

کاربرد توموگرافی ژئوالکتریک در شناسایی تاثیر گسل‌ها بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی بادرود، جنوب شرق کاشان

حمیدرضا ناصری^(۱)، فرشاد علی‌جانی^(۲)، مرتضی درویش سدهی^(۳) و فائزه فلسفی^(۳)

۱. استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶

چکیده

این مطالعه به بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی آبخوان دشت بادرود، واقع در جنوب شرق کاشان، پرداخته است. با توجه به تفاوت‌های قابل توجه در مقادیر املاح و پارامترهای هیدروشیمیایی در بخش‌های مختلف دشت، احتمال وجود ساختارهای مدفون مانند گسل‌ها به عنوان عامل ناهنجاری هیدروژئولوژیک وجود دارد؛ از این رو تلاش شده است تا تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر منابع آب زیرزمینی و بهبود مدیریت این منابع در دشت بادرود بررسی شود. روش پژوهش شامل جمع‌آوری داده‌های هدایت الکتریکی، pH و دما (از ۴۰ نمونه آب زیرزمینی در دو دوره اردیبهشت و تیر ۱۳۹۷) و استفاده از روش‌های ژئوالکتریک با آرایه شلومبرژه در سه پروفیل و ۶۱ نقطه سونداژ است. تفسیر داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای IPI2win و RES2DINV برای مدل‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که آبخوان دشت بادرود از نظر پارامترهای هیدروشیمیایی دارای ناهنجاری‌های قابل توجهی است که با الگوی جریان آب زیرزمینی همخوانی ندارد. نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری در عمق‌های مختلف و مقاطع توموگرافی الکتریکی نشان‌دهنده وجود حداقل یک مسیر احتمالی گسل در منطقه است که می‌تواند به عنوان عامل اصلی ناهنجاری‌های هیدروشیمیایی عمل کند. در آبخوان بادرود، این ناهنجاری ساختاری با تغییرات هیدروشیمی منطبق است و به لحاظ هیدروژئولوژی با تفاوت فاحش آبدی‌های چاه‌های آب در اطراف مشخص می‌شود. این یافته‌ها بر لزوم توجه به عوامل تکتونیکی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید می‌کند. همچنین با ادغام روش‌های ژئوالکتریک و تحلیل‌های هیدروشیمیایی، رویکردی نوین برای شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی مدفون و بررسی اثرات آن‌ها بر کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، بادرود، توموگرافی، گسل، ناهنجاری هیدروژئولوژی، هیدروشیمیایی

مقدمه

گسل‌های فعال و غیرفعال می‌توانند بر هیدروژئولوژی آبخوان‌ها تأثیرگذار باشند. بررسی تأثیر گسل‌ها بر آب‌های زیرزمینی از دو جنبه کمی و کیفی اهمیت دارد. از نظر کمی، گسل‌ها می‌توانند باعث افزایش یا کاهش هدایت هیدرولیکی آبخوان‌ها شوند. این موضوع بطور مستقیم بر مقدار آب قابل استخراج تأثیر می‌گذارد. از نظر کیفی، گسل‌ها می‌توانند باعث تغییرات شیمیایی در آب‌های زیرزمینی شوند؛ به‌عنوان مثال، افزایش غلظت سولفات، کلر و سایر یون‌ها را می‌توان به حضور گسل‌ها نسبت داد. در این راستا، مطالعاتی مانند لی و همکاران (Li et al., 2022) در استان یوننان چین، نشان داده‌اند، گسل‌ها می‌توانند باعث ایجاد ناهنجاری‌های هیدروشیمیایی در آب‌های زیرزمینی شوند. این موضوع می‌تواند برای مدیریت منابع آب بسیار حائز اهمیت باشد. گسل‌ها در مقیاس محلی و ناحیه‌ای می‌توانند سیستم جریان آب زیرزمینی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند (Bense et al., 2003). تغییرات واضح در ضخامت آبخوان، جنس سنگ کف، شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی، و جریان‌های کانالیزه در امتداد گسل در ارتباط با عملکرد گسل است (Rajabpour et al., 2016). در مناطقی که گسل جریان‌های عمیق آب زیرزمینی را بالا می‌آورد، حرکت آب‌های نیمه گرم و شور عمقی باعث رخداد ناهنجاری‌های بارز در کیفیت آبخوان می‌شود. آلپ و همکاران (Alp et al., 2024) به منظور ارزیابی تأثیر پاره گسل‌های جدید گسل فعال آئاتولی به بررسی ژئوالکتریکی در اطراف دریاچه کوچک‌چکمجه^۱ پرداختند. نتایج ۱۴ سونداژ برداری الکتریکی عمودی معکوس^۲ (VES) برای ارائه مقاطع مقاومت ویژه در برابر عمق و سه پروفیل داده توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی^۳ (ERT) دو بعدی، نشان دادند که شبکه‌ای از گسل‌ها، جدیدترین واحدهای رسوبی را قطع کرده و باعث تغییرات شدید مقاومت ویژه شده‌اند. روش‌های مختلفی برای بررسی اثرات گسل‌ها و شناسایی

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین در جهان، نقش بسزایی در تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی و خانگی ایفا می‌کنند. با این حال، عوامل مختلفی از جمله ساختارهای زمین‌شناسی، به‌ویژه گسل‌ها، می‌توانند بر کیفیت و کمیت این منابع تأثیرگذار باشند. گسل‌ها به‌عنوان ساختارهای چینه‌ای یا تکتونیک، می‌توانند مسیر حرکت آب‌های زیرزمینی را تغییر دهند و باعث تغییر در ویژگی‌های هیدروشیمیایی و هیدرولیکی آبخوان‌ها شوند. این تغییرات می‌توانند شامل افزایش یا کاهش هدایت هیدرولیکی، تغییر در ترکیب شیمیایی آب و حتی ایجاد ناهنجاری‌های محلی در آبخوان‌ها باشند. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در ایران و سایر نقاط جهان به بررسی اثرات گسل‌ها بر آب‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021)، از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای شناسایی گسل‌های مدفون در آبخوان‌های شمال چین استفاده شد، نشان داد گسل‌ها باعث ایجاد ناهنجاری‌های هیدروشیمیایی قابل توجهی شده‌اند. همچنین، کومار و همکاران (Kumar et al., 2020) در مطالعه‌ای در هند نشان دادند که گسل‌ها می‌توانند به‌عنوان مسیرهای ترجیحی برای جریان آب‌های زیرزمینی عمل کنند و باعث افزایش غلظت املاح در مناطق مشخصی شوند. یان و همکاران (Yan et al., 2026) تغییرات ناشی از تأثیر زلزله در عناصر اصلی، عناصر کمیاب و ایزوتوپ‌های هیدروژن-اکسیژن با استفاده از داده‌های پایش با فرکانس بالا در چشمه‌های آب گرم ناحیه گسلی Xianshuihe در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۲ را مورد بررسی قرار دادند. در طی این مطالعات تجزیه و تحلیل متقابل نشانه‌های هیدروژئوشیمیایی با شواهد زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی نشان داد، ناهنجاری‌های هیدروشیمیایی ناشی از زلزله توسط (۱) تکتونیک ناحیه‌ای؛ (۲) ناهمگونی قطعه گسل و (۳) سازماندهی مجدد مسیر سیال و دینامیک برهمکنش آب و سنگ کنترل می‌شوند. در ایران نیز مطالعاتی انجام شده است. محمدزاده و همکاران (Mohammadzadeh et al., 2019) در دشت یزد-اردکان، نشان داده‌اند که

1. Küçükökmence

2. Vertical electrical sounding

3. Electrical resistivity tomography

روش مطالعه

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

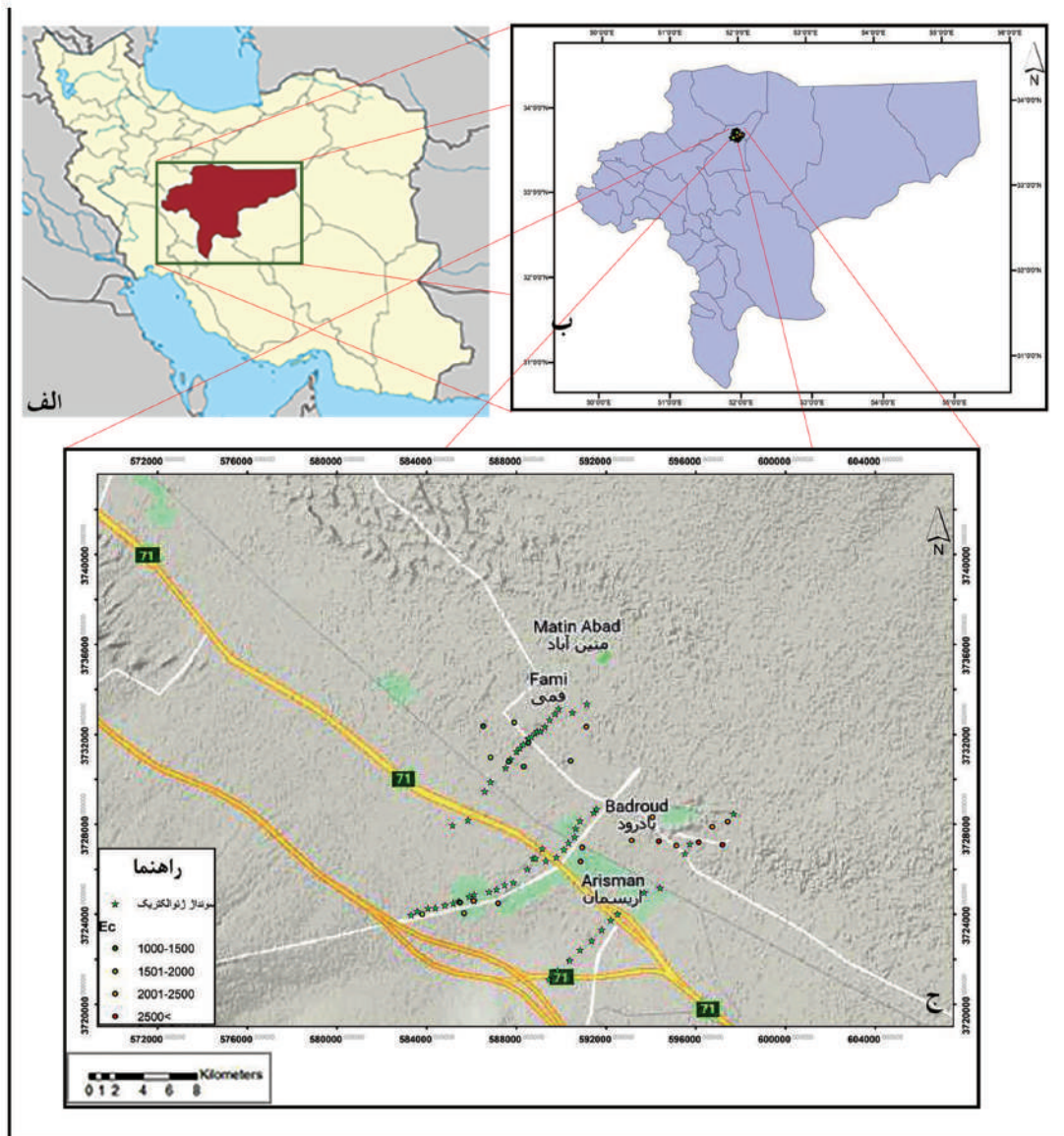
پهنه مورد مطالعه، دشت بادرود، در ۶۰ کیلومتری جنوب شرق کاشان و در ۳۰ کیلومتری شمال شهر نطنز از توابع استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). پهنه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای گرم و خشک کویری است. میانگین دمای هوا در تابستان ۳۰ درجه سانتی‌گراد و در زمستان روزها شش درجه و شب‌ها بین منفی دو تا دو درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع شهر از سطح دریا حدود ۹۵۵ متر و متوسط بارندگی سالانه در حدود ۱۰۸ میلی‌متر است (سازمان هواشناسی اصفهان، ۱۳۹۵).

طبق تقسیم‌بندی آقاناتی (۱۳۸۳) و درویش‌زاده (۱۳۸۳) پهنه مورد مطالعه در پهنه ساختاری ایران مرکزی و در نوار آتش‌فشانی ارومیه-دختر قرار دارد. یکی از ساختارهای مهم این پهنه گسل قم-زفره است و از کوه‌های جنوب غربی قم آغاز می‌شود و تا جنوب زفره در ۷۰ کیلومتری اصفهان ادامه پیدا می‌کند. پهنه مورد مطالعه بر روی دو نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ کوه لطیف و نطنز قرار دارد. به‌طور کلی در دشت، با حداکثر پهنای ۴۵ کیلومتر در ناحیه که شمال و جنوب آن ارتفاعات قرار دارند، هشت واحد مختلف زمین‌شناسی آبرفتی عهد حاضر وجود دارد (شکل ۲) و به‌طور کلی شامل مخروط افکنه پای ارتفاعات و آبرفت قدیمه می‌باشند که تا حدودی شیب توپوگرافی سطحی به سمت دشت دارند و از قطعات درشت دانه و ریزدانه تا حدی متراکم شده تشکیل شده‌اند. این واحدهای آبرفت قدیمه توسط قنات‌ها زهکشی می‌شوند. عمده سطح دشت رسوبات آبرفتی جوان با افزایش ضخامت از حاشیه به سمت مرکز دشت می‌باشند و به‌طور عمده درشت دانه و تا حدی با عدسی‌های سیلت و رسی می‌باشند. این رسوبات آبرفتی جوان، آبخوان اصلی بادرود را تشکیل داده‌اند و عمده چاه‌های پهنه در این واحد حفر شده‌اند. علاوه بر این مسیل‌های موجود مواد درشت دانه را از ارتفاعات پایین آورده به صورت کانال‌های مدفون در بین رسوبات جوان قرار داده‌اند (رهگشای، ۱۳۷۶).

آن‌ها در آبخوان‌ها وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی، به‌ویژه روش مقاومت ویژه الکتریکی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی اشاره کرد. روش مقاومت ویژه الکتریکی به‌دلیل قابلیت تشخیص تغییرات در ویژگی‌های الکتریکی زمین، ابزاری مناسب برای شناسایی گسل‌های مدفون در آبخوان‌های آبرفتی است. در این روش، با استفاده از آرایه‌های مختلفی مانند شلومبرژه، داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی جمع‌آوری می‌شوند، سپس با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند RES2DINV مورد تفسیر قرار می‌گیرند. این روش در مطالعات مختلفی از جمله در ایران (علی‌جانی و همکاران، ۱۳۹۷)، ژاپن (Wang et al., 2021) و مصر (Ahmed et al., 2020) استفاده شده است.

در مطالعات انجام‌شده در ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای شناسایی گسل‌ها و بررسی اثرات آن‌ها بر آب‌های زیرزمینی، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر معرفی شده است. به‌عنوان مثال، رحیمی و همکاران (Rahimi et al., 2021) در مطالعه‌ای در دشت کرمانشاه، از این روش برای شناسایی گسل‌های مدفون و بررسی اثرات آن‌ها بر کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. همچنین، حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2020) در مطالعه‌ای در دشت اصفهان، نشان دادند، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند یک ابزار دقیق برای شناسایی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک مرتبط با گسل‌ها باشد.

مطالعات منابع آب در پهنه مورد مطالعه (دشت بادرود واقع در جنوب شرق کاشان) نشان می‌دهد، در بخش‌های مختلف این دشت تفاوت قابل توجهی از نظر مقدار املاح وجود دارد. این ناهنجاری‌های بارز هیدروشیمی، می‌تواند در ارتباط با ساختارهای زمین‌شناسی همانند گسل مدفون در آبرفت باشد. از این رو، هدف از این مطالعه، بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی آبخوان دشت بادرود با استفاده از پارامترهای ژئوالکتریک و شناسایی احتمالی گسل‌های مدفون در این ناحیه است. این مطالعه می‌تواند به درک بهتر از تأثیرات ساختارهای زمین‌شناسی بر آب‌های زیرزمینی و مدیریت بهینه منابع آب در این ناحیه کمک کند.

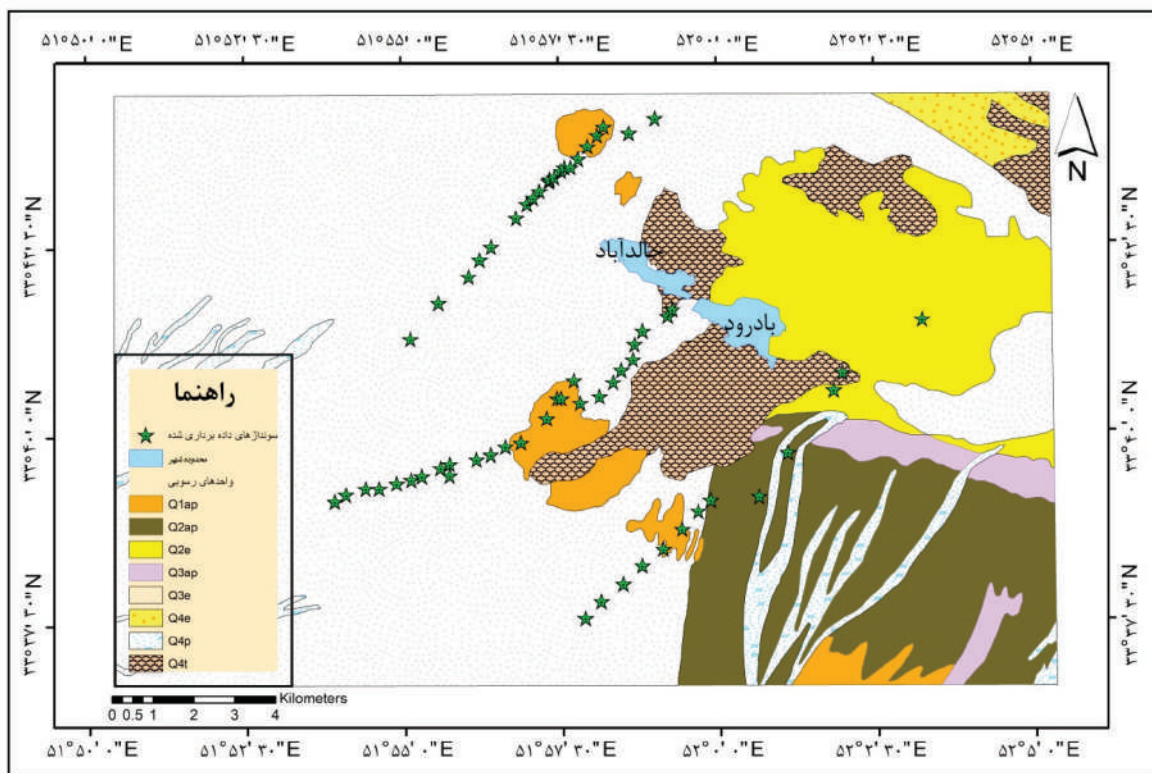


شکل ۱. نقشه موقعیت پهنه مورد مطالعه

هستند. با ارتفاع گرفتن کوه‌های اصلی در ناحیه (دشت حدفاصل بین این دو) بر اثر فشارهای تکتونیکی، شروع به پایین رفتن کردند و بستر مناسبی برای نهشته شدن رسوبات شنی و ماسه‌ای به وجود آورده است.

آبخوان آبرفتی گستره بادرود از چند دره بزرگ شامل هنجن، دره ایبانه و دره اوره تغذیه می‌شود. آبخوان از نوع آزاد است و از آبرفت ارتفاعات مجاور تشکیل شده است. یک مخروط افکنه بسیار وسیع در دامنه جنوب غربی در تغذیه آبخوان بسیار موثر است. جنس سنگ بستر در نقاط مختلف آبخوان متفاوت است و در نزدیکی ارتفاعات جنوبی از جنس

واحد رسی Q4t که زمین‌های بادرود روی آن واقع است، دارای شیب کمتر از یک درصد است. Q2e (تپه‌های ماسه بادی) در فاصله دو کیلومتری از شهر بادرود واقع شده است. آبخوان بادرود در امتداد آبرفت‌های مسیل یک جریان زیرزمینی بسیار غنی را تشکیل می‌دهند، در کف دره به آرامی به سمت پایین دست رودخانه حرکت می‌کنند. بر اثر شروع فعالیت آتش‌فشانی کرتاسه زیرین که در ائوسن به اوج خود رسیده، کوه‌های اصلی کرکس به وجود آمده و هم‌زمان به موازات آن در حدود ۵۰ کیلومتر شمال شرق ارتفاعات دم و لطیف شکل گرفتند و در اصطلاح محلی به سیاه کوه مشهور



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی پهنه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کوه لطیف و نطنز)

داشته باشد. برای مطالعه منابع آب‌های زیرزمینی بیشتر از روش ژئوالکتریک استفاده می‌شود. در این مقاله روش مقاومت ویژه الکتریکی به منظور برداشت داده‌ها و تصویرسازی الکتریکی دوبعدی برای شناسایی مسیر گسل زیرسطحی در آبخوان بادرود به کار رفته است. مقاومت الکتریکی سازندهای زمین‌شناسی در اثر حضور مستقیم آب و تغییرات آب زیرزمینی است. مقاومت کلی سازندهای زمین‌شناسی مقدار کمی به ماتریکس سنگ وابسته است و بیشتر به قابلیت هدایت الکتریکی که از طریق حرکت یون‌ها ایجاد می‌شود، بستگی دارد. با افزایش اشباع‌شدگی حفرات، مقاومت ویژه الکتریکی به صورت غیرخطی کاهش پیدا می‌کند. این تغییر مقاومت ویژه الکتریکی به سنگ‌شناسی و کل نمک‌های محلول در آب موجود در حفرات بستگی دارد. مقاومت ویژه الکتریکی یک ویژگی کلی است و مستقل از شکل، اندازه و وضعیت هندسی ذرات تشکیل دهنده ماده می‌باشد (Chandra, 2016).

آرایه شلومبرژه یکی از کاربردی‌ترین و مرسوم‌ترین آرایه‌ها است. در این پژوهش از این روش استفاده شده است. در این آرایه نقطه برداشت وسط آرایه است و الکتروود جریان و

سازندهای مارنی نئوژن و یا توده‌های آذرین و یا شیل‌های ژوراسیک است. ضخامت آبرفت نیز متغیر است و از حدود ۱۰ متر در نزدیکی ارتفاعات تا ۲۵۰ متر تغییر می‌کند. جهت آب زیرزمینی از شمال و جنوب به سمت مرکز آبخوان می‌باشد و غالب تغذیه از این بخش‌ها است. بررسی‌های ژئوالکتریک و اکتشافی مشخصی برای برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان صورت نگرفت، با اینحال در محاسبات ذخیره مخزن این آبخوان ضریب آبدی حدود چهار درصد در نظر گرفتند، و نشان‌دهنده ریز دانه بودن آبرفت در بیشتر بخش‌های آن است. وجود واحد ریز دانه شیلی و مارنی در مجاورت آبخوان تایید کننده این موضوع است. بررسی هیدروگراف آبخوان بیانگر یک افت کلی ملایم در طی دوره آماری است. در بازه زمانی ۹۷ تا ۹۹ یک افت ۱۸۰ سانتی‌متری داشته است (شیرخانی و همکاران، ۱۴۰۳).

جمع‌آوری داده‌ها

در مطالعات ژئوفیزیک با توجه به جنبه‌های اقتصادی، روشی انتخاب می‌شود که بتواند پاسخ بهتری برای حل مسائل

پتانسیل نسبت به آن قرینه‌اند؛ که فاصله بین الکترودهای جریان (فاصله AB) بسیار بیشتر از الکترودهای پتانسیل (فاصله MN) است.

در این مطالعه علاوه بر برداشت نمونه از منابع آبی ناحیه، از داده‌های هیدروشیمی بانک کیفی آب زیرزمینی دشت بادرود نیز استفاده شده است (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۶). تعداد نمونه‌های کیفی برداشت شده در مرحله اول، ۱۷ نمونه و در مرحله دوم، ۲۳ نمونه از چاه‌های بهره‌برداری است و EC، pH و دمای این چاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها با دستگاه‌های EC سنج، pH سنج قلمی و دماسنج برداشت شده است (جدول ۱). به منظور شناسایی دقیق‌تر ناهنجاری‌ها در آبخوان، داده‌برداری مقاومت ویژه الکتریکی با آرایه شلومبرژه در سه نیم‌رخ و با فواصل سونداژ حداقل ۲۰۰ متر (۶۱ سونداژ) و فاصله الکترودی جریان حداکثر $AB=600\text{ m}$ (عمق نفوذ احتمالی ۱۵۰ متر) صورت گرفته است.

روش‌شناسی

به منظور انجام مطالعات ژئوالکتریک در پهنه مورد مطالعه، در ابتدای بازدید میدانی از پهنه طرح صورت گرفت. سپس نقشه‌های هم‌پتانسیل آبخوان برای تعیین جهت جریان آب زیرزمینی تهیه شد. همچنین نقشه‌های هیدروشیمی برای تعیین ناهنجاری تهیه شدند. در نهایت بر اساس محل احتمالی گسل و دره‌های مدفون و با توجه به جهت جریان و الگوی ناهنجاری‌های هیدروشیمی، شبکه سونداژهای ژئوالکتریک در دشت طراحی شد و تلاش شد تا امتداد آن‌ها تعیین کننده عوارض پنهان در آبخوان باشد.

در ادامه با مرتب‌سازی داده‌های ژئوالکتریک، نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه ظاهری در عمق‌های مختلف تهیه و تفسیر شده است. با استفاده از داده‌های موجود نقشه هم‌مقاومت واقعی، نقشه مقاومت عرضی و نقشه رسانای الکتریکی تهیه و تفسیر شده است. نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه ظاهری دشت با استفاده از داده‌های برداشت شده در AB‌های ۳۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ متر رسم شده است.

پس از جمع‌آوری و تصحیح داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی، تفسیر یک‌بعدی داده‌ها انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از تفسیر داده‌ها، اساس مدل‌سازی زیرسطحی است؛ بنابراین تحلیل درست داده‌های مقاومت ویژه، بخش مهمی از روش مورد نظر به حساب می‌آید. لازم است بهترین روش تفسیر با کمترین خطا را انتخاب کرد. از این رو برای تفسیر داده‌های این پژوهش از نرم‌افزار IPI2win استفاده شده است این برنامه توانایی بالا و استفاده گسترده‌ای در تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و IP دارد. هدف استفاده از این نرم‌افزار، تفکیک رخساره‌های مختلف زمین‌شناسی به روش وارون‌سازی است. در عملیات وارون‌سازی پارامترهای مدل آنقدر تغییر داده می‌شود تا مقادیر به دست آمده مقاومت ویژه بیشترین شباهت را به داده‌های برداشت شده صحرائی داشته باشند.

در تفسیر نتایج، تفسیری که بهترین انطباق را با داده‌های ژئوفیزیکی و اطلاعات زمین‌شناسی و لاگ چاه‌ها داشته باشد انتخاب می‌شود. برای انتخاب بهترین تفسیر لازم است، اطلاعات زمین‌شناسی آن ناحیه از قبل جمع‌آوری شده باشد. دقت در این روش به تجربه کاربر، کیفیت دستگاه ژئوالکتریک و اطلاعات زمین‌شناسی ناحیه وابسته است. برای تفسیر بهتر یک‌بعدی داده‌ها از لاگ چاه‌های موجود استفاده شده است و در ادامه کار داده‌ها به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزار Surfer درآمد و سپس با روش کریجینگ درون‌یابی شده‌اند. این داده‌ها به محیط Arc GIS وارد شده و نقشه هم‌مقاومت ویژه ظاهری در فواصل الکتریکی مورد نیاز تهیه شده است. سپس با داشتن اطلاعات مقاومت و عمق آبخوان تا عمق مورد مطالعه (به سنگ کف برخورد نشده است) نقشه مقاومت عرضی^۱ (RT) آبخوان به دست می‌آید.

در پهنه مورد مطالعه اطلاعات لاگ ۱۰ چاه در دسترس است (شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، ۱۳۹۶). ابتدا لاگ چاه‌های موجود در ناحیه بررسی شده و در ادامه کار در هر نیم‌رخ تعدادی سونداژ در ابتدا، وسط و انتهای خط نیم‌رخ انتخاب و تفسیر یک‌بعدی آن‌ها ارائه شده است.

در این پژوهش برای تفسیر دوبعدی داده‌های مقاومت

1. Transversal Resistivity

جدول ۱. موقعیت برداشت‌ها در مرحله اول و دوم در ماه‌های اردیبهشت و تیر (۱۳۹۷) (هدایت الکتریکی (EC) بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر و دما (T) بر حسب درجه سانتی‌گراد)

UTMx	UTMy	ارتفاع (متر)	EC1	EC2	pH 1	pH 2	T	ID
۵۸۶۰۹۰	۳۷۲۴۶۰۱	۱۰۳۶	۱۶۷۲	۱۹۰۹	۶/۶	۷/۱	۲۳/۵	Well 1
۵۹۰۲۱۶	۳۷۲۶۵۱۶	۱۰۴۵	۲۲۰۰		۶/۵		۲۱/۳	Well 2
۵۸۹۴۵۶	۳۷۲۷۰۱۰	۱۰۶۰	۴۰۶۰		۶/۶		۲۳/۵	Well 3
۵۹۰۹۲۸	۳۷۲۶۹۸۴	۱۰۴۴	۱۶۲۰	۱۸۲۰	۶/۹	۷/۳۲	۲۳/۵	Well 4
۵۹۲۱۳۳	۳۷۲۷۰۵۶	۱۰۱۷	۱۸۸۰		۶/۹		۲۳	Well 5
۵۹۳۱۴۱	۳۷۲۷۲۰۴	۱۰۰۷	۱۷۶۰	۱۸۴۵	۶/۷	۷/۲۹	۲۵/۳	Well 6
۵۹۴۳۴۸	۳۷۲۷۲۵۵	۱۰۰۰	۳۲۲۲	۲۷۱۰	۶/۶	۷/۲۱	۲۵/۵	Well 7
۵۹۴۰۶۶	۳۷۲۸۳۰۹	۱۰۰۶	۲۰۶۰	۲۲۰۰	۶/۸	۷/۰۹	۲۴/۵	Well 8
۵۹۰۶۲۳	۳۷۳۰۳۴۴	۱۰۱۳	۱۶۷۳		۶/۶		۲۵	Well 9
۵۹۰۴۲۱	۳۷۳۰۸۲۳	۱۰۱۰	۱۳۵۷	۱۵۳۱	۶/۹	۷/۷۳	۲۶/۷	Well 10
۵۹۱۱۱۴	۳۷۳۲۳۴۷	۱۰۰۷	۱۹۶۸	۲۰۳۰	۶/۷	۷/۶	۲۵	Well 11
۵۹۰۹۲۱	۳۷۳۳۹۳۳	۱۰۰۴	۲۰۰۰		۶/۷		۲۳/۵	Well 12
۵۸۶۵۱۹	۳۷۳۳۳۶۴	۱۰۲۶	۱۲۴۴	۱۳۱۹	۶/۸	۷/۲۵	۲۳/۷	Well 13
۵۸۷۸۵۱	۳۷۳۲۵۴۰	۱۰۱۵	۱۴۱۵		۶/۸		۲۴	Well 14
۵۸۶۸۵۲	۳۷۳۰۹۸۴	۱۰۲۵	۱۳۴۷	۱۴۴۹	۶/۸	۷/۲۷	۲۳/۷	Well 15
۵۸۸۵۳۳	۳۷۳۱۶۳۱	۱۰۱۸	۱۹۶۷	۱۳۰۶	۶/۸	۷/۳۹	۲۵	Well 16
۵۸۳۸۰۱	۳۷۲۴۰۰۰			۱۶۳۶		۷/۲۱		Well 17
۵۹۵۱۳۳	۳۷۲۷۰۵۶	۱۰۱۷		۱۹۴۰		۷/۱۸		Well 18
۵۹۶۱۳۶	۳۷۲۷۲۱۱			۲۶۴۰		۷/۳۵		Well 19
۵۹۷۱۹۱	۳۷۲۸۱۱۳			۲۵۴۰		۷/۸۲		Well 20
۵۹۷۴۲۳	۳۷۲۸۱۱۳			۲۰۴۰		۷/۱۷		Well 21
۵۹۶۷۴۳	۳۷۲۷۸۷۳	۱۰۰۳		۲۰۲۰		۷/۸۳		Well 22
۵۸۷۱۷۹	۳۷۲۴۴۸۹			۱۸۹۰		۶/۹۶		Well 23
۵۸۷۶۵۷	۳۷۳۰۷۹۰			۱۳۶۲		۷/۳۷		Well 24
۵۸۷۹۰۲	۳۷۳۲۵۳۷			۱۵۳۰		۷/۲۵		Well 25
۵۸۸۳۳۳	۳۷۳۰۵۷۲			۱۳۳۳		۷/۳۷		Well 26
۵۸۵۴۹۴	۳۷۲۴۵۲۴			۱۳۷۰		۷/۲		Well 27
۵۸۵۶۶۵	۳۷۲۴۰۴۷			۱۴۹۸		۷/۵		Well 28
۵۹۰۸۶۱	۳۷۲۶۳۵۴			۱۹۶۰		۷/۴۱		Well 29

الکتریکی از نرم‌افزار RES2DINV استفاده شده است. بررسی هیدروشیمی آبخوان بادرود شامل نقشه‌های هم‌EC، هم‌دما و هم‌pH است. این نقشه‌ها با استفاده از داده‌های برداشت شده طی دو مرحله در ماه‌های اردیبهشت و تیر ۱۳۹۷ و داده‌های بانک کیفی پهنه مورد مطالعه در سال ۱۳۹۱ (شکل‌های ۳ تا ۵) تهیه شده است. روش مورد استفاده برای درون‌یابی تمام نقشه‌ها، روش کریجینگ در نرم‌افزار Surfer است و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه و خروجی تهیه شده است. محاسبه شده، خطای RMS گفته می‌شود.

بحث

بررسی هیدروشیمی آبخوان بادرود

در گستره مورد مطالعه هشت درجه سانتی گراد است. کمینه دما در نقشه ۲۱ درجه سانتی گراد و بیشینه دما ۲۹ درجه سانتی گراد گزارش شده است. چاه های جنوب شرقی گستره دارای بیشترین دما و چاه های شمال گستره به نسبت دارای دمای کمتری است. در شرق پهنه از شمال به جنوب دما روند افزایشی دارد. در جنوب غربی شهر بادرود تغییرات دما روند خاصی ندارد و به نوعی ناهنجاری مشاهده می شود. تغییرات pH در نقشه شکل ۵-۵-۵ بین ۷/۵ تا ۸/۵۶ است و هیچ گونه روند خاصی ندارد. با توجه به نقشه شمال و جنوب گستره نسبت به مرکز گستره دارای pH کمتری است و از شرق به غرب ناهنجاری های زیادی مشاهده می شود.

آبخوان دشت بادرود دارای تغییرات زیاد در مقدار پارامترهای هیدروشیمی است. این تغییرات در مرکز گستره و جنوب دشت بادرود به نسبت زیاد است. با توجه به مسیر حرکت آب زیرزمینی در آبخوان که از غرب و جنوب غرب به سمت شمال شرق است، این تغییرات در ارتباط با حرکت آب در آبخوان نیست و آبخوان از نظر پارامترهای هیدروشیمی دارای ناهنجاری های زیادی است.

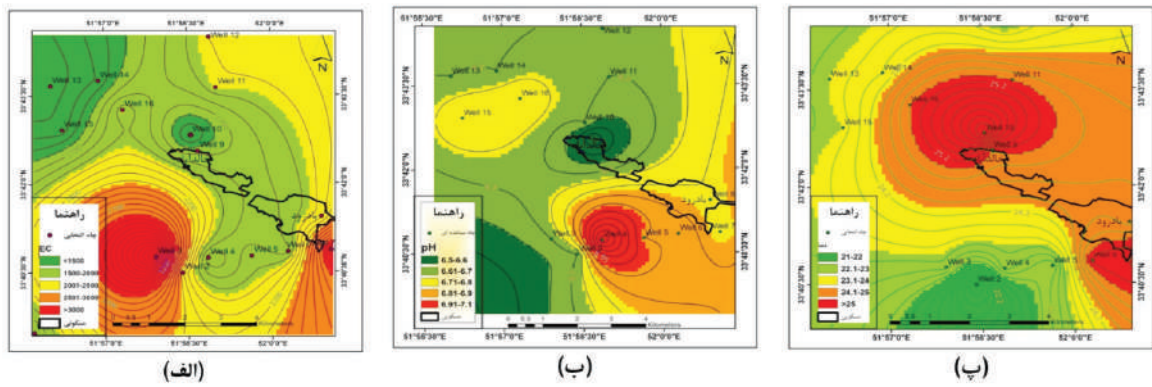
تفسیر یک بعدی داده های ژئوالکتریک

در شکل ۶، مدل الکتریکی و تفسیر یک بعدی سونداژها و ویژگی های لایه های سونداژهای منتخب ارائه شده است. در نیم رخ A-AA و نیم رخ C هر کدام شش سونداژ و نیم رخ B تعداد هفت سونداژ انتخاب شده و مورد تفسیر قرار گرفتند (جدول ۳). به عنوان نمونه سونداژ A17 به طور کل دارای چهار لایه است و دارای مقاومت ویژه متوسط به پایین است. این سونداژ تا عمق سه متری شامل ماسه و شن، از سه تا هفت و نیم متری ماسه ریز، از هفت و نیم تا نوزده و نیم متری ماسه و کمی شن و از نوزده و نیم متری به پایین ماسه ریز است. این سونداژ در حدود ۷۰ متری به آب برخورد کرده است.

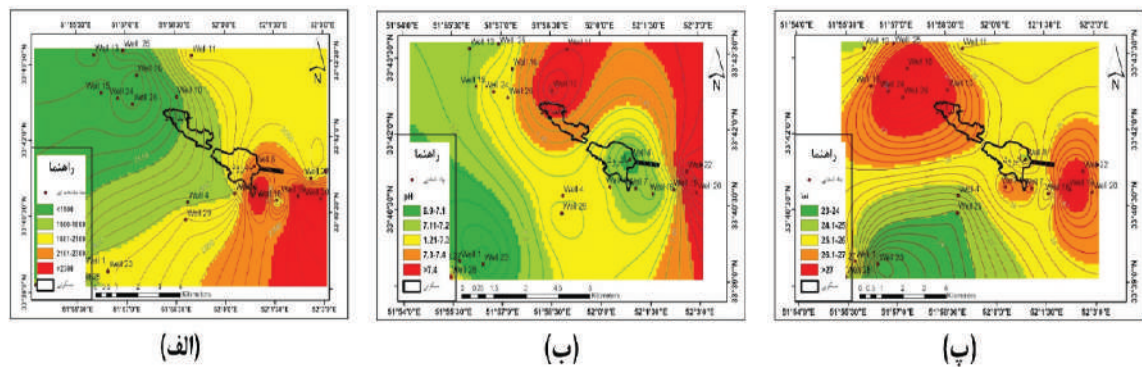
با توجه به نقشه هم EC آبخوان بادرود اردیبهشت ۱۳۹۷، کمترین EC حدود ۱۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر است که در شمال خالدآباد و شمال غرب گستره مشاهده می شود. بیشترین EC، بیش از ۳۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر است که در جنوب شرقی و جنوب غربی گستره مشاهده می شود (شکل ۳-الف). در نقشه هم pH در مرحله اول pH از ۶/۵ تا ۷/۱ متغیر است. کمترین pH در بخش شمالی خالدآباد و جنوب غربی گستره است و بیشترین pH در Well4 در جنوب غربی بادرود گزارش شده است (شکل ۳-ب). با توجه به نقشه هم دما مرحله اول کمترین دما ۲۱ درجه سانتی گراد و بیشترین دما، بیش از ۲۵ درجه سانتی گراد است. بیشترین دما در چاه ۱۰ و کمترین دما در چاه ۲ گزارش شده است (شکل ۳-پ).

در نقشه هم EC آبخوان در مرحله دوم کمترین EC، ۱۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر و بیشترین EC، بیش تر از ۲۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی متر است. EC از شمال غرب به سمت جنوب شرق افزایش پیدا می کند (شکل ۴-الف). با توجه به نقشه هم pH مرحله دوم، pH از ۶/۹ تا بیش از ۷/۴ متغیر است. کمترین pH در جنوب غربی و بخشی از شهر بادرود است. از جنوب غرب به سمت شمال شرق تقریباً افزایش pH رخ می دهد، به جز بخشی از شهر بادرود که pH کاهش پیدا می کند (شکل ۴-ب). در نقشه هم دما مرحله دوم حداقل دما ۲۳ و حداکثر دما، بیش از ۲۷ درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است. کمترین دما در جنوب غرب گستره و بیشترین دما در شمال غرب خالدآباد و جنوب شرق بادرود گزارش شده است (شکل ۴-پ).

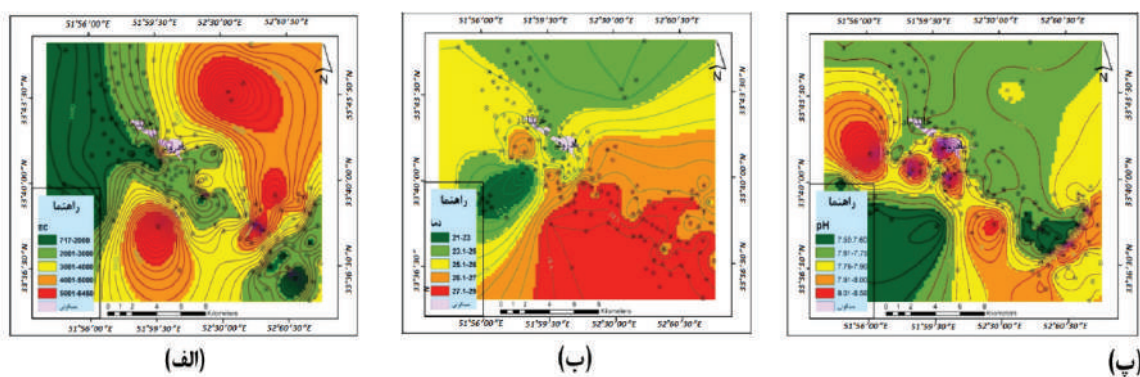
در نقشه هم EC آبخوان بادرود با استفاده از داده های بانک کیفی، کمترین هدایت الکتریکی ۷۱۷ میکروزیمنس بر سانتی متر و بیشترین آن ۶۴۵۰ میکروزیمنس بر سانتی متر گزارش شده است. در این نقشه هیچ روند خاصی مشاهده نمی شود (شکل ۵-الف). با توجه به شکل ۵-ب اختلاف دما



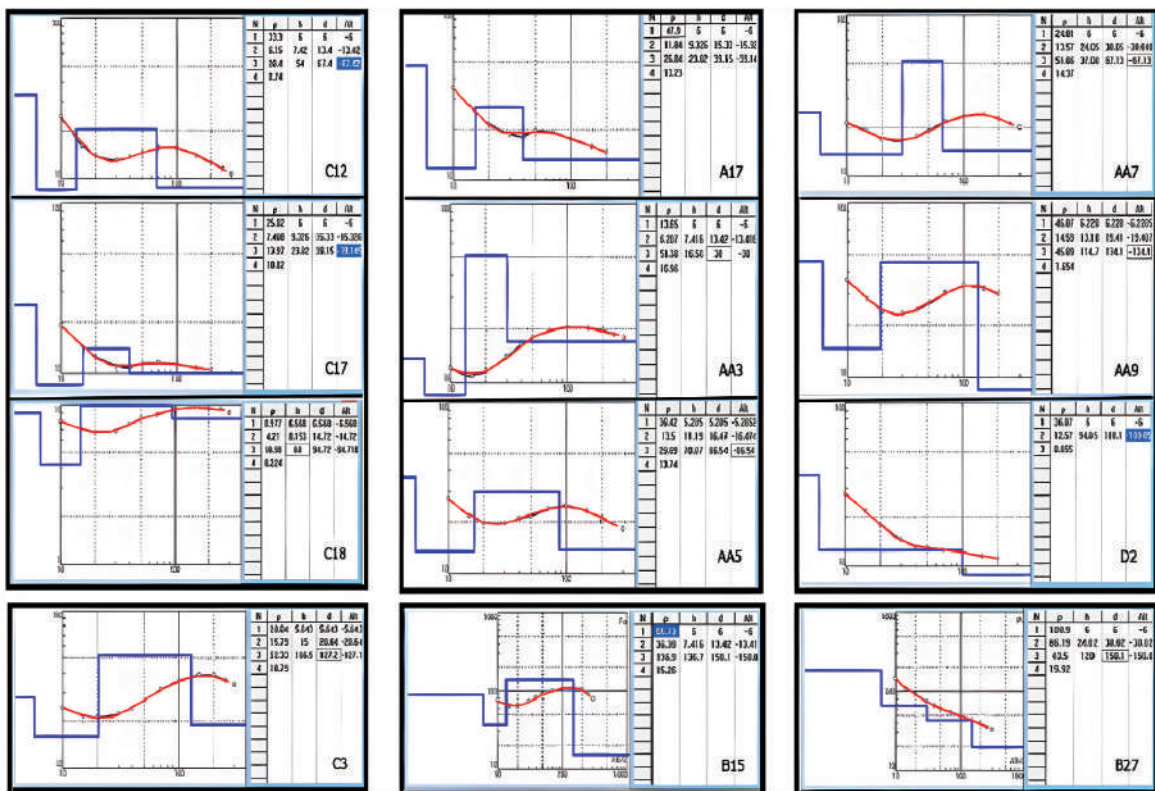
شکل ۳. الف) نقشه هم هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتی متر، ب) نقشه هم pH و پ) نقشه هم دما برحسب درجه سانتی گراد در گستره مورد مطالعه در مرحله اول



شکل ۴. الف) نقشه هم هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتی متر، ب) نقشه هم pH و پ) نقشه هم دما برحسب درجه سانتی گراد در گستره مورد مطالعه در مرحله دوم



شکل ۵. الف) نقشه هم هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتی متر، ب) نقشه هم دما و پ) نقشه هم pH در گستره مورد مطالعه با استفاده از داده‌های بانک کیفی



شکل ۶. مدل الکتریکی سونداژهای منتخب در پهنه مورد مطالعه

تفسیر دوبعدی داده‌های ژئوالکتریک

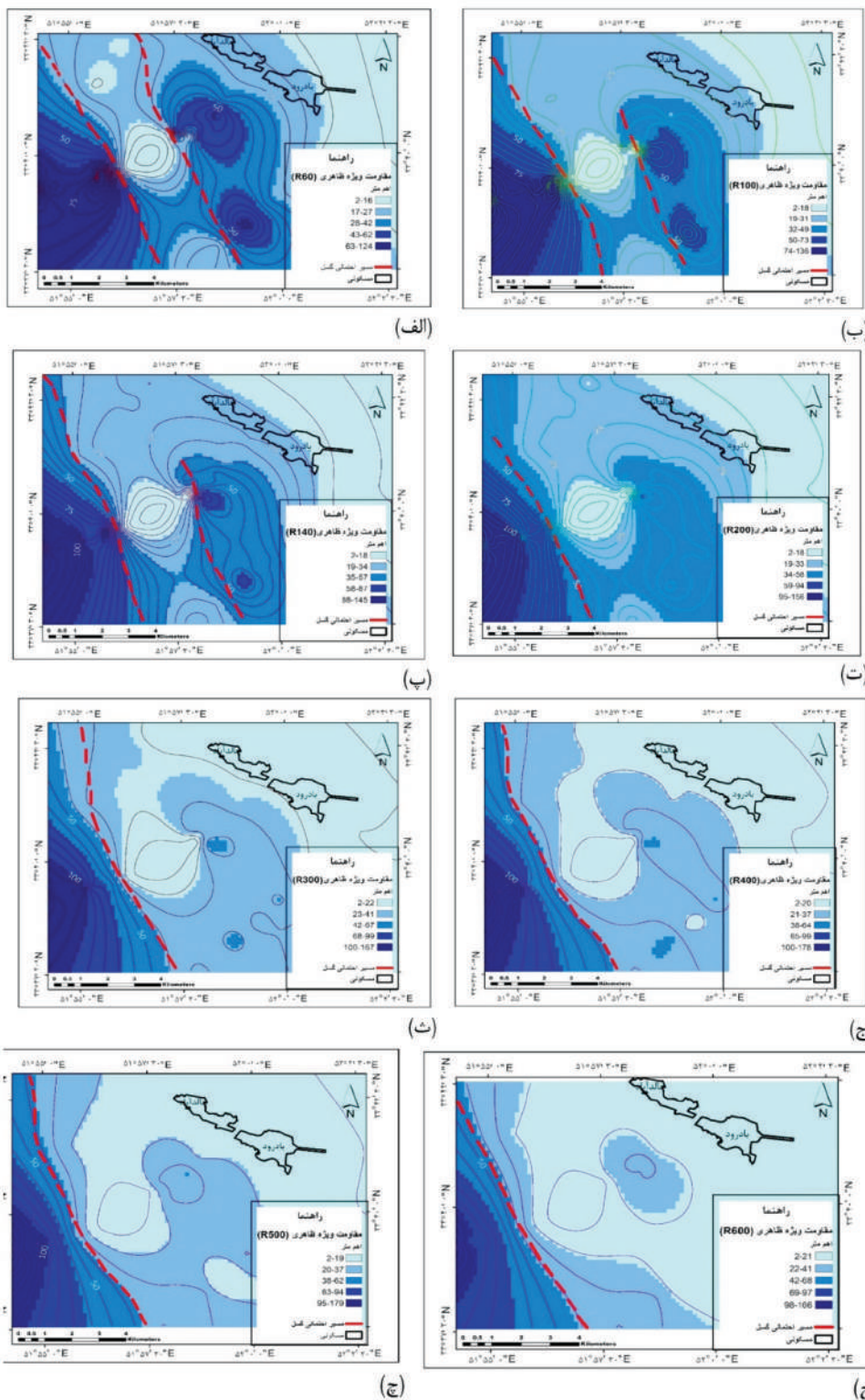
حدود ۲ تا ۱۷۹ اهم‌متر متغیر و بیشترین مقدار آن در جنوب غربی گستره، مشاهده می‌شود که به سمت شمال شرقی از این مقدار کاسته می‌شود و دوباره مقدار آن افزایش می‌یابد. این حدفاصل که به سمت دو طرف، افزایش می‌یابد می‌تواند تحت تاثیر گسل ایجاد شده و مرز این تغییرات گستره گسلی باشد.

با توجه به شکل ۷-الف دو مسیر احتمالی گسل وجود دارد. در بین دو گسل، مقاومت کم‌تر و اطراف دو گسل مقاومت بیشتر می‌شود. با توجه به نقشه مقاومت ویژه ظاهری در عمق تقریبی ۵۰ متر (شکل ۷-ب) نیز مانند عمق تقریبی ۳۰ متر دو گسل در نظر گرفته شده است ولی گسل سمت راست مقداری کوتاه‌تر می‌شود. در این نقشه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری تقریباً مانند شکل ۷-الف است. نقشه مقاومت ویژه ظاهری در عمق تقریبی ۷۰ متر نیز تقریباً مانند دو عمق قبل است ولی گسل سمت راست تقریباً نصف می‌شود. با توجه به شکل ۷-ت در عمق ۱۰۰ متر گسل سمت

با مرتب‌سازی داده‌های ژئوالکتریک ابتدا نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری در عمق‌های مختلف تهیه شده است. با توجه به اطلاعات لاگ چاه‌ها (حداکثر عمق ۱۷۷ متر) و تفسیر یک‌بعدی (تا عمق حدود ۳۰۰ متری) اکثر سونداژها به سنگ‌بستر برخورد نکرده‌اند و اطلاعات دقیقی از سنگ‌بستر موجود نیست. به همین دلیل نقشه هم ضخامت آبخوان قابل رسم نیست. با استفاده از داده‌های موجود نقشه هم مقاومت واقعی، نقشه مقاومت عرضی و نقشه رسانای الکتریکی تهیه و تفسیر شده است.

شکل ۷-الف مقاومت ویژه ظاهری دشت را برای عمق ۳۰ متر (R60) نشان می‌دهد. مطالعات نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری در عمق‌های ۳۰ تا ۳۰۰ متر نشان می‌دهد، با وجود تغییرات در مقدار مقاومت ویژه ظاهری و همچنین پراکندگی مقاومت ویژه در نقشه نسبت به باقی، الگو اصلی نقشه‌ها در اعماق مختلف مشابه است (شکل‌های ۷-الف تا ۷-ح). مقدار مقاومت ویژه ظاهری در عمق‌های مختلف بین

راست حذف می‌شود و فقط یک مسیر احتمالی گسل باقی می‌ماند. با توجه به شکل ۷-ث در عمق ۱۵۰ متر تغییرات تقریباً مانند شکل ۷-ت است و یک مسیر احتمالی گسل معرفی شده است.



شکل ۷. نقشه مقاومت ویژه ظاهری در عمق تقریبی (الف) ۳۰ متر، (ب) ۵۰ متر، (پ) ۷۰ متر، (ت) ۱۰۰ متر، (ث) ۱۵۰ متر، (ج) ۲۰۰ متر، (ح) ۲۵۰ متر و (خ) ۳۰۰ متر

ضخامت لایه‌ها محاسبه شده است. کمترین مقاومت عرضی الکتریکی لایه آبدار ۴۰۵ و بیشترین ۱۰۱۵۸ اهم متر مربع است. در این نقشه نیز یک مسیر احتمالی گسل شناسایی شده است. رسانایی الکتریکی (شکل ۸-ت) عکس مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار است. کمترین رسانایی الکتریکی ۰/۰۰۷ و بیشترین ۰/۲۳۲ زیمنس است. در این نقشه دو مسیر احتمالی گسل مشخص شده است.

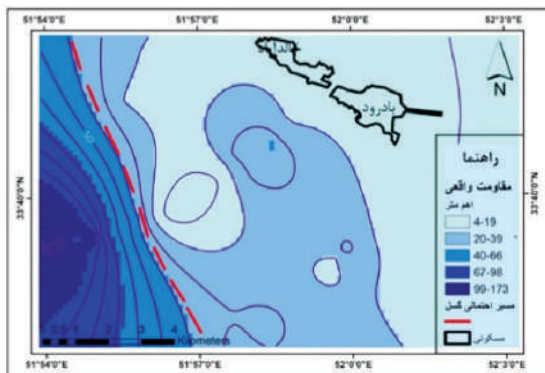
در ادامه از توموگرافی الکتریکی برای تفسیر یافته‌های ژئوالکتریک در سه مقطع استفاده شده است (شکل ۲). مقطع توموگرافی و مدل لیتولوژی سونداژ A-AA با طول تقریبی ۷۷۰۰ متر و ۱۸ سونداژ انتخابی برداشت شده است. برای دقت بیشتر و تفسیر بهتر طول نیمرخ با ضریب افقی ۰/۱ برابر ۷۷۰ متر در نظر گرفته شده است. خطای RMS نیمرخ این مدل پس از پنج مرحله تکرار ۳/۳ درصد حاصل شده است (شکل ۹). در این نیمرخ دامنه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی از حدود ۳ تا ۷۰ اهم متر است. طبق مدل نیمرخ

مقاومت واقعی گستره با توجه به رابطه زیر محاسبه شده است:

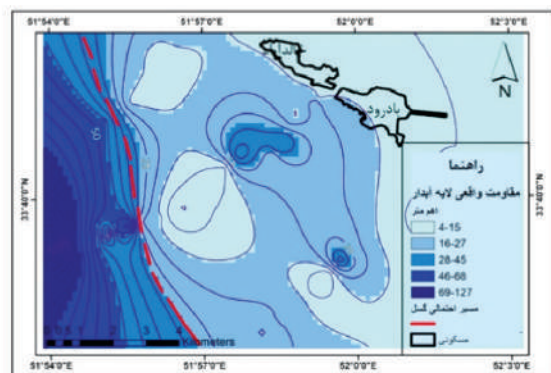
$$RT = [(\rho_1 \times b_1) + (\rho_2 \times b_2) + \dots + (\rho_i \times b_i)] \quad (1)$$

که RT مقاومت عرضی بر حسب اهم متر مربع، ρ مقاومت ویژه الکتریکی لایه i ام بر حسب اهم متر و b ضخامت لایه بر حسب متر است.

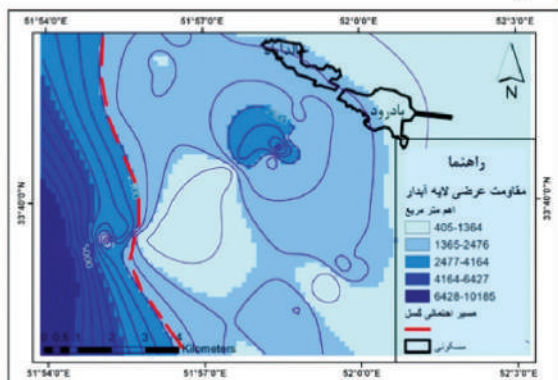
در شکل ۸-الف بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی در جنوب غربی و کمترین مقاومت ویژه الکتریکی در شمال شرقی منطقه مورد مطالعه است. در کل با مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری در عمق‌های مختلف مشابه است و یک مسیر احتمالی گسل معرفی شده است. در شکل ۸-ب فقط مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار در نظر گرفته شده است. در این نقشه نیز تغییرات از جنوب غرب به شمال شرق کاهش پیدا می‌کند و یک مسیر احتمالی گسل وجود دارد. مقاومت عرضی الکتریکی لایه آبدار (شکل ۸-پ) از حاصلضرب مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار در



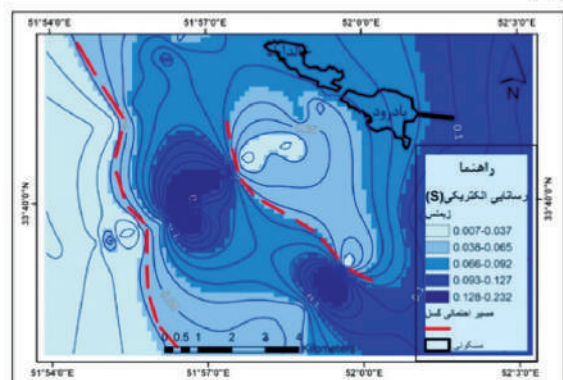
(الف)



(ب)



(پ)



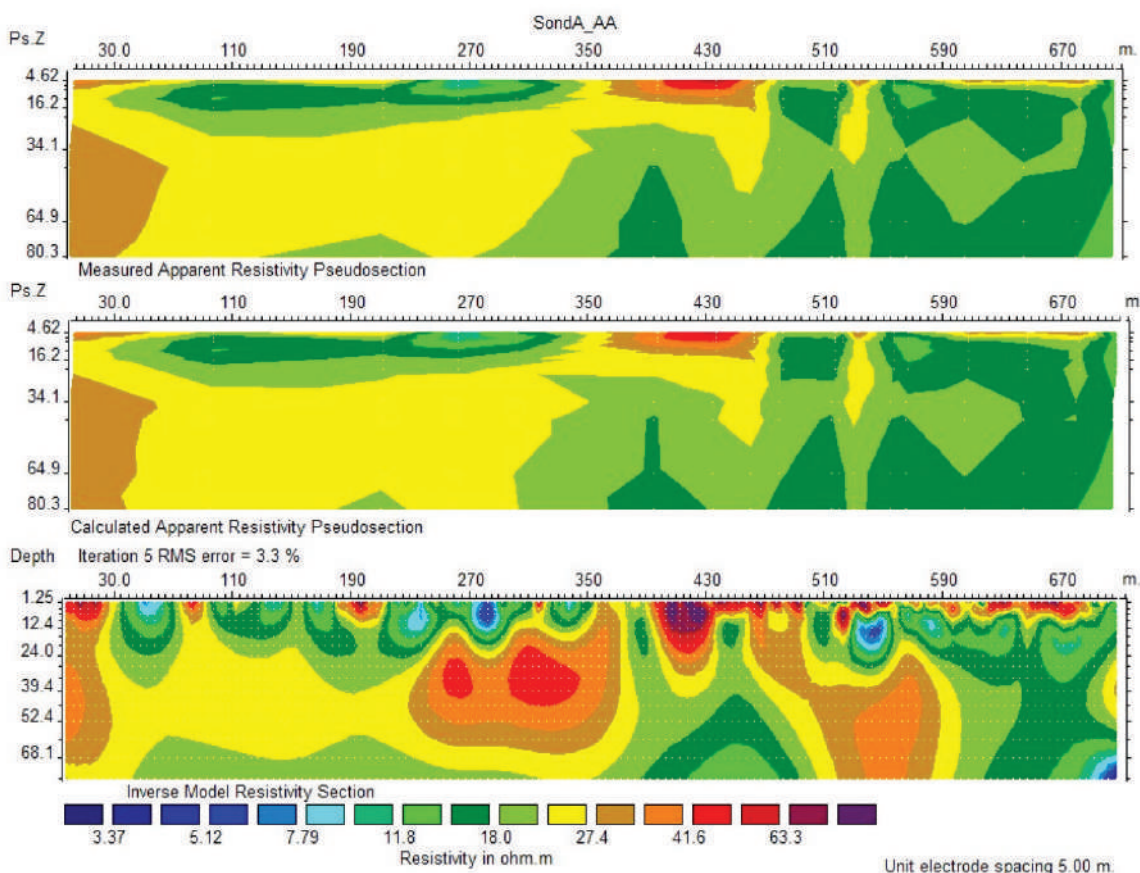
(ت)

شکل ۸. الف) مقاومت ویژه الکتریکی واقعی آبرفت سطحی در پهنه مورد مطالعه، ب) مقاومت ویژه الکتریکی واقعی لایه آبدار، پ) مقاومت عرضی لایه آبدار و ت) رسانایی الکتریکی در پهنه مورد مطالعه

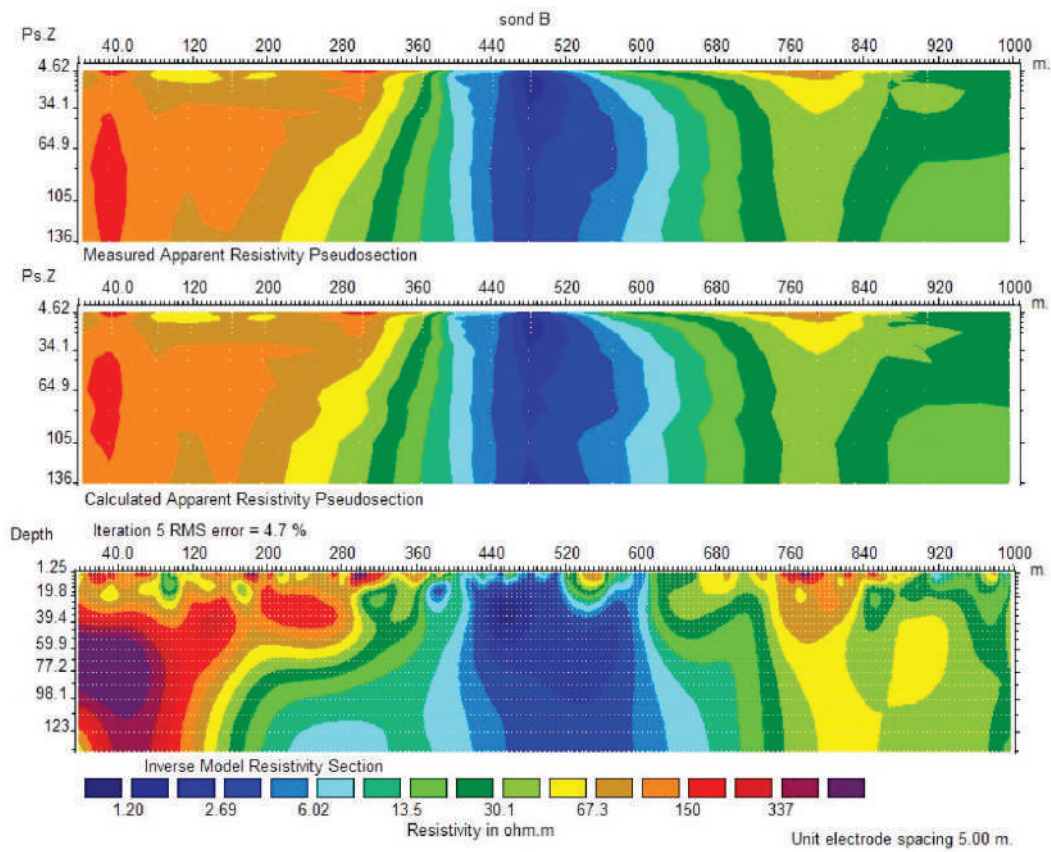
مقطع توموگرافی و مدل لیتولوژی سونداژ C با طول تقریبی ۸۰۰۰ متر و ۱۲ سونداژ انتخابی برداشت شده است. برای دقت بیشتر و تفسیر بهتر طول نیمرخ با ضریب افقی ۰/۱ برابر ۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است. خطای RMS نیمرخ این مدل پس از پنج مرحله تکرار ۳/۶ درصد حاصل شده است (شکل ۱۱). تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در این نیمرخ از حدود شش تا ۵۰۰ اهم متر است. در ابتدا مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده کم است و به تدریج مقاومت ویژه الکتریکی زیاد شده و دوباره کم می‌شود. در اواسط نیمرخ در ۴۶۰ متری یک روند خطی مشاهده می‌شود که با تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی همراه است و می‌تواند یکی از اصلی‌ترین دلایل اثبات گسل در ناحیه باشد. در نهایت با توجه به نقشه هم مقاومت ویژه الکتریکی ویژه ظاهری دشت در عمق‌های مختلف و مدل‌های توموگرافی برای هر سه نیمرخ حدود موقعیت گسل‌های پهنه مشخص شده است (شکل ۱۲).

و تفسیر یک‌بعدی داده‌ها در اواسط مقطع یک تغییر ناگهانی در نیمرخ حاصل شده است (حدود ۳۸۰ متری) که این می‌تواند بر اثر عملکرد گسل باشد. در این نیمرخ از عمق کم به زیاد مقاومت ویژه الکتریکی کاهش پیدا می‌کند.

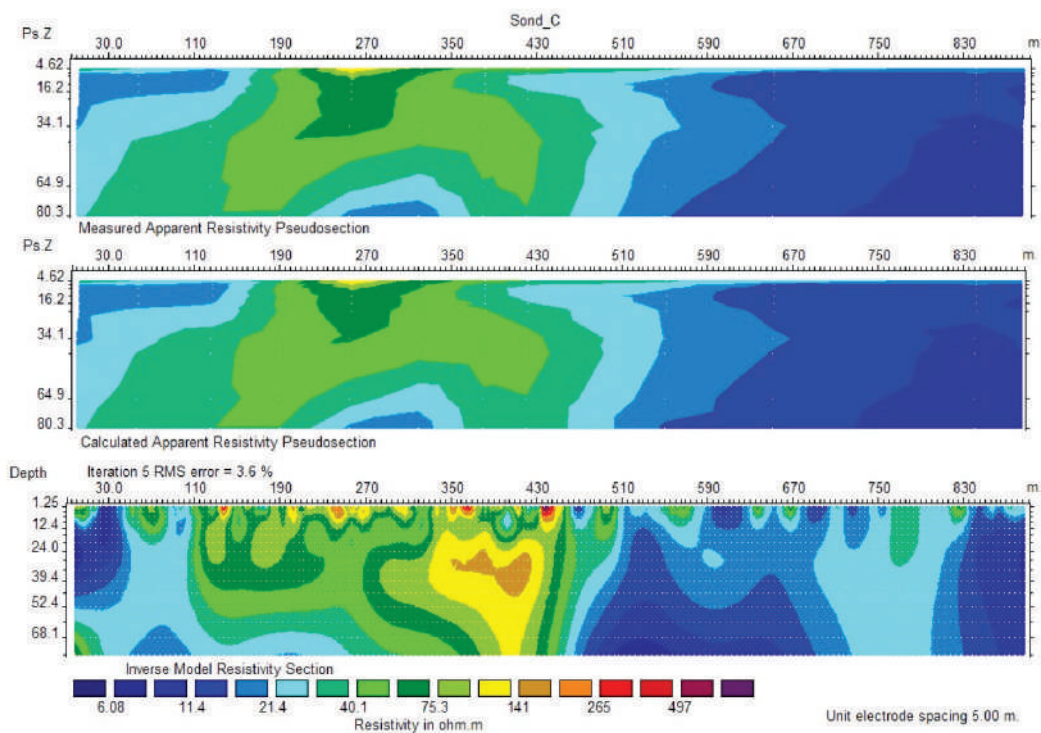
مقطع توموگرافی و مدل لیتولوژی سونداژ B با طول تقریباً ۱۰۰۰۰ متر و ۱۸ سونداژ انتخابی برداشت شده است. برای دقت بیشتر و تفسیر بهتر طول نیمرخ با ضریب افقی ۰/۱ برابر ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. خطای RMS نیمرخ این مدل پس از پنج مرحله تکرار ۴/۷ درصد محاسبه شده است (شکل ۱۰). در این نیمرخ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی از یک تا حدود ۴۰۰ اهم متر است. چنانچه در شکل زیر مشاهده می‌شود، در شروع نیمرخ مقاومت ویژه الکتریکی زیاد و تا اواسط نیمرخ (حدود ۴۸۰ متری) مقاومت ویژه الکتریکی به تدریج کم شده است. پس‌از آن دوباره مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً زیاد شده است. این تغییرات را می‌توان به عملکرد گسلی مربوط کرد.



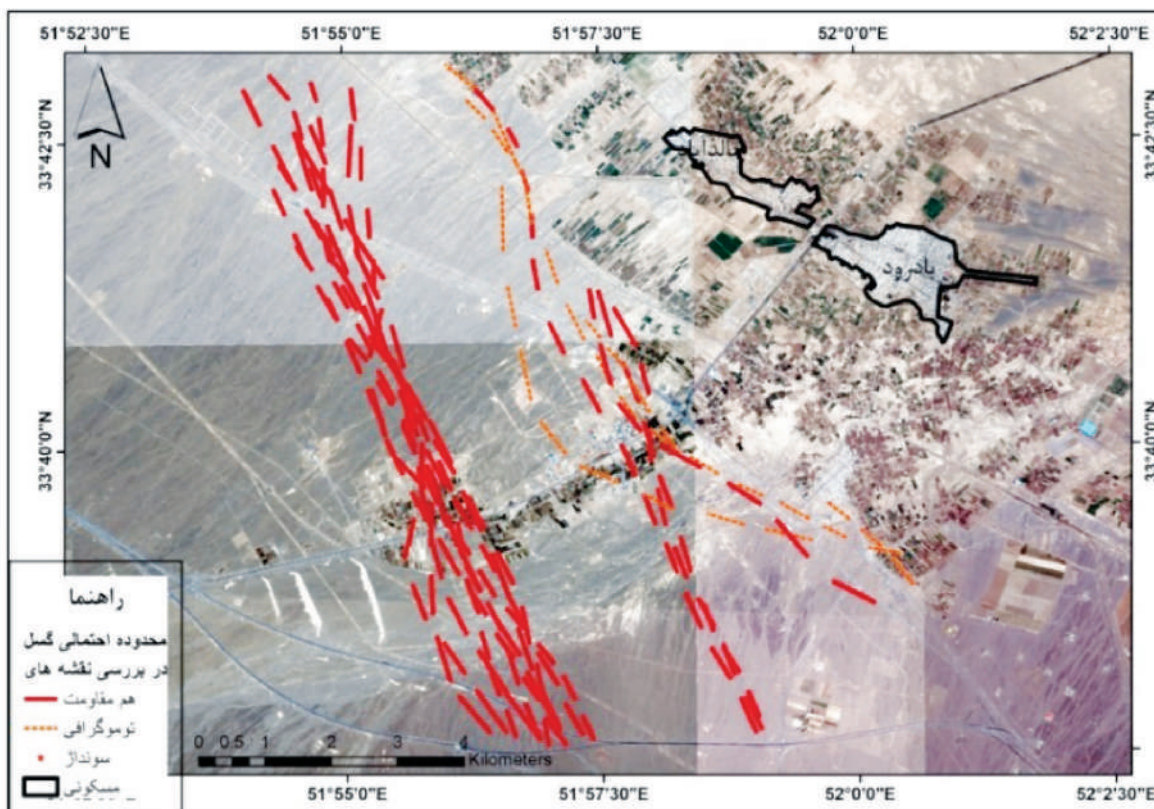
شکل ۹. مقطع توموگرافی نیمرخ A-AA



شکل ۱۰. مقطع توموگرافی نیمرخ B



شکل ۱۱. مدل توموگرافی نیمرخ C



شکل ۱۲. موقعیت گسل‌های احتمالی په‌نه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

مقاومت ظاهری همخوانی دارند که الگوهای متناظری از تغییرات مقاومت (بین دو تا ۱۷۹ اهم-متر) در عمق‌های ۳۰ تا ۳۰۰ متر نشان می‌دهند و کاهش مقاومت به سمت شمال شرقی، نشانگر مرزهای ساختاری مرتبط با گسل می‌باشند. تحلیل‌های هیدروشیمیایی بر اساس ۴۰ نمونه آب زیرزمینی که در دو مرحله جمع‌آوری شدند و با داده‌های کیفی موجود تکمیل شدند و نشان داد، تغییرات مکانی قابل توجهی در هدایت الکتریکی (EC)، pH و دما وجود دارد. EC بین ۷۱۷ تا ۶۴۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر می‌باشد. مقادیر بالاتر در مناطق جنوب شرقی و جنوب غربی نشان‌دهنده کانی‌سازی ناشی از گسل است. pH بین ۶/۵ تا ۸/۵۶ متغیر است و روند مشخصی ندارد، در حالی که تغییرات دما (۲۱ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد) نشان‌دهنده آنومالی‌های حرارتی محلی به‌ویژه در جنوب شرقی است. این تغییرات هیدروشیمیایی که با جهت جریان

این پژوهش با هدف بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی آبخوان دشت بادرود در جنوب شرق کاشان، با استفاده از داده‌های ژئوالکتریک و پارامترهای هیدروشیمی انجام شد. بررسی‌های ژئوالکتریک با استفاده از آرایه شلومبرژه و ۶۱ سونداژ در سه پروفیل و با فاصله الکتروود جریان حداکثر ۶۰۰ متر، نقشه‌برداری دقیقی از تغییرات مقاومت ویژه زیرسطحی را ممکن ساخت. تفسیر یک‌بعدی داده‌ها با نرم‌افزار IPI2win و توموگرافی الکتریکی دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV، تغییرات ناگهانی و تدریجی در مقاومت ویژه الکتریکی در عمق‌های مختلف را که نشان‌دهنده وجود یک گسل است نشان داد. مقاطع توموگرافی مسیر گسل را تأیید کردند. این مطلب به‌ویژه در پروفیل A-AA در حدود ۳۸۰ متر، پروفیل B در ۴۸۰ متر و پروفیل C در ۴۶۰ متر مشهود است. این یافته‌ها با نقشه‌های

به عنوان پایه‌ای برای مطالعات بیشتر و برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب در مناطق مشابه با شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- آقانباتی، ع، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- درویش‌زاده، ع، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران (چینه‌شناسی، تکنونیک، دگرگونی و ماگماتیسم)، چاپ اول، انتشارات امیرکبیر، ۴۳۳ص.
- رهگشای، م، ۱۳۷۶. مطالعه آب‌شناسی مناطق با آب‌وهوای خشک تحت شرایط ناپایدار، مدل مطالعاتی: منطقه حاشیه کویر بادرود، طرح مستقل پژوهشی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ کوه لطیف و نطنز و نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ کاشان
- شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان. ۱۳۹۶. بانک اطلاعات کمی و کیفی منابع آب
- شیرخانی، ف.، ناصری، ح.، علیجانی، ف. و نجات‌جهرمی، ز. ۱۴۰۳. مدل‌سازی اثرات کف شکنی چاه‌های بهره‌برداری بر آبخوان باد-خالدآباد، جنوب کاشان، نشریه زمین‌شناسی ایران ۷۰ (۱۸)، ۵۱-۶۵. <https://dorl.net/do/20.1001.1.17357128.1403.18.70.4.3>
- سازمان هواشناسی اصفهان. ۱۳۹۵. بانک اطلاعات کمی و کیفی
- علیجانی، ف.، ناصری، ح.، امیرافضلی، م.، شماسی، ع. ۱۳۹۷. تاثیر گسل دورود بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی دشت دورود بروجرد، لرستان. تحقیقات منابع آب ایران ۱۴(۲)، ۱۶۷-۱۸۱

- Ahmed, A., Salem, H. and El-Kaliouby, B. 2020. Application of electrical resistivity tomography for detecting buried faults in the Nile Delta aquifer, Egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 175, 103914. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103914>.

- Alp, H., Tezel, O., Avcı, K., Vardar, D. and Alp, Y. 2024. Detecting Active Faults Using Electrical Resistivity Tomography: a Case Study in Istanbul, Türkiye. *Dokl. Earth Sci-*

آب زیرزمینی (جنوب غربی به شمال شرقی) همبستگی ندارند، تأثیر ساختارهای تکتونیکی بر شیمی آبخوان را برجسته می‌کنند. نقشه‌های هم‌هدایت الکتریکی (EC)، دما و pH آب زیرزمینی نشان‌دهنده تغییرات مکانی قابل توجهی در کیفیت آب هستند، با ناهنجاری‌های ژئوالکتریک هم‌راستا می‌باشند و بر تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی، بر جریان و کیفیت آب‌های زیرزمینی تأکید دارند. به ویژه، افزایش هدایت الکتریکی و تغییرات pH در بخش‌هایی از دشت، احتمال نفوذ آب‌های نیمه‌گرم و شور عمقی را که ناشی از فعالیت گسل‌ها است، تقویت می‌کند.

نتایج حاصل از تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی با آرایه شلومبرژه و توموگرافی دوبعدی، نشان‌دهنده وجود ناهنجاری‌های ساختاری در آبخوان است که با تغییرات ناگهانی و تدریجی مقاومت ویژه در عمق‌های مختلف، مسیرهای احتمالی گسل‌های مدفون در پهنه را مشخص کرد. این گسل‌ها به عنوان عوامل تکتونیکی مؤثر، نقش مهمی در تغییرات هیدروشیمیایی آبخوان ایفا می‌کنند. از این رو گسل‌ها به عنوان مسیرهای ترجیحی یا موانع جریان آب عمل کرده و باعث ایجاد ناهنجاری‌های محلی در آبخوان شده‌اند.

این مطالعه بر اثربخشی ترکیب روش‌های ژئوالکتریک با تحلیل‌های هیدروشیمیایی برای تعیین ساختارهای زیرسطحی و تأثیرات آن‌ها بر سیستم‌های آب زیرزمینی تأکید می‌کند. یافته‌ها پیامدهای مهمی برای مدیریت آب زیرزمینی در ناحیه بادرود دارند و لزوم در نظر گرفتن تأثیرات تکتونیکی در برنامه‌ریزی منابع و ارزیابی کیفیت را برجسته می‌کنند. پژوهش‌های آینده باید بر بررسی‌های ژئوفیزیکی عمیق‌تر برای شناخت سنگ بستر و تعریف دقیق‌تر هندسه گسل، همراه با پایش هیدروشیمیایی مستمر برای ردیابی تغییرات زمانی کیفیت آبخوان متمرکز شوند.

در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، مدیریت منابع آب زیرزمینی در دشت بادرود باید با در نظر گرفتن تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی به‌ویژه گسل‌ها صورت گیرد تا از بروز مشکلات کیفی و کمی جلوگیری شود و بهره‌برداری پایدار از این منبع حیاتی تضمین شود. این پژوهش می‌تواند

- ence. 519, 2257-2270. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24603018>
- Bense, V.F., Van den Berg, E.H. and Van Balen, R.T., 2003. Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments. the Roer Valley Rift System, The Netherlands. *Hydrogeology Journal*, 11(3), 319-332.
 - Chandra, C.P, 2016. *Groundwater Geophysics in Hard Rock*. First edition, CRC Press/Balkema, 370 .
 - Hosseini, M., Javadi, S. and Kholghi, M., 2020. Hydrogeological and geophysical investigation of groundwater quality in Isfahan plain, Iran. *Environmental Earth Sciences* , 79(10), 234. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08967-8> .
 - Kumar, R., Singh, V. and Kumar, P., 2020. Impact of tectonic structures on groundwater flow and quality in the Indo-Gangetic plains. *Hydrogeology Journal* , 28(4), 1455-1468. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02145-9> .
 - Li, Y., Zhang, X. and Wang, L., 2022. Hydrochemical anomalies caused by buried faults in Yunnan Province, China: A geophysical perspective. *Science of the Total Environment* , 806, 150604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150604> .
 - Mohammadzadeh, H., Jafari, F. and Moghaddam, A., 2019. Hydrogeological impacts of active and inactive faults in Yazd-Ardakan plain, Iran. *Journal of African Earth Sciences* , 158, 103538. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103538> .
 - Rahimi, A., Asghari-Moghaddam, A. and Zare, M., 2021. Geophysical investigation of buried faults and their impact on groundwater quality in Kermanshah plain, Iran. *Near Surface Geophysics*, 19(2), 123-135. <https://doi.org/10.1002/nsg.12145> .
 - Rajabpour, H., Vaezihir, A. and Sedghi, M.H., 2016. The North Tabriz Fault, a barrier to groundwater flow in an alluvial aquifer northwest of Tabriz, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 1-13.
 - Wang, T., Li, H. and Liu, J., 2021. Electrical resistivity tomography for detecting buried faults in alluvial aquifers: A case study from Japan. *Engineering Geology* , 282, 105994. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.105994> .
 - Yan, Y., Shi, Z., Zhou, X., Wang, G., Zhang, Z., Bai, Y., Zeng, Z., Yao, B., Wang, Y., He, M., Tian, J., Li, R. and Yan, H., 2026. Unraveling stress-mediated fluid-fault interactions in 2021-2022 seismic sequence: Insights from unsupervised machine learning and multiparametric hydrochemical anomalies in Xianshuihe fault zone. *Applied Geochemistry*, Volume 196, 106635, ISSN 0883-2927. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106635>.
 - Zhang, J., Chen, Y. and Wu, Q., 2021. Geophysical identification of buried faults and their hydrochemical impacts in northern China. *Journal of Hydrology* , 594, 125876. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125876> .