

بررسی نقش گسل خشک‌رود بر رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت زرنديه ساوه

محمد کاظم محمدی^۱، حاجی کریمی^{۲*} و علی حسینی^۳

۱- کارشناس ارشد هیدروژئولوژی، شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار هیدروژئولوژی، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۳- کارشناس ارشد زمین‌شناسی، گرایش آب‌شناسی، زرنديه، ساوه، ایران

نویسنده مسئول: *Haji.karimi@gmail.com

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۹

چکیده

بهره‌برداری صحیح از منابع آب زیرزمینی در هر ناحیه مستلزم شناخت ویژگی‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی و آب‌شناسی آن ناحیه است. ساختارهای تکتونیکی، به‌ویژه گسل‌ها، تأثیر عمده‌ای بر وضعیت فراوانی و کیفیت منابع آب زیرزمینی دارند. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر گسل خشک‌رود بر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت زرنديه ساوه است. این آبخوان با مساحت ۱۲۱۹ کیلومترمربع در شمال استان مرکزی واقع شده است. گسل نرمال خشک‌رود با امتداد غربی- شرقی آبخوان را به دو بلوک شمالی و جنوبی تفکیک کرده است. در این تحقیق، هندسه آبخوان و تغییرات پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان در طرفین خط گسل خشک‌رود، با استفاده از داده‌های دوره آماری ۲۱ ساله (۱۳۶۹ تا ۱۳۹۰) و با به‌کارگیری نرم‌افزار ArcGIS9.3 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین ضخامت آب‌رفت با مقدار بیش از ۲۵۰ متر و حداکثر مقاومت عرضی الکتریکی برابر با ۶۰۰۰ اهم مترمربع، در مرکز بلوک شمالی، در غرب روستای رحمت‌آباد و مناطقی با کمترین ضخامت‌های آب‌رفت با مقدار کمتر از ۵۰ متر و کمترین مقدار مقاومت عرضی الکتریکی برابر با ۵۰۰ اهم مترمربع، در حاشیه‌های آبخوان، واقع بر بلوک جنوبی است که بیانگر تأثیر مستقیم گسل خشک‌رود بر هندسه آبخوان هست. در محدوده غربی گسل، از ابتدای محل ورود گسل به آبخوان تا حوالی شهر خشک‌رود به طول ۲۳ کیلومتر، با توجه به عدم وجود جریان عرضی از گسل و موازی بودن جهت جریان با خط گسل، عدم شباهت روند افت سطح آب در پیزومترهای مقابل و طرفین گسل در سری زمانی ۴۸ ماهه (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰) و عدم شباهت نقشه پراکندگی غلظت پارامترهای هیدروشیمیایی آب نمونه‌برداری شده در شهریور ۱۳۹۰ در طرفین گسل، نشان می‌دهد در قسمت غربی آبخوان، گسل به عنوان یک سد هیدرولیکی عمل کرده و ارتباط دو طرف شمالی و جنوبی را قطع می‌کند و در حالی که، در سایر قسمت‌های امتداد گسل، از شهر خشک‌رود به سمت شرق دشت، ارتباط برقرار است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، گسل خشک‌رود، سد هیدرولیکی، دشت زرنديه ساوه

پیشگفتار

شکستگی بدون جابه‌جایی باشد «درز» است. مقدار جابه‌جایی در گسل ممکن است از چند میلی‌متر تا صدها متر باشد. اندازه و طول گسل‌ها نیز بسیار متغیر و از چند سانتی‌متر تا هزاران کیلومتر است. جابه‌جایی در سطح گسل‌ها ممکن است در راستای شیب گسل، در جهت امتداد گسل یا ترکیبی از آن دو باشد. درزه‌ها ساده‌ترین و فراوان‌ترین ساختارهای تکتونیکی‌اند و باعث تسریع هوازگی و فرسایش و نفوذ آب می‌شوند. ساختارهای متنوع زمین‌شناسی و تغییر شکل فیزیکی سنگ‌ها و لایه‌های زمین‌شناسی در اثر نیروهای تکتونیکی و فرایندهای ساختمانی پیچیده و الگوی واحد زمین‌ساخت ورقه‌ای و تکتونیک صفحه‌ای به وجود آمده‌اند (معماریان و صداقت، ۱۳۹۸).

تغییر شکل مواد طبیعی، در شرایط مختلف به صورت عمده خمیری و شکننده و یا به صورت ترکیبی است. آنچه از این دو نوع تغییر شکل حاصل می‌شود؛ به طور کلی به چین‌ها و شکستگی‌ها تقسیم می‌شود. در اعماق پوسته، به دلیل بالا بودن دما و فشارهای همه‌جانبه زیاد، سنگ‌های جامد رفتار خمیری از خود نشان می‌دهند و در شرایط مناسب چین می‌خورند و در نواحی نزدیک به سطح زمین که سنگ‌ها و لایه‌ها سردترند حالتی ترد و شکننده دارند و در صورتی که تنش‌های وارده به لایه‌ها و سنگ‌ها از مقاومت آن‌ها بیشتر شود لایه و یا سنگ از هم گسیخته می‌شود. شکستگی‌های ایجاد شده در صورتی که همراه با جابه‌جایی و حرکت باشند «گسل» نامیده می‌شوند و در صورتی که،

می‌کنند می‌توانند به طور تعیین کننده‌ای بر وضعیت فراوانی و کیفیت منابع آب زیرزمینی اثرگذار باشند (کین، ۱۹۹۶). گسل‌ها و ساختارهای تکتونیکی تأثیر عمده‌ای بر منابع آب زیرزمینی دارند و باعث هدایت و تشکیل سفره‌های آبی می‌شوند. تعیین میزان ارتباط بین آن‌ها می‌تواند در شناسایی منابع آبی جدید کمک کند (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۷). امروزه نقش سیستم‌های گسلی در انتقال سیال یک جنبه علمی چالش برانگیز است. با توجه به این که جریان آب‌های زیرزمینی به سنگ‌شناسی و حرکت‌شناسی گسل‌ها وابسته است، گسل‌ها به عنوان کانال و مجرا^۱ یا موانع^۲ و یا به صورت ترکیبی^۳ رفتار می‌کنند (فرانزی و همکاران، ۲۰۲۱). در مدیریت و پیش‌بینی تغییرات منابع آب زیرزمینی یک آبخوان، در نظر گرفتن اثرات گسل‌ها در تعیین مدل مفهومی هندسه آبخوان و شبیه‌سازی عددی آبخوان، یک جنبه مهمی است (مک کالوم و همکاران، ۲۰۲۱). گسل‌ها با ایجاد تغییر در نرخ جریان آب زیرزمینی در منطقه گسلی، می‌توانند تأثیر مستقیم داشته باشند؛ به طوری که محل شکستگی‌ها می‌تواند مکان‌هایی با پتانسیل بالا برای نفوذ آب‌های جاری به درون زمین یا محل خروج آب زیرزمینی به صورت چشمه و یا محل حرکت عمودی آب زیرزمینی در بین لایه‌های آبدار باشند. همچنین گسل‌ها با ایجاد تغییرات فیزیکی در ژئومورفولوژی حوضه آبریز، به صورت غیرمستقیم بر تغییرات آب‌های زیرزمینی مؤثر هستند (فانت و همکاران، ۱۹۹۷). در مواردی گسل‌ها، با ایجاد اختلاف ارتفاع، باعث شکل‌گیری مخروط‌افکنه‌ها و نهشته‌های آبرفتی وسیع در جوار ارتفاعات می‌شوند که مخروط‌افکنه‌ها و نهشته‌های آبرفتی نقش مهمی در به وجود آمدن مجاری هدایت روان‌آب‌ها یا نفوذ روان‌آب به درون زمین را بر عهده دارند (نوری، ۱۳۹۱). گسل خوردگی در آبخوان‌های آبرفتی ممکن است موجب ایجاد یک زون با نفوذپذیری بیشتری شود که در این شرایط گسل به صورت یک زون با قابلیت انتقال بیشتر آب در آبخوان عمل می‌کند؛ همچنین زون‌های گسلی می‌توانند بین مناطق کم‌عمق و عمیق ارتباط هیدرولیکی برقرار کنند که در این حالت، گسل نقش مثبت در انتقال آب را دارد. از طرف دیگر گاهی پدیده گسل خوردگی در آبرفت موجب ایجاد یک زون

ساختارهای شکننده مانند درزه‌ها و گسل‌ها در اکثر نقاط سطح زمین قابل مشاهده‌اند. این شکستگی‌ها در صورتی که نقش گسل را بازی کنند سبب به هم خوردگی امتداد لایه‌های رسوبی می‌شوند. گسل‌ها با جابه‌جایی موجب سردرگمی امتداد ساختارها می‌شوند. قطع ناگهانی مخازن نفتی و کانسارهای معدنی اهمیت اقتصادی گسل‌ها را نشان می‌دهد. امروزه بدون توجه به فعال بودن گسل‌ها در محل‌های دفن زباله‌های اتمی فاجعه‌های جبران‌ناپذیری از نظر زیست‌محیطی ایجاد می‌شود. حرکت گسل اگر ناگهانی باشد سبب زمین‌لرزه می‌شود که به دلیل تهدید جان انسان‌ها از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است (الیاسی، ۱۳۹۳). شناسایی درزه‌ها و گسل‌های ناحیه، یکی از بهترین مراحل مقدماتی حفر تونل و احداث سدها و فعالیت بهره‌برداری معدنی به شمار می‌آید (ایزدی‌کیان و همکاران، ۱۳۹۳). ساختار خطی گسل‌ها، بر تحولات زمین‌ساختی و همچنین تکوین حوضه‌های ساختاری رسوبی ایران اثر قابل توجه داشته‌اند (نوگل سادات، ۱۹۷۸). آگاهی از نوع ساخت واحدهای زمین‌شناسی منطقه در تهیه نقشه زمین‌شناسی محل بسیار مهم است. آشنایی به وضعیت ساختمانی منطقه، کمک مؤثری در مطالعه آب‌های زیرزمینی است. زیرا گسل‌ها و شکستگی‌ها علاوه بر جابه‌جایی لایه‌های آبدار، مجرای مناسبی جهت عبور آب‌های زیرزمینی است (ایزدی‌کیان و همکاران، ۱۳۹۳).

بهره‌برداری صحیح از منابع آب زیرزمینی در هر ناحیه مستلزم شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی و آب‌شناسی آن ناحیه است. با بررسی نوع سنگ‌ها، رسوبات و پدیده‌های زمین‌شناسی و همچنین چینه‌شناسی و تاریخ زمین‌شناسی یک منطقه می‌توان اطلاعات مفیدی از نظر تشکیل آبخوان و سفره‌های آب زیرزمینی، حدود مرز آبخوان‌ها و کمیت و کیفیت آب موجود در آن‌ها به دست آورد. اولین قدم در مطالعه آب‌های زیرزمینی یک ناحیه بررسی‌های زمین‌شناسی است (معماریان و صداقت، ۱۳۸۹). در موارد بسیاری بین وضعیت منابع آب و ساختارهای زمین‌شناسی مناطق ارتباط تنگاتنگی وجود دارد (هاشمی و همکاران، ۱۳۸۹). گسل‌ها با توجه به تغییراتی که می‌توانند در توالی لایه‌ها ایجاد کنند و همچنین با توجه به نقش مهمی که صفحات گسلی و شکستگی‌ها در نفوذ آب‌های جاری ایفا

³- barrier-conduit

¹- conduits

²- barriers

شرقی توسط دو گسل است. تأثیر خطواره‌ها و گسل‌ها بر آبخوان‌های آبرفتی غرب استان یزد توسط دهقان منشادی و همکاران (۱۴۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تراکم خطواره‌ها در نواحی سازندی انطباق خوبی با موقعیت چشمه‌ها و در نواحی آبرفتی انطباق خوبی با موقعیت و تراکم و آبدهی چاه‌ها دارند. بررسی جهت جریان آب زیرزمینی آبخوان در طرفین گسل دهشیر نشان داد در بخش‌هایی، گسل نقش یک سد هیدرولیکی را در برابر جریان آب‌های زیرزمینی دارد و در بخش‌های دیگر، گسل به عنوان کانال و هدایت‌کننده جریان آب‌های زیرزمینی عمل می‌کند. علیجانی و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر گسل دورود بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی منطقه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که گسل دورود با جابه‌جایی لایه‌های آبرفتی باعث تغییرات ناگهانی جنس و ضخامت آبخوان و همچنین تغییر در کیفیت آب زیرزمینی شده است. رجب‌پور و واعظی هیر (۱۳۹۶) ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی پهنه گسل شمال تبریز را در محدوده صوفیان تا بستان‌آباد بررسی نمودند. اختلاف فاحش در سطح تراز و کیفیت آب زیرزمینی و اختلاف در تغییرات سطح آب در طول انجام آزمون پمپاژ دراز مدت در طرفین شمالی و جنوبی گسل نشان داد که این گسل، رفتار مانع‌وار بر جریان آب زیرزمینی دارد. نتایج بررسی نوری و همکاران (۱۳۹۵) درباره اثر هیدرولیکی زون گسلی تبریز در آبخوان دشت اراک نشان داد، گسل تبریز در بخش‌های از طول خود به صورت سدی در مقابل جریان آب زیرزمینی قرار گرفته است و باعث تفکیک آبخوان به دو بخش مجزا شده است و در بخش‌های دیگر تأثیری بر آبخوان نداشته است. آلوز و لوسنا (۲۰۲۲) دو گسل بوآسیکا و تاباتینگا در آبخوان باریراس در شمال شرق برزیل، را در یک مدل انتقال هیدروژئولوژیک شبیه‌سازی نمودند. مدل با دو سناریو اجرا شد. در سناریو اول گسل‌ها به عنوان کانال عبور جریان به صورت مناطق با هدایت هیدرولیکی بالا و در سناریو دوم گسل‌ها به عنوان موانع هیدرولیکی در نظر گرفته شدند که بعد از اجرای مدل و مقایسه نتایج مدل با داده‌های صحرائی اندازه‌گیری شده مشخص گردید مدل با سناریو اول انطباق بهتری با شرایط صحرائی دارد.

کوک و همکاران (۲۰۲۲) در داخل دشت آدلاید استرالیا، با ساخت مدل‌های مفهومی آب زیرزمینی در طرفین گسل

با نفوذپذیری کم می‌شود که در این حالت زون گسلی به صورت یک سد هیدرولیکی^۴، مانع ارتباط هیدرولیکی آب می‌شود که در این حالت، گسل نقش منفی در انتقال آب را دارد (کین و همکاران، ۲۰۱۳). در زمینه تأثیر و ارتباط عناصر ساختاری و تکتونیک زمین‌شناسی به خصوص ساختمان گسل در منابع آب زیرزمینی تحقیقات متعددی صورت گرفته است، از جمله تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، در دشت‌های مختلف در ایران می‌توان به تحقیق عالی انوری (۱۳۹۸)، کیانی و همکاران (۱۳۹۶)، علیجانی و همکاران (۱۳۹۷)، کنگی و ارجمند (۱۳۹۸)، ادریس‌نیا و همکاران (۱۳۹۶)، ده‌بزرگی و رضایی (۱۳۹۴) ناصری و سرور (۱۳۸۷)، نادری و همکاران (۱۳۹۶)، محمدزاده و همکاران (۱۳۹۶)، نوری و همکاران (۱۳۹۵)، و در دیگر کشورهای جهان به تحقیق بنسه و همکاران (۲۰۰۳)، سروانتس و همکاران (۲۰۰۴)، سیتون و همکاران (۲۰۰۵)، بنسه و همکاران (۲۰۰۶)، دلینوم (۲۰۰۹)، لیانگ و همکاران (۲۰۱۲)، لین و همکاران (۲۰۱۵)، بائر و همکاران (۲۰۱۶)، هادلی و همکاران (۲۰۱۹)، رومانو و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد. در این مورد عزیزخانی و همکاران (۱۴۰۰) تأثیر گسل قلعه حاتم در غرب شهر بروجرد بر آبخوان را بررسی کردند که نتایج نشان داد گسل باعث تغییرات شدید و ناگهانی در ضخامت و جنس رسوبات آبرفتی اطراف شده است به طوری که آبرفت در شرق گسل عمدتاً شامل رسوبات دانه‌ریز و در غرب گسل شامل رسوبات درشت‌دانه شنی می‌باشد. این عملکرد سبب کاهش آبدهی و عمر مفید چاه‌ها در این منطقه شده است. معاشی و همکاران (۱۴۰۰) نقش گسل‌های دشت تشان در شهرستان بهبهان در ظهور چشمه‌ها و تأثیر آن‌ها بر ترکیب شیمیایی آب مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد وجود گسل‌های بهبهان و بخصوص تشان مانع جریان آب از دشت تشان به دشت‌های مجاور می‌شود. در پیت جنوبی معدن سه‌چاهون شهر بافق یزد با استفاده از روش ژئوالکتریک، گسل‌ها و شکستگی‌های آبدار جهت شناسایی جریان آب زیرزمینی توسط پایدار و همکاران (۱۴۰۰) مورد بررسی قرار گرفت و با تحلیل داده‌های مقاطع حفاری اکتشافی، هیدروژئولوژی، تکتونیک، مورفولوژی و زمین‌شناسی و مقاومت ویژه الکتریکی، نتایج نشان داد عامل اصلی تراوش و ورود آب به داخل پیت جنوبی از قسمت جنوب و جنوب

⁴- hydraulic barriers

که هدف اصلی در این تحقیق، تعیین ویژگی‌ها، رفتار و نحوه تأثیر هیدروژئولوژیکی گسل خشک‌رود بر آبخوان دشت زرنديه ساوه است.

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مطالعاتی

دشت زرنديه ساوه در شمال استان مرکزی قرار گرفته است. محدوده زرنديه واقع در زیر حوضه دریاچه نمک می‌باشد. آزاد راه تهران- ساوه، راه آهن‌های قم- تهران، تهران- همدان و بزرگراه ساوه- بوئین‌زهرا از آن عبور کرده است. شهرهای مامونیه، زاویه، خشک‌رود، پرندک از مراکز جمعیتی و صنعتی محدوده مورد مطالعه است (شکل ۱). دشت زرنديه با راستای غربی- شرقی در بین دامنه‌های جنوبی رشته کوه‌های البرز و دامنه‌های شرقی رشته کوه‌های زاگرس واقع شده است. وسعت کل محدوده ۳۶۲۸/۵ کیلومترمربع است که ۱۹۵۹/۵ کیلومترمربع آن دشت و مابقی آن بخش کوهستانی است. در داخل دشت، آبخوان با وسعت ۱۲۱۹ کیلومترمربع با کشیدگی غربی- شرقی تشکیل شده است. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده آبخوان آبرفتی دشت زرنديه از نوع آزاد است. این آبخوان از نظر تأمین آب مورد نیاز برای استفاده در مصارف مختلف به خصوص صنعتی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. بر اساس پهنه‌بندی زمین‌شناسی ایران، محدوده مورد مطالعه در واحد زمین ساخت ایران مرکزی قرار گرفته است و ارتفاعات غربی و جنوبی آن در داخل زون سنندج - سیرجان واقع شده است. در امتداد گسل خشک‌رود، آبخوان دشت زرنديه به دو بلوک جنوبی و شمالی با ضخامت لایه‌های اشباع متفاوت و خرد شده تفکیک شده است. گسل خشک‌رود از نوع گسل نرمال است. ردیف‌های رسوبی الیگومیوسن و میوپلیوسن چین‌خورده در قسمت‌های جنوبی دشت وجود دارد. رودخانه سرود با جهت غربی- شرقی خود، مسیر اصلی جریان آب سطحی در این محدوده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۶).

روش تحقیق

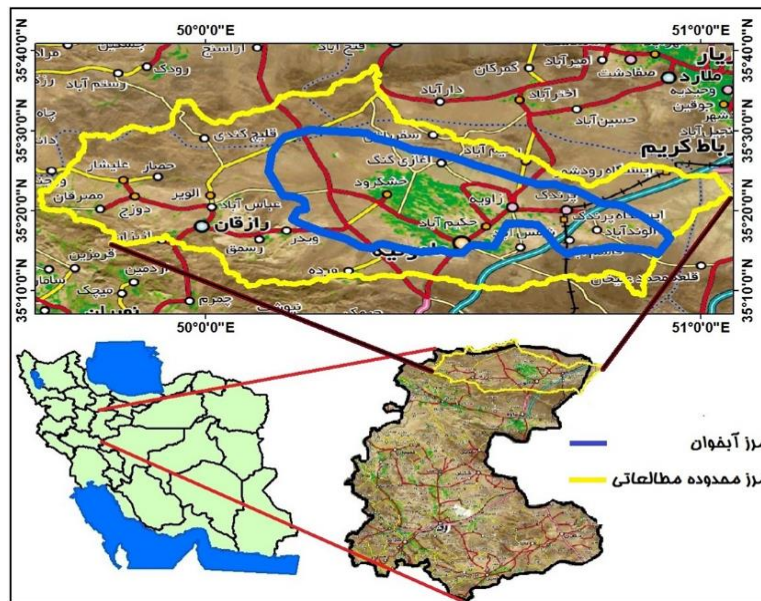
با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش ورقه ساوه (نوگل‌سادات و هوشمندزاده، ۱۳۶۳) زمین‌شناسی منطقه، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲، گسل خشک‌رود بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص

ادن بورن‌ساید پارامترهای مقاومت و نرخ جریان و تغذیه را در امتداد و اطراف گسل مورد بررسی قرار دادند. در سه ناحیه مختلف و در طرفین گسل داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی و هیدروشیمی و داده‌های سن آب زیرزمینی، مقادیر کربن ۱۴ و کلرید به صورت صحرایی اندازه‌گیری و جمع‌آوری شد. در دو ناحیه داده‌های جمع‌آوری شده از طرفین گسل با هم اختلاف و تغییرات زیادی داشتند که نشان‌دهنده عمل گسل به عنوان سد و مانع هیدرولیکی است و در ناحیه سوم داده‌های طرفین گسل مشابه بودند که نشان‌دهنده عمل گسل به عنوان مجرا می‌باشد. هاس و همکاران (۲۰۲۲) برای بررسی رفتار و مشخصات هیدرولیکی و ذخایر آب زیرزمینی در ناحیه زون گسلی دیلی تایوان مرکزی و سازندهای اطراف، یک مدل ترکیبی سه‌بعدی عددی، طراحی و صحت‌سنجی نمودند. با اجرای مدل عددی صحت‌سنجی شده شبکه جریان آب زیرزمینی ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید نقش هیدروژئولوژیکی ناحیه گسلی به صورت مجرای عبور جریان است. برای اطمینان از نتایج مدل عددی، داده‌های ایزوتوپ‌های پایدار آب، نمودارهای آزمایش پمپاژ و شیب هیدرولیکی، با استفاده از روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت که نقش هیدروژئولوژیکی ناحیه گسلی در هر دو روش مدل عددی و تحلیلی مشابه هم بود. اسپرول و همکاران (۲۰۲۱) به منظور بررسی اثرات هیدروژئولوژیکی سیمانی کردن زون گسلی در مقیاس صحرایی، پهنه گسلی لوما بلانکا در مرکز نیومکزیک توسط کلسیت سیمانی نمودند. بعد از انجام آزمایش‌های پمپاژ و تحلیل داده‌ها نتایج نشان داد که در جایی که گسل سیمانی شده است، گسل به عنوان مانعی برای عبور جریان آب زیرزمینی عمل می‌کند. یوان و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از ردیابی یون‌های اصلی و ایزوتوپ‌های پایدار آبخوان در دشت پیمونت واقع در شمال چین، به بررسی رژیم تغذیه‌ای آبخوان آبرفتی متأثر از گسل پرداختند. نتایج نشان داد که آبخوان آبرفتی به وسیله یک گسل نرمال از آبخوان سنگی مجاور تغذیه می‌شود.

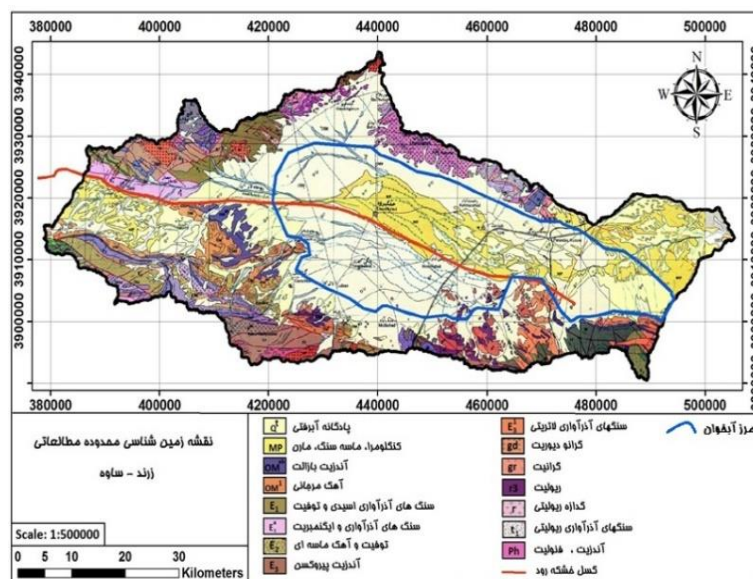
مطالعات انجام‌گرفته فوق نشان می‌دهد بررسی فرایندها و ساختارهای تکنوتیکی در مطالعات هیدروژئولوژیکی دارای اهمیت بالایی است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ارائه شده توسط نوگل‌سادات و هوشمندزاده (۱۳۶۳)، در داخل دشت زرنديه، گسل خشک‌رود با امتداد غربی- شرقی وجود دارد

نرم‌افزار ArcGIS 9.3 برای ترسیم و آنالیز نقشه‌ها و درون‌یابی نقاط استفاده شد. جهت بررسی هندسه آبخوان و مشخص نمودن تغییرات ضخامت و مقاومت لایه‌های مختلف، داده‌های ژئوالکتریک و لاگ حفاری چاه‌های حفر شده، اکتشافی و پیرومتری از شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی دریافت شد. در مطالعات ژئوفیزیک آبرفت دشت زرنديه باروش ژئوالکتریکي و آرایش شلومبرژه و تعداد ۱۱۲ عدد سونداژ الکتریکي در نظر گرفته شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۱) که در شکل ۳ نقشه محل پراکنش سونداژهای انجام شده ارائه شده است.

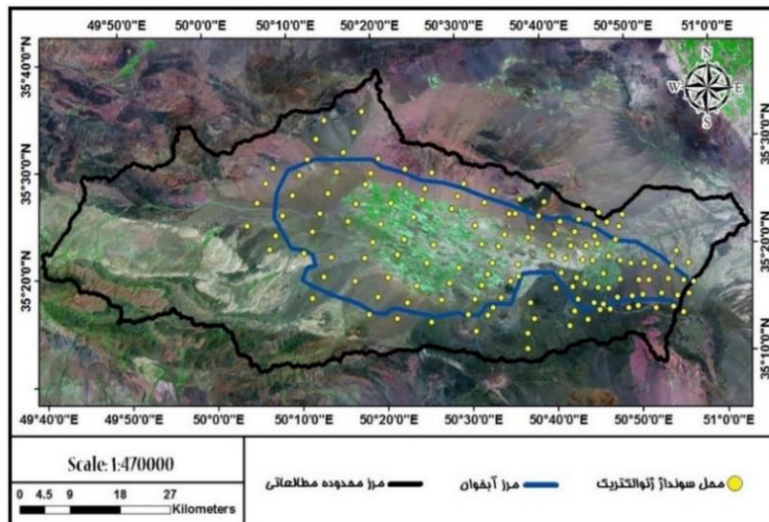
شده است. برای بررسی تأثیر گسل خشک‌رود بر رفتار هیدروژئولوژیکی و ویژگی‌های آبخوان زرنديه، شواهد ساختاری زمین‌شناسی و تغییرات هیدروژئولوژیکی مورد نیاز است. شواهد ساختاری هندسه آبخوان شامل وضعیت و تغییرات لایه‌های آبدار و توپوگرافی سنگ کف، در طرفین گسل است. شواهد تغییرات هیدروژئولوژیکی نیز شامل الگو و تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و جهت جریان و تغییرات کیفی و هیدروشیمیایی آب در طرفین گسل هست. در ابتدا کلیه داده‌های مورد نیاز از شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی دریافت و بعد از جمع‌آوری داده‌ها، از



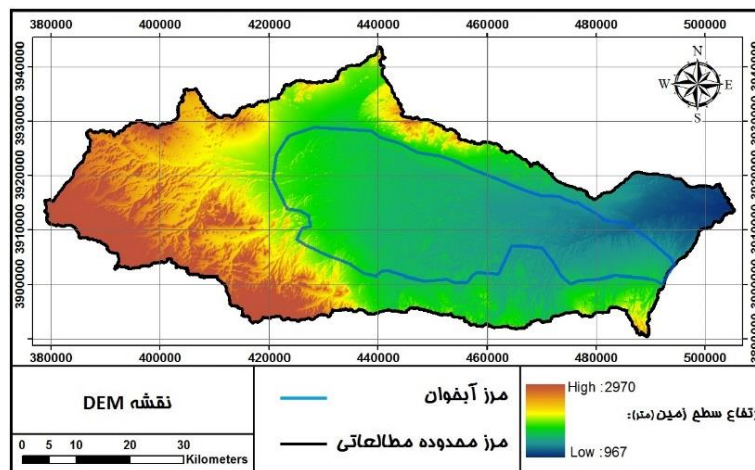
شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی و راه‌های دسترسی



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی که امتداد گسل خشک‌رود بر روی آن مشخص شده است برگرفته از نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ساوه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۶۳.



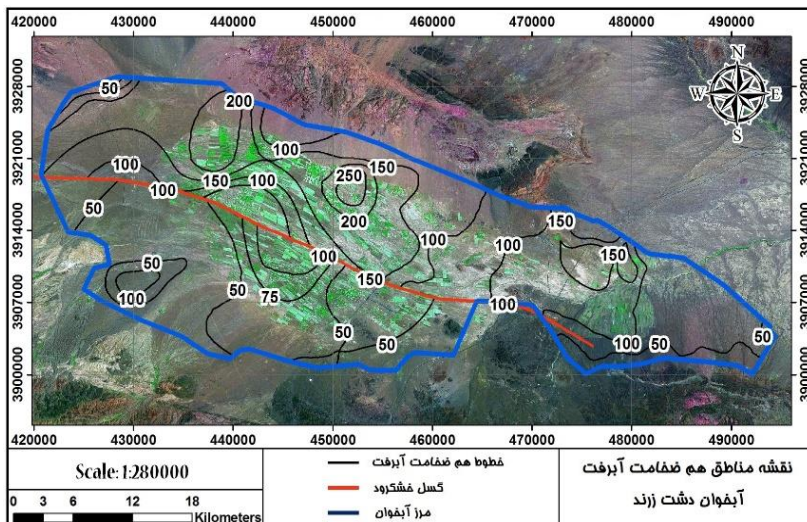
شکل ۳. نقشه محل سونداژهای ژئوالکتربیک برداشت شده در دشت



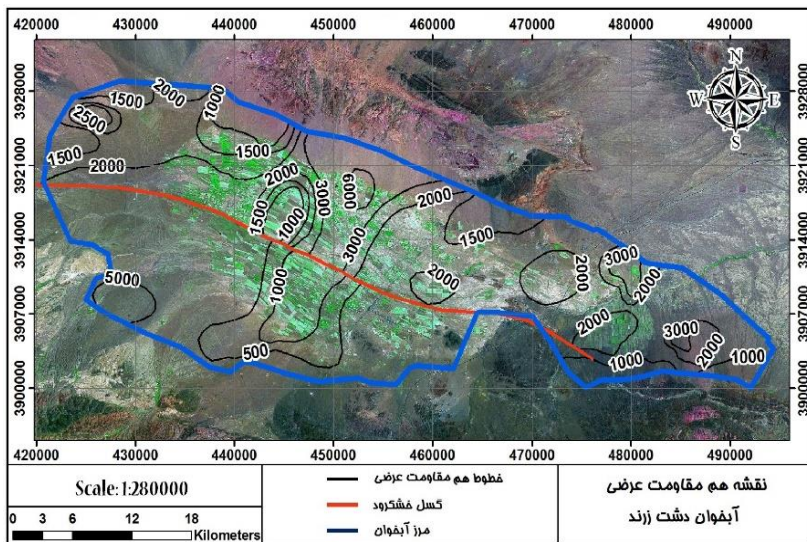
شکل ۴. نقشه DEM منطقه

و نقشه توپوگرافی سنگ کف آبخوان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. و در ادامه رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوان با استفاده از داده‌های چاه‌های پیزومتری و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و تهیه نقشه‌های توزیع مکانی تغییرات غلظت هیدروشیمی آب زیرزمینی در طرفین گسل خشک‌رود مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به داده‌های دریافتی از شرکت سهامی آب منطقه‌ای، در شکل ۸ پراکندگی چاه‌های در حال بهره‌برداری ترسیم گردید. در دشت زرنديه تعداد ۵۸ عدد چاه پیزومتری وجود دارد که با استفاده از آن‌ها، تغییرات سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۶۹ تاکنون به صورت ماهیانه اندازه‌گیری می‌شود (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۶). در شکل ۹ پراکندگی پیزومترها نمایش داده شده است و پیزومترهای نزدیک به گسل خشک‌رود برای آنالیز دقیق‌تر از سایر پیزومترها تفکیک و مشخص شده است.

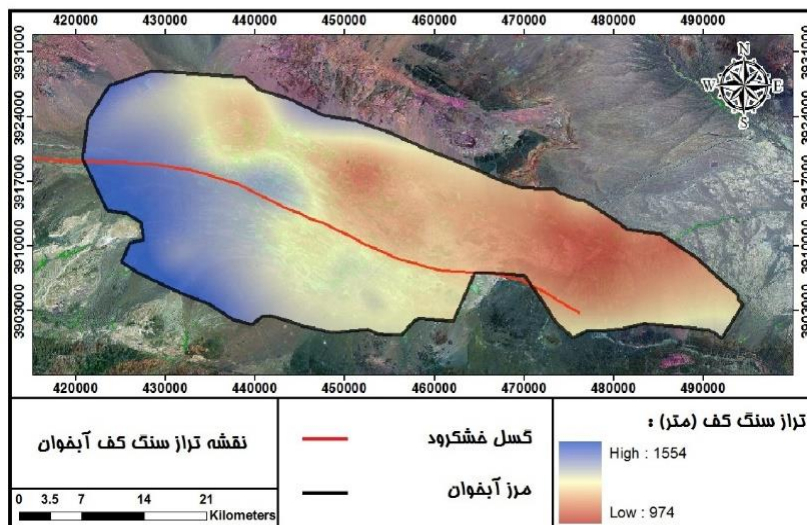
در شکل ۴ نقشه تراز توپوگرافی سطح زمین منطقه توسط نقشه مدل ارتفاعی دیجیتالی (DEM) ترسیم شد و نقشه هم‌ضخامت آبرفت آبخوان در شکل ۵ و نقشه هم‌مقاومت عرضی آبخوان در شکل ۶ ترسیم شد. برای تهیه نقشه تراز سنگ کف آبخوان دشت زرنديه، با استفاده از داده‌های ژئوالکتربیک دریافتی از شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی و تفسیر برداشت‌های ژئوفیزیک، و همچنین با استفاده از داده‌های تعداد محدودی از چاه‌هایی حفاری شده تا سنگ کف، ابتدا نقشه رستری عمق سنگ کف تهیه شد، سپس با استفاده از قابلیت Raster Calculator در محیط GIS لایه‌های رستری DEM و عمق سنگ کف از هم تفریق شدند تا نقشه پراکندگی تراز ارتفاعی سنگ کف به دست آمد (شکل ۷). نهایتاً همدسه آبخوان از طریق تهیه نقشه‌های توپوگرافی سطح زمین، نقشه هم‌ضخامت آبرفت آبخوان، نقشه هم‌مقاومت عرضی الکتریکی لایه‌های آبخوان



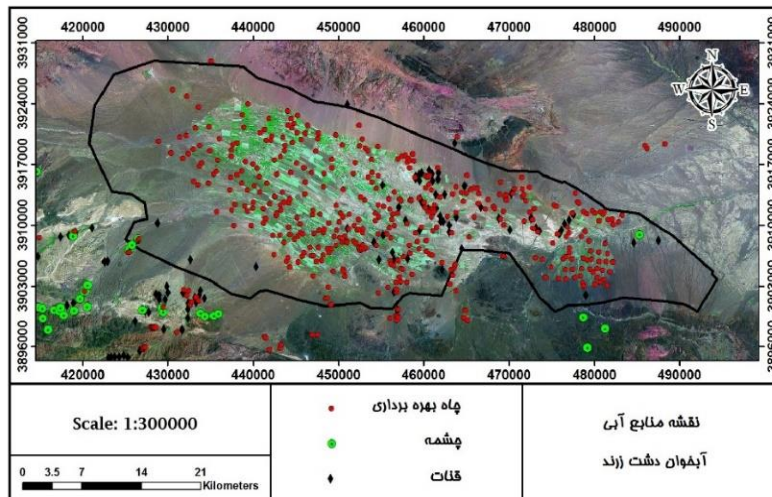
شکل ۵. نقشه مناطق هم ضخامت آبرفت در آبخوان دشت زرنديه



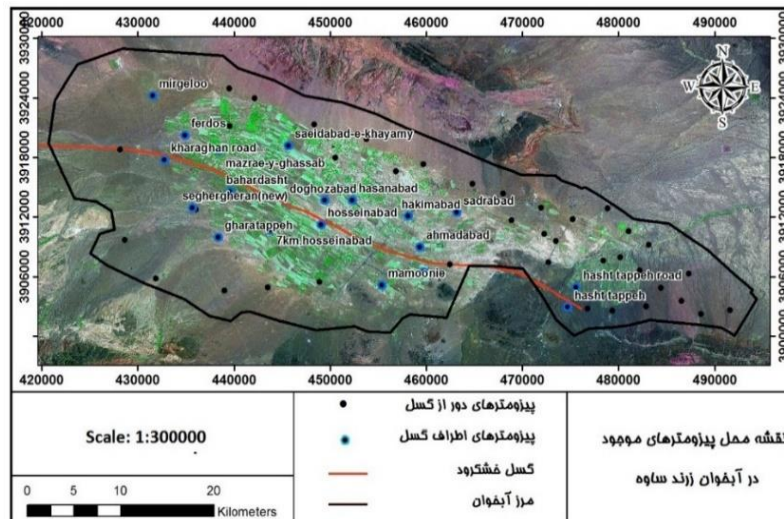
شکل ۶. نقشه پراکندگی مقاومت عرضی در آبخوان زرنديه



شکل ۷. نقشه ارتفاع تراز سنگ کف



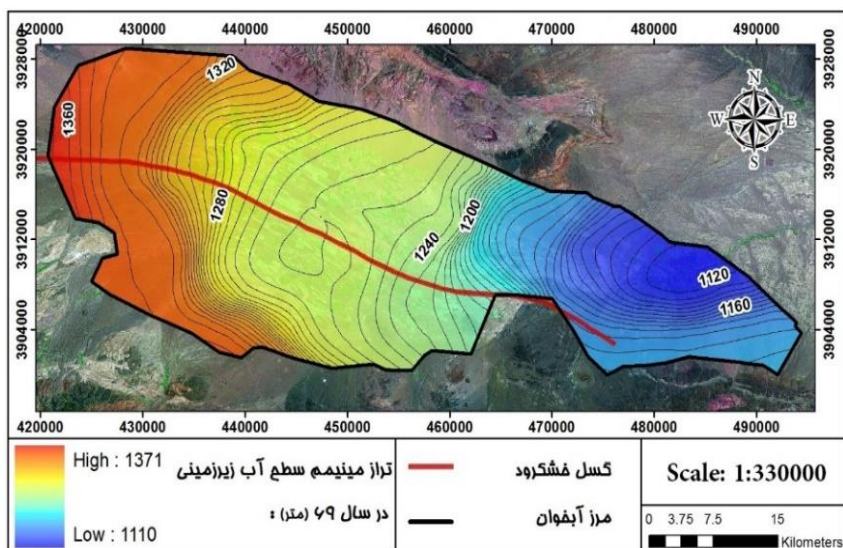
شکل ۸. نقشه منابع آبی آبخوان دشت زرنديه



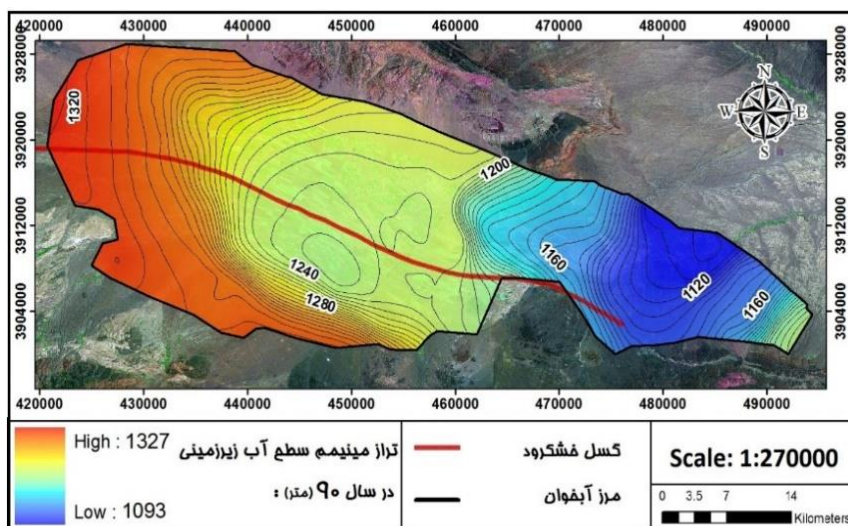
شکل ۹. نقشه پراکنده‌گی پیزومترهای موجود در دشت زرنديه

پیزومتری نزدیک به گسل به صورت دوه‌دو مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تغییرات هیدروشیمیایی آب زیرزمینی در طرفین گسل از داده‌های آنالیز شیمیایی نمونه‌های منابع آبی آماربرداری شده در شهریور سال ۱۳۹۰ استفاده گردید و نقشه‌های توزیع مکانی تغییرات غلظت یون‌های سولفات، کلر، بی‌کربنات، سدیم و نقشه تغییرات هدایت الکتریکی ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. که در شکل ۱۳ پراکنده‌گی منابع انتخابی جهت نمونه‌برداری و آنالیز هیدروشیمی را نشان می‌دهد. که غلظت یون‌های سولفات، کلر، بی‌کربنات، سدیم به ترتیب بین ۳۹ تا ۲۱۵۶، ۵/۴ تا ۳۱۵۰، ۱/۷ تا ۶/۳، ۲/۵ تا ۴۷ میلی‌اکی‌والان در لیتر تغییر می‌کند و دامنه تغییرات هدایت الکتریکی بین ۳۸۳ تا ۱۲۶۸۲ میکروزیمنس در سانتی‌متر می‌باشد (شکل‌های ۱۴).

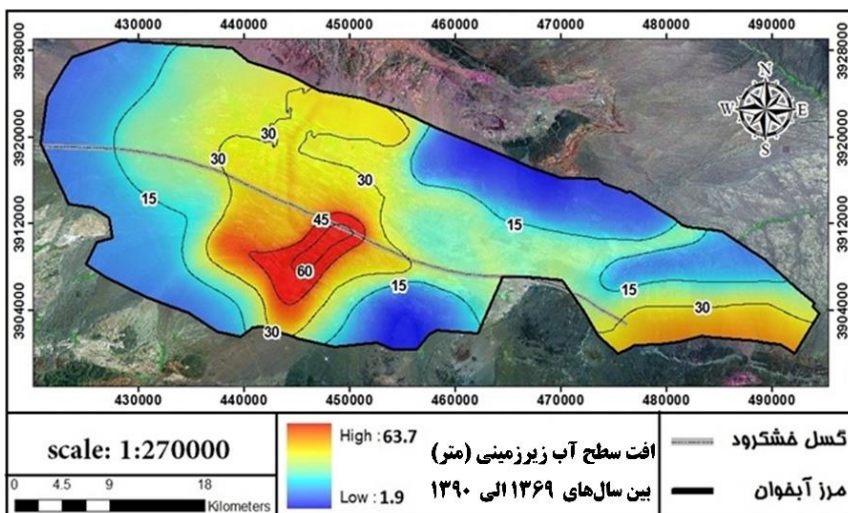
برای رسم خطوط هم‌پتانسیل سطح آب در محیط نرم‌افزار Arc GIS، از روش topo to raster برای درونیابی نقاط استفاده شد. نقشه تراز سطح آب زیرزمینی برای داده‌های مهرماه سال ۱۳۶۹ و ۱۳۹۰ در شکل‌های شماره ۱۰ و ۱۱ ترسیم شد و نقشه هم‌افت دوره ۲۱ ساله (۱۳۶۹ تا ۱۳۹۰) نیز در شکل ۱۲ ترسیم گردید و با استفاده از داده‌های پیزومتری مربوط به تراز سطح ایستابی بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰، خطوط هم‌پتانسیل سطح آب زیرزمینی در اطراف گسل ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. با ترسیم نمودار سری زمانی روند تغییرات شیب سطح آب زیرزمینی در بلوک شمالی و جنوبی گسل، به صورت جداگانه برای بازه زمانی ۴۸ ماهه (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰) مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه جهت مشخص شدن جزئیات بیشتر تأثیر هیدروژئولوژیکی گسل خشک‌رود بر آبخوان، داده‌های



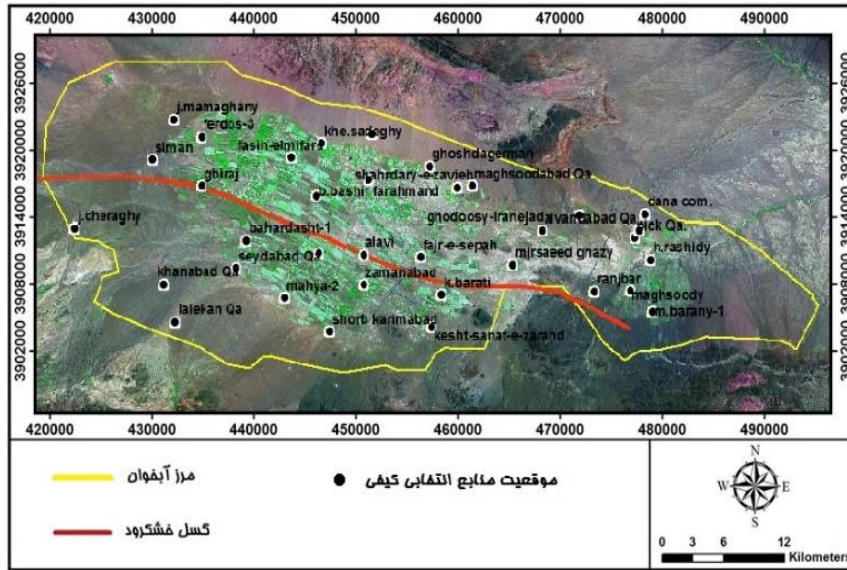
شکل ۱۰. نقشه تراز سطح آب زیرزمینی در مهر ۱۳۶۹



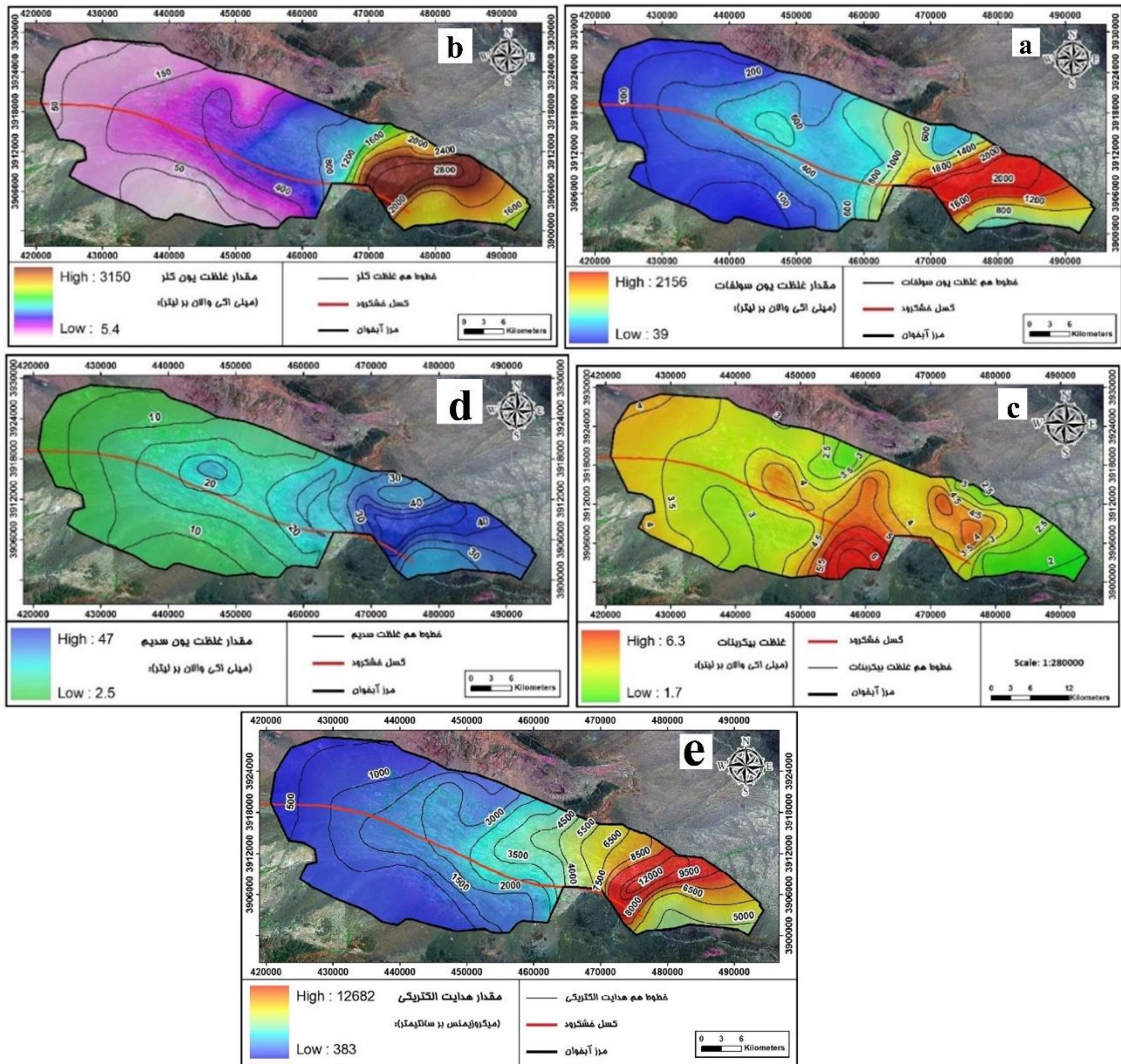
شکل ۱۱. نقشه تراز سطح آب زیرزمینی در مهر ۱۳۹۰



شکل ۱۲. نقشه مناطق هم افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان در طول دوره ۲۱ ساله (۱۳۶۹-۱۳۹۰)



شکل ۱۳. موقعیت منابع انتخابی کیفی



شکل ۱۴. نقشه پراکنده‌گی غلظت یون‌های (a) سولفات، (b) کلر، (c) بی‌کربنات، (d) سدیم و (e) نقشه پراکنده‌گی مقدار هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در آبخیزان زرنده

بحث و یافته‌های تحقیق

اثرات گسل خشک‌رود بر هندسه آبخوان: ساختارهای زمین‌شناسی، ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و هندسه آبخوان را تعیین می‌کنند (حسین و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به نقشه توپوگرافی سطح منطقه در شکل ۴ مرتفع‌ترین نقطه نسبت به سطح دریا، با مقدار ۲۹۷۰ متر در ارتفاعات غرب منطقه مورد مطالعه واقع شده و با حرکت به سمت مرکز و شرق منطقه از مقدار ارتفاع کاسته می‌شود تا به پست‌ترین نقطه در محل خروجی آب‌های سطحی با ۹۶۷ متر ارتفاع در محدوده روستای پیک می‌رسد و شیب کلی سطح منطقه از غرب به شرق است. با توجه به شکل ۵ ضخامت آبرفت در نیمه جنوبی آبخوان و در قسمت بلوک جنوبی گسل، دارای عمق متوسط ۷۵ متر است و ضخامت آبرفت در نیمه شمالی آبخوان و در قسمت بلوک شمالی گسل دارای عمق متوسط ۱۷۵ متر است. بیشترین ضخامت آبرفت با مقدار بیش از ۲۵۰ متر در غرب روستای رحمت‌آباد مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۶، حداکثر مقاومت عرضی در غرب روستای رحمت‌آباد است و در قسمت‌های میانی بلوک جنوبی گسل خشک‌رود کمترین مقدار مقاومت عرضی با ۵۰۰ اهم مترمربع است. با توجه به شکل ۷ بیشترین ارتفاع سنگ کف با مقدار ۱۵۵۴ متر از سطح دریا هست که مربوط به منطقه جنوب غرب آبخوان است که در بلوک جنوبی گسل خشک‌رود قرار گرفته است. پست‌ترین نقطه سنگ کف از نظر ارتفاعی با ۹۷۴ متر بلندی از سطح دریا مربوط به نواحی مرکزی و شرقی بلوک شمالی گسل خشک‌رود هست. شیب کلی سنگ کف هم مشابه شیب سطح منطقه، از سمت غرب به شرق هست. اختلاف فاحش در میزان ضخامت آبخوان و میزان مقاومت عرضی آبخوان و همچنین تفاوت آشکار میانگین ارتفاع سنگ کف، در بلوک‌های شمالی و جنوبی طرفین گسل خشک‌رود، همه این شواهد بیانگر تأثیر مستقیم گسل خشک‌رود بر هندسه آبخوان هست. به طوری که گسل نرمال خشک‌رود باعث شده است تا بلوک شمالی به صورت گراین در تراز ارتفاعی پایین‌تری با ضخامت آبرفت بیشتری نسبت به بلوک جنوبی قرار بگیرد؛ در مقابل، بلوک جنوبی هم به صورت هورست در تراز ارتفاعی بالاتری و با ضخامت آبرفت کمتری نسبت به بلوک شمالی قرار گرفته است.

اثرات گسل خشک‌رود بر رفتار هیدروژئولوژیک آبخوان: تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی متأثر از عوامل مختلفی

از جمله وضعیت توپوگرافی سطح اساس فرسایش، جبهه‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی و مناطق برداشت و تغذیه به آبخوان و همچنین عوامل زمین‌شناسی و ساختاری است. یکی از اثراتی که گسل‌ها ممکن است بر آبخوان‌های آبرفتی داشته باشند، تغییر شرایط جریان و گرادیان هیدرولیکی است. به منظور بررسی چگونگی تأثیر گسل خشک‌رود بر هیدرولیک آب زیرزمینی آبخوان زرنديه ابتدا وضعیت و تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت زرنديه در طرفین گسل را بررسی و سپس به تجزیه و تحلیل نقشه‌های هم‌پتانسیل سطح آب و جهت جریان و پارامترهای هیدروشیمی آب زیرزمینی می‌پردازیم.

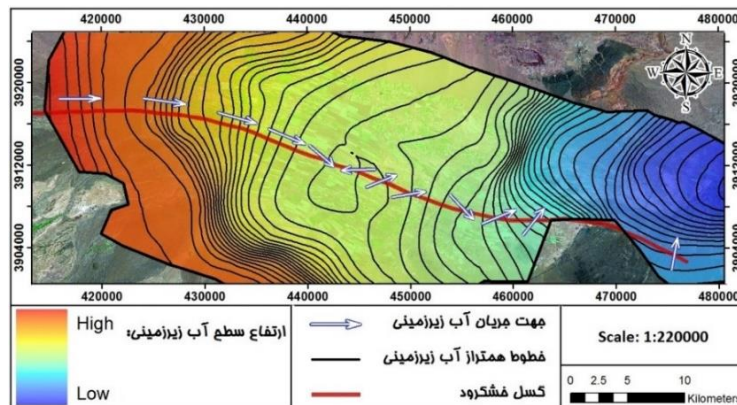
نقشه هم‌افت دوره ۲۱ ساله: بررسی نقشه تراز سطح آب زیرزمینی ترسیم شده با داده‌های پیژومترها در مهر ۱۳۶۹ و ۱۳۹۰ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد آب زیرزمینی از ارتفاعات غربی و دیگر ارتفاعات حاشیه دشت تغذیه می‌شود و با توجه به وضعیت خطوط هم‌پتانسیل، آب تغذیه شده از نیمه غربی دشت به سمت مرکز آن جریان یافته و سپس به سمت نواحی شرقی و محل خروج آب سطحی جریان دارد. با مقایسه نقشه تراز سطح آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۳۶۹ و ۱۳۹۰ مشاهده می‌گردد که در طی این دوره ۲۱ ساله سطح آب زیرزمینی به شدت کاهش یافته است. به طوری که بیشترین افت در مرکز دشت اتفاق افتاده و عمق و گستردگی افتادگی سطح آب در مرکز دشت در سال ۱۳۶۹ بسیار محدودتر از سال ۹۰ بوده است. مهم‌ترین عامل تخلیه سفره آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی دشت زرنديه ساوه، چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق بهره‌برداری می‌باشند. بر اساس آماربرداری سال ۱۳۸۷، در این محدوده تعداد ۶۵۳ حلقه چاه و با مجموع حجم برداشت ۱۴۱ میلیون مترمکعب در سال، از آبخوان برداشت می‌شود (شرکت سهامی آب منطقه‌ای، ۱۳۹۶).

نقشه مناطق هم‌افت سطح آب زیرزمینی در طول دوره ۲۱ ساله از مقایسه تراز سطح آب چاه‌های پیژومتر در طول دوره ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۰ در شکل ۱۲ ترسیم گردید. بر اساس این نقشه هم‌افت ۲۱ ساله (۱۳۶۹-۱۳۹۰) حداکثر افت در بخش جنوب نواحی مرکزی دشت و حداقل افت در نواحی مجاور شرقی آن است همچنین در مرکز دشت یک افتادگی در سطح آب زیرزمینی دیده می‌شود که با توجه به نقشه منابع آبی و چاه‌ها در شکل ۸، این منطقه از مناطقی است که بیشترین تراکم تخلیه آب زیرزمینی را داشته‌اند. نخعی

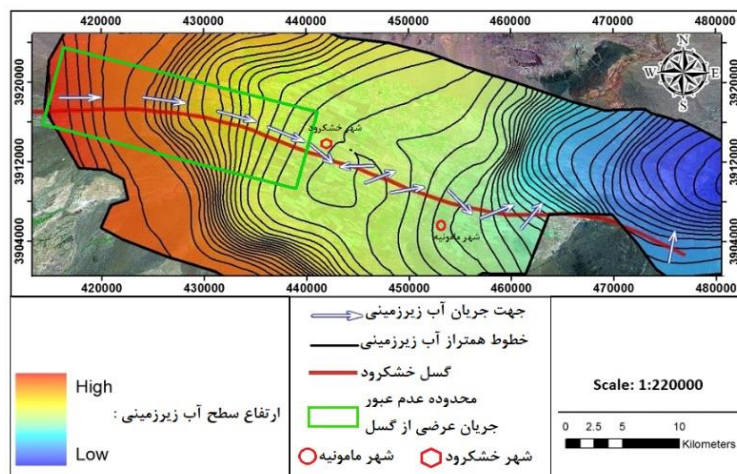
بلوک جنوبی نسبت به بلوک شمالی کمتر بوده و از تنش‌های برداشت و تخلیه تأثیرپذیری و افت بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین عملکرد مانع‌وار امتداد خط گسل خشک‌رود باعث عدم توسعه این افتادگی از بلوک جنوبی به بلوک شمالی در این ناحیه شده است.

خطوط هم‌پتانسیل کنار گسل خشک‌رود: برای مشخص شدن تأثیر گسل بر جهت جریان آب زیرزمینی و تأثیر آن بر سطح ایستابی، نقشه خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی در اطراف گسل رسم شد (شکل ۱۵). در محدوده غربی آبخوان، و در قسمت غربی گسل خشک‌رود و در امتداد ۲۳ کیلومتر ابتدایی محل ورود گسل به آبخوان، جهت جریان آب زیرزمینی، موازی با خط گسل و بدون عبور عرضی جریان از گسل است. اما در ادامه و در مرکز دشت که افتادگی سطح آب زیرزمینی را نیز شاهدیم، جهت جریان تغییر کرده و از عرض گسل خشک‌رود عبور می‌کند که نشان دهنده این موضوع است که گسل اثری بر هیدرولیک آب زیرزمینی ندارد؛ اما در ۲۳ کیلومتر غربی، گسل به صورت سد هیدرولیکی عمل می‌کند (شکل ۱۶).

و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی اثرات ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه بر آبخوان دشت زرنديه استان مرکزی با استفاده از نرم‌افزار GMS را بررسی نموده‌اند که نتایج نشان می‌دهد که با ادامه روند کنونی برداشت از آب‌های زیرزمینی در محدوده مورد پژوهش به مرور از ابتدای دوره تا انتهای دوره پیش‌بینی شاهد افت سطح آب زیرزمینی بیشتری خواهیم بود؛ این افزایش افت در نواحی مرکزی (محدوده غربی روستای حسین‌آباد) و نزدیک به غرب آبخوان که محدوده با تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد، بیشتر و مشهودتر است. با بررسی نقشه هم‌افت ۲۱ ساله (۱۳۶۹-۱۳۹۰) در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد که محدوده افتادگی شدید با حداکثر افت به مقدار ۶۰ متر در مرکز دشت، و در محدوده روستای حسین‌آباد اتفاق افتاده است که نشان دهنده تخلیه و برداشت زیاد آب زیرزمینی در این ناحیه می‌باشد. با وجود تراکم چاه‌های تخلیه و بهره‌برداری در هر دو طرف گسل، در قسمت بلوک جنوبی افتادگی شدیدی تشکیل شده است و همان‌طور که در تأثیر گسل خشک‌رود بر هندسه آبخوان بیان شد ضخامت آبرفت در



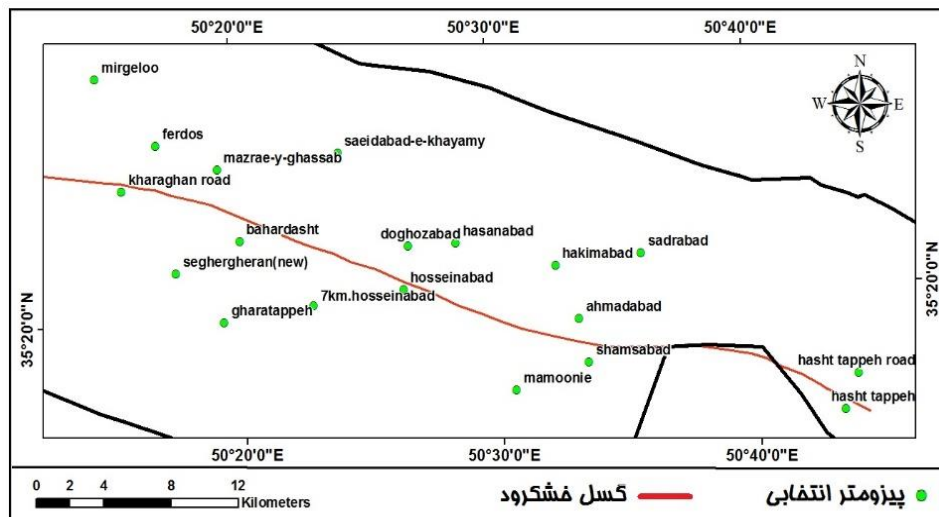
شکل ۱۵. نقشه خطوط هم‌پتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی در اطراف گسل خشک‌رود



شکل ۱۶. نقشه خطوط هم‌پتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی در اطراف گسل خشک‌رود

آب زیرزمینی و محاسبه مقدار شیب خط روند تغییرات شد. نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۱۸ تراز سطح آب پیژومترهای شمال و نمودارهای شکل‌های ۱۹ تراز سطح آب پیژومترهای جنوب گسل خشکروود را برای اندازه‌گیری‌های ماهانه بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ را نشان می‌دهند. در این نمودارها محور افقی، ماه‌های اندازه‌گیری است و برابر با ۴۸ ماه است که از قدیم به جدید نام‌گذاری شده است و محور عمودی تراز سطح آب از سطح آب‌های آزاد است. با بررسی شیب روند افت سطح آب در پیژومترها، میزان افت سطح آب در پیژومترهای واقع در قسمت شمالی گسل خشکروود، نسبت به بلوک جنوبی، بیشتر است و نشان دهنده افت سریع‌تر سطح ایستابی در بخش شمالی گسل هست که مقدار زیادی از این تفاوت نرخ افت به دلیل جدایش هیدرولیکی القا شده بر اثر گسل خشکروود است.

سری زمانی روند تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی در پیژومترهای بلوک شمالی و جنوبی نزدیک به خط گسل خشکروود: یکی از اثرات تأثیر گسل‌ها بر آب‌های زیرزمینی بر ارتباط هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی است. بدین منظور برای مطالعه تأثیر گسل خشکروود بر ارتباط هیدرولیکی آبخوان دشت زرنديه، سری زمانی تغییرات سطح آب را در طرفین گسل خشکروود مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از بین پیژومترهایی که در دشت زرنديه قرار دارند ۱۸ عدد از پیژومترهایی که در طرفین گسل هستند انتخاب شد که موقعیت این پیژومترها در شکل ۱۷ آمده است. داده‌های استفاده شده، اندازه‌گیری‌های ماهیانه سطح آب در پیژومترها است. با توجه به اینکه داده‌های مربوط به تراز سطح ایستابی بین سال‌های ۸۷ تا ۹۰ دارای کامل‌ترین آمار هستند، داده‌های ۴۸ ماه از همین دوره نیز برای تفسیر سری‌های زمانی در نظر گرفته شد. در ادامه اقدام به تعیین روند تغییرات تراز



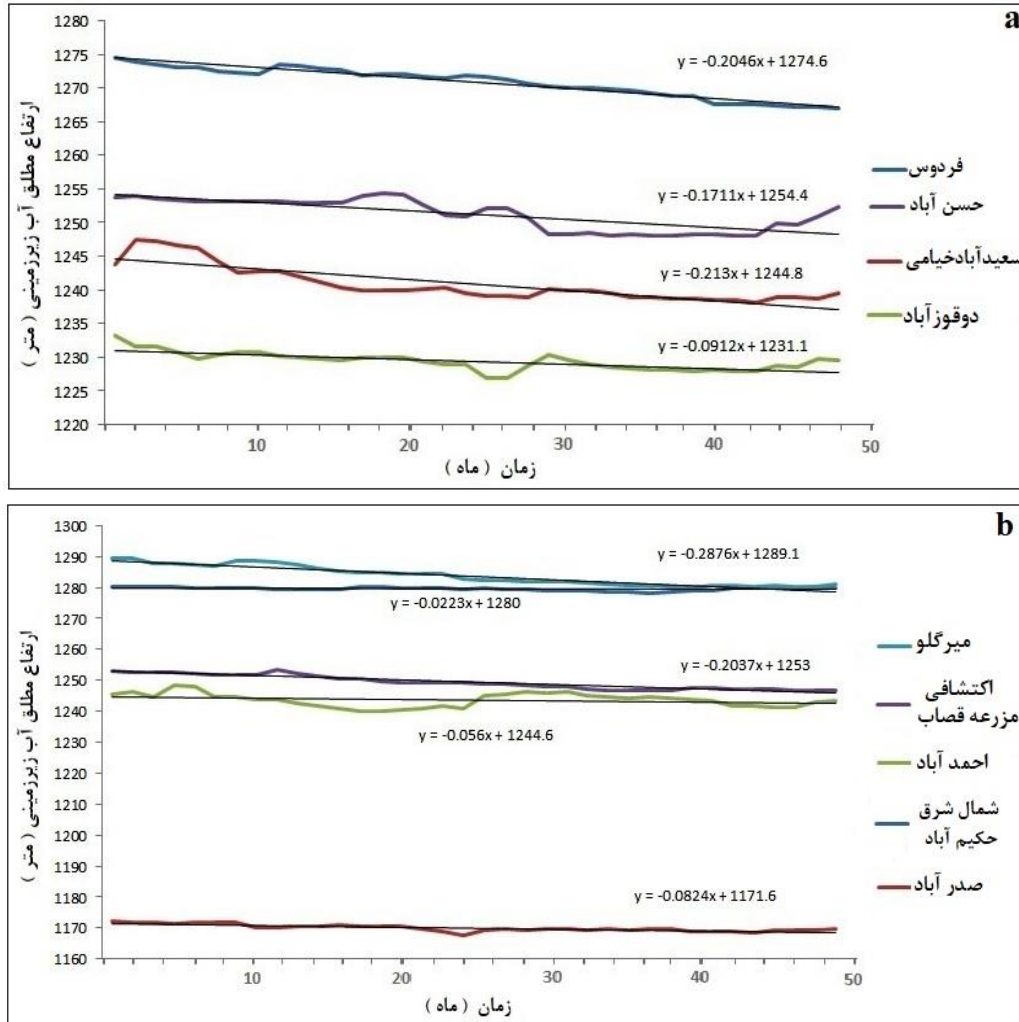
شکل ۱۷. محل پیژومترهای انتخابی اطراف گسل خشکروود

خشکروود وارد دشت می‌شود تا فاصله بیش از ۲۰ کیلومتری زیاد است (پیژومترهای فردوس و جاده خرقان و همچنین پیژومترهای بهارداشت و مزرعه قصاب) و از این محل به بعد این اختلاف کمتر می‌شود تا حدی که روند افت دیگر پیژومترهای دوتایی طرفین گسل تقریباً از یک رژیم پیروی می‌کند و اختلاف آن‌ها به حداقل می‌رسد. از این موضوع می‌توان این‌چنین برداشت کرد که عدم شباهت بین روند افت در پیژومترهایی که در محدوده غربی آبخوان قرار گرفته‌اند نشان از عدم ارتباط هیدرولیکی بین دو سمت گسل، در این منطقه است و شباهت بین روند افت

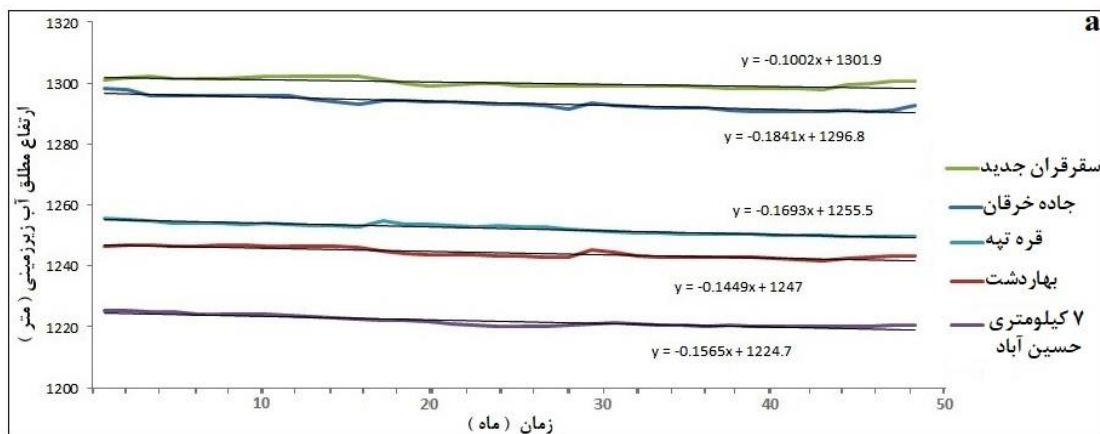
سری زمانی روند تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی در پیژومترهای نزدیک و مقابل هم در طرفین خط گسل خشکروود: برای درک بهتر تأثیر گسل خشکروود بر آبخوان، آمار پیژومترهایی که در طرفین گسل و روبه‌روی هم قرار دارند با هم مقایسه شد. روند تغییرات در این پیژومترها در نمودارهای شکل ۲۰ نمایش داده شده است. با مطالعه دوبه‌دو پیژومترهای مقابل هم که در طرفین گسل قرار گرفته‌اند مشاهده می‌شود که روند تغییرات سطح آب پیژومترهای مقابل هم متفاوت است. به طوری که این اختلاف در روند تغییرات، از غرب آبخوان که گسل

هیدروژئولوژیکی و هیدرولیکی شامل تغییرات محسوس حاصل از آنالیز سری زمانی تغییرات بلند مدت سطح ایستابی در طرفین گسل مورد بررسی قرار دادند.

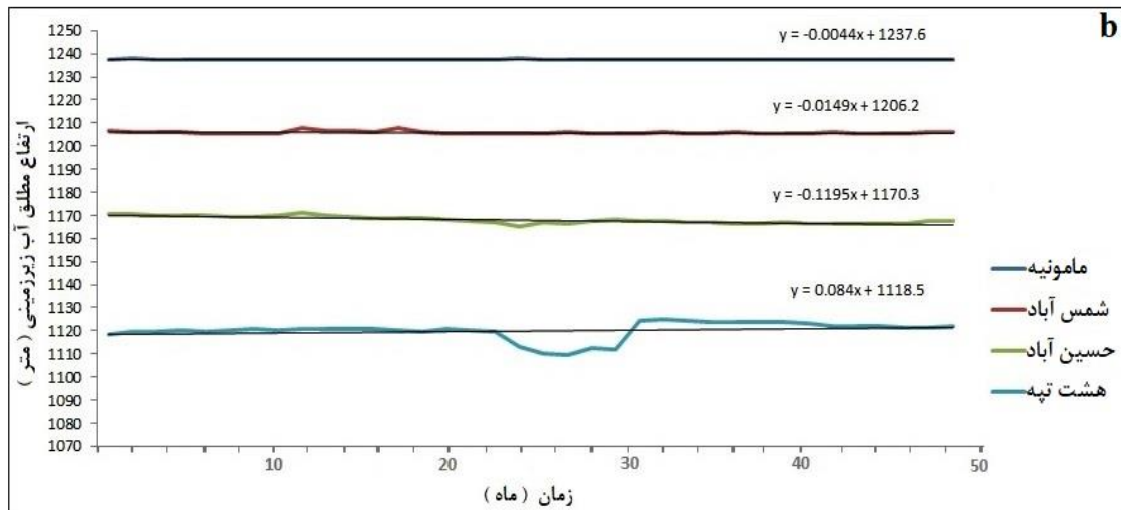
در پیزومترهای مرکزی و شرقی، نشان از ارتباط هیدرولیکی در این منطقه از آبخوان است. نوری و همکاران (۱۳۹۵) و رجب‌پور و واعظی هیر (۱۳۹۶) و کنگی و ارجمند (۱۳۹۸) در تحقیقات خود نیز شواهد



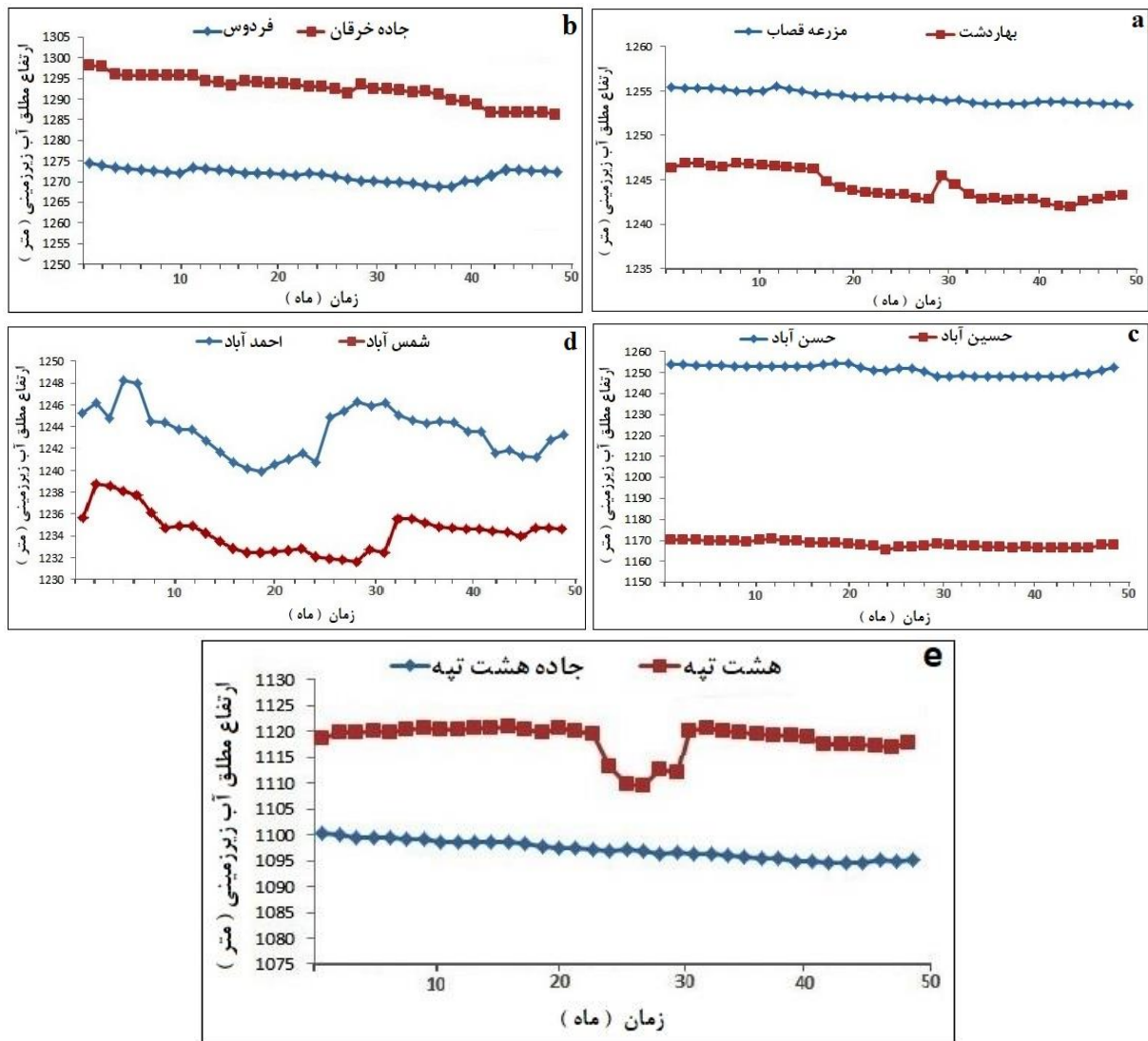
شکل ۱۸. نمودار روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای شمالی نزدیک به گسل خشک‌رود (a) قسمت غربی دشت و (b) قسمت شرقی دشت.



شکل ۱۹. نمودار روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای جنوبی نزدیک به گسل خشک‌رود، (a) قسمت غربی دشت.



ادامه شکل ۱۹. نمودار روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در پیژومترهای جنوبی نزدیک به گسل خشک‌رود، (b) قسمت شرقی دشت.

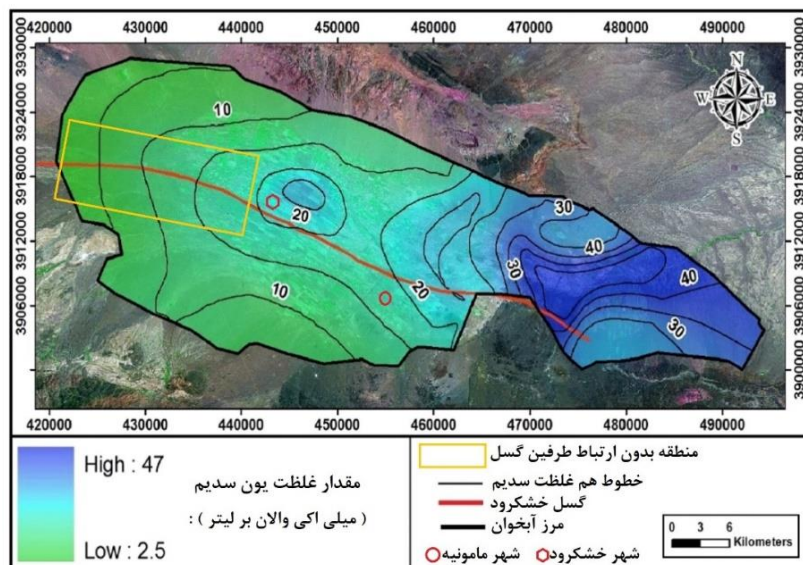


شکل ۲۰. نمودار روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دو پیژومتر طرفین گسل (a) پیژومترهای فردوس و جاده خرقان، (b) پیژومترهای بهاردشت و مزرعه قصاب، (c) پیژومترهای حسن آباد و حسین آباد، (d) پیژومترهای احمدآباد و شمس‌آباد و (e) پیژومترهای هشت تپه و جاده هشت تپه.

بی‌کربنات، نسبت به یون‌های دیگر را، می‌توان به دلیل وجود رخنمون‌های واحدهای کربناته در اطراف آبخوان و همچنین وجود اراضی و فعالیت‌های کشاورزی و پوشش گیاهی خاک در نقاط میانی و شرقی دشت که منجر به تولید CO_2 شده و انحلال آن توسط آب‌های جاری و سطحی و نفوذ آن به درون آبخوان، نسبت داد. با توجه به نتایج پراکندگی غلظت پارامترها در آبخوان از اندرکنش جریان آب‌های سطحی با آب زیرزمینی و مسیر حرکت آن پیروی می‌کند به این صورت که غلظت پارامترهای مورد بررسی در سمت غربی آبخوان کم و با حرکت به سمت شرق بر مقدار آن افزوده می‌شود. غلظت املاح و یون‌های موجود در آب زیرزمینی در نواحی وسط دشت و نواحی پایین‌دست شرقی، ناشی از مسافت زیادی است که آب‌های زیرزمینی از نواحی بالادست غرب و جنوب غربی طی می‌نمایند و با حرکت به سمت شرق، ذرات آبرفت تشکیل‌دهنده آبخوان ریزدانه شده و زمان تماس آب با املاح زیادتر شده و در نتیجه نمک‌های زیادی را در خود حل می‌کند و موجب افزایش میزان املاح آب می‌شوند. با توجه به نقشه‌های پراکندگی غلظت پارامترهای هیدروشیمیایی آبخوان، از ابتدای محل ورود گسل خشک‌رود به آبخوان تا حوالی شهر خشک‌رود که بیش از ۲۳ کیلومتر طول دارد، پارامترهای هیدروشیمیایی در بین دو طرف گسل ارتباطی وجود ندارد و گسل به صورت سد هیدرولیکی عمل کرده است؛ اما در قسمت‌های میانی و شرق گسل، تبادلات املاح و یون‌های موجود برقرار است. (شکل ۲۱).

همان‌طور که مشاهده می‌شود دو پیژومتر هشت تپه و جاده هشت تپه که در قسمت جنوب شرقی آبخوان قرار گرفته‌اند نیز تا حدودی رفتار متفاوتی نشان می‌دهند که این می‌تواند به دلیل تراکم چاه‌های بهره‌برداری و تراکم برداشت آب در نزدیکی یکی از پیژومترها باشد و باید این نکته را نیز خاطر نشان کرد که مقدار افت سطح ایستابی به طور مستقیم وابسته به میزان برداشت از آبخوان است؛ بنابراین برای مطالعه تأثیر عوامل زمین‌شناسی بر آبخوان، نمی‌توان فقط به بررسی اختلاف روند تراز سطح آب پرداخت و این بررسی باید توسط شواهد دیگر نیز صحت‌سنجی شود. از جمله شواهد دیگری که می‌تواند وجود داشته باشند، جهت جریان آب زیرزمینی در نزدیکی گسل و مطالعات هیدروشیمی است.

ارزیابی تغییرات هیدروشیمی آب زیرزمینی در طرفین خط گسل خشک‌رود: کیفیت و هیدروشیمی منابع آب زیرزمینی منطقه با استفاده از داده‌های آنالیز هیدروشیمیایی منابع انتخابی نمونه‌برداری شده در شهریورماه سال ۱۳۹۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. (شکل ۱۴). با توجه به نقشه‌های توزیع مکانی هدایت الکتریکی و غلظت یون‌های مذکور مشاهده می‌شود که به جز یون بی‌کربنات، مابقی دارای روند نسبتاً منظم افزایش غلظت هستند به طوری که کمترین مقدار غلظت در قسمت‌های غرب و جنوب غربی هستند و مقدار غلظت آن‌ها از غرب به سمت نقاط میانی و شرق دشت که محل خروجی آبخوان و آب‌های سطحی هست دارای روند افزایشی هستند. روند تغییرات متفاوت و متغیر غلظت یون



شکل ۲۱. نقشه پراکندگی غلظت یون سدیم و محدوده فاقد ارتباط بین دو طرف گسل

نتیجه‌گیری

دائمی در این منطقه و محدودیت دیگر عوامل تغذیه‌ای، در مقایسه با حجم بهره‌برداری فعلی، بسیار محدود و ناچیز است و همچنین با توجه به مشخص شدن تأثیر محدودکننده گسل خشک‌رود بر آبخوان و تقسیم آبخوان به دو بلوک شمالی و جنوبی لازم است تا در جهت حفظ و بهره‌برداری بهینه و پایدار از ذخایر منابع آب زیرزمینی محدود در کل آبخوان به خصوص در قسمت بلوک جنوبی که در اثر تأثیر گسل خشک‌رود دارای ضخامت آبرفت کمتری نسبت به بلوک شمالی است، سیاست‌های مدیریتی و حفاظتی کنترل حجم بهره‌برداری از طریق وسایل اندازه‌گیری سالم و قابل رصد و تحویل حجمی آب به بهره‌برداران و جلوگیری از اضافه برداشت پروانه‌های بهره‌برداری چاه‌ها توسط اداره منابع آب و کنترل ساعت کارکرد و میزان برق مصرفی چاه‌ها برابر ضوابط و پروانه‌های بهره‌برداری چاه‌ها توسط اداره توزیع برق اعمال شود و همچنین با توجه به نتایج و پیشنهادها پژوهش‌نحعی و همکاران (۱۴۰۰) در دشت زرنندیه لازم است نسبت به اتخاذ و اجرایی نمودن تصمیمات مدیریتی مصرف بهینه آب زیرزمینی استخراج شده از طریق اصلاح نوع کشت و روش آبیاری توسط اداره جهاد کشاورزی اقدام شود. لازم است تا در طراحی و حفر چاه در حوالی و مناطق نزدیک به خط گسل جهت جلوگیری از جمع‌شدگی و پاره شدن جدار چاه‌های عمیق تمهیدات لازم اعمال گردد؛ در طول چند سال اخیر در تعدادی از چاه‌های نزدیک به خط گسل در منطقه حسین‌آباد، جدار چاه به صورت دوره‌ای و تکراری دچار کج‌شدگی شده است که پیشنهاد می‌گردد با طرح تحقیقات جدید اعم از بررسی فرونشست و عملکرد تکنونیک‌های این گسل در این منطقه مورد بررسی قرار گیرد؛ همچنین انجام آزمایش‌های ردیابی جهت مطالعه گسترده‌تر تأثیر این گسل بر آبخوان پیشنهاد می‌گردد.

منابع

ادریس‌نیا، س.، پهلوانروی، ا.، مقدم‌نیا، ع.، نظری سامانی، ع. ا.، و میری، ع (۱۳۹۶) بررسی نقش عوامل ساختاری در فراوانی منابع آب منطقه کارستی مهارلو با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS، نشریه مرتع و آبخیزداری، شماره ۲، ص ۲۶۳-۲۷۵.

الیاسی، م (۱۳۹۳) مبانی زمین‌شناسی ساختمانی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۲۰ ص.

نتایج کلی حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که گسل خشک‌رود بر شکل و هندسه آبخوان و همچنین بر خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان تأثیر مستقیمی دارد، به طوری که هندسه آبخوان به صورت هم‌کشیدگی غربی-شرقی دشت، و در امتداد این گسل به وجود آمده است؛ گسل خشک‌رود با عبور از داخل آبخوان و با امتداد غربی-شرقی خود آبخوان دشت زرنندیه را به دو بلوک شمالی و جنوبی در طرفین گسل تقسیم نموده است. عملکرد گسل نرمال خشک‌رود باعث شده است تا ارتفاع سنگ کف آبخوان در بلوک جنوبی در تراز بالاتری نسبت به بلوک شمالی قرار بگیرد و همچنین این گسل باعث به وجود آمدن بیشترین ضخامت آبرفت آبخوان در بلوک شمالی، و کمترین ضخامت آبرفت آبخوان در بلوک جنوبی و حاشیه‌های جنوبی آبخوان، شده است. علاوه بر تأثیر بر هندسه آبخوان، نتایج بررسی جهت جریان آب زیرزمینی و روند تغییرات سطح ایستابی آب و بررسی پراکندگی غلظت پارامترهای هیدروشیمیایی در طرفین گسل خشک‌رود نشان‌دهنده تأثیرات هیدروژئولوژیکی گسل خشک‌رود بر آبخوان است به طوری که در غرب محدوده و از ابتدای محل ورود گسل خشک‌رود به آبخوان تا حوالی شهر خشک‌رود که بیش از ۲۳ کیلومتر طول دارد، جریان عرضی در گسل وجود ندارد و جهت جریان به موازات خط گسل است و گسل به صورت یک سد هیدرولیکی عمل کرده و ارتباط هیدرولیکی دو سمت گسل و تبادلات املاح و یون‌های موجود قطع است. اما از حوالی شهر خشک‌رود و در امتداد خط گسل از شهر خشک‌رود به سمت شرق دشت، ارتباط هیدرولیکی بین دو طرف گسل برقرار است و جهت جریان به صورت عبور عرضی از گسل است و بین دو طرف خط گسل تبادلات املاح و یون‌های موجود برقرار است. در تحقیقات نوری و همکاران (۱۳۹۵) و رجب‌پور و واعظی هیر (۱۳۹۶) و کنگی و ارجمند (۱۳۹۸) نیز شواهد هیدروژئولوژیکی و هیدرولیکی در طرفین گسل، حاکی از رفتار مانع‌وار گسل در مقابل عبور جریان آب زیرزمینی از عرض گسل و تغییرات کیفی آب زیرزمینی در طرفین گسل در قسمت‌هایی از مناطق مورد مطالعه است که این مسئله تأثیر شگرف پدیده‌های زمین‌شناختی نظیر گسل بر کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. تغذیه مستمر این آبخوان به دلیل عدم وجود رودخانه

محمدزاده، ح.، زندوکیلی، ز.، و رحیمی، ب. (۱۳۹۶) بررسی پارامترهای ساختاری و الگوی شکستگی‌ها و معماری زون‌های گسلی و ساختار نفوذپذیری گسل‌ها و نقش آن در نفوذ و زهکشی و فرار آب از سازند تیرگان در منطقه قوری میدان، نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۴، ص ۷۶-۸۶.

محمدی، م. ک (۱۳۹۳) بررسی نقش گسل خشک‌رود بر رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوان زرنديه ساوه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

معاشی، س. م (۱۴۰۰) نقش گسل‌های منطقه تشان در ظهور چشمه‌ها و تأثیر آن‌ها بر ترکیب شیمیایی آب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

نادری، ط.، پورکرمانی، م.، شفیعی‌بافتی، ا.، امینی‌زاده، م. ر و بوذری، س (۱۳۹۶) بررسی نفوذپذیری ساختارهای همراه با پهنه‌های گسلی (گسل کوهبنان، شمال کرمان، ایران مرکزی)، نشریه علوم زمین، شماره ۱۰۴، ص ۲۶۷ - ۲۸۰.

ناصری، ح.، و سرور، ع (۱۳۸۷) نقش گسل خزر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: محدوده ساری- گرگان)، نهمین همایش سالانه انجمن زمین‌شناسی ایران.

نخعی، م.، حسنی، ع.، مقیمی، ه.، عباس‌نویں‌پور، ا (۱۴۰۰) پیش‌بینی اثرات ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه بر آبخوان دشت زرنديه استان مرکزی با استفاده از نرم‌افزار GMS. مجله هیدروژئولوژی، شماره ۲، ص ۲۹ - ۱۳.

نوری، م (۱۳۹۱) بررسی نقش گسل تبرته بر رفتار هیدروژئولوژیکی دشت اراک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی.

نوری، م.، اشجاری، ج.، و عظیمی، م. ر (۱۳۹۵) بررسی نقش هیدرولیکی زون گسلی تبرته در آبخوان دشت اراک، بیستمین همایش سالانه انجمن زمین‌شناسی ایران.

نوگل‌سادات، ع.، هوشمندزاده، ا (۱۳۶۳) نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی ساوه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.

نوگل‌سادات، م. ع. ه (۱۹۷۸) نقشه تقسیم‌بندی بر اساس ویژگی‌های ساختاری و روند آن‌ها، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.

هاشمی، س. ن.، تقی‌پور، ن.، قوشی، م.، زارع، ح (۱۳۸۹) بررسی نقش گسل‌های عمده در کنترل فراوانی منابع آب زیرزمینی استان سمنان، مجموعه مقالات اولین همایش ملی بهره‌برداری از منابع آب، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، ص ۱۵-۲۴.

Alves, R. D. S., Lucena, L. R. F. D (2022) Numerical modeling of NE Brazil coastal

ایزدی‌کیان، ل.، حسینی‌دوست، س. ج.، صدیقی، ا (۱۳۹۳) زمین‌شناسی ساختاری، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا.

پایدار، م (۱۴۰۰) بررسی گسل‌ها و شکستگی‌ها در شناسایی جریان آب زیرزمینی کارگاه استخراج معدن سنگ‌آهن سه چاهون، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.

ده‌بزرگی، م.، و رضایی، م (۱۳۹۴) تأثیر گسل‌های فعال در کواترنری بر فراوانی آب‌های زیرزمینی حوضه مهارلو زاگرس مرکزی. فصلنامه کواترنری ایران، شماره ۴، ص ۲۸۱-۲۹۱. رجب‌پور، ح.، و واعظی‌هیر، ع (۱۳۹۶) بررسی تأثیر گسل شمال تبریز بر ویژگی‌های کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی مجاور در شرق تبریز، نشریه زمین‌شناسی ایران، شماره ۴۲، ص ۱۴۱ - ۱۵۳.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی (۱۳۹۱) مطالعات پایه منابع آب، گزارش مطالعات ژئوالکتریک دشت زرنديه. شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی (۱۳۹۶) گزارش ممنوعیت دشت زرنديه.

صداقت، م.، معماریان، ح (۱۳۸۹) زمین‌شناسی فیزیکی: فرایندهای بیرونی: خودآموز، هدف‌دار، برنامه‌ریزی شده، دانشگاه پیام‌نور.

صداقت، م.، معماریان، ح (۱۳۹۸) زمین‌شناسی فیزیکی، فرایندهای درونی، دانشگاه پیام‌نور.

عالی‌انوری، ع (۱۳۹۸) بررسی رفتار هیدرولیکی گسل‌ها و مدل‌های رفتاری حاکم بر آن‌ها، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۳، ص ۵۷ - ۶۴.

عزیزخانی، ف (۱۴۰۰) تأثیر گسل قلعه حاتم بر خصوصیات کمی و کیفی آب زیرزمینی در آبخوان غرب بروجرد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.

علیچانی، ف.، ناصری، ح.، امیرافضلی، م.، و شماسی، ع (۱۳۹۷) تأثیر گسل دورود بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی دشت دورود بروجرد، نشریه تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۲، ص ۱۶۳ - ۱۷۳.

کنگی، ع.، و ارجمند، م (۱۳۹۸) گسل طوس مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده رفتار هیدرولیکی بخش شمالی آبخوان دشت مشهد، نشریه فصلنامه زمین‌شناسی محیط‌زیست، شماره ۴۷، ص ۳۱ - ۳۸.

کیانی، ط.، و یوسفی، ز (۱۳۹۶) نقش گسل فعال در سطح تراز آب زیرزمینی حوضه آبریز شهرچای دشت ارومیه، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۴۷، ص ۶۱ - ۷۵.

محرابی، ع.، پورخسروانی، م (۱۳۹۸) ارتباط بین منابع آب زیرزمینی و گسل‌های کواترنری دشت سیرجان با روش وزن‌های نشان‌گر، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ص ۱۷۵-۱۸۲.

- of the Dili fault in Central Taiwan, *Journal of Engineering Geology*, 308:106805.
- Hussain, Y., Campos, J. E. G., Borges, W. R., Uagoda, R. E. S., Hamza, O., Havenith, H. B (2022) Hydrogeophysical Characterization of Fractured Aquifers for Groundwater Exploration in the Federal District of Brazil. *Journal of Applied science*, 12: 2509-2528.
- Liang, S. C., Zhao, X. S., Li, S., Feng, L. H., Liu, X. L., Qin, X. M (2012) The application of GMS in numerical simulation of groundwater and faults disposing in Gaizi River Source, China. *Advanced Materials Research*, 518-523(5): 4047 – 4056.
- Lin, L., Lin, H., Xu, Y., Ntuli, T., Mahlangu, F (2015) Impact Fault Structure on the Occurrence of Groundwater in Fractured Rock Aquifers, Water Research Commission, South Africa. WRC Report No 2053/1/14
- Loveless, S., Bense, V., Turner, J (2011) fault architecture and deformation processes within poorly lithified rift sediments, central Greece. *Journal of Structural Geology*, 33: 1554-1568.
- McCallum, J. L., Noorduijn, S. L., Simmons, C. T (2021) Including Vertical Fault Structures in Layered Groundwater Flow Models, Australia, *Journal of Groundwater*, 59(6): 799-807.
- Romano, V., Bigi, S., Carnevale, F., Hyman, J. D. H., Karra, S., Valocchi, A., Tartarello, M. C., Battaglia, M (2020) Hydraulic characterization of a fault zone from fracture distribution, Italy. *Journal of Structural Geology*, 135: 104036.
- Seaton, W. J., Burbey, T. J (2005) Influence of ancient thrust faults on the hydrogeology of the blue ridge province, Virginia. *Journal of GroundWater*, 43(3): 301-313.
- Sproule, TG., Spinelli, GA., Wilson, J. L., Fort, M. D., Mozley, P. S., Ciarico, J (2021) The Effects of Fault-Zone Cementation on Groundwater Flow at the Field Scale, central New Mexico. *Journal of GroundWater*, 59(3): 396-409.
- Yuan, R., Song, X., Zhang, Y., Han, D., Wang, S., Tang, C (2011) Using major ions and stable isotopes to characterize recharge regime of a fault-influenced aquifer in Beiyishui River Watershed, North China Plain. *Journal of Hydrology*, 405: 3–4.
- aquifer: Fault controlled conduits for seawater intrusion, *Journal of South American Earth Sciences*, 117: 103872.
- Bauer, H., Schröckenfuchs, T. C., and Decker, K (2016) Hydrogeological properties of fault zones in a karstified carbonate aquifer (Northern Calcareous Alps, Austria). *Hydrogeology Journal*, 24: 1147-1170.
- Bense, V. F., Person, M. A (2006) Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers, Louisiana, *Journal of Water Resources Research*, 42(5).
- Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O., Scibek, J (2013) Fault Zone Hydrogeology, *Earth-Science Reviews Journal*, 127: 171–192.
- Bense, V. F., Van den Berg, E. H., Van Balen, R. T (2003) Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments; the Roer Valley Rift System, *Hydrogeology Journal*, 11: 319–332.
- Caine, J. S., Evans, J. P., Forster, C. B (1996) Faults zone architecture and permeability structure, Utah. *Geology Journal*, 24 (11): 1025-1028.
- Cervantes-Medel, A., Armienta, M. A (2004) Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico, *Geofisica International Journal*, 43(3): 477-493.
- Cook, P. G., Banks, E. W., Marshall, S. K., Harrington, G. A., Batlle-Aguilar, J., Dogramaci, S., Turnadge, C (2022) Inferring fault hydrology using groundwater age tracers, *Journal of Hydrology*, 610: 127905.
- Delinom, R. M (2009) Structural geology controls on groundwater flow: Lembang Fault case study, West Java, Indonesia, *Hydrogeology Journal*, 17: 1011–1023.
- Faunt, C. C (1997) Effect of Faulting on Ground-Water Movement in the Death Valley Region, Nevada and California. US Geological Survey WaterResources Investigations Report, 95-4132, 42p.
- Fronzi, D., Mirabella, F., Cardellini, C., Caliro, S., Palpacelli, S., Cambi, C., Valigi, D., Tazioli, A (2021) The Role of Faults in Groundwater Circulation before and after Seismic Events: Insights from Tracers, Water Isotopes and Geochemistry. *Journal of Water*, 13(11): 1499.
- Hadley, D. R., Abrams, D. B., Roadcap, G. S (2019) Modeling a Large-Scale Historic Aquifer Test: Insight into the Hydrogeology of a Regional Fault Zone, *Journal of GroundWater*, 58(3): 453-463.
- Hsu, S. M., Ke, C. C., Dong, M. C., Lin, Y. T (2022) Investigating fault zone hydraulic properties and groundwater potential in a fault-dominated aquifer system: A case study

The role of Khoshkarud fault on hydrogeological behavior of Zarandieh Saveh aquifer

M. K. Mohammadi¹, H. Karimi^{2*} and A. Hasani³

1- M. Sc. of Hydrogeology, water and waste water company of Isfahan province, Isfahan, Iran

2- Assoc. Prof., of Hydrogeology, Range and Watershed Management Department, Ilam University, Ilam, Iran

3- M. Sc. of Geology- Hydrogeology, Zarandieh, Saveh, Iran

* Haji.karimi@gmail.com

Received: 2022.10.21 Accepted: 2023.1.3

Abstract

Correct exploitation of groundwater water resources in any area requires knowledge of geological and hydrological features and structures of that area. Tectonic structures, especially faults, have a major impact on the abundance and quality of groundwater resources. The purpose of this research is to investigate the effect of Khoshkarud fault on the hydrogeological characteristics of the aquifer of Zarandieh Saveh plain. This aquifer is located in the north of Markazi Province. In this research, the changes in the hydrogeological parameters of the aquifer on the sides of the fault line were investigated using the data of the 21-year statistical period (1990 to 2011) and using ArcGIS 9.3 software. The results showed that the highest thickness of alluvium and the maximum transverse electrical resistance equal to 6000 ohm-m², in the center of the northern block, and lowest thickness of alluvium and the lowest value of transverse electrical resistance It is equal to 500 ohm-m², located on the southern block, which indicates the direct effect of the fault on the aquifer geometry. In the western region of the Khoshkarud fault and from the beginning of the fault's entrance to the aquifer to the vicinity of Shokhrud city, 23 km long, due to the absence of transverse flow from the fault and the flow direction being parallel to the fault line, the dissimilarity of the water level drop trend in the piezometers opposite and on the sides of the fault in the 48-month time series (2008 to 2011) and the dissimilarity of the distribution map of the concentration of hydrochemical parameters sampled in September 2011 on the sides of the fault, shows that in the western part of the aquifer, the fault acts as a hydraulic barrier, While in other parts of the fault extension, there is a connection.

Keywords: Aquifer, Khoshkarud fault, Hydraulic barrier, Zarandieh Saveh Plain