فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحهٔ ۵۷۵- ۵۹۲ (مقاله پژوهشی)
DOI: 10.22059/jesphys.2022.335814.1007393

توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی جهت تعیین مرز سنگ‌بستر و رولایه؛ مطالعه موردی سدخاکی شهدای ایلام

مرتضی عزیزلو[۱]، رضا قناتی[۲*] و محمدکاظم حفیظی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱/۳۰)

چکیده

مطالعه مرز بین رخساره‌ها و لایه‌ها با دانه‌بندی نزدیک به‌هم در یک محیط رسوبی و دارای چین‌خوردگی‌های بالا از مسائل ژئوفیزیکی چالش‌برانگیز است. یکی از موارد کاربرد برداشت‌های ژئوفیزیکی تعیین مرز رولایه و سنگ‌بستر در ساختگاه‌های مهندسی مانند سدهای خاکی است. توموگرافی الکتریکی (ERT)، به‌عنوان یکی از مؤثرترین رهیافت‌های ژئوفیزیکی برای به نقشه درآوردن لایه‌های زیرسطحی بر اساس تباین رسانندگی مواد قلمداد می‌شود. در این مطالعه، به بررسی کارایی توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی از طریق برداشت چندین پروفیل موازی با هدف تصویرسازی مرز رولایه و سنگ‌بستر و تعیین احتمال نشت و فرار آب در تکیه‌گاه چپ سد خاکی ایلام (گلال) پرداخته می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آرایه‌های برداشت شده، بخش‌های بارپذیر می‌توانند در ارتباط با زون شیلی و نیز آهک‌های مارنی حاوی پیریت باشد. همچنین به دلیل نزدیکی مقادیر شارژپذیری رولایه با دانه‌بندی در حد رس و سنگ کف آهکی با میان لایه‌های شیلی و مارنی، تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی به‌عنوان عامل اصلی جهت تفکیک لایه های زیرسطحی از یکدیگر در نظر گرفته می‌شود. برای تفسیر بهتر مدل‌های به‌دست آمده و تطابق آن با شرایط زیرسطحی از اطلاعات زمین شناسی منطقه استفاده شد. همچنین با بهره‌گیری از گمانه‌های حفاری موجود در منطقه، مقاطع ژئوالکتریکی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. بر اساس مدل‌های منتج‌شده از داده‌های ژئوالکتریکی می‌توان نتیجه گرفت که بررسی‌های توموگرافی الکتریکی، به‌خوبی توانسته فروافتادگی موجود در منطقه موردمطالعه و همچنین مرز رولایه و سنگ‌بستر را با توجه به محدودیت‌های تفکیک‌پذیری تا حد قابل‌قبولی به تصویر درآورد.

واژه‌های کلیدی: توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی (ERT)، پلاریزاسیون القایی، مرز رولایه و سنگ‌بستر، سد خاکی.

۱. مقدمه

مطالعات ژئوفیزیکی برای ساختگاه‌های مهندسی با اهداف متفاوت مثل سدها، نیروگاه‌ها، تونل های انتقال آب و غیره به یک امر ضروری تبدیل شده است. در این بین با افزایش روزافزون جمعیت و توسعه اقتصادی که باعث افزایش تعداد سدها برای تأمین آب شرب و کشاورزی می‌شود، قبل از شروع به ساخت سد باید منطقه از جهات مختلفی همچون اقتصادی، علمی، زیست‌محیطی، سیاسی و... بررسی شود و بهترین مکان برای ساخت این سازه‌ها را ارائه داد. برآورد قابل‌اعتماد از مرز بین رسوبات و سنگ‌بستر برای کشف حجم رسوبات بسیار مهم است.

ساختارهای زمین‌شناسی دارای پیچیدگی‌های خاص خود هستند که با مطالعات قبل از احداث سازه‌های مهندسی می‌توان سرعت ساخت آنها را از لحاظ زمانی بالا برد و هزینه‌های اضافی را کاهش داد. ناهنجاری‌های زمین‌شناسی که در هنگام ساخت سدها ممکن است با آنها روبه‌رو شویم شامل: زون‌های شکسته، گسل‌ها، توده‌های رسی و غیره می‌باشند. در شرایطی که این ناهنجاری‌ها قبل از احداث سازه موردمطالعه قرار نگیرند، می‌توانند در هنگام ساخت یا بعد از احداث سازه مشکلاتی مانند شکستگی در سد یا ترک در دیواره‌های اطراف سد به‌وجود آورند، که امکان ایجاد محلی برای فرار آب می‌تواند باشد (راجی و آددوین، ۲۰۱۹). بنابراین، قبل از شروع به ساخت این نوع ساختگاه‌ها باید مطالعات کاملی از جمله مطالعات میدانی زمین‌شناسی، مطالعات

*نگارنده رابط: rghanati@ut.ac.ir

ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی انجام گیرد تا اطلاعات لازم برای ساخت این سازه‌ها در اختیار مهندسین قرار گیرد (دینگ و وی‌وی، ۲۰۱۶). روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی به‌منظور مطالعه ساختگاه سدهای خاکی مانند روش‌های لرزه‌ای (هانتر و همکاران، ۱۹۸۴؛ پلانس و همکاران، ۲۰۱۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۱)، الکترومغناطیسی (بنش و همکاران، ۲۰۱۱؛ پری و همکاران، ۲۰۱۴)، ژئوالکتریکی (لین و همکاران، ۲۰۱۴؛ راجی و آددوین، ۲۰۱۹) و پتانسیل خودزا (ایکارد و همکاران، ۲۰۱۲؛ ایکارد و همکاران ۲۰۱۴؛ جونز و همکاران، ۲۰۱۴؛ سنتناک و همکاران ۲۰۱۳ و ۲۰۱۷) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان این روش‌ها، اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی شامل مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی (Induced polarization) به‌دلیل سرعت بالای برداشت، هزینه کم و امکان تفکیک بهتر لایه‌های زیرسطحی با رسانندگی‌های متفاوت، موردتوجه بیشتر جامعه ژئوفیزیک قرار گرفته است. هرچند در مواردی که تباین رسانندگی مصالح زیرسطحی کم باشد، استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی با عدم‌قطعیت همراه است. برای رفع این مشکل، استفاده همزمان از داده‌های پلاریزاسیون القایی در تصویرسازی لایه‌های زیرسطحی باعث افزایش قطعیت در تفسیر نتایج می‌شود.

توموگرافی الکتریکی (Electrical tomography)، شامل مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی، برای تعیین توزیع مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی و شارژپذیری مصالح زیرسطحی به‌کار گرفته می‌شود. این مقادیر از طریق اندازه‌گیری‌های سطحی پتانسیل ایجاد شده در اثر تزریق جریان به زمین حاصل می‌شود. جریان الکتریکی با استفاده از الکترودهای فرستنده به زمین تزریق می‌شود و مقدار پتانسیل با استفاده از ترکیب جفت الکترودهای دیگر نمونه‌برداری می‌شود (لوک و همکاران، ۲۰۱۳). روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات مهندسی برای پی‌جویی‌های نزدیک به سطح مورد استفاده قرار می‌گیرد (لی و همکاران، ۲۰۱۷). در واقع با استفاده از روش‌های غیرمخرب ژئوفیزیکی، مانند توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی (ERT)، می‌توان میزان و نوع رسوبات را با سرعت بیشتر و هزینه کمتر در محدوده وسیع‌تری نسبت به چاه‌های اکتشافی مطالعه کرد (هاوک و همکاران، ۲۰۰۳ ؛ کروک و همکاران، ۲۰۰۸). روش ERT به‌عنوان یک رهیافت قدرتمند برای تصویرسازی ساختارهای الکتریکی زیر سطحی در بررسی‌های مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله می‌توان به چنگ (۲۰۰۰)، یانگ و همکاران (۲۰۰۲)، هاوک و همکاران (۲۰۰۳)، چنگ و همکاران (۲۰۰۸)، کروک و همکاران (۲۰۰۸)، چمبرز و ویلکینسون (۲۰۱۲)، آمایا و همکاران (۲۰۱۶) و آرجوچ و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد.

به‌طور معمول، چنین اندازه‌گیری‌هایی با الکترودی‌های قرارگرفته بر روی زمین سطح زمین انجام می‌گیرد. با فرض عدم‌تغییر در مقاومت‌ویژه الکتریکی در جهت عمود بر پروفیل برداشت می‌توان یک مدل مقاومت‌ویژه دوبعدی را تعیین کرد، که پاسخ این مدل با داده‌های مشاهده‌ای مطابقت داشته باشد. با این حال، در محیط‌های بسیار ناهمگن تفسیر چنین مدل‌های دوبعدی ممکن است نامعتبر باشد، در این‌گونه موارد تصویرسازی 3D ضروری است (چاوز و همکاران، ۲۰۱۵؛ چنگ و همکاران، ۲۰۰۸). در حالت ایده‌آل اندازه‌گیری ERT در آرایه‌های سه‌بعدی انجام می‌شود (به‌عنوان مثال، استفاده از یک صفحه الکترود، به‌جای یک خط)، با این حال، چنین برداشت‌هایی اغلب غیرعملی است؛ زیرا (۱) دسترسی به قسمت‌های یک سایت برداشت ممکن است محدود شود. (۲) الزامات کابل و الکترود برای اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی، بررسی را در یک منطقه کوچک محدود می‌کند. (۳) محدودیت اندازه‌گیری روش‌های ERT (به‌طور معمول) ۱۰۰ الکترود در یک‌زمان است. با این حال، برداشت چندین پروفیل دوبعدی به‌صورت موازی و ترکیب آنها امکان ایجاد یک مدل شبه سه‌بعدی را فراهم می‌آورد.

مقاومت‌ویژه الکتریکی به‌عنوان یکی از خصوصیات فیزیکی کانی‌ها و سنگ‌ها شناخته می‌شودکه دارای دامنه‌تغییرات زیادی در شرایط مختلف زمین‌شناسی می‌باشد. بیشتر کانی‌ها و سنگ‌ها بر اساس میزان وجود یون‌های موجود در آب (رطوبت) جریان را از خود عبور می‌دهند. بر همین اساس می‌توان چنین نتیجه گرفت که تخلخل و رطوبت مهم‌ترین عامل در عبور جریان الکتریکی در زمین می‌باشند، که این خود باعث همپوشانی قابل‌ملاحظه‌ای بین دامنه‌تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی سنگ‌ها و خاک‌ها می‌شود (میلسون، ۲۰۰۳).

پاسخ پلاریزاسیون القایی (یا ولتاژ رو به زوال) بعد از قطع میدان الکتریکی خارجی و در یک زمان کوتاه اندازه‌گیری می‌شود. در واقع با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی، تعادل‌های یونی الکترولیت موجود در خلل‌وفرج‌ها و شکاف‌های سنگ به هم می‌خورد و باعث تجمع یون‌ها در سطوح کانی‌های رسی و یا دانه‌های فلزی شده و تشکیل ابر کاتیونی و یا آنیونی را می‌دهند. با قطع جریان، یون‌ها به حالت اولیه برگشته و منجر به تولید جریانی الکتریکی که جهت آن در داخل کانه مخالف و در خارج کانه موافق جریان اولیه است می‌شود. جریان ثانویه تولیدشده به‌صورت ولتاژ نمایی میراشونده بر روی سطح زمین قابل اندازه‌گیری خواهد بود. این اختلاف پتانسیل به‌صورت ناگهانی به صفر نمی‌رسد؛ بلکه طی زمان محدودی (چند ثانیه یا چند دقیقه) به صفر میل می‌کند. این پدیده بر اثر همان ذخیره‌سازی انرژی در زمان وصل جریان است. منشاء پلاریزاسیون القایی شامل لایه دوگانه الکتریکی (Electrical double layer) و پلاریزاسیون سطحی یا اثر ماکسول-وگنر (Maxwell-Vagner effect) است. برخلاف روش مقاومت‌ویژه الکتریکی که تحت‌تأثیر ویژگی‌های حجمی فضاهای خالی قرار می‌گیرد و همچنین بر اساس توانایی انتقال بار در لایه‌های زیرسطحی تعریف می‌شود، روش پلاریزاسیون القایی وابسته به خصوصیات هندسی فضاهای خالی (بزرگی سطوح دانه‌ها) و ویژگی‌های جدایش بار می‌باشد.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد مطالعات ژئوفیزیکی سازه‌های مهندسی از جمله سدهای خاکی قبل از احداث منجر به شناسایی زون‌های گسله، بررسی وضعیت هیدروژئولوژی منطقه، تفکیک لایه‌ها و نیز تعیین کیفی توده سنگ در زون‌های ناپایدار ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. به‌همین منظور برداشت‌های ژئوفیزیکی در محل سد خاکی ایلام (گلال) باهدف تعیین مرز رولایه و سنگ‌بستر و بررسی وضعیت هیدروژئولوژی محدوده تکیه‌گاه چپ سد انجام گرفت. هرچند این بررسی‌های ژئوفیزیکی در این پژوهش بعد از احداث سد و با احتمال وجود محل فرار آب در دیواره چپ سد انجام شده است. اهداف اصلی این مطالعات شامل تعیین وضعیت کلی رولایه نسبت به سنگ‌بستر، تصویرسازی هندسی سنگ‌بستر و شناسایی قسمت‌های فرسایش یافته سنگ‌بستر می‌باشد. چالش اصلی این مطالعه ژئوفیزیکی، تباین کم رسانندگی بین رولایه با دانه‌بندی در حد رس و سنگ کف متشکل از آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن می‌باشد. در واقع، سوالی که مطرح می‌شود این است که آیا روش‌های ژئوالکتریکی در چنین شرایط زمین‌شناسی قادر به افتراق مناسب مرز رولایه از سنگ کف هستند؟ باتوجه به وسعت منطقه و اهداف در نظر گرفته‌شده، مطالعات بر اساس اندازه‌گیری‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی بنا نهاده شد. برداشت‌های صحرایی در قالب چهار پروفیل تقریباً موازی (باتوجه به شرایط توپوگرافی منطقه) و با طول‌های نسبتاً متفاوت و از طریق آرایه قطبی-دوقطبی به‌صورت پیشرو (Forward measurements) و معکوس (Reverse measurements) انجام شد. همچنین نتایج مدل‌سازی ژئوفیزیکی منتج‌شده از برداشت‌های صحرایی از طریق داده‌های گمانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که قسمتی از سنگ‌بستر تکیه‌گاه چپ سد در اثر شرایط محیطی فرسایش‌یافته که در آینده و با افزایش سطح تراز مخزن احتمال فرار آب از این قسمت تکیه‌گاه سد وجود دارد.

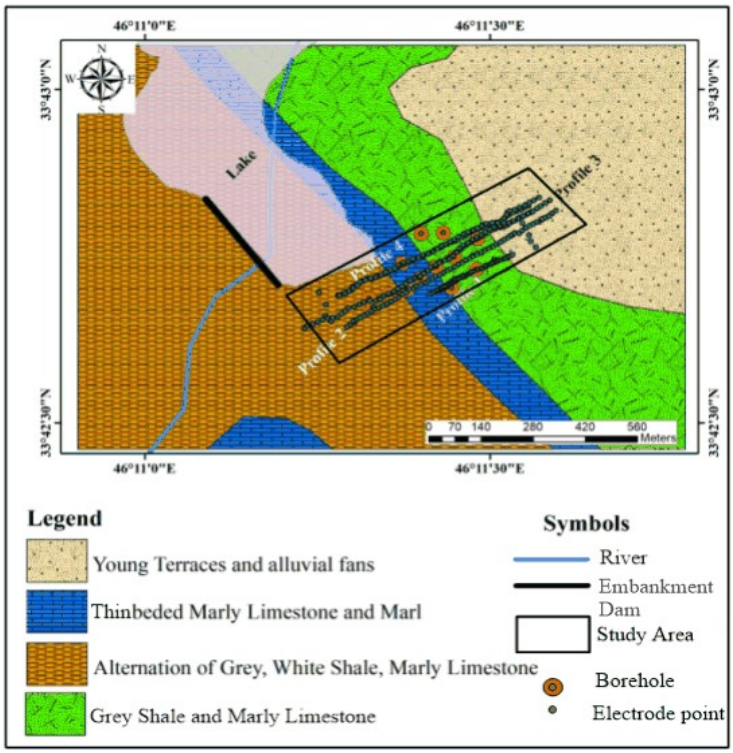
در ادامه به بررسی شرایط زمین‌شناسی منطقه، چگونگی برداشت داده‌های صحرایی، مدل‌سازی و تفسیر نتایج پرداخته می‌شود. در بخش انتهایی نیز نتایج مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲. زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در غرب ایران، استان ایلام و در ۲۲ کیلومتری شهر ایلام و در ۳ کیلومتری پالایشگاه گاز ایلام واقع شده است. این سد در مختصات جغرافیایی N "43 ′42 °33 و E "23 ′11 °46 واقع شده است. منطقه موردمطالعه از لحاظ زمین‌شناسی در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. این زون در جنوب غربی ایران با روند جنوب‌شرقی–شمال‌غربی قرار دارد. مرز شرقی این زون جزء گسل میناب محسوب می‌شود. در سمت شرق زون زاگرس به‌صورت شرقی–غربی در آمده که احتمالاً متأثر از فعالیت گسل راست لغز میناب می‌باشد ولی در سمت غرب روند زون مزبور به‌طور مشخص جنوب شرقی–شمال غربی می‌شود و در ادامه وارد کشور ترکیه شده که در آنجا به‌عنوان زون چین‌خورده موسوم است. پهنای زون چین‌خورده زاگرس در حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. این زون رسوبات پالئوزوئیک، مزوزئیک و ترشیری به‌طور همشیب البته گاهی همراه‌با ناپیوستگی‌هایی روی هم قرار دارند. به‌طور کلی مراحل تکامل خالص این زون موجب تمایز بین آن و دیگر زون‌های زمین‌شناسی در ایران شده است.

همچنین می‌توان گفت که از اینفراکامبرین تا تریاس میانی رسوباتی مشابه ایران مرکزی و البرز ته نشست کرده‌اند: مانند شیل، ماسه سنگ، سیلتستون و گاهی آهک. علاوه‌بر این ته نشست رسوبات نمکدار شرق و جنوب زاگرس نیز در طی این مدت قابل‌توجه می‌باشد. منطقه موردمطالعه از لحاظ سنگ چینه‌ای شامل رسوبات مربوط به دوره ژوراسیک به بعد می‌باشد. رسوبات دوره ژوراسیک در آن گستردگی بسیار محدودی دارند که شامل آهک و شیل و مقداری نیز نهشته‌های تبخیری می‌باشند. رسوبات مربوط به دوره کرتاسه به بعد در منطقه موردمطالعه شامل، سنگ‌های گروه بنگستان متشکل از سنگ‌های آهکی، مارن، آهک مارنی و شیل که شامل سازندهای سروک، سورگاه و ایلام است، سازند گورپی که این سازند از دو رخساره شیلی و آهکی تشکیل شده است. پادگانه‌های آبرفتی در این منطقه در اثر فعالیت رودخانه‌ها در طی زمان ایجاد شده‌اند و اغلب از قلوه سنگ ریگ و ماسه و خاک تشکیل شده‌اند. همچنین دشت‌های سیلتی و رسی همراه‌با خاک‌های برجا غالباً زمین‌های کشاورزی را تشکیل داده‌اند (گزارش شرکت سهامی آب منطقه ای ایلام، ۱۳۹۶). آبرفت‌های مسیر رودخانه‌ها و واریزه‌های دامنه ارتفاعات مهم‌ترین واحدهای مربوط به کواترنری می‌باشد. نقشه زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه همراه‌با موقعیت مخزن سد، جهت پروفیل‌ها و محل گمانه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

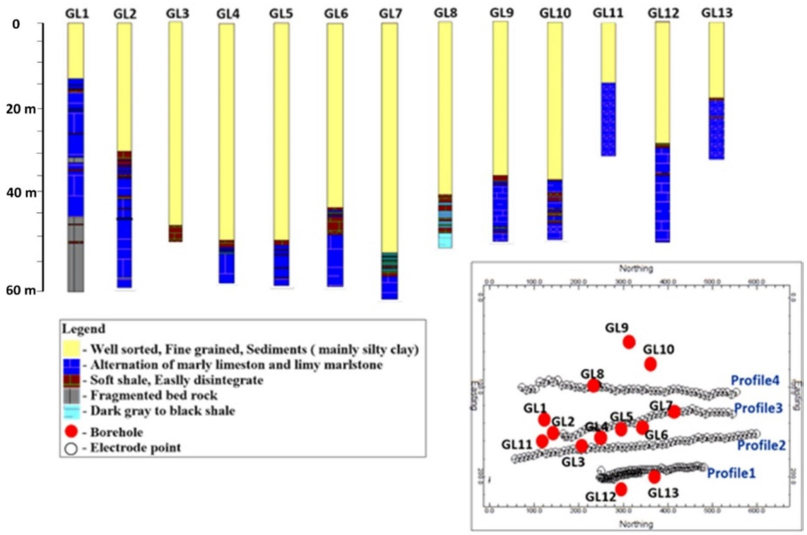
باتوجه به واحدهای زمین‌شناسی موجود در منطقه انتظار می‌رود که سنگ کف محدوده موردمطالعه متشکل از لایه‌های چین خورده با تشکیلات آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن و نیز دانه‌های پیریت ثانویه باشد. البته این مورد بعداً توسط اطلاعات منتج‌شده از گمانه‌های حفاری تأیید شد. وجود پیریت ثانویه در لایه‌بندی سنگ‌بستر احتمالاً باعث افزایش پاسخ پلاریزاسیون القایی نسبت به رولایه و در نتیجه افتراق بهتر مرز سنگ‌بستر و رولایه را فراهم می‌آورد.



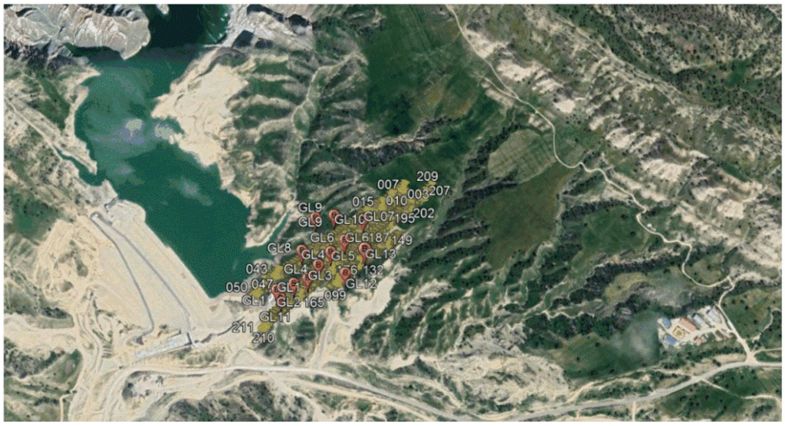
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه همراه‌با موقعیت پروفیل‌ها و محل گمانه‌های اکتشافی (برای جزییات بیشتر از وضعیت پروفیل‌ها و گمانه‌ها به شکل ۲ مراجعه شود).

۳. گمانه‌ها

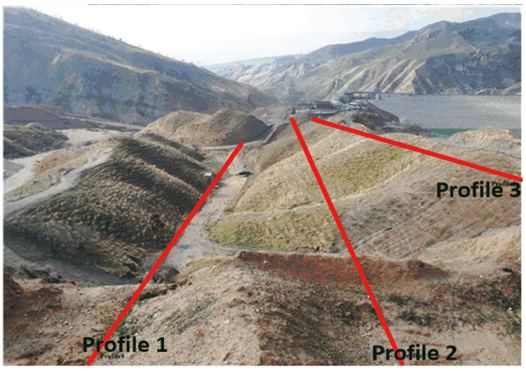
به‌منظور بررسی بهتر تغییرات لیتولوژی از سطح تا عمق تعداد ۱۳ گمانه حفاری در محدوده موردمطالعه در یک شبکه غیرمنظم برداشت شده است. نتایج حاصل از گمانه‌ها همراه‌با موقعیت آنها نسبت به وضعیت پروفیل‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود بخش عمده رولایه را ماسه دانه‌ریز به‌همراه رس و شیل تشکیل می‌دهد که درصد رس در گمانه‌ها و همچنین نسبت به عمق در هر یک از آن‌ها متفاوت است و سنگ‌بستر نیز تناوبی از شیل، آهک و آهک مارنی می‌باشد.



شکل ۲. لیتولوژی حاصل از گمانه‌ها و موقعیت آنها نسبت به پروفیل‌ها و محل الکترودها. بر اساس نتایج حاصل از مغزه‌های به‌دست آمده از گمانه‌ها، رولایه غالباً متشکل از رسوبات دانه‌ریز در حد رس و سیلت است و سنگ‌بستر محدوده شامل آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن.



(الف)



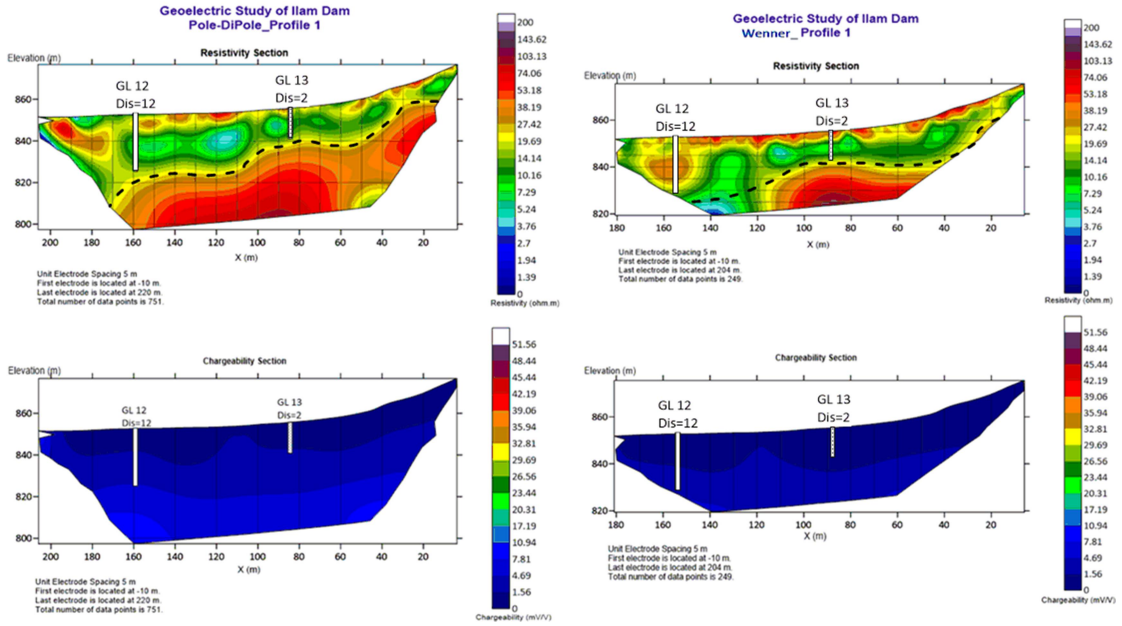
(پ)

(ب)

شکل۳. الف) عکس هوایی از منطقه موردمطالعه به‌همراه موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری کمیت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی و محل گمانه‌ها در نزدیکی پروفیل‌ها (امتداد شمال شرقی–جنوب غربی)، ب) تصویر مخزن سد و توپوگرافی محل برداشت (دید عکس شمالی غربی–جنوب شرقی)، پ) امتداد پروفیل‌ها در محل تکیه‌گاه چپ سد و وضعیت توپوگرافی محل برداشت (دید عکس شرقی – جنوب غربی).

۴. برداشت صحرایی و تفسیر نتایج

باتوجه به وسعت و توپوگرافی منطقه موردمطالعه، تعداد چهار پروفیل عمود بر محور چین‌خوردگی منطقه طراحی شد. امتداد و موقعیت پروفیل‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجایی‌که هدف اصلی این مطالعات تعیین مرز سنگ‌بستر و رولایه می‌باشد، قاعدتاً استفاده از آرایه ونر به‌دلیل حساسیت بیشتر (نسبت به آرایه‌های الکترودی دیگر) به ساختارهای افقی توصیه می‌شود. اما برداشت آرایه ونر از لحاظ حمل و نقل زمان بر بوده و همچنین امکان دستیابی به عمق پایینتر باتوجه به فاصله الکترودی در نظر گرفته شده وجود نداشت. لذا ابتدا در مسیر پروفیل اول باتوجه به ضخامت کم رولایه و دسترسی به اطلاعات گمانه‌های اکتشافی در نزدیکی امتداد خط برداشت، دو آرایه ونر و قطبی–دوقطبی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پروفیل فاصله الکترودی ۵ متر و طول مسیر حدود ۲۰۰ متر در نظر گرفته شد. جهت مقایسه بهتر، مقاطع وارون‌شده حاصل از دو آرایه ونر و قطبی–دوقطبی در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی مربوط به رولایه در هر دو مقطع تاحدود زیادی یکسان است. همچنین هر دو آرایه مرز سنگ‌بستر را به‌خوبی نمایش می‌دهند، هرچند به‌دلیل عمق نفوذ کمتر آرایه ونر و ضخامت بیشتر رولایه در انتهای پروفیل (سمت چپ مقطع) موقعیت سنگ‌بستر به خوبی نشان داده نمی‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که آرایه قطبی–دوقطبی در عین حالی‌که عمق نفوذ بیشتری نسبت به آرایه ونر دارد، با دقت مناسبی مرز رولایه و سنگ‌بستر را تخمین زده است. این نتایج توسط گمانه‌های حفاری‌شده GL12 و GL13 در نزدیکی محل پروفیل مورد تأیید می‌باشد.



(ب) (الف)

شکل ٤. مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) مربوط به پروفیل اول: الف) آرایه ونر، ب) آرایه قطبی–دوقطبی همراه‌با موقعیت گمانه‌های حفاری‌شده در محدوده پروفیل. خط‌چین مرز تخمینی رولایه و سنگ‌بستر را نمایش می‌دهد. در عین حالی‌که مقاطع منتج‌شده از هر آرایه تغییرات نسبتاً مشابه‌ای از کمیت‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی در رولایه و سنگ‌بستر را نشان می‌دهند، اما به‌دلیل عمق نفوذ بیشتر آرایه قطبی–دوقطبی این مرز در انتهای پروفیل (سمت چپ) نسبت به آرایه ونر بهتر تخمین زده می‌شود.

بر اساس نتایج منتج‌شده از برداشت‌های مرحله اول، مابقی پروفیل‌ها (یعنی پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴) با استفاده از آرایه قطبی–دوقطبی و با فاصله الکترودی ۱۰ و ۱۲ متر برداشت شد. مجموعاً در پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب ۷۶۷، ۸۵۵ و ۶۵۳ داده مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی اندازه‌گیری شد. آرایه قطبی–دوقطبی، یک آرایه نامتقارن است و مقطع نهایی حاصل از این آرایه باعث جابه‌جایی ساختارهای زیر سطحی می‌شود، جهت جبران این مشکل، داده‌ها هم به‌صورت پیشرو و هم به‌صورت معکوس برداشت شد؛ به‌طوری‌که تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده در هر پروفیل دو برابر تعداد معمول شد. جدول ۱ مشخصات هر پروفیل شامل فاصله الکترودی، تعداد پرش‌ها در هر برداشت، طول پروفیل‌ها و فاصله آنها از پروفیل اول را نمایش می‌دهد. فاصله الکترودی در این پروفیل‌ها به دلایلی همچون تغییر ضخامت رولایه در منطقه و نیاز به عمق کاوش بیشتر جهت دسترسی به سنگ‌بستر و تفکیک‌پذیری مناسب مقاطع، متغیر انتخاب شده است. طول خطوط برداشت و فاصله هر یک از پروفیل‌ها نسبت به یکدیگر بر اساس شرایط توپوگرافی و عارضه‌های زمین‌شناسی منطقه و همچنین دسترسی به اطلاعات حاصل از گمانه‌های حفاری‌شده در امتداد پروفیل‌ها در نظر گرفته شد.

جدول ۱. مشخصات طول پروفیل‌ها به‌همراه فاصله الکترودی و تعداد پرش هر پروفیل و نسبت فاصله پروفیل‌ها از یکدیگر.

شماره پروفیل	فاصله از پروفیل اول بر حسب (m)	طول پروفیل برحسب (m)	عمق پروفیل برحسب (m)	فاصله الکترودی برحسب (m)	تعداد پرش در هر برداشت
۱	-	۲۳۰ (m)	۵۵ (m)	۵ (m)	n=۱۶
۲	۳۰ (m)	۶۱۰ (m)	۱۱۰ (m)	۱۰ (m)	n=۱۴
۳	۷۰ (m)	۶۳۰ (m)	۱۰۰ (m)	۱۲ (m)	n=۱۲
٤	۱۲۵ (m)	۵۵۰ (m)	۱۱۰ (m)	۱۲ (m)	n=۱۴

اندازه‌گیری‌های صحرایی توسط گیرنده GRx8mini-Allegro2 شرکت GDD و یک دستگاه فرستنده مدل TSQ-3 ساخت شرکت Scintrex و یک دستگاه ژنراتور برق با توان W ۳۶۰۰ انجام شد. قبل از برداشت داده‌ها، جهت افزایش کیفیت اندازه‌گیری‌ها، مقاومت الکتریکی تماسی (Contact resistance) بین الکترودها و زمین بررسی شد و مقدار مناسب برای مقاومت الکتریکی تماسی حدود ۵ کیلو اهم در نظر گرفته شد و در محل الکترودها با مقاومت الکتریکی تماسی بیشتر، از محلول آب نمک استفاده شد. همچنین توقف تکرار اندازه‌گیری‌ها در هر ایستگاه بر اساس کنترل مقدار انحراف‌معیار پارامترهای فیزیکی ثبت‌شده در نظر گرفته شد. پاسخ‌های ولتاژ در هر نقطه اندازه‌گیری از طریق تزریق جریان الکتریکی به‌مدت ۴ ثانیه به زمین ثبت شد. شکل ۵ مدلی از پاسخ کامل ولتاژ در حوزه زمان را نشان می‌دهد به‌طوری‌که V_∞ ولتاژ لحظه ای (Instantaneous Voltage) و بلافاصله پس از تزریق جریان به‌دست می‌آید، V_η ولتاژ جریان مستقیم (Direct current) و V_s ولتاژ ثانویه (Secondary voltage) پس از قطع جریان الکتریکی است. از لحاظ برداشت صحرایی، به علت محدودیت‌های دستگاهی امکان ثبت V_∞ وجود ندارد، از طرفی به‌دلیل وجود اثرات جفت‌شدگی الکترومغناطیسی (EM coupling) و جفت‌شدگی خازنی (Capacity coupling) در ابتدای منحنی پاسخ ولتاژ بعد از قطع جریان، V_s نیز اندازه‌گیری نمی‌شود. باتوجه به این‌که اثرات القایی (پلاریزاسیون القایی) در زمان تزریق جریان نیز در زمین دیده می‌شود، لذا پاسخ V_η اندازه‌گیری شده علاوه‌بر این‌که تحت‌تأثیر ویژگی‌های رسانندگی لایه‌های زیرسطحی قرار می‌گیرد، متأثر از خصوصیات پلاریزاسون القایی مواد نیز می‌باشد به‌طوری‌که در مدل‌سازی پیشرو مقاومت‌ویژه جریان مستقیم اثرات پلاریزاسیون القایی نادیده گرفته می‌شود (یووال و اولدنبرگ، ۱۹۹۷). منحنی میراشونده پاسخ ولتاژ پس از قطع جریان، از طریق ۲۰ پنجره زمانی با توزیع عددی کول-کول در هر ایستگاه اندازه‌گیری شد. کمیت پلاریزاسیون القایی در هر پنجره زمانی از طریق معادله (۱) و با انتگرال‌گیری از منحنی ولتاژ در بازه زمانی مشخصی محاسبه می‌شود (سامنر، ۱۹۷۶؛ رینولدز، ۲۰۱۱).

$$\eta_i = \frac{1}{(t_{i+1}-t_i)V_\eta}\int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t)\,dt \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که پاسخ پلاریزاسیون القایی η_i برحسب mV/V و در هر پنجره زمانی t_i و t_{i+1} محاسبه می‌شود.

سپس پاسخ نهایی پلاریزاسیون القایی در هر ایستگاه به‌عنوان ورودی به مدل‌سازی وارون به‌کمک رابطه (۲) و از طریق جمع وزن داده‌شده ولتاژها محاسبه می‌شود. در واقع با این کار اثر همه پنجره‌های زمانی در طول منحنی میراشونده در نظر گرفته شده و عدد پلاریزاسیون القایی قابل اعتمادتری حاصل می‌شود. همچنین ثبت شکل کامل ولتاژ میراشونده امکان ارزیابی کیفیت پاسخ پلاریزاسیون القایی را فراهم می‌آورد.

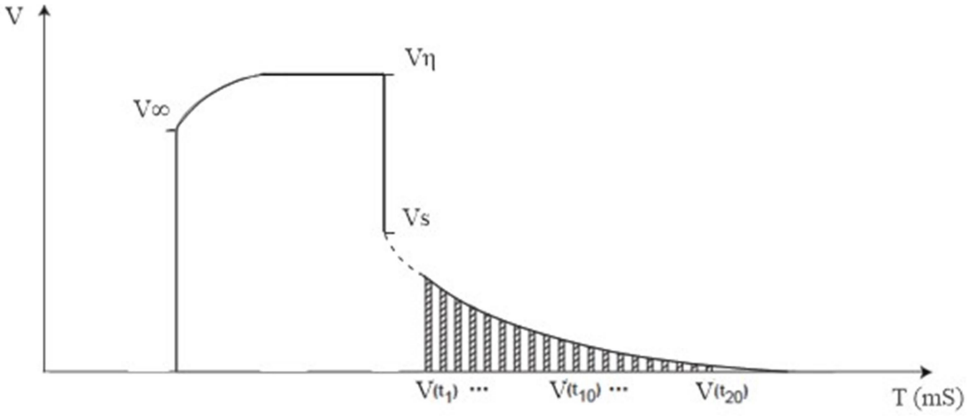
$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{n}\eta_i t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i} \qquad (۲)$$

نمونه‌ای از منحنی‌های ولتاژ ثبت شده در شکل ۶ نمایش داده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود منحنی با نقاط سیاه رنگ شکل نمایی میراشونده ولتاژ را به‌خوبی نشان می‌دهد این در حالی‌است که منحنی با نقاط قرمز به‌دلیل نسبت سیگنال به نوفه پایین تغییرات ولتاژ به‌صورت نمایی میراشونده وجود ندارد. داده‌های پلاریزاسیون القایی ثبت‌شده از طریق شکل منحنی میراشونده آنها به دو گروه داده‌های خوب و داده‌های بد تقسیم‌بندی می‌شوند. در این مطالعه حدود ۲ درصد از داده‌های ثبت شده به‌عنوان داده‌های بد از مجموعه اندازه‌گیری‌ها حذف شد. البته علاوه به بررسی بصری داده‌ها، کیفیت اندازه‌گیری‌ها به‌صورت کمی و از طریق میزان انحراف‌معیار ($SD = 1/N-1\sum_i^N(d_i-\mu)$)، به‌طوری‌که N تعداد تکرار در هر ایستگاه اندازه‌گیری (تعداد تکرارها بر اساس کاهش میزان انحراف‌معیار داده‌ها در نظر گرفته شد به‌طوری‌که تعداد تکرارها در ایستگاه‌های مختلف بین عدد ۸ تا ۱۶ متغییر می‌باشد)، d داده‌ها و μ میانگین داده‌ها

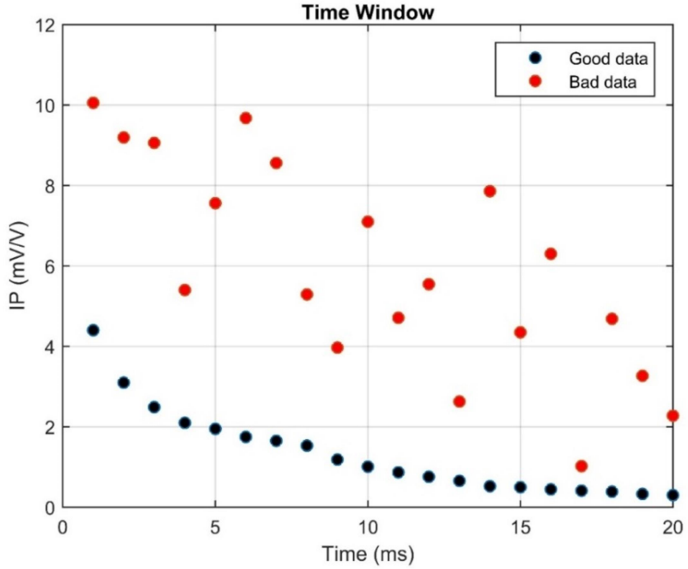
تکرارشده در هر ایستگاه است) آنها مورد ارزیابی قرار گرفت.

همچنین استفاده از شکل کامل منحنی ولتاژ در سال‌های اخیر امکان برآورد پارامترهای حوزه فرکانس مانند ثابت زمانی (τ) و وابستگی فرکانسی (C) را فراهم می‌آورد (فیانداکا و همکاران، ۲۰۱۲؛ موریا و همکاران، ۲۰۱۸). در واقع از طریق وارون‌سازی داده‌های τ و C اطلاعات ارزشمندی در رابطه با نوع دانه‌بندی و هندسه فضاهای خالی حاصل می‌شود. هرچند در این مقاله صرفا از جمع وزن داده‌شده منحنی ولتاژ با هدف برآورد توزیع کمیت پلاریزاسیون القایی لایه‌های زیرسطحی استفاده می‌شود.

پس از پردازش داده‌ها و حذف اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی با نسبت سیگنال به نوفه پایین (معیار حذف داده‌ها بر اساس میزان انحراف‌معیار پاسخ‌های ولتاژ ثبت شده و نیز شکل پاسخ منحنی پلاریزاسیون القایی در نظر گرفته شده است)، به‌منظور تهیه مقطعی از توزیع کمیت‌های ژئوالکتریکی لایه‌های زیرسطحی، داده‌ها وارون‌سازی می‌شود. در این مطالعه از نرم‌افزار Res2DInv (لوک، ۲۰۰۷) جهت مدل‌سازی وارون استفاده می‌شود. باتوجه به توپوگرافی منطقه از روش المان محدود به‌منظور افزایش دقت مدل‌سازی فیزیکی (پیشرو) در حین وارون‌سازی بهره گرفته شد.



شکل۵. پاسخ ولتاژ در حوزه زمان و تغییرات منحنی ولتاژ پس از قطع جریان و در مرحله دشارژ. منحنی نمایی میراشونده ولتاژ از طریق پنجره‌های زمانی گسسته می‌شود. کمیت پلاریزاسیون القایی در هر پنجره از طریق انتگرال‌گیری پاسخ ولتاژ در بازه زمانی مربوطه محاسبه می‌شود.



شکل٦. پاسخ منحنی میراشونده پلاریزاسیون القایی نسبت به زمان. منحنی سیاه مربوط به پاسخ ولتاژ با نسبت سیگنال به نوفه بالا و منحنی قرمز مربوط به پاسخ ولتاژ با نسبت سیگنال به نوفه پایین (آغشته به نوفه).

همچنین مؤلفه‌های وارون‌سازی مانند تعداد تکرار، قیود فیزیکی و مقدار شروع کننده پارامتر منظم‌سازی بر اساس اطلاعات اولیه تنظیم می‌شود. وارون‌سازی بر اساس الگوریتم گوس-نیوتن و با بهنگام‌کردن ماتریس حساسیت در تکرار انجام می‌گیرد. باهدف کاهش تابع عدم‌برازش $\|\boldsymbol{d}-f(\boldsymbol{m})\|_2$، به‌طوری‌که $\boldsymbol{d}$ مقاومت‌ویژه ظاهری (ρ_a) یا پلاریزاسیون القایی ظاهری (η_a)، $\boldsymbol{m}$ پارامترهای مدل شامل مقاومت‌ویژه یا پلاریزاسیون القایی و f عملگر مدل‌سازی پیشرو مقاومت‌ویژه جریان مستقیم) مقدار پارامتر منظم‌سازی در هر تکرار به فاکتوری تقسیم می‌شود. مدل‌سازی پیشرو در مقاومت‌ویژه در یک مرحله و بر اساس رابطه $\rho_a = f(\sigma)$ محاسبه می‌شود به‌طوری‌که f عملگر مدل‌سازی پیشرو مقاومت‌ویژه جریان مستقیم است. این در حالی‌است که مدل‌سازی پیشرو در محاسبه پلاریزاسیون القایی ظاهری (η_a) از طریق حل مسئله پیشرو برای σ و $\sigma(1-\eta)$ از طریق رابطه زیر انجام می‌شود (سیگل، ۱۹۵۹؛ اولدنبرگ و لی، ۱۹۹۴).

$$\eta_a = \frac{f(\sigma(1-\eta)) - f(\sigma)}{f(\sigma(1-\eta))} \qquad (۳)$$

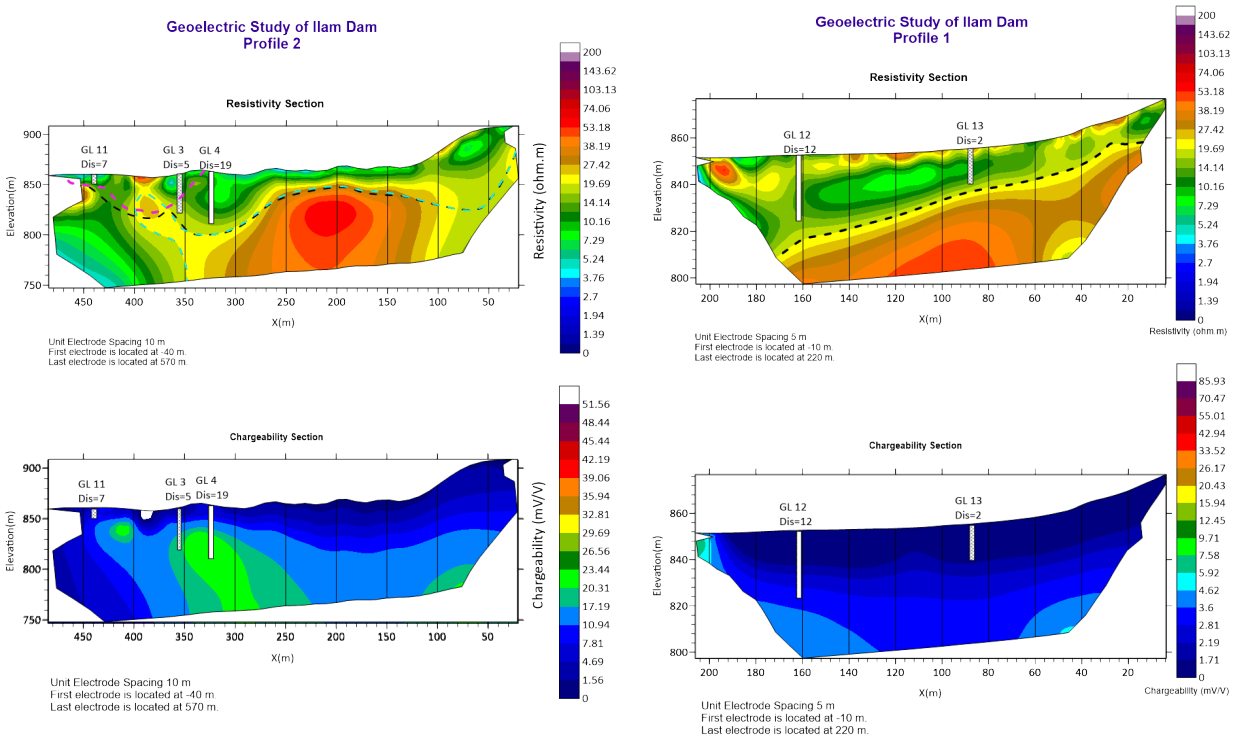
معادله بالا نشان می‌دهد که در هر تکرار حل مسئله وارون پلاریزاسیون القایی، نیاز به محاسبه پاسخ پیشرو در دو مرتبه و به‌ترتیب برای σ و $\sigma(1-\eta)$ است. بنابراین برای کاهش زمان محاسبات در حل مسئله معکوس، مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری و پلاریزاسیون القایی ظاهری به‌صورت همزمان در هر تکرار انجام می‌شود.

ابتدا نتایج وارون‌سازی داده‌های برداشت‌شده در پروفیل ۱ بر اساس تلفیق اندازه‌گیری‌های آرایه ونر و قطبی-دوقطبی نمایش داده می‌شود. پیش‌تر در شکل ۴ نتایج وارون‌سازی داده‌های منتج‌شده از آرایه‌های ونر و قطبی-دوقطبی به‌صورت مجزا نمایش داده شد. با هدف افزایش تفکیک‌پذیری مدل‌های وارون، شکل ۷-الف) نتایج وارون‌سازی مدل‌های ژئوالکتریکی حاصل از تلفیق هردو آرایه ونر و قطبی-دوقطبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود استفاده همزمان از داده‌های هر دو آرایه ونر و قطبی-دوقطبی مدلی با تفکیک‌پذیری بالاتر و نزدیک‌تر به واقعیت زمین حاصل می‌شود. مرز رولایه تخمینی با سنگ‌بستر به‌صورت خط‌چین نمایش داده می‌شود. با توجه به ضخامت رولایه در امتداد پروفیل ۱ انتظار می‌رود که رطوبت سنگ کف نسبت به پروفیل‌های دیگر بیشتر و در نتیجه میزان مقاومت‌ویژه متوسط سنگ کف پایین‌تر باشد. بر همین اساس مقدار ۱۹/۶۹ اهم-متر به‌عنوان مرز تفکیک رولایه و سنگ کف در نظر گرفته شد. بر اساس مقطع پلاریزاسیون القایی، مقدار متوسط IP برای رولایه حدود ۲ میلی‌ولت بر ولت و این مقدار برای سنگ‌بستر حدود ۴ میلی‌ولت بر ولت تخمین زده می‌شود. مرز تخمینی با توجه به تغییرات پلاریزاسیون القایی مطابقت مناسبی با گمانه شماره GL13 که نزدیک به خط پروفیل است، دارد. هر چند مرز تخمینی در مقطع پلاریزاسیون در فاصله حدود ۱۶۰ متری با اطلاعات گمانه GL12 تفاوت دارد، احتمالاً این اختلاف به‌دلیل فاصله حدود ۱۲ متری این گمانه از محل پروفیل است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد به‌دلیل وجود میان لایه‌های شیل و مارن در سنگ کف و نیز دانه‌بندی رس و سیلت در رولایه، تباین کافی جهت تخمین مناسب مرز دو محیط از طریق مقطع پلاریزاسیون القایی وجود ندارد. این نکته شایان ذکر است که گمانه‌های حفاری‌شده در محدوده پروفیل‌های ژئوالکتریکی بر روی مقاطع به‌صورت ستون‌های به رنگ سفید هاشورخورده و بدون هاشور نمایش داده می‌شود. جهت تطابق مقاطع با نتایج گمانه‌های حفاری سعی شده از گمانه‌ها با کمترین فاصله از پروفیل‌ها استفاده شود. طول این ستون‌ها متناسب با عمق سنگ‌بستر در محدوده موردمطالعه می‌باشد. ستون‌های هاشورخورده معرف گمانه‌های نزدیک به پروفیل و ستون‌های بدون هاشور معرف گمانه‌های دور از خط پروفیل می‌باشد. همچنین فاصله گمانه‌ها از محل پروفیل‌ها بر روی مقاطع نیز مشخص شده است. استفاده از اطلاعات اولیه (*a priori* information) با هدف اعمال قیود در فرایند حل مسئله وارون منجر به برآورد مدل‌های ژئوفیزیکی نزدیک‌تر به

واقعیت زمین و در نتیجه کاهش عدم‌قطعیت در تفسیر نتایج می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود اطلاعات به‌دست آمده از گمانه‌های حفاری به‌عنوان قیود فیزیکی و هندسی در مسئله باعث کاهش عدم‌یکتایی و افزایش دقت مدل‌سازی می‌شود. به دو دلیل امکان استفاده از این اطلاعات در تخمین بهتر مرز سنگ‌بستر و رولایه در نرم‌افزار مورد استفاده وجود نداشت؛ مورد اول این‌که داده‌های گمانه ای فقط شامل لیتولوژی می‌شود و فاقد اطلاعات در رابطه با مقادیر مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی مغزه‌های به‌دست آمده در عمق‌ها مختلف می‌باشد و مورد دوم نیز عدم‌امکان واردکردن مرز تقریبی متغیر در طول پروفیل به نرم‌افزار Res2Dinv است. در واقع نرم‌افزار تنها یک عمق ثابت به‌عنوان اطلاعات اولیه برای مرز سنگ‌بستر و رولایه در تمام طول پروفیل دریافت می‌کند، این در حالی است که ضخامت رولایه در طول پروفیل و از پروفیلی به پروفیل دیگر متفاوت است.

نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های پروفیل دوم در شکل ۷-ب) نمایش داده می‌شود. بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، جنس رسوبات زیر سطحی در محدوده سمت راست پروفیل عمدتاً متشکل از سنگ آهک مارنی و محدوده سمت چپ حاوی شیل می‌باشد، از این‌رو دو مقدار متفاوت از مقاومت‌ویژه جهت تفکیک رولایه از سنگ کف در دو قسمت پروفیل در نظر گرفته می‌شود. در این پروفیل عمق مورد بررسی حدود ۱۱۰ متر می‌باشد. با توجه به مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی، رولایه همچون پروفیل ۱ با مقاومت‌ویژه متوسط ۱۳ اهم-متر و سنگ‌بستر با مقاومت‌ویژه متوسط ۴۰ اهم-متر تفکیک شده‌اند. مرز رولایه تخمینی با سنگ کف به‌صورت خط‌چین در مقطع مقاومت‌ویژه نمایش داده شده است. در این مقطع دو زون با مقاومت‌ویژه بالا دیده می‌شود. زون اولی (از سمت راست پروفیل) مربوط به مرکز طاقدیس و زون دوم نشان‌دهنده یک چین خوابیده (Recumbent fold) است. در مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی در حدود متراژ ۴۰۰ تا ۴۴۰ متر مشاهده می‌شود که مقادیر مقاومت‌ویژه نسبت به مرکز پروفیل با مقاومت‌ویژه بالا (سنگ آهک مارنی) مقدار کمتری را نشان می‌دهد. با توجه به بازه تغییرات مقاومت‌ویژه در این محدوده، این قسمت از پروفیل احتمالاً خالی از سنگ‌بستر آهکی است و می‌توان آن را به سنگ‌بستر شیلی نسبت داد. به‌دلیل نزدیکی پاسخ‌های IP رولایه و سنگ‌بستر شیلی در انتهای پروفیل، تعیین مرز سنگ‌بستر از رولایه مشکل است. بنابراین جهت تعیین مرز در این قسمت مقطع از اطلاعات IP پروفیل سوم که به موازات پروفیل دوم در فاصله حدود ۲۰ متر قرار گرفته است استفاده می‌شود (مراجعه به شکل ۹-الف). در طول این مقطع ۲ ناحیه اصلی با مقاومت‌ویژه بالا (حدوداً ۵۵ اهم-متر) در فاصله ۰ تا ۳۸۰ متری، و با مقاومت‌ویژه پایین (حدوداً ۱۶ اهم-متر) در فاصله ۳۸۰ تا ۴۹۰ متری مشاهده می‌شود. زون با مقاومت‌ویژه بالا را می‌توان به سنگ آهک و زون مقاومت‌ویژه پایین را می‌توان به وجود لایه شیلی نسبت داد. به نظر می‌رسد در حد فاصل ۳۸۰ تا ۴۸۰ متری مقدار مقاومت‌ویژه با افزایش محتوای آب (زون اشباع) از سطح تا عمق مقطع کاهش می‌یابد. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از مغزه‌های حفاری، ساختگاه سد شهدای ایلام حاوی دانه‌های پیریت رسوبی در توالی سنگ آهک‌های رسی می‌باشد. کانی پیریت در صورتی‌که در معرض هوا و یا جریان آب‌های زیرزمینی قرار گیرد به‌سرعت هوازده‌شده و برنگ قرمز اکسیدآهن در سطح سنگ‌ها و یا در امتداد درزه‌ها مشاهده می‌شود. در این منطقه، سنگ آهک رسی به‌دلیل ریزدانه‌بودن و دربر داشتن کانی‌های رسی از نفوذپذیری پایینی برخوردار بوده و بنابراین پیریت به‌طور عمده در آنها به‌صورت کاملاً سالم و هوانزده وجود دارد (شکل ۸). پیریت تقریباً در همه محیط‌های زمین‌شناسی از جمله رسوبی، آذرین و دگرگونی و همچنین رگه‌های گرمابی تشکیل می‌شود. این کانی یکی از سازنده‌های مهم سنگ‌های رسوبی به‌ویژه سنگ آهک، ماسه سنگ و سیلت استون‌های کربناتی و شیل‌ها است. بخش عمده‌ای از پیریت موجود

در رسوبات و سنگ‌های رسوبی به‌صورت اوتیژن در محیط‌های رسوبی و یا دیاژنتیک اولیه که در هنگام تبدیل رسوب به سنگ به‌وجود می‌آید. با توجه به این توضیحات، پاسخ IP نسبتاً بالاتر در سنگ‌بستر منطقه نسبت به رولایه وجود دانه‌های پراکنده پیریت در رسوبات آهکی ساختگاه سد است.

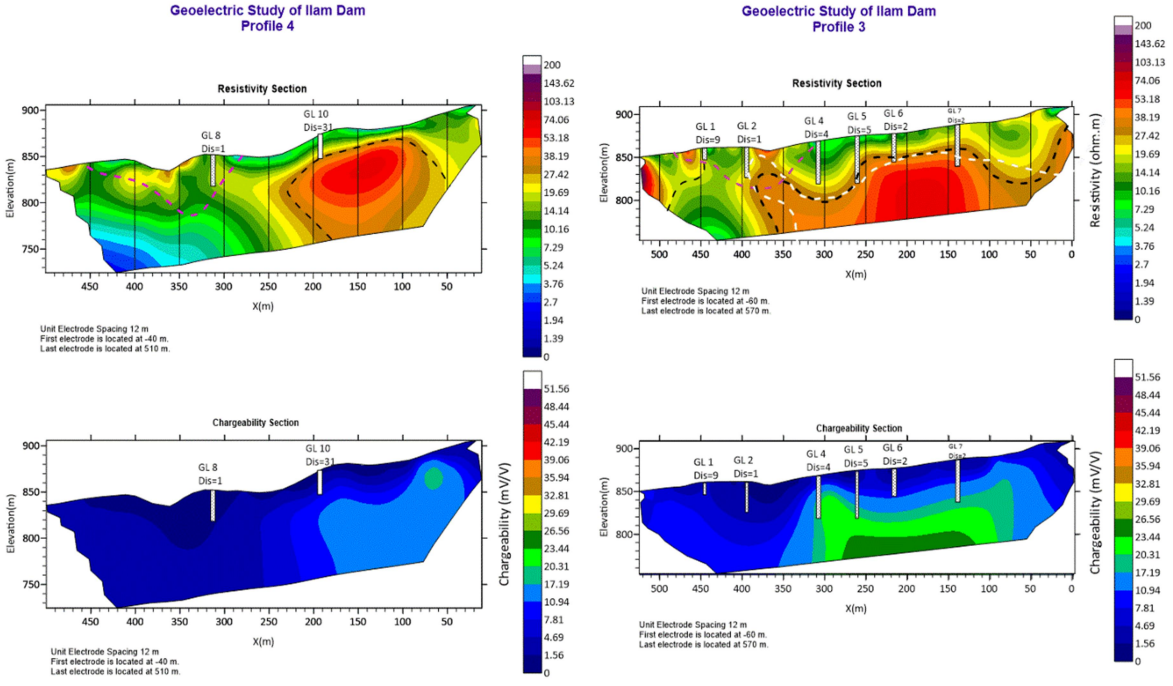


(ب) (الف)

شکل۷. مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) همراه‌با موقعیت گمانه‌های حفاری‌شده در محدوده پروفیل‌ها الف) مقاطع حاصل از پروفیل اول و تعیین مرز رولایه و سنگ‌بستر (خط‌چین سیاه) از تلفیق داده‌های حاصل از آرایه‌های ونر و قطبی–دوقطبی، ب) مقاطع حاصل از پروفیل دوم و تعیین مرز رولایه و سنگ‌بستر منتج‌شده از مدل مقاومت‌ویژه (خط‌چین سبز) و مدل پلاریزاسیون القایی (خط‌چین ارغوانی) و نمایش نهایی مرز سنگ‌بستر با رولایه منتج‌شده از تلفیق مقاطع مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی (خط‌چین سیاه).

شکل۸. نمونه‌ای از مغزه تهیه‌شده از سنگ‌بستر منطقه موردمطالعه. دانه‌های پیریت سالم و غیر هوازده در انتهای مغزه دیده می‌شود.

مقاطع ژئوالکتریکی منتج‌شده از وارون‌سازی اندازه‌گیری‌های پروفیل سوم در شکل ۹-الف) نمایش داده می‌شود. با توجه به مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی، رولایه مانند پروفیل اول با مقاومت‌ویژه متوسط ۱۴/۱ اهم-متر و سنگ‌بستر با مقاومت‌ویژه متوسط ۳۸/۶ اهم-متر تفکیک شده‌اند. مرز رولایه تخمینی با سنگ کف به‌صورت خط‌چین در مقطع مقاومت‌ویژه نمایش داده شده است (شکل ۹-الف). با مقایسه عمق سنگ‌بستر به‌دست آمده از مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی (خط‌چین سیاه) و اطلاعات گمانه‌ها تفاوت‌هایی مشاهد می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر هم بیان شد احتمال این‌که مقطع زمین‌شناسی تا حدودی متفاوت از مقطع ژئوالکتریک باشد دور از ذهن نیست به این دلیل که مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی و نیز پلاریزاسیون القایی متأثر از دانه‌بندی، جنس، رطوبت، تخلخل و تراوایی می‌باشد، لذا تفاوت بین مقاطع ژئوالکتریکی و زمین‌شناسی محتمل است. با بررسی جزیی‌تر نتایج حفاری مشاهده می‌شود که با افزایش عمق حفاری میزان محتوای رس کاهش و دانه‌بندی از رس به گراول تغییر می‌یابد. در واقع این افزایش دانه‌بندی خود را با افزایش مقادیر مقاومت‌ویژه بر روی مقطع نشان می‌دهد. این روند در گمانه‌های GL5، GL6 و GL7 مشاهده می‌شود. برای مقایسه روند تغییرات مرز رولایه به‌دست آمده در پروفیل سوم با مرز رولایه منتج‌شده از مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی پروفیل دوم، خط‌چین سفید که نشان‌دهنده این مرز در پروفیل دوم است در پروفیل شماره سوم نیز نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات مقاومت‌ویژه تقریبا یکسان است. همچنین زون نشان داده‌شده با مقاومت‌ویژه نسبتاً بالا در محدوده ۳۶۰ متری مربوط به یک چین خوابیده می‌باشد که این ساختار زمین‌شناسی در پروفیل شماره دوم نیز قابل مشاهده بود.



(ب) (الف)

شکل ۹. مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) همراه‌با موقعیت گمانه‌های حفاری‌شده در محدوده پروفیل‌ها، الف) مقاطع حاصل از پروفیل سوم و تعیین مرز رولایه و سنگ‌بستر (خط‌چین سیاه) با استفاده از مدل مقاومت‌ویژه و مدل پلاریزاسیون القایی (خط‌چین ارغوانی)، همچنین جهت بررسی و مقایسه بهتر روند تغییرات سنگ‌بستر در دو پروفیل دوم و سوم، خط‌چین سفید، مرز تعیین شده در پروفیل دوم را نشان می‌دهد ب) مقاطع حاصل از پروفیل چهارم همراه‌با موقعیت گمانه‌های حفاری‌شده در محدوده پروفیل و مرز سنگ‌بستر منتج‌شده از مدل مقاومت‌ویژه (خط‌چین مشکی) و پلاریزاسین القایی (خط‌چین ارغوانی).

همچنین بر اساس مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در فاصله دو گمانه GL2 و GL1 سنگ کف از نوع آهکی وجود ندارد. از طرفی با توجه به بازه تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی در این محدوده، احتمال وجود رسوباتی از جنس شیل می‌باشد. و به‌علاوه با کمک نتایج منتج‌شده از مقطع IP مرز رولایه حد فاصل ۳۱۰ تا ۴۵۰ متر (GL4 تا GL1) توسط خط‌چین ارغوانی مشخص شده است (شکل ۹-الف).

پروفیل چهارم به‌طول ۵۵۰ متر در حداکثر فاصله تقریبی ۵۵ متر از پروفیل شماره ۳ و به موازات آن با استفاده از آرایه قطبی-دوقطبی برداشت شده است. در این پروفیل عمق کاوش حدود ۱۱۰ متر می‌باشد. نتایج مدل‌سازی وارون این پروفیل شامل مقاطع مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی در شکل ۹-ب ارائه می‌شود. در طول این مقطع، دو ناحیه اصلی با مقاومت‌ویژه بالا (حدوداً ۵۵ اهم-متر) در فاصله ۵۰ تا ۲۲۰ متری، و با مقاومت‌ویژه پایین (حدوداً ۱۱ اهم-متر) در فاصله ۲۲۰ متر تا انتهای پروفیل مشاهده می‌شود. زون با مقاومت‌ویژه بالا را می‌توان به سنگ‌بستر آهکی و زون با مقاومت‌ویژه پایین را می‌توان به وجود لایه شیلی نسبت داد. به نظر می‌رسد در حد فاصله ۲۲۰ متر تا ۵۰۰ متری مقدار مقاومت‌ویژه با افزایش محتوای آب (زون اشباع) از سطح تا عمق مقطع کاهش می‌یابد. با توجه به مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی، رولایه مانند پروفیل ۱ با مقاومت‌ویژه متوسط ۸ اهم-متر و سنگ‌بستر با مقاومت‌ویژه متوسط ۳۵ اهم-متر تفکیک شده‌اند. مرز رولایه تخمینی با سنگ کف به‌صورت خط‌چین سیاه در مقطع مقاومت‌ویژه نمایش داده شده است. با توجه به مقطع IP مرز رولایه با سنگ کف در متراژ ۲۸۰ تا ۴۵۰ متری به‌وسیله خط‌چین ارغوانی نشان داده می‌شود. در رابطه با حد فاصله بین گمانه‌های GL1 و GL2 در پروفیل شماره ۳ و نیز حد فاصل ۴۰۰ تا ۴۵۰ متری در پروفیل شماره ۲، پاسخ‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی پایینی دیده می‌شود که از لحاظ تفسیر زمین‌شناسی و با توجه به لایه‌بندی منطقه احتمال وجود لایه‌های شیلی و یا حتی زون گسله وجود دارد. اما بر اساس ضخامت زیاد این محدوده (حدود ۵۰ متر) شباهت بیشتری به لایه‌های شیلی نشان می‌دهد و این احتمال قوی‌تر است. علاوه‌بر آن، هیچ‌گونه گسل و یا برش گسلی متناسب، که توانایی ایجاد چنان جابه‌جایی نسبتاً بزرگی را داشته باشد، در محدوده مورد نظر مشاهده نشده است.

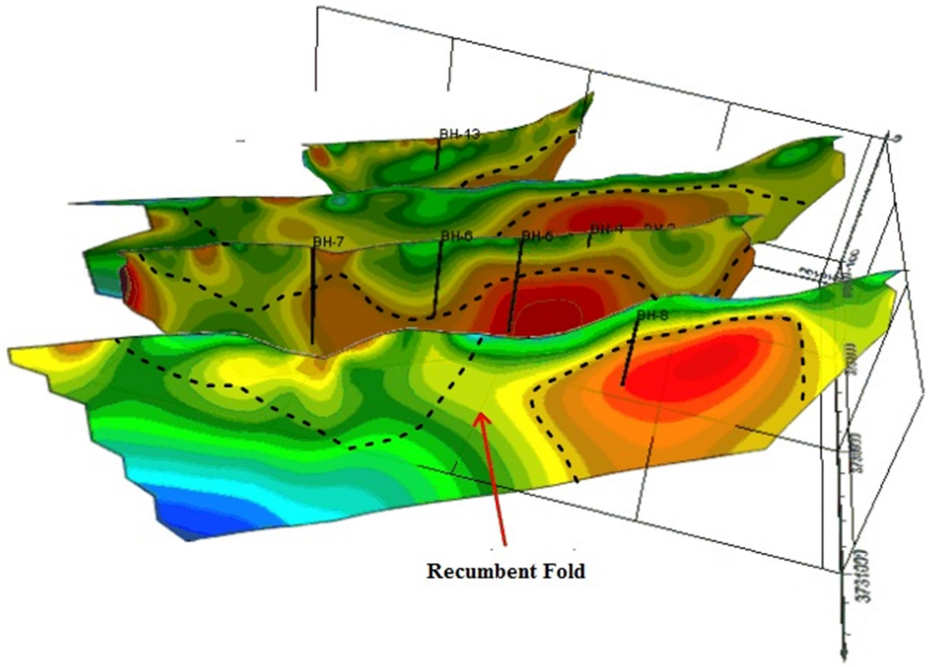
مقایسه‌ای از نتایج تخمین عمق سنگ‌بستر حاصل از مطالعات ژئوالکتریکی و داده‌های حفاری در جدول ۲ ارائه شده است. البته در پروفیل ۳ و گمانه‌های GL5، GL6 و GL7 اختلاف بیشتری بین ضخامت‌های تخمینی مشاهده می‌شود. از آنجایی‌که کمیت‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی تحت‌تأثیر پارامترهایی مانند رطوبت، دانه‌بندی و جنس مصالح زیرسطحی قرار می‌گیرد و همچنین با توجه به اطلاعات گمانه‌های اکتشافی میزان محتوی کاهش و دانه‌بندی از رس به گراول تغییر می‌یابد، می‌توان استنباط کرد که اختلاف‌های موردنظر بین نتایج حفاری و مقاطع ژئوالکتریکی متأثر از این عارضه طبیعی است. با این وجود روند کلی تغییرات ضخامت رولایه در همه مقاطع از روند زمین‌شناسی و اطلاعات گمانه‌های اکتشافی تبعیت می‌کند.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد یکی از اهداف این مطالعه تعیین تغییرات جانبی سنگ‌بستر و تصویرسازی قسمت‌هایی از سنگ کف در تکیه‌گاه چپ سد دچار فرسایش شده و امکان ایجاد مسیری برای فرار آب در صورت بالا آمدن سطح تراز مخزن سد فراهم می‌آورد. این فرو افتادگی در تکیه‌گاه سمت چپ برروی مقاطع حاصل از پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴ قابل مشاهده است. فرو افتادگی در مقطع مقاومت‌ویژه پروفیل ۲ (شکل ۷-ب) در حد فاصل ۲۷۰ تا ۳۸۰ متری قابل مشاهده است. این عارضه زمین‌شناسی در مقطع مقاومت‌ویژه پروفیل ۳ (شکل ۹-الف) در حد فاصل ۲۵۰ تا ۳۵۰ متری نشان داده می‌شود و در مقطع پروفیل ۴ (شکل ۹-ب) در وسط پروفیل و در فاصله ۲۹۰ تا ۴۵۰ متری دیده می‌شود. با

هدف نمایش بهتر از تغییرات ساختارهای زیر سطحی (مانند چین خوابیده و هندسه ساختگاه تکیه‌گاه سمت چپ) در منطقه موردمطالعه، نمایشی سه‌بعدی از مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی در شکل ۱۰ ارائه می‌شود. همچنین مرز نهایی سنگ‌بستر منتج‌شده از تلفیق مقاطع مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی و نیز تخمینی از روند فروافتادگی سنگ‌بستر در نمایش سه‌بعدی نشان داده می‌شود.

جدول۲. مقایسه داده‌های حاصل از برداشت ژئوالکتریکی و گمانه‌های حفاری‌شده.

گمانه	شماره پروفیل	عمق سنگ‌بستر حاصل از مقاطع ژئوالکتریک (m)	عمق سنگ‌بستر حاصل از مغزه‌گیری (m)	فاصله گمانه از پروفیل (m)	اختلاف عمق حاصل از ۲ روش (m)
GL12	P1	۲۸	۳۶	۱۲	۸
GL13	P1	۱۵	۱۷	۲	۲
GL11	P2	۱۵	۱۰	۷	۵
GL3	P2	٤٦	۳۹	۵	۷
GL4	P2	٦۲	۵۲	۱۹	۱۰
GL1	P3	۱۷	۱٤	۹	۳
GL2	P3	٤۲	۳۵	۱	۷
GL4	P3	٦٦	٤۹	٤	۱۷
GL5	P3	٤٦	۵۵	۵	۹
GL6	P3	۲۸	۳۳	۲	۵
GL7	P3	۳۰	٤۹	۲	۱۹
GL8	P4	٤۰	۳۵	۱	۵
GL10	P4	۲۵	۲۷	۳۱	۲



شکل۱۰. نمایش سه‌بعدی از مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی منتج‌شده از پروفیل‌های صحرایی همراه‌با موقعیت گمانه‌ها در امتداد پروفیل‌ها (در اینجا تنها از گمانه‌هایی که فاصله نزدیکی به خطوط برداشت داشته‌اند، استفاده شده است). مرز تخمینی رولایه و سنگ‌بستر با خط‌چین مشکی نمایش داده می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به بررسی توانایی توموگرافی ژئوالکتریکی با هدف تخمین مرز رولایه و سنگ‌بستر و نیز تصویرسازی تغییرات جانبی ساختگاه سد در تکیه‌گاه چپ سد خاکی ایلام می‌پردازد. چالش اصلی این مطالعه ژئوفیزیکی تباین کم رسانندگی بین رولایه با دانه‌بندی در حد رس و سنگ کف متشکل از آهک و میان لایه‌هایی از شیل و مارن می‌باشد. باتوجه به وسعت منطقه و اهداف در نظر گرفته شده، مطالعات بر اساس اندازه‌گیری‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی بنا نهاده شد. برداشت‌های صحرایی در قالب چهار پروفیل تقریباً موازی (با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه) و با طول‌های نسبتاً متفاوت و از طریق آرایه قطبی-دوقطبی به‌صورت پیشرو و معکوس انجام شد. هرچند که با توجه به هدف اصلی این مطالعه یعنی تخمین مرز سنگ‌بستر، استفاده از آرایه ونر به‌دلیل حساسیت بیشتر به ساختارهای افقی ترجیح داده می‌شود، اما بررسی‌های ما نشان داد که نتایج مقاطع وارون‌شده حاصل از آرایه ونر و آرایه قطبی-دوقطبی تفاوت چندانی از نظر تفکیک‌پذیری افقی وجود ندارد و از طرف دیگر عمق نفوذ بیشتر آرایه قطبی-دوقطبی امکان بررسی بیشتر ساختارهای عمیق را فراهم می‌آورد. مدل‌های منتج‌شده از وارون‌سازی داده‌های صحرایی نشان می‌دهد که مرز تخمینی رولایه و سنگ‌بستر تطابق مناسبی با روند کلی زمین‌شناسی منطقه و نیز داده‌های به‌دست آمده از گمانه‌های اکتشافی در نزدیکی مسیر پروفیل‌ها وجود دارد. هرچند تفاوت‌هایی در عمق سنگ‌بستر برآورد شده از مقاطع ژئوالکتریکی و اطلاعات گمانه‌ها مشاهد شد که این تفاوت ناشی تغییر میزان محتوای رس و کاهش دانه‌بندی از رس به گراول از سطح تا عمق می‌باشد. این افزایش دانه‌بندی خود را با افزایش مقادیر پارامتر مقاومت‌ویژه الکتریکی بر روی مقاطع نمایان می‌کند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که اختلاف‌های موردنظر متأثر از این عارضه طبیعی است. بر اساس جنس مصالح سنگ‌بستر در ابتدا و انتهای پروفیل‌ها که به‌ترتیب متشکل از آهک مارنی و شیل می‌باشد و نیز از آنجاکه انتظار پاسخ‌های IP بالا به‌عنوان یک آنومالی و به‌منظور تفکیک رولایه از سنگ‌بستر در قسمت راست پروفیل‌ها وجود ندارد، بنابراین در قسمت راست مقاطع جهت تعیین مرز رولایه تاکید بر روی مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی شده است و از مقاطع پلاریزاسیون القایی جهت تعیین مرز سنگ‌بستر شیلی در سمت چپ مقاطع بهره برده شده است. بررسی مقاطع ژئوالکتریکی همچنین نشان می‌دهد که قسمت‌هایی از سنگ‌بستر در تکیه‌گاه چپ سد دچار فرسایش شده و امکان ایجاد مسیری برای فرار آب در صورت بالاآمدن سطح تراز مخزن سد فراهم می‌آورد. بنابراین نیاز به اقدامات پیشگیرانه جهت رفع این مشکل قبل از فرسایش رولایه و در نتیجه ایجاد معبری برای خروج آب در تکیه‌گاه چپ سد وجود دارد. این مطالعات نشان داد که استفاده همزمان از اندازه‌گیری‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در صورت انتخاب مناسب پارامترهای برداشت (مانند آرایه الکترودی بهینه و فاصله الکترودی مناسب)، پردازش دقیق داده‌های ثبت شده و وارون‌سازی صحیح داده‌ها، امکان تخمین مناسبی از تغییرات مرز سنگ‌بستر حتی در شرایطی که تباین کافی بین رولایه و سنگ‌بستر وجود ندارد مهیا می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از دبیر و دو داور محترم مجله فیزیک زمین و فضا به جهت ارائه نظرات سازنده به جهت بهبود کیفیت مقاله تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

گزارش بررسی نشت و پایداری شیب تکیه‌گاه چپ سد شهدای ایلام، شرکت سهامی آب منطقه ای ایلام، ۱۳۹۶.

Amaya, G. A., Dahlin, T., Barmen, G. and Rosberg, J. E., 2016, Electrical Resistivity Tomography and Induced Polarization for Mapping the Subsurface of Alluvial Fans: A Case Study in Punata (Bolivia). Geosciences, 6(4), 51.

Arjwech, R., Sriwangpon, P., Somchat, K., Pondthai, P. and Everett, M., 2020, Electrical resistivity tomography (ERT) data for clay mineral mapping, Elsevier. Amsterdam.

Benes, V., Tesař, M. and Boukalová, Z., 2011, Repeated geophysical measurements of the basic principle of the GMS methodology used to inspect the condition of flood control dikes. River Basin Management, California, USA.

Chambers, J. E. and Wilkinson, P. B., 2012, Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography, Geomorphology, 177–178, 17–25.

Chavez, R., Tejero, A., Cifuentes, G., Hernandez, E. and Aguilar, D. A., 2015, Imaging fractures beneath a residential complex using novel 3-D electrical resistivity arrays. Environmental and Engineering Geophysics 20(3), 219–233.

Cheng, P. H., 2000, Imaging the subsurface structure of the northern tip of the 1999 Chi-Chi earthquake fault in central Taiwan using the electric resistivity method. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. 11, 721–734.

Cheng, P. H., Ger, Y. I. and Lee, S. L., 2008, An electric resistivity study of the Chelungpu fault in the Taichung area, Taiwan. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. 19, 241–255.

Crook, N., Binley, A., Knight, R., Robinson, D. A., Zarnetske, J. and Haggerty, R., 2008, Electrical resistivity imaging of the architecture of substream sediments. Water Resources Research, 44, 13.

Ding, H., and Weiwei, J., 2016, Application of Geophysical Methods in Tunnel Exploration. Proceedings of the 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE), 188–192.

Fiandaca, G., Auken, E., Christiansen, A. V. and Gazoty, A., 2012, Time-domain-induced polarization: Full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters, Geophysics, 77, E213-E225.

Hauck, C., Muhll, D. V. and Maurer, H., 2003, Using DC resistivity tomography to detect and characterize mountain permafrost. Geophysical Prospecting, 51(4), 273–284.

Hunter, J. A., Pullan, S. E., Burns, R. A., Gagne, R. M. and Good,R. S., 1984, Shallow seismic reflection mapping of the overburden–bedrock interface with the engineering seismograph some simple techniques. Geophysics, 49, 1381-1385.

Ikard, S. J., Revil, A., Schmutz, M., Karaoulis, M., Jardani, A. and Mooney, M., 2014, Characterization of focused seepage through an earthfill dam using geoelectrical methods. Groundwater, 52(6), 952–965.

Ikard, S. J., Revil, A., Jardani. A., Woodruff, W. F., Parekh, M. and Mooney, M., 2012, Saline pulse test monitoring with the self-potential method to non-intrusively determine the velocity of the pore water in leaking areas of earth dams and embankments. Water Resources Research, 48, 1–17.

Jones, G., Sentenac, P. and Zielinski, M., 2014, Fissure detection using 2-D and 3-D electrical resistivity tomography on a flood embankment. Journal of Applied Geophysics, 106,196–211.

Loke, M., 2007, Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method, Geo-electrical Imaging 2D and 3D. Geotomo Software, Malaysia.

Li, S. C., Liu, B., Xu, X., Nie, L., Liu, Z., Song, J., Sun, H., Chen, L. and Fan, K,., 2017, An overview of ahead geological prospecting in tunneling. Tunneling and Underground Space Technology. 63, 69–94.

Liu, P., Wang, K. and Wang, Q., 2021, Data acquisition method and the effectiveness of multichannel analysis of surface waves for defect detections on small earthen dams. Arabian Journal of Geosciences, 14, 631.

Lin, C. P., Hung, Y. C., Wu, P. L. and Yu, Z. H., 2014, Performance of 2-D ERT in investigation of abnormal seepage: a case study at the Hsin-Shan earth dam in Taiwan. Environmental and Engineering Geophysics 19(2), 101–112.

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O. and Wilkinson, P. B., 2013, Recent developments in direct current geo-electrical imaging method, Journal of Applied Geophysics, 95, 135-156.

Maurya, P. K., Fiandaca, G., Christiansen, A. V. and Auken, E., 2018, Field-scale comparison of frequency-and time-domain spectral induced polarization, Geophysical Journal International, 24(2), 1441-1466.

Milson, J., 2003, Field Geophysics, the Geological Field Guide Series, John Wiley & Sons.

Oldenburg, D. W. and Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data, Geophysics 59, 9, 1327-1341.

Planès, T., Mooney, M. A., Rittgers, J. B. R., Parekh, M. L. and Snieder, R., 2016, Time-

lapse monitoring of internal erosion in earthen dams and levees using ambient seismic noise. Géotechnique, 66(4), 301–312.

Perri, M. T., Boaga, J., Bersan, S., Cassiani, G., Cola, S., Deiana, R., Simonini, P., Patti, S. and 2014, River embankment characterization: the joint use of geophysical and geotechnical techniques. Journal of Applied Geophysics, 110, 5–22.

Raji, W. O. and Adedoyin, D. O., 2019, Dam Safety Assessment Using 2D Electrical Resistivity Geophysical Survey and Geological Mapping, Journal of King Saud University, 32(1), 1123-1129.

Reynolds, J. M., 2011, An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons Ltd.

Seigel, H. O., 1959, Mathematical formulation and type curves for induced polarization, Geophysics 24, 3, 547-565, DOI: 10.1190/1.1438625.

Sentenac, P., Benes, V., Budinski, V., Keenan, H. and Baron, R., 2017, Post flooding damage assessment of a historical pond and earth dam by non-invasive geophysical techniques. Journal of Applied Geophysics, 146, 138–148.

Sentenac, P., Jones, G., Zielinski, M. and Tarantino, A., 2013, An approach for the geophysical assessment of fissuring of estuary and river flood embankments: validation against two case studies in England and Scotland. Environmental Earth Sciences, 69(6), 1939–1949.

Sumner, J. S., 1976, Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration, Elsevier, Amsterdam.

Yang, C. H., You, J.I. and Lin, C. P., 2002, Delineating Lake Bottom structure by resistivity image profiling on water surface, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences,13(1), 39-52.

Yuval, and Oldenburg, D. W., 1997, Computation of Cole-Cole parameters from IP data, Geophysics, 62, 436-448.

Resistivity and IP Tomography to determine Overburden-Bedrock Interface: A case study of Ilam Embankment dam

Azizlo, M.[1], Ghanati, R.[2*] and Hafizi, M. K.[3]

1. M.Sc. Student, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 1 Jan 2022, Accepted: 19 April 2022)

Summary

Determination of the overburden-bedrock interface with fine-grained sediments in a high-fold sedimentary environment is a challenging geophysical issue. Electrical Resistivity Tomography (ERT) is considered one of the most effective geophysical approaches for mapping subsurface layers based on the conductivity distribution of materials. The surveys are often performed in two dimensions to investigate lateral and depth variations of resistivity and chargeability values of subsurface layers. The resistivity method, influenced by the volumetric properties of empty spaces, is defined by the ability to transfer charge in subsurface medium, but the induced polarization method depends upon the geometric properties of the pore spaces (grain surface size). Despite the advantages of geo-electrical methods in imaging subsurface structures, due to the high dependency of resistivity and induced polarization parameters on the physical and hydrogeological conditions of the layers, it is not possible to fully match the geological and geo-electrical sections.

One of the applications of geophysical studies is to determine the contact zone between overburden and bedrock in engineering structures such as embankment dams. In cases where the conductivity contrast between the overburden and the bedrock is low, the exact determination of this boundary with the help of geo-electrical methods confronts high uncertainty. In this study, the efficiency of electrical resistivity tomography and induced polarization is investigated by measuring several parallel profiles with the aim of imaging the boundary between overburden and bedrock and determining the possibility of a water escape zone at the left bank of the Ilam embankment dam. According to the results obtained from the inversion of the field measurements, rechargeable sections would be ascribed to the shale region as well as marl limestone containing pyrite particles.

The main objectives of this study include determining the general condition of the overburden concerning the bedrock, geometric imaging of the bedrock, and identification of parts of the bedrock eroded over time. The significant challenge of this geophysical study is the low conductivity contrast between clay and silt overburden and limestone bedrock interbedded with shale and marl. Due to the size of the study area, the studies were performed based on tomographic measurements of electrical resistivity and induced polarization. The field surveys were conducted using four almost parallel profiles (according to the topographic conditions of the area) and with relatively different lengths and through a Pole-Dipole array in forward and reverse measurements.

Geological data as well as borehole information are used to validate the geo-electrical sections to better interpret the models obtained from the collected data (i.e., geo-electrical measurements). Finally, due to the high topography of the area and to better show the trend of subsurface structures using two-dimensional models obtained from electrical resistivity tomography and induced polarization as well as drilled boreholes, a three-dimensional view of sections and boreholes has been prepared. Based on the models obtained from the geo-electrical data, it can be concluded that geophysical studies (electrical tomography) have been able to successfully determine the eroded region of the bedrock surface as well as the bedrock-overburden contact which correlates well with boreholes drilled in the area.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography (ERT), Induction Polarization, Overburden-Bedrock Interface, Embankment Dam.

* Corresponding author: rghanati@ut.ac.ir