی از آب در دهه‌های ۱۹۶۰ یا ۱۹۷۰ تغذیه شده است.
> 50	آبی که عمدتاً در دهه ۱۹۶۰ تغذیه شده است.

با استناد به نقشه هدایت هیدرولیکی (ولی‌زاده ۱۳۹۲) و در نظر گرفتن عدد ۲ برای هدایت هیدرولیکی و نیز با استفاده از گرادیان هیدرولیکی ۰/۰۱ (محاسبه شده از نقشه جهت جریان آب زیرزمینی)، تخلخل مؤثر ۰/۲۵، و سرعت جریان ۰/۰۸ متر در روز سن آب زیرزمینی توسط فرمول داری و رابطه بین سرعت داری و سرعت واقعی حدوداً ۶۸ سال برآورد شد. این سن با سن به دست آمده از رابطه سن سنجی تریتیوم مطابقت دارد.

بحث و نتیجه

جهت جریان کلی آبخوان شاهرود از مناطق شمال شرقی به سمت مناطق جنوب غربی است. ولی به وجود آمدن یک خط تقسیم آب در بخش مرکزی منطقه باعث تغییر روند کلی آب شده است؛ طوری که جهت جریان در بخش مرکزی به سمت شرق منحرف می‌شود. جریان‌های ورودی قوی از مرز تغذیه کننده شمالی همراه عملکرد خط تقسیم آب زیرزمینی باعث کاهش ارتباط هیدرولیکی و جدا افتادن جریان‌های شور وارد شده از جنوب شرق منطقه می‌شوند. فاصله بیشتر خطوط هم‌پتانسیل در بخش جنوب شرقی نشان دهنده شیب هیدرولیکی کم و در نتیجه سرعت کمتر جریان آب در این بخش از آبخوان است. نبود نوسانات زیاد در هیدروگراف چاه‌های پیژومتری حفار شده در توده جنوب شرقی کاهش ارتباط هیدرولیکی آب شور در بخش جنوب شرقی آبخوان را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد جریان این بخش از نوع پایدار است. سرعت کمتر آب در این بخش باعث شده زمان لازم برای واکنش‌های آب و سنگ فراهم شود. در نتیجه به مرور زمان تیپ آب از سولفات به کلروره تغییر کرده است. در اثر عملکرد این خط تقسیم، دو آنامولی شوری متفاوت و ناپیوستگی ژئوشیمیایی در پراکندگی EC و یون‌های عمده، به ویژه در بخش جنوب شرقی، به وجود آمده است. راکد یا کند بودن جریان آب در بخش جنوب شرقی باعث شده نمونه‌های آب شور جنوبی تأثیر چندانی بر شیمی آبخوان شاهرود نگذارند. در واقع، کنترل هیدروژئولوژیکی بر تغییر تیپ آب در آبخوان شاهرود بسیار اثرگذار است. بر اساس نتایج آنالیز تریتیوم، حداقل دو منبع تغذیه با سنین مختلف در آبخوان وجود دارد. نمونه‌های شور جنوب آبخوان با میزان تریتیوم کمتر از TU

۰/۸ نشان‌دهنده آب نسبتاً قدیمی تغذیه‌شده قبل از سال ۱۹۵۲ است؛ درحالی‌که آب شیرین شمال منطقه با میزان تریتیوم TU ۲/۲ آبی است که به‌تازگی تغذیه شده است. سن بیشتر آب در بخش جنوب‌شرقی نیز به دلیل عدم ارتباط هیدرولیکی با آب‌های جوان، سرعت کمتر جریان، و نیز عدم خروج آب قدیمی از این بخش از آبخوان به دلیل کم بودن میزان بهره‌برداری است.

سپاسگزاری

در انتها نگارندگان لازم می‌دانند از همکاری دانشگاه صنعتی شاهرود و دانشگاه اتاوا، که زمینه لازم را برای انجام گرفتن این پژوهش فراهم آوردند، تشکر و قدردانی کنند.

منابع

- بهزادی فر، و.، نخعی، م.، لشگری پور، غ. ر.، اشرفی، م. ر. (۱۳۸۳). «بررسی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت قوچان با استفاده از GIS»، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، صص ۴۱۳ - ۴۲۲.
- بوسلیک، ز. و جعفری، ه. (۱۳۹۸). «تغییرات زمانی و مکانی مؤلفه‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان شاهرود در بازه زمانی ده‌ساله (۸۲ - ۹۲)»، سی و هشتمین گردهمایی ملی علوم زمین. رجب‌پور، ح.، اصغری مقدم، ا.، ناصری، ح. ر.، علی‌نژاد، ع. (۱۳۸۲). «هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی دشت آذرشهر»، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز.
- رقیمی، م.، رحیمی، ع.، قره‌محمدلو، م.، شاه‌پسندزاده، م.، سیدخادمی، س. م. (۱۳۸۵). «تأثیر عوامل زمین‌شناسی در کیفیت شیمیایی منابع آب آشامیدنی گرگان»، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، تهران.
- کلاتگی، م. (۱۳۹۳). «ارزیابی آلودگی یون نیترات در منابع آب زیرزمینی دشت شاهرود»، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- گروه مهندسان مشاور راماب (۱۳۸۹). مطالعات نیمه‌تفصیلی منابع آب محدوده مطالعاتی شاهرود.
- محمدزاده، ح. سلیمانی ولیکندی، ط. (۱۳۹۷). «بررسی مقدار تریتیوم (^3H) در نزولات جوی و تعیین سن نسبی منابع آب‌های زیرزمینی در غرب کرمانشاه»، آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ج ۳۲، ش ۵، صص ۱۰۲۹ - ۱۰۴۱.
- ولی‌زاده، م. (۱۳۹۲). «مدل‌سازی انتقال آلاینده نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت شاهرود»، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Ajdary, K. & Kazemi, G. A. (2014). «Quantifying changes in groundwater level and chemistry in Shahrood, northeastern Iran», *Hydrogeology Journal*, 22: pp. 469-480.
- Back, W. (1966). Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in Northern part of Atlantic Coastal Plain. *United States Geological Survey professional paper*, 498-A.
- Bagheri, R., Nosratia, A., Jafaria, H., Eggenkampb, H. G. M., Mozafaric, M. (2019). «Overexploitation hazards and salinization risks in crucial declining aquifers chemo-isotopic appr, oaches». *Journal of Hazardous Materials*, 369, pp. 150-163.
- Behzadifar, V., Nakhaei, M., Lashgaripoor, G. R., Ashrafi, M. R. (2004). «Study and assesment the water quality of Ghochan plain using GIS», *8th conference of geology of Iran*. pp. 413-422.

- Berenji, A. (1998). «Evaluation of agricultural development in Shahrood District. In: Proceedings of Shahrood and Development Symposium, Shahrood, Iran», pp. 25–39 (in Persian).
- Boosalik, Z. & Jafari, H. (2019). «Spatio- temporal changes of hydrogeochemical components of Shahrood aquifer over a 10-year period (2003-2013) », *38th National Geosciences Congress, Iran*.
- Bugliosi, E. F. (1999). «The Midwestern Basins and Arches regional aquifer system in parts of Indiana, Ohio, Michigan, and Illinois. U.S». *Geological Survey Professional Paper*, 1423-A.
- Dalton, M. G. & Upchurch, S. B. (1978). «Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis». *Groundwater*, 16(4): pp. 228–233.
- Domenico, P. A. Q. & Schwartz, F. W. (1990). «Physical and Chemical Hydrogeology», *John Wiley & Sons Inc*. New York. 807 pp.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). «Groundwater». Prentice Hall Inc, *Englewood Cliffs*.
- Furlong, B. V., Riley, M. S., Herbert, A. W., Ingram, J. A, Mackay, R., Tellam, J. H. (2011). «Using regional groundwater flow models for prediction of regional well water quality distributions», *J Hydrol* 398(1–2): pp. 1–16.
- Hamed, Y., Dassi, L., Tarki, M., Ahmadi, R., Mehdi, K., Ben Dhia, H. (2011). «Groundwater origins and mixing pattern in the multilayer aquifer system of the Gafsa-south mining district: a chemical and isotopic approach», *Environ Earth Sci* 63(6): pp. 1355–1368.
- Kalategi, M. (2014). «The assesment of Nitrate pollution in groundwater of Shahrood plain», *Master thesis*, Shahrood University of Technology.
- Kazemi, G. A. (2004). «Temporal changes in the physical properties and chemical composition of the municipal water supply of Shahrood, northeastern Iran». *Hydrogeol J* 12: pp. 723–734.
- Kebede, S. (2013). «Groundwater in Ethiopia: features, numbers, and opportunities». *Springer, Berlin*.
- Kebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T., Ayenew, T. (2005). «Groundwater recharge, circulation and geochemical evolution in the source region of the Blue Nile River, Ethiopia», *Appl Geochem* 20(2005): pp. 1658–1676.
- Mohammadzadeh, H. & Soleymani valikendi, T. (2018). «Assesment the ³H content in precipitation and determine the water resources age in west of Kermanshah», *Water and Soil (Agricultural Sciences and industries)*, V 32, N 5, pp: 1029-1041.
- Rajabpoor, H., Asgharimoghadam, A., Naseri, H. R., Alinejad, A. (2003). «Groundwater hydrochemistry of Azarshahr plain», *Master thesis*, Natural sciences faculty, Geology group, Tabriz university.
- Raghimi, M., Rahimi, A., Ghahrehamoodlo, M., Shahpasandzadeh, M., Seyyedkhademi, S. M. (2006). «The effect of geological factors on chemical quality of drinking water resources of Gorgan», *25th Geosciences Congress, Tehran*.
- Ramab consellor engineers group (2010). «study of groundwater resources of Shahrood study area».
- Schoeller, H. (1962). «Les eaux souterraines». *Masson & Cie. Paris*, 642 pp.
- Toth, J. (1963). «A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins», *J Geophys Res* 68: pp. 298–315.
- Toth, J. (1984). «The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of groundwater», *First Canadian/American conference on Hydrogeology, Banff, Alberta. Memoir No. 8*.
- Valizadeh, M. (2011). «Transport modeling of nitrate pollutant in groundwater of Shahrood plain», *Master thesis*, Shahrood University of Technology.
- Zhou, Y. & Li, W. (2011). «A review of regional groundwater flow modeling». *Geosci Front* 2(2): pp. 205–214.