

مطالعه پتانسیل زمین لغزش با استفاده از روش توموگرافی الکتریکی دوبعدی در منطقه چای باغ (سوادکوه شمالی، ایران)

رضا امامی^۱، مهدی رضاپور^{۲*} و محمد فرجی^۳

^۱ دانش آموخته دکتری زلزله شناسی، گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، کارشناس آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تبریز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰)

چکیده

زمین لغزش‌ها مخاطراتی طبیعی هستند که باعث تلفات جانی و خسارات مالی شدید می‌شوند. برای تجزیه و تحلیل زمین لغزش‌ها از روش‌های مختلفی از جمله روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی به ترتیب به دلیل دقت و هزینه بسیار کم استفاده می‌شود. در میان روش‌های ژئوفیزیکی، از توموگرافی مقاومت الکتریکی به‌طور گسترده‌ای برای اکتشاف نزدیک به سطح در مناطق زمین لغزش استفاده می‌شود. در این مطالعه از بررسی‌های توموگرافی مقاومت الکتریکی دوبعدی برای بررسی ساختار زیرسطحی و پتانسیل زمین لغزش در منطقه چای باغ استفاده شده است. در مطالعات اولیه پروژه‌های عمرانی به‌ویژه سازه‌های خطی، بررسی مناطقی که پتانسیل لغزش دارند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین منظور پس از ایجاد شکاف بزرگ در قسمتی از جاده ساری- شیرگاه در منطقه چای باغ شهرستان سوادکوه شمالی که واژگون شدن قطار باری را در پایین دست جاده به دلیل خم شدن ریل راه آهن در پی داشت، تحقیقات توموگرافی مقاومت الکتریکی دوبعدی برای تشخیص دلیل این حادثه و احتمال وقوع زمین-لغزش گسترده در منطقه صورت گرفت تا در ساخت دوباره جاده تدابیر لازم لحاظ و از بروز خسارت بیشتر جلوگیری شود. در این تحقیق داده‌های حاصل از سه مقطع با آرایه‌های دو قطبی- دو قطبی، قطبی- قطبی و سونداژ الکتریکی (VES) با روش وارون سازی دوبعدی در نرم افزار Res2dinv تفسیر شد. نتایج مطالعه نشان داد پتانسیل لغزش در سطح وسیعی از منطقه با سطح لغزشی در عمق ۳۰ تا ۳۵ متری از سطح جاده وجود دارد و تجمع شار آب زیرزمینی می‌تواند محرک اصلی زمین لغزش احتمالی در آینده باشد. بر این اساس تمهیدات لازم از جمله طراحی زهکش برای ساخت دوباره این قسمت از جاده برای افزایش ایمنی پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل زمین لغزش، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، وارون سازی، روش کمترین مربعات، سطح لغزش، چای باغ

۱ مقدمه

زمین لغزش سالانه جان هزاران نفر را می‌گیرد و به دلیل آسیب‌رسانی به سازه‌های انسانی و سایر تأسیسات، خسارات مالی شدیدی را به دنبال دارد. عوامل متعددی باعث زمین لغزش می‌شوند که از میان آنها می‌توان به زمین لرزه، بارش‌های شدید، سازوکارهای آتشفشانی و فعالیت‌های انسانی مانند حفاری در شیب‌های تند و غیره اشاره کرد. بسته به ویژگی‌های مواد درگیر، رانش زمین معمولاً در شیب‌های تندتر (با زاویه ۲۵ درجه) و لایه‌های ضعیف (خاک رسی اشباع با مقاومت برشی ضعیف) رخ می‌دهد (هیبرت و همکاران، ۲۰۱۲ و آکپان و همکاران، ۲۰۱۵). گاهی اوقات زمین لغزش می‌تواند یک شهر یا روستا را به‌طور کامل زیر توده شکست‌خورده مدفون کند و باعث آسیب جبران‌ناپذیر شود (برای مثال، دفن روستای یونگای در پرو به دلیل رانش زمین در سال ۱۹۷۰) (کرامر، ۱۹۹۶)؛ بنابراین جهت کاهش خطرات مرتبط با زمین لغزش، داشتن دانش کامل درباره هندسه، آب‌شناسی، خواص مواد و سینماتیک مداوم آنها ضروری است (گوئیرینو و همکاران، ۲۰۱۶).

بازسازی جامع یک مدل لغزش، مستلزم شناخت صحیح هندسه زمین لغزش، سطح لغزش، ساختارهای تغییر شکل، لایه‌بندی خاک، پارامترهای مقاومت برشی و آب‌شناسی است (لوک و همکاران، ۲۰۱۳؛ پرون و همکاران، ۲۰۱۴؛ هو و همکاران، ۲۰۱۸؛ دای و همکاران، ۲۰۱۹؛ واتلت و همکاران، ۲۰۱۸ و کارلینی و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی زیرسطحی و تعیین مشخصات مواد لغزش‌های زمین وجود دارد که در میان آنها روش‌های ژئوتکنیکی (گاله‌ها، آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی) به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند؛ زیرا داده‌های دقیق و باورپذیری را درباره شرایط زیرسطحی فراهم می‌کنند (سوریو، ۲۰۱۳ و توپساکال و توپال، ۲۰۱۵).

روش‌های ژئوتکنیکی علی‌رغم مطمئن بودن، پرهزینه، زمان‌بر و مستلزم نفوذ به داخل زمین هستند. علاوه بر این، داده‌های به‌دست‌آمده از این روش‌ها فقط به یک نقطه خاص مربوط می‌شود. شرایط زیرسطحی به‌ویژه در مناطق لغزش بسیار متغیر است؛ بنابراین جمع‌آوری داده‌های جامع شامل حفاری چندین گمانه با توزیع مناسب در مناطق لغزش مقرون به صرفه نیست و به رویکردی تکمیلی برای بررسی زمین لغزش نیاز است (ساس و همکاران، ۲۰۰۸؛ دی باری و همکاران، ۲۰۱۱؛ پرون و همکاران، ۲۰۱۴؛ ییلماز و نارمان، ۲۰۱۵ و اسزوکلی و همکاران، ۲۰۱۷).

در دهه‌های اخیر، از روش‌های ژئوفیزیکی به‌طور گسترده در تحقیقات زمین لغزش استفاده شده است. این روش‌ها برای تعیین ضخامت رسوبات آبرفتی، سرعت موج برشی، فرکانس بنیادی، عمق سنگ بستر، سطح آب زیرزمینی، سطح لغزش و غیره در مناطق لغزش به‌کار می‌روند (چوبیستی و همکاران، ۲۰۱۳؛ رضایی و همکاران، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰؛ فرسارد و همکاران، ۲۰۱۶ و رضایی و چوبیستی، ۲۰۱۷). روش‌های ژئوفیزیکی در مقایسه با روش‌های ژئوتکنیکی، سریع، کم‌هزینه و غیرمخرب هستند و می‌توانند مناطق وسیعی را بررسی کنند؛ از این رو، علاقه عمومی به این روش‌ها در حال افزایش است (اوه و سون، ۲۰۰۸ و دوی و همکاران، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، روش‌های ژئوفیزیکی معایبی نیز دارند. این روش‌ها مستقیم هستند و تفسیر نتایجشان یا پیچیده است یا به پشتیبانی داده‌های ژئوتکنیکی تکمیلی نیاز دارد. علاوه بر این، با افزایش عمق نفوذ، دقت آنها کاهش می‌یابد و نوفه تأثیر منفی بر نتایج می‌گذارد (لوک و همکاران، ۲۰۱۳ و گوئیرینو و همکاران، ۲۰۱۷).

امروزه از روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی مانند شکست لرزه‌ای، انعکاس لرزه‌ای، اندازه‌گیری نوفه محیط، رادار نفوذی زمین، بررسی‌های الکترومغناطیسی و توموگرافی

می‌شود (لوک، ۲۰۰۴؛ دی باری و همکاران، ۲۰۱۱ و مریت و همکاران، ۲۰۱۴).

در ایران زمین لغزش‌ها همیشه مشکل آفرین بوده‌اند. ایران با توپوگرافی اغلب کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد و شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی را برای ایجاد طیف وسیعی از زمین لغزه‌ها دارد. این پدیده همه‌ساله در بیشتر استان‌های کشور موجب خسارات اقتصادی فراوانی به صنعت، جنگل‌ها، مراتع، مزارع و خانه‌های مسکونی می‌شود (حقیقی و همکاران، ۱۳۸۹). بیشتر جاده‌های مازندران به دلیل واقع شدن در رشته‌کوه‌های البرز کوهستانی است. در استان مازندران به دلیل لغزش‌های فراوان شاهد مسدود شدن جاده و نقص در حمل‌ونقل هستیم. وجود گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان، شیب‌های تند، بارندگی‌های فراوان و لایه‌های مرنی و شیلی متعلق به دوره میوسن موجب تشدید این فرایند است (درویش‌زاده، ۱۳۸۵). در این قسمت از ایران روش مقاومت ویژه الکتریکی در بررسی زمین لغزش‌ها یکی از متداول‌ترین روش‌ها به لحاظ دقت و سرعت است (اجل لوئیان، ۱۳۸۸). به‌طور کلی مهم‌ترین کاربرد روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی عبارت‌اند از: تعیین ویژگی‌های لایه‌های زمین و رسوبات آبرفتی و توپوگرافی سنگ کف؛ تشخیص شکستگی‌ها و ناپوستگی‌های جانبی در لایه‌ها؛ بررسی زمین لغزش‌ها با تأکید بر تعیین شیب و سطوح لغزش؛ بررسی کمی و کیفی سطوح لغزش (دوبرین، ۱۹۸۸).

روش‌های توموگرافی الکتریکی تطابق خوبی با اطلاعات زمین‌شناسی، چاه‌پیمایی و نمونه‌های مغزه‌ای نشان می‌دهند. بارندگی‌های محلی می‌توانند باعث کاهش اصطکاک سطح لغزش شوند و مواد متخلخل را از آب اشباع کنند. از نظر الکتریکی، بی‌هنجاری مقاومت ویژه کم ممکن است به دلیل محتوای زیاد املاح در سیال منفذی، وجود رس، ریزدانه بودن ذرات یا ترکیبی از این

مقاومت الکتریکی (ERT) برای شناسایی زمین لغزش‌ها استفاده می‌شود. در بین روش‌های ژئوفیزیکی، ERT برای بررسی زمین لغزش بسیار مفید است. اندازه‌گیری‌های ERT شامل تجهیزات کم‌وزن (برخلاف دیگر تجهیزات خسته‌کننده) می‌شود که کار را در زمین لغزش و مناطق دور آسان می‌کند. این روش بر اساس اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی است (فریدل و همکاران، ۲۰۰۶؛ گراندژان و همکاران، ۲۰۱۱؛ کاپیزی و مارتورانا، ۲۰۱۴؛ مریت و همکاران، ۲۰۱۴؛ رونینگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ لینگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ سوتو و همکاران، ۲۰۱۷، یانه و همکاران، ۲۰۱۷ و اولمان و همکاران، ۲۰۱۸). اندازه‌گیری‌های یک‌بعدی محدودیت‌هایی دارند و معمولاً تغییرات افقی مقاومت الکتریکی زیرسطحی را نشان نمی‌دهند. بررسی‌های دوبعدی به درستی تغییرات عمودی و افقی مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهند. بررسی‌های سه‌بعدی، زمان‌بر، پرهزینه و دشوار هستند و معمولاً در شرایط توپوگرافی با شیب کمتر از ۲۰ درصد تکمیل می‌شوند (پرونه و همکاران، ۲۰۱۴ و کاپیزی و مارتورانا، ۲۰۱۴).

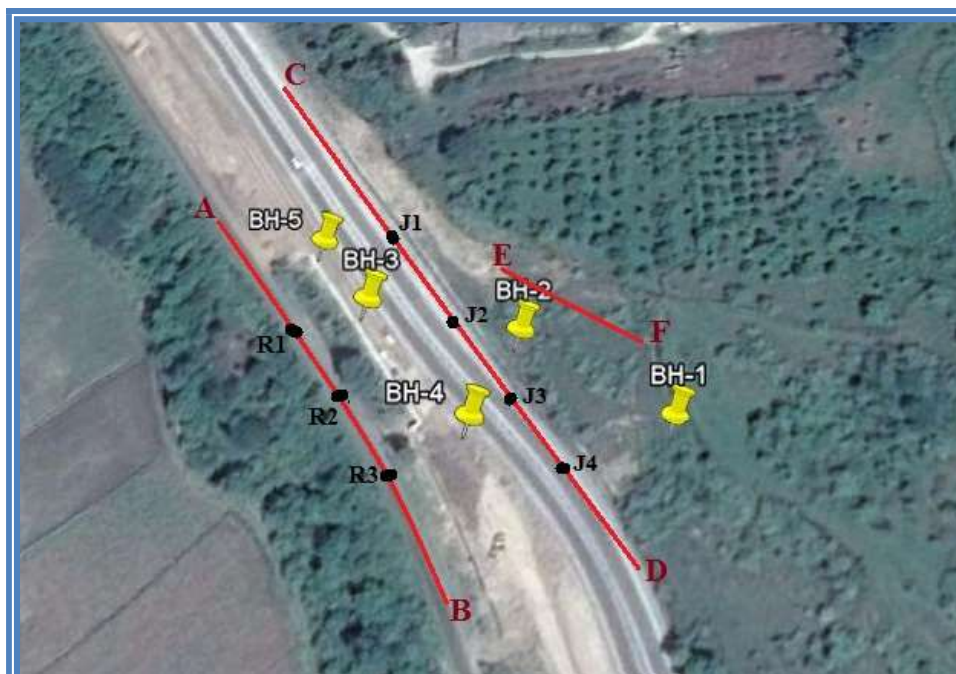
عواملی مانند وجود خاک رس، درجه اشباع و شدت هوازدگی در سنگ‌ها بر مقاومت الکتریکی تأثیر می‌گذارند؛ لذا روش ERT به اندازه کافی برای شناسایی و رمزگشایی ساختارهای زیرسطحی و گرم‌زدگی‌های زمین‌شناسی حساس است (براگا و همکاران، ۱۹۹۹ و کولای و همکاران، ۲۰۱۸). از بررسی‌های ERT دوبعدی که طیف وسیعی از کاربردها را شامل می‌شود، می‌توان برای انواع مختلف زمین لغزش‌ها (انتقالی، چرخشی و غیره) و شرایط زمین‌شناسی (سنگ، خاک یا ترکیبی از هر دو) استفاده کرد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند هندسه سطح لغزش و ساختارهای تغییر شکل زمین لغزش را می‌توان با استفاده از ERT دوبعدی شناسایی کرد. تعیین این ویژگی‌ها به شناسایی جامع یک زمین لغزش منجر

عوامل باشد. بر این اساس قبل از گسیختگی زمین می‌توان مناطق مستعد گسیختگی را با روش‌های توموگرافی مشخص کرد. امروزه، از روش‌های ژئوفیزیکی در بررسی اثر زمین‌لغزش چه در زمینه سازه‌های متمرکز (دراهور، ۲۰۰۶) و چه در زمینه سازه‌های خطی (یانگ، ۲۰۰۴) استفاده گسترده‌ای شده است. پدیده زمین‌لغزش را می‌توان با روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در دو حالت بررسی کرد. در حالت اول، هدف، بررسی احتمال وقوع زمین‌لغزش در مناطقی است که زمینه وقوع این پدیده در آنها وجود داشته باشد و در حالت دوم، منظور از مطالعات اندازه‌گیری مقاومت ویژه، بررسی و تخمین ابعاد توده لغزنده پس از وقوع زمین‌لغزش است. در هر دو حالت، مبانی نظری روش‌های به‌کاررفته یکسان است. پتانسیل زمین‌لغزش چای‌باغ با استفاده از ERT دوبعدی بررسی شد. برای به‌دست‌آوردن داده مناسب، گسترش‌های الکترودی (به‌منظور اندازه‌گیری ERT در طول سه مقطع

AB، CD و EF) عمود بر شیب توپوگرافی زمین لغزش انتخاب شده‌اند تا جریان به‌طور یکنواخت و بدون تأثیر توپوگرافی به درون زمین نفوذ کند (حقیقی و همکاران، ۱۳۸۹) (شکل ۱).

۲ مشاهدات

در ساعت ۷ صبح روز پنج‌شنبه آذر ماه سال ۱۳۹۲ بر اثر ایجاد شکاف بزرگ در قسمتی از جاده در حال احداث در منطقه چای‌باغ شهرستان سوادکوه شمالی و نشست زمین به سمت ریل راه‌آهن، بخشی از راه‌آهن این منطقه زیر خاک رفت. بر اثر این حادثه شش واگن از قطار باربری حامل سوخت مازوت که در حال عبور از این منطقه بود به‌طور کامل واژگون و سبب انحراف قطار باری از مسیر و خسارت مالی شد.



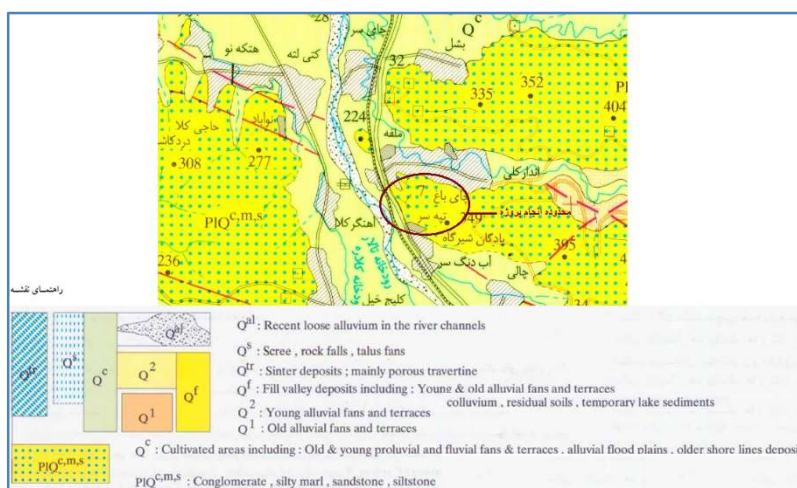
شکل ۱. عکس ماهواره‌ای منطقه (برگرفته از Google Earth) به همراه محل مقاطع (AB، CD و EF) و سونداژها (نقاط سیاه‌رنگ روی مقاطع)

با برداشت و تحلیل داده‌ها به این نتیجه رسیدیم که لایه رسی اشباع از آب از حدود ۱۲ تا ۳۵ متری از سطح جاده وجود دارد که مستعد لغزش است و بنابراین در طراحی این قسمت از جاده باید به این موضوع اهمیت داده شود تا از تکرار حادثه مشابه و حتی زمین لغزش در مقیاس بزرگ جلوگیری شود (شکل ۲).

این مسئله به زمین لغزش نسبت داده شد (شکل ۲). همان‌طور که در شکل ماهواره‌ای مشاهده می‌شود، در قسمت‌های بالایی جاده، زمین لغزش دیده می‌شود که در بازدید صحرایی نیز این مسئله اثبات و با روش توموگرافی الکتریکی سطح زمین لغزش مشخص شد. گفتنی است زمین لغزش بزرگی که مدنظر بود، اتفاق نیفتاده بود؛ زیرا هیچ آثاری از شکستگی در جاده قدیم دیده نمی‌شد. البته



شکل ۲. محل وقوع حادثه. تخریب جاده و واژگونی قطار به‌خوبی در شکل‌ها مشخص است.



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه برگرفته از برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ قائم‌شهر (وحداتی دانشمند و سعیدی، ۱۳۶۹)

۳ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در کیلومتر ۳۷، قطعه دوم پل سفید قائم‌شهر واقع در جاده قائم‌شهر- شیرگاه و بین طول‌های جغرافیایی "۱۸' ۵۱" و "۵۴' ۵۱" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۴۸' ۱۹" و "۲۴' ۲۰" شمالی در استان مازندران، شهرستان قائم‌شهر قرار گرفته است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ قائم‌شهر (وحدتی دانشمند و سعیدی، ۱۳۶۹)، محدوده مورد مطالعه شامل کنگلومرا، مارن سیلت‌دار، ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ است. پایین‌دست منطقه زمین‌لغزش بستر رودخانه تالار واقع است که شامل مخروطه‌افکنه‌ها و پادگانه‌های سیلابی رودخانه‌ای و رودخانه‌ای قدیمی و جوان، دشت‌های طغیانی آبرفتی، نهشته‌های خط ساحل قدیمی‌تر و آبرفت‌های سخت‌نشده عهد حاضر بستر رودخانه‌ها است. در محل وقوع زمین‌لغزش، سطح دامنه را لایه‌ای ضخیم از شن رس‌دار همراه با ماسه پوشانده است که در برخی از قسمت‌ها ضخامت آن به بیش از ۱۰ متر می‌رسد و زیر آن، لایه رسی با خاصیت خمیری قرار دارد. جاده در قسمت عمده‌ای از مسیر روی تراس آبرفتی کناره رودخانه احداث شده بود و توانایی زیاد آن برای جذب آب موجب شد مواد زیرین جاده به هنگام وقوع لغزش حالت روانه گلی به خود بگیرند و به‌صورت زبانه به سمت دره حرکت کنند. در بالادست این زمین‌لغزش، پدیده افتادگی زمین (slump) به‌خوبی دیده می‌شود که حرکت برشی چرخشی دارد و صفحه لغزش به‌صورت قاشقی است (شکل ۳).

دلیل اصلی این‌گونه زمین‌لغزش‌ها، از بین رفتن تکیه‌گاه دامنه در پایین‌دست آن است؛ باین‌حال این زمین‌لغزش‌های طبیعی طبقه‌بندی می‌شوند (پدرام، ۱۳۷۳). وقوع این زمین‌لغزش در چندین سال بعد از بهره‌برداری از جاده، حاکی از دخالت عامل دیگری نیز هست. افزایش بارندگی شدید در طول ماه‌های گذشته زمینه را برای

وقوع این حادثه فراهم کرده و با توجه به آسیب‌پذیری زیاد منطقه و نداشتن تکیه‌گاه، بخشی از دامنه دچار زمین‌لغزش شده است. این عامل همراه با قرارگیری دامنه در کنار رودخانه و فرسایش دیواره رود با آب، آسیب‌پذیری دامنه را افزایش داده است.

۴ روش استفاده‌شده

روش توموگرافی الکتریکی روشی به‌نسبت جدید جهت افزایش دقت و بهبود قدرت تفکیک عمقی (قائم) و جانبی (افقی) در شناسایی اهداف زیرزمینی است که برداشت آن بهینه است (لوک، ۲۰۰۴). این روش را می‌توان در دو بخش طراحی شبکه و چگونگی برداشت داده‌ها و نیز مدل‌سازی داده‌های برداشت‌شده بررسی کرد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). توموگرافی به معنی تشخیص توده بی‌هنجاری در زیر یک سطح با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری است. توموگرافی در واقع روشی است که می‌توان با آن گسترش فضایی یک خاصیت را از راه عبور جریان الکتریکی در همان فضا تعیین کرد؛ بنابراین اولین مرحله توموگرافی الکتریکی، فرستادن جریان الکتریکی به درون زمین و اندازه‌گیری پاسخ زمین به این جریان است که معمولاً برحسب ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود. برداشت‌های متداول توموگرافی الکتریکی به دو نوع دوبعدی و سه‌بعدی خلاصه می‌شوند. از برداشت‌های دوبعدی به دلیل سازش اقتصادی مناسب بیشتر استفاده می‌شود و برداشت‌های سه‌بعدی در مراحل تحقیقاتی قرار دارند (لوک، ۲۰۰۱).

مرحله مهم دیگر در این روش، مدل‌سازی است که به دو صورت مستقیم (پیشرو) و معکوس (وارون) انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا با مدل‌های زمینی دوبعدی با استفاده از روش اجزاء محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد. مدل اولیه در این نوع از مدل‌سازی سلیقه‌ای است و با توجه به تبحر و تجربه

u_i برابر است با:

$$u_i = (\Delta y_i - j_i p_i) / p_i^T p_i; \Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (3)$$

y_i پاسخ مدل برای i امین تکرار، j_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای $(i+1)$ امین تکرار با استفاده از تقریب ماتریس ژاکوبین J_i است. p_i بردار انحراف پارامتر است (لوک، ۲۰۰۴). به طور کلی به دلیل محاسبه نشدن ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، روش شبه نیوتن در مقایسه با روش گوس-نیوتن روش سریع تری است و مطلوب است در وارون سازی، بیشتر از روش شبه نیوتن استفاده شود (لوک، ۲۰۰۴).

۵ عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها

برداشت‌ها با هدف اجرای مدل سازی دوبعدی برای یک شبکه روی زمین لغزش انجام پذیرفت. ابتدا سه مقطع تقریباً به موازات هم و عمود بر راستای زمین لغزش برداشت شد. در این مطالعه، آرایه اصلی جهت پیمایش ژئوالکتریک، آرایه دوقطبی-دوقطبی بود. مزیت این آرایه نسبت به سایر آرایه‌های ژئوالکتریک، قدرت تفکیک زیاد آن در به تصویر کشیدن ساختارهای قائم از جمله گسل خوردگی و سطوح گسیختگی (مانند سطح زمین لغزش) است (داهلین و بینگ، ۲۰۰۱). پژوهش زو و همکاران (۲۰۰۲) نشان می‌دهد از بین سه آرایه شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی و ونر، آرایه دوقطبی-دوقطبی در شناسایی مناطق گسلی و سطوح گسیختگی مؤثرتر است. متداول‌ترین حالت در این آرایه، قرار گرفتن الکترودها در یک امتداد است؛ یعنی چهار الکترودها بر یک خط روی زمین نصب می‌شوند. در آرایه دوقطبی-دوقطبی دو پارامتر a و n مطرح است که a فاصله الکترودی و n برابر با نسبت فاصله الکترودهای داخلی جریان و پتانسیل به فاصله دوقطبی پتانسیل یا دوقطبی جریان در دو طرف آرایه است. در عملیات صحرائی، الکترودهای جریان (C_1 و C_2) ثابت هستند و الکترودهای پتانسیل (P_1 و P_2) با

کارشناس ژئوفیزیک بهبود می‌یابد. در روش وارون سازی که روشی پرکاربردتر و مرسوم تر در بررسی های ژئوفیزیکی است، برخلاف مدل سازی مستقیم، مدل زمین با استفاده از داده های به دست آمده تخمین زده می شود. در مدل سازی وارون در ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای مدل سازی نیاز است (لوک، ۲۰۰۴). برای بهبود مدل اولیه، از دو روش معمول کمترین مربعات گوس-نیوتن و روش شبه نیوتن استفاده می شود.

در نرم افزار Res2Dinv برای وارون سازی، دو روش معمول کمترین مربعات شامل گوس-نیوتن (لوک، ۲۰۰۱) و شبه نیوتن (لوک و بارکر، ۱۹۹۶) به کار می روند. در روش گوس-نیوتن برای بهبود مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می شود:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_k = J^T g \quad (1)$$

که q بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت ویژه، g بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسباتی، Δq تغییر پارامتری مدل، I ماتریس یک، λ عامل میرایی، J ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی و در نهایت، J^T ترانزاده ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی است. در روش گوس-نیوتن، ماتریس ژاکوبین در هر تکرار باید محاسبه شود. این عمل باعث افزایش میزان محاسبات و زمان بر شدن مدل سازی می شود (لوک، ۲۰۰۴). روش های شبه نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به روزرسانی اجتناب می کنند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می کند. اگر ماتریس ژاکوبین J_0 برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد، مشتقات جزئی می تواند به طور تحلیلی با استفاده از مدل زمین همگن به عنوان مدل اولیه محاسبه شود. روش شبه نیوتن از معادله به روزرسانی شده زیر استفاده می کند:

$$j_{i+1} = j_i + u_i p_i^T \quad (2)$$

موارد تفکیک این منابع نوفه از یکدیگر امکان پذیر نیست. در جاهایی که مقدار نوفه زیاد باشد، با تغییراتی در آرایش الکترودها، زمان عملیات و روش مناسب پردازش می توان اثر نوفه ها را به طور چشمگیری در بررسی های مقاومت سنجی کاهش داد (جوان دولویی و همکاران، ۱۳۸۷). چنانچه برداشت ژئوالکتریکی در نزدیکی ریل راه آهن باشد، ابتدا با سونداژ الکتریکی برداشت آزمایشی انجام می شود. پس از آن با رسم نمودارهای استاندارد (منحنی های سر یا منحنی های آباک)، چنانچه این منحنی ها نرم باشند و پرش نداشته باشند، نوفه کم است، ولی اگر منحنی پرش داشته باشد یا به عبارتی، منحنی نرم نباشد، نوفه زیاد است و باید از ریل فاصله بیشتری گرفت. این فاصله به جنس خاک (مقاومت خاک) و مشخصات ریل بستگی دارد. برای تعیین سطح لغزش می توان با آرایه دوقطبی-دوقطبی برداشت و سطح لغزش را به خوبی تعیین کرد؛ بنابراین در برداشت مقطع AB در کنار ریل راه آهن، ابتدا با برداشت سونداژ آزمایشی و رسم منحنی های آباک از نبود نوفه اطمینان حاصل شد سپس اقدام به برداشت شد.

در این تحقیق داده های توموگرافی مقاومت الکتریکی با دستگاه ARES ساخت شرکت GF Instrument برداشت شدند. سعی شد داده ها با دقت و کیفیت زیاد و میزان خطای کم در هر بار اندازه گیری برداشت شوند تا تفسیرهای نهایی معتبر باشند. این دستگاه با باتری ۱۲ ولت کار می کند و توانایی ارسال جریان حداکثر تا ۲/۰ آمپر را با توان ۳۰۰ وات دارد و حمل و نقل آن آسان است.

۶ بحث و بررسی نتایج

۱-۶ نتایج بررسی مقاطع

در این مطالعه از آرایه دوقطبی-دوقطبی و قطبی-قطبی برای مقاطع و از آرایه شلومبرژه برای سونداژها استفاده شده است. داده های مقاومت ویژه در نرم افزار Res2dinv

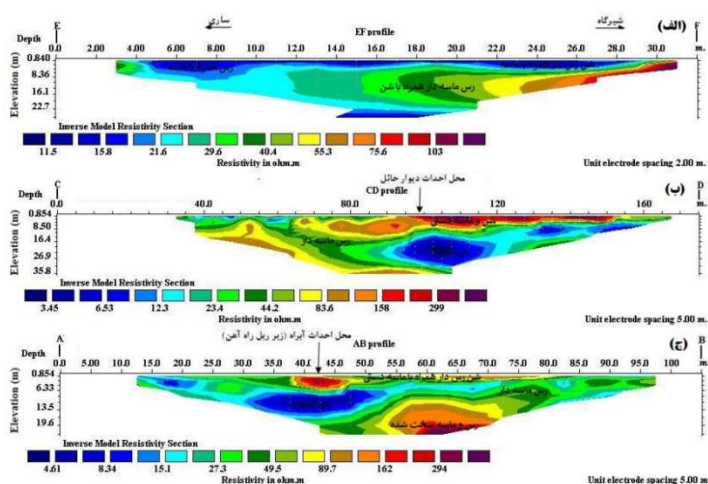
فواصل ثابت (a) نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند و با جابه جایی الکترودهای پتانسیل به اندازه $n \times a$ مقاومت ویژه اندازه گیری می شود. در مرحله بعد، با رسیدن الکترودهای پتانسیل به آخرین نقطه مدنظر، اندازه گیری ها با جابه جایی الکترودهای جریان به اندازه a دوباره به همان شکلی که توضیح داده شد، مشابه حالت اول تکرار می شود. برداشت های مقاومت ویژه الکتریکی مقطع AB با طول ۱۰۰ متر و فواصل الکترودی ۵، ۱۰ و ۱۵ متر و مقطع CD با طول ۱۵۰ متر و فواصل الکترودی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر با استفاده از آرایه دوقطبی-دوقطبی انجام گرفت. در این برداشت ها مضرب صحیح n تا ۶ افزایش یافته است.

علاوه بر آرایه دوقطبی-دوقطبی از آرایه قطبی-قطبی نیز در برداشت داده در یک مقطع استفاده شد. در این آرایه یکی از الکترودهای جریان (C_2) و یکی از الکترودهای پتانسیل (P_2) در فاصله بی نهایت (حداقل در فاصله پنج برابری از الکترودهای C_1 و P_1) قرار داده می شود. این آرایه به دلیل عمق نفوذ زیاد و سادگی برداشت نسبت به آرایه دوقطبی-دوقطبی در مناطقی که توپوگرافی، خشن و پوشش گیاهی، زیاد باشد، نتایجی پذیرفتنی ارائه می دهد. مقاطع برداشت شده در حالت دوبعدی با نرم افزار Res2Dinv مدل سازی شده اند.

نوفه ها یکی از مباحث مطرح در بحث اکتشاف با روش های ژئوالکتریکی هستند. نوفه های الکتریکی تأثیر بسزایی در دقت روش های ژئوالکتریکی، به خصوص مقاومت سنجی، پتانسیل خودزا، قطبش القایی، مگنتوالکتریک و الکترومغناطیس دارند. این نوفه ها منابع متفاوتی دارند. منشاء این نوفه ها ممکن است لیتولوژی زمین، پتانسیل خودزا، پتانسیل القایی، خطوط انتقال نیرو، ریل های راه آهن، مترو، موتورهای پمپ آب، امواج الکتروسایز میک، سامانه کاتدیك خطوط لوله های گاز و نفت و جریان های الکترومغناطیسی باشد. در بعضی از

جغرافیایی مقاطع و سونداژها در جدول ۱ آورده شده است. گسترش‌های الکترودی در جهت عمود بر شیب توپوگرافی زمین لغزش انتخاب شده‌اند تا جریان به‌طور یکنواخت و بدون تأثیر توپوگرافی به درون زمین نفوذ کند. در مجموع، با توجه به موقعیت و زمین‌شناسی منطقه، سه مقطع برای برداشت در نظر گرفته شد:

به‌صورت آرایه عمومی (general array) داده شده است. در این روش مختصات هر الکترود به نرم‌افزار معرفی می‌شود و نرم‌افزار صرف‌نظر از نوع آرایه به‌کاررفته در کار صحایی، به مدل‌سازی وارون (inverse modeling) می‌پردازد (لوک، ۱۹۹۹). در نهایت، در این منطقه تعداد سه مقطع و هفت سونداژ (شکل ۱) در طول مقاطع برداشت شد که نتایج آن در شکل ۴ و مشخصات



شکل ۴. مقاطع وارون‌سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات. مقیاس فاصله قائم برحسب ارتفاع نسبی است. (الف) مقطع EF واقع در دامنه و بالادست جاده (ب) مقطع CD واقع در جاده (ج) مقطع AB واقع در پایین دست جاده. رنگ آبی سطح لایه رسی اشباع را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مختصات جغرافیایی مقاطع، سونداژها و گمانه‌ها (اندازه‌گیری با استفاده از GPS صورت گرفته است).

نام	X(UTM)	Y(UTM)
A	۳۹S ۰۶۶۷۱۱۳/۰	۴۰۲۳۰۲۳/۰
B	۳۹S ۰۶۶۷۱۴۸/۰	۴۰۲۲۹۲۶/۰
C	۳۹S ۰۶۶۷۲۲۰/۰	۴۰۲۲۸۱۷/۰
D	۳۹S ۰۶۶۷۲۱۷/۰	۴۰۲۲۷۲۹/۰
E	۳۹S ۰۶۶۷۲۰۷/۰	۴۰۲۲۸۴۵/۰
F	۳۹S ۰۶۶۷۲۱۲/۰	۴۰۲۲۸۲۳/۰
J1	۳۹S ۰۶۶۷۱۶۵/۰	۴۰۲۳۰۲۴/۰
J2	۳۹S ۰۶۶۷۱۷۱/۰	۴۰۲۳۰۰۴/۰
J3	۳۹S ۰۶۶۷۱۶۵/۰	۴۰۲۳۰۱۹/۰
J4	۳۹S ۰۶۶۷۱۹۳/۰	۴۰۲۲۹۶۸/۰
R1	۳۹S ۰۶۶۷۱۴۳/۰	۴۰۲۲۹۵۷/۰
R2	۳۹S ۰۶۶۷۱۴۷/۰	۴۰۲۲۹۷۲/۰
R3	۳۹S ۰۶۶۷۱۲۷/۰	۴۰۲۳۰۰۰/۰
BH-1	۳۹S ۰۶۶۷۲۳۱/۰	۴۰۲۲۷۵۰/۰
BH-2	۳۹S ۰۶۶۷۱۸۵/۰	۴۰۲۲۸۴۷/۰
BH-3	۳۹S ۰۶۶۷۱۷۸/۰	۴۰۲۲۷۹۲/۰
BH-4	۳۹S ۰۶۶۷۱۸۵/۰	۴۰۲۲۷۶۱/۰
BH-5	۳۹S ۰۶۶۷۱۴۵/۰	۴۰۲۲۸۴۳/۰

رس اشباع و رس و ماسه سخت شده، سطح گسیختگی زمین لغزش است. با توجه به شواهد موجود، سنگ بستر به احتمال زیاد پایین تر از رس و ماسه سخت شده قرار داشته است و به دلیل کوتاه بودن طول مقطع، داده برداری از اعماق زیرین ممکن نبوده است. با توجه به نتایج سونداژ الکتریکی در چهار نقطه مقطع (J1، J2، J3 و J4) و تحلیل آن با استفاده از نرم افزار IPI2win و تلفیق داده ها به صورت آرایه عمومی می توان نتیجه گرفت عمق سنگ بستر در مرکز مقطع بیشتر از ۴۰ متر است. عمق سنگ بستر در دو طرف مقطع کمتر از مرکز آن است.

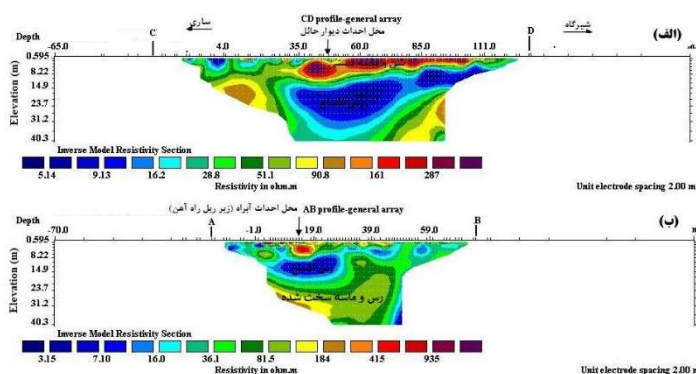
- سومین مقطع با نام AB در پایین دست جاده با اختلاف عمق تقریباً ۱۵ متر و در کنار ریل راه آهن به طول ۱۰۰ متر به همراه سه سونداژ برداشت شد (شکل ۴). همان طور که از شکل های ۴-ج و ۵-ب مشخص است، محل آبراه را به خوبی می توان زیر پل راه آهن در مقطع با مقاومت ویژه الکتریکی زیاد تشخیص داد. بر اساس نتایج مقطع CD ادامه لایه رس اشباع که در محل احداث دیوار حائل از عمق حدود ۲۰ متری سطح جاده شروع و تا ۳۵ متر ادامه دارد، در مقطع AB از حدود ۸ متری سطح راه آهن شروع و تا ۲۰ متری آن ادامه دارد. در عمق ۱۵ تا ۲۰ متری، لایه ای با مقاومت ویژه زیاد ۱۵۰ اهم متر وجود دارد که نشان دهنده وجود رس و ماسه سخت شده است. با توجه به اینکه این منطقه حدود ۱۵ متر از سطح جاده پایین تر است، نتایج مقطع AB با مقطع CD همخوانی دارد.

۲-۶ بررسی نتایج سونداژ الکتریکی

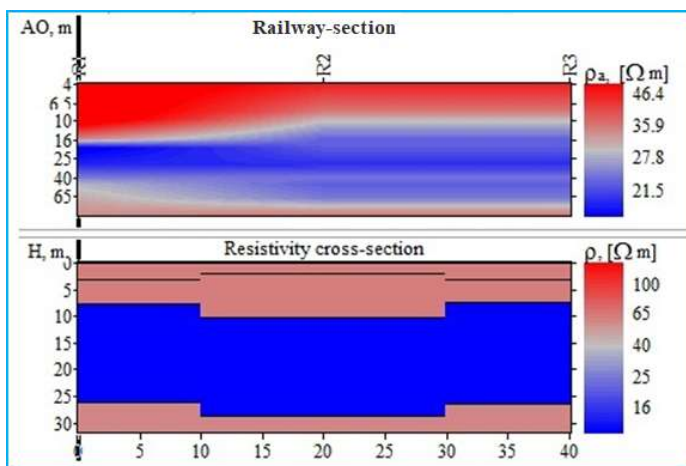
اطلاعات سونداژها پس از جمع آوری، در نرم افزارهای Res2dinv به صورت آرایه عمومی و IPI2WIN پردازش و نتایج آن به صورت مقاطع دوبعدی در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین جهت سهولت در مقایسه مقاطع با یکدیگر، همگی با یک طیف رنگی ترسیم شده اند. برای این کار از طیف رنگی آبی تا قرمز

- مقطع EF در دامنه و بالادست جاده برداشت شد. با توجه به پوشش گیاهی، مقطع به طول ۳۲ متر و عمق ۲۵ متر با روش قطبی-قطبی برداشت شد (شکل ۴-الف). در این برداشت سطح لغزش در عمق ۴ تا ۵ متری مشاهده شد. توده لغزنده با مقاومت ویژه الکتریکی کم مشخص شده است. با تلفیق نتایج مقاومت ویژه الکتریکی و داده های حفاری در منطقه، نقاطی که با رنگ آبی تا عمق حدود ۴ تا ۶ متر در این مقاطع مشخص هستند، نشان دهنده شن رس دار همراه با ماسه اشباع هستند. پایین تر از آن، لایه هایی شامل رس ماسه دار همراه با شن شروع می شود که با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۲۰ تا ۵۰ اهم متر مشخص شده است.

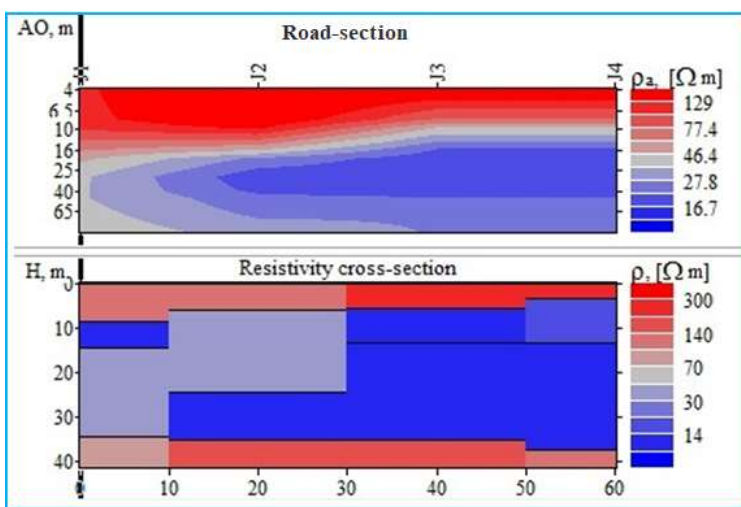
- مقطع CD به طول ۱۵۰ متر و با عمق نفوذ ۳۸ متر در کنار جاده واقع است. این مقطع با روش دو قطبی-دو قطبی و چهار سونداژ شلومبرژه در طول آن برداشت شد و در نهایت، با تلفیق داده ها به صورت آرایه عمومی (general array) مقطع مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمد (شکل های ۴-ب و ۵-الف). با توجه به اینکه مقطع CD از شانه جاده برداشت شده، حدود ۵ تا ۱۰ متر شن و ماسه دستی جهت عملیات جاده سازی استفاده شده است که در مقطع، با مقاومت بیشتر از ۱۰۰ اهم متر مشخص است. بعد از این لایه، لایه گذر شامل رس ماسه دار با مقاومت ویژه ۴۰ تا ۱۰۰ اهم متر قرار گرفته است و پس از آن، لایه رس اشباع (به رنگ آبی تیره) با کمترین مقاومت ویژه الکتریکی شروع می شود که در مرکز مقطع (محل احداث دیوار حائل) در عمق ۲۰ تا ۳۵ متری قرار می گیرد. در سمت چپ مقطع، لایه رس دار اشباع از آب با مقاومت ویژه الکتریکی کم مشاهده نمی شود. مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از ۵۰ اهم متر می تواند نشان دهنده وجود رس ماسه دار اشباع از آب باشد. با توجه به نتایج حفاری و مقطع حاصل از آرایه عمومی در مقطع CD (شکل ۵-الف)، به احتمال زیاد عمق ۳۰ تا ۳۵ متری سطح جدایش



شکل ۵. مقاطع وارون‌سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات با تلفیق داده‌های مقطع و سونداژ در قالب آرایه عمومی. (الف) مقطع CD روی جاده (ب) مقطع AB پایین‌دست جاده. مقیاس فاصله قائم برحسب ارتفاع نسبی است. رنگ آبی لایه رسی اشباع را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقطع عمقی راه‌آهن (AB)، برش شبه‌مقطع مقاومت (بالا) و مقاومت ویژه (پایین)



شکل ۷. مقطع عمقی جاده (مقطع CD)، برش شبه‌مقطع مقاومت (بالا) و مقاومت ویژه (پایین)

استفاده می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت الکتریکی کم به زیاد است. تعداد کل مقاطع مدل‌سازی شده به صورت آرایه عمومی، دو مقطع است (شکل ۵).

از مجموعه سونداژهای الکتریکی برداشت شده در منطقه ۲ با استفاده از نرم‌افزار IPI2WIN مقطع ژئوالکتریک تهیه شد (شکل‌های ۶ و ۷). موقعیت مقاطع در تصویر ماهواره‌ای (شکل ۱) نشان داده شده است. مقاطع مزبور، جهت بررسی ضخامت لایه‌ها تهیه شده‌اند.

بر اساس بروزردهای موجود در منطقه و حفاری‌های ژئوتکنیکی (BH-1، BH-2، BH-3، BH-4 و BH-5)، سنگ کف به طور کلی از نوع ماسه‌سنگ و رس‌سنگ و در بعضی مواقع خردشده است. در ضمن این اطلاعات نشان می‌دهد سطح آب در منطقه بالا بوده و گاهی به عمق ۳ متری نیز رسیده است. دلیل اصلی این موضوع، قرار گرفتن منطقه در دره و مجاورت بستر رودخانه است. همچنین فعال بودن منطقه از نظر زمین‌شناسی باعث خردشدگی بیشتر لایه‌ها و افزایش تخلخل آنها شده است. این شرایط باعث شده است تشکیلات سنگ کف، رسانندگی الکتریکی زیادی از خود نشان دهند. شرح مقاطع ژئوالکتریک به صورت زیر است:

مقطع راه آهن سه سونداژ دارد که فاصله سونداژها با توجه به شرایط زمین‌شناسی و هدف مورد نظر ۲۰ متر تعیین شده است. فاصله سونداژها بسیار کم است و به علت محدودیت طول مقاطع، عمق بررسی ۳۵ متر است. مقاومت ویژه ظاهری به دست آمده در این مقطع با افزایش عمق، کاهش و رسانندگی الکتریکی افزایش یافته است. این حالت که ممکن است به علت وجود آب شور و متخلخل بودن سنگ کف یا عبور کابل برق فشار قوی در محدوده طرح و همچنین وجود شمع‌ها در منطقه باشد که البته با نگاره‌های حفاری شده مغایرت دارد، کار تفسیر را با مشکل روبه‌رو می‌کند. این شرایط باعث شده است بی‌هنجاری‌های به دست آمده در سطح و عمق ساختارهای

جزیبی آشکار نشوند. بر اساس بی‌هنجاری‌های به دست آمده با استفاده از حفاری گمانه‌های اکتشافی، میانگین ضخامت رسوبات آبرفتی ۱۲ متر است. بعد از رسوبات آبرفتی، لایه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌های خرد شده دیده می‌شود (شکل ۶).

در مقطع جاده که از چهار سونداژ تشکیل شده است، سنگ کف از نوع ماسه‌سنگ و مارن‌سنگ است. ضخامت متوسط رسوبات آبرفتی که از نوع دانه‌درشت هستند، حدود ۱۲ متر است و مقاومت ویژه ظاهری، مقادیر متفاوتی بین ۵ تا ۱۱ اهم‌متر دارد (شکل ۷).

۷ نتیجه‌گیری

پس از نشست قسمتی از جاده پل سفید- قائم‌شهر واقع در جای‌باغ سوادکوه شمالی، نتایج توموگرافی الکتریکی برای بررسی زمین‌لغزش احتمالی و تعیین محل امن عبور جاده پل سفید- قائم‌شهر به کار گرفته شد. چنانچه از مقطع CD مشخص است، از عمق ۱۲ تا ۳۲ متری از جاده، لایه رسی اشباع از آب مشاهده می‌شود و لایه‌بندی مشخص شده در توموگرافی با اطلاعات به دست آمده از گمانه‌زنی در منطقه مطابقت دارد. این منطقه پتانسیل زمین‌لغزش بزرگی دارد، ولی نشست زمین و واژگونی قطار به احتمال زیاد ناشی از توجه نکردن به وضعیت زمین‌شناسی منطقه در طراحی دیوار حائل است به گونه‌ای که با جمع شدن آب پشت دیوار حائل و نشست زمین، ریل منحرف و قطار واژگون شده است. البته در دامنه بالای جاده، سطح لغزش کوچکی در عمق ۴ تا ۵ متری مشاهده می‌شود. دیواره لغزش هم در تصاویر ماهواره‌ای و هم در بازدید صحرایی به روشنی دیده می‌شود. این لغزش در سطح کوچکی اتفاق افتاده است و ارتباطی به نشست زمین و شکاف جاده ندارد، اما پتانسیل لغزش در سطح وسیعی در منطقه با سطح لغزشی در عمق ۳۰ تا ۳۵ متری از سطح جاده وجود دارد به طوری که تجمع شار آب زیرزمینی می‌تواند محرک

سه‌بعدی: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۶(۱)، ۱۷-۲۸.
 درویش‌زاده، ع.، ۱۳۸۵، زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی،
 تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسیم: انتشارات امیرکبیر.
 وحدتی دانشمند، ف.، سعیدی، ع.، ۱۳۶۹، نقشه زمین-
 شناسی ایران، ورقه ۱/۱۱۰۰۰۰۰ قائم شهر: انتشارات
 سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Akpan, A. E., Ilori, A. O., and Essien, N. U.,
 2015, Geophysical investigation of Obot Ekpo
 landslide site, Cross River state, Nigeria:
 Journal of African Earth Sciences, **109**, 154-
 167.

Braga, A. C., Malagutti, F. W., Dourado, J. C.,
 and Chang, H. K., 1999, Correlation of
 electrical resistivity and induced polarization
 data with geotechnical survey standard
 penetration test measurements: Journal of
 Environmental and Engineering Geophysics,
4, 123-130.

Capizzi, P., and Martorana, R., 2014, Integration
 of constrained electrical and seismic
 tomographies to study the landslide affecting
 the cathedral of Agrigento: Journal of
 Geophysics and Engineering, **11**(4), 045009.

Carlini, M., Chelli, A., Francese, R., Giacomelli,
 S., Giorgi, M., Quagliarini, A., Carpena, A.,
 and Tellini, C., 2018, Landslides types
 controlled by tectonics-induced evolution of
 valley slopes (northern Apennines, Italy):
 Landslides, **15**(2), 283-296.

Choobbasti, A. J., Rezaei, S., and Farrokhzad, F.,
 2013, Evaluation of site response
 characteristics using microtremors:
 Gradevinar, **65**, 731-741.

Dahlin, T., and Bing, Z., 2001, A numerical
 comparison of 2D resistivity imaging with
 eight electrode arrays: Department of
 Geotechnology, Lund University, Box.118, S-
 221 00, Lund, Sweden.

Dai, Z., Wang, F., Cheng, Q., Wang, Y., Yang,
 H., Lin, Q., Kongming, Y., Feicheng, L., and
 Li, K., 2019, A giant historical landslide on
 the eastern margin of the Tibetan plateau:
 Bulletin of Engineering Geology and the
 Environment, **78**(3), 2055-2068,
<https://doi.org/10.1007/s10064-017-1226-x>.

De Bari, C., Lapenna, V., Perrone, A., Puglisi, C.,
 and Sdao, F., 2011, Digital photogrammetric
 analysis and electrical resistivity tomography
 for investigating the Picerno landslide
 (Basilicata region, southern Italy):
 Geomorphology, **133**, 34-46.

حرکت زمین‌لغزش در آینده باشد؛ بنابراین طراحی
 زهکش برای سازه‌های مهندسی در این قسمت از راه
 ضروری است. پیشنهاد می‌شود جهت جلوگیری از ریزش
 جاده و حوادث و تلفات احتمالی در این قسمت از جاده
 در هنگام احداث سازه‌های عمرانی برای تعریض آن،
 سطح لغزشی در عمق دست کم ۳۵ متری یعنی تا زیر لایه
 رسی اشباع در نظر گرفته شود و احتمال وقوع زمین‌لغزش
 در طراحی‌ها لحاظ شود.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از آزمایشگاه
 فنی و مکانیک خاک استان‌های آذربایجان شرقی و
 مازندران بابت همکاری‌های لازم جهت برداشت داده
 تقدیر و تشکر کنند. همچنین از جناب آقای دکتر حفیظی
 استاد مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بابت راهنمایی‌های
 ایشان در برداشت داده سپاسگزاری می‌شود.

منابع

اجل لویان، ر.، دادخواه، ر.، حسین میرزائی، ز.، ۱۳۸۸،
 کاربرد زمین‌شناسی مهندسی در تونل‌ها: انتشارات
 فرهیختگان علوی.

پدرام، ح.، ۱۳۷۳، نظری به زمین‌لغزش‌های ایران، علل
 وقوع و نحوه پراکندگی آنها: مجموعه مقالات اولین
 کارگاه تخصصی بررسی راهبردهای کاهش خسارات
 زمین‌لغزش در کشور، ۳۶۵-۳۸۹.

جوان دولویی، غ.، آزادی، ا.، کمالیان، ن.، ۱۳۸۷، طراحی
 و ساخت فرستنده و گیرنده رقمی (دیجیتال) داده‌های
 ژئوالکتریک، کاربرد آن در کاهش اثر نوبه: مجله
 فیزیک زمین و فضا، ۳۶(۴)، ۳۲-۱۵.

حفیظی، م.، عباسی، ب.، اشتری تلخستانی، ا.، ۱۳۸۹،
 بررسی زمین‌لغزش گردنه صائین اردبیل به‌منظور تأمین
 ایمنی راه با روش توموگرافی الکتریکی دوبعدی و

- International Journal of Geotechnology and Engineering, **12**(1), 13–19.
- Kramer, S. L., 1996, Geotechnical Earthquake Engineering: Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Ling, C., Xu, Q., Zhang, Q., Ran, J., and Lv, H., 2016, Application of electrical resistivity tomography for investigating the internal structure of a translational landslide and characterizing its groundwater circulation (Kualiangzi landslide, Southwest China): Journal of Applied Geophysics, **131**, 154–162.
- Loke, M. H., 2001, Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys: RES2DINV Manual: IRIS Instruments, www.iris.instrument.com.
- Loke, M. H., 2004, 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, www.GeoElectrical.com.
- Loke, M.H., 1999, Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least squares method, Software manual, <http://www.abem.se>.
- Loke, M. H., and Barker, R. D., 1996, Rapid least squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method: Geophysical Prospecting, **44**(1), 131–152.
- Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., and Wilkinson, P. B., 2013, Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method: Journal of Applied Geophysics, **95**, 135–156.
- Merritt, A. J., Chambers, J. E., Murphy, W., et al., 2014, 3D ground model development for an active landslide in Lias mudrocks using geophysical, remote sensing and geotechnical methods: Landslides, **11**, 537–550.
- Oh, S., and Sun, C. G., 2008, Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam: Environmental Geology, **54**, 31–42.
- Perrone, A., Lapenna, V., and Piscitelli, S., 2014, Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review: Earth-Science Reviews, **135**, 65–82.
- Rezaei, S., and Choobbasti, A. J., 2017, Application of the microtremor measurements to a site effect study: Earthquake Science, **30**(3), 157-164, <https://doi.org/10.1007/s11589-017-0187-2>.
- Rezaei, S., Choobbasti, A. J., Soleimani, S., and Kutanaei, S., 2015, Site effect assessment using microtremor measurement, equivalent linear method and artificial neural network (case study: Babol, Iran): Arabian Journal of Geosciences, **8**, 1453–1466.
- Devi, A., Israil, M., Anbalagan, R., and Gupta, P. K., 2017, Subsurface soil characterization using geoelectrical and geotechnical investigations at a bridge site in Uttarakhand Himalayan region: Journal of Applied Geophysics, **144**, 78–85.
- Dobrin, B. M., and Savit, C. H., 1988, Introduction to geophysical prospecting, 4th Edition: McGraw-Hill.
- Drahor, M. G., 2006, Application of electrical resistivity tomography technique for investigation of landslides: a case from Turkey: Journal of Environmental Geology, **50**(2), 147-155.
- Fressard, M., Maquaire, O., Thiery, Y., Davidson, R., and Lissak, C., 2016, Multimethod characterisation of an active landslide: case study in the pays d'Auge plateau (Normandy, France): Geomorphology, **270**, 22–39.
- Friedel, S., Thielen, A., and Springman, S. M., 2006, Investigation of a slope endangered by rainfall-induced landslides using 3D resistivity tomography and geotechnical testing: Journal of Applied Geophysics, **60**, 100–114.
- Grandjean, G., Gourry, J. C., Sanchez, O., Bitri, A., and Garambois, S., 2011, Structural study of the Ballandaz landslide (French Alps) using geophysical imagery: Journal of Applied Geophysics, **75**(3), 531–542.
- Guerrero, L., Bertello, L., Cardozo, N., Berti, M., Grelle, G., and Revellino, P., 2017, Unsteady sediment discharge in earth flows: a case study from the mount Pizzuto earth flow, southern Italy: Geomorphology, **295**, 260–284.
- Guerrero, L., Revellino, P., Luongo, A., Focareta, M., Grelle, G., and Guadagno, F. M., 2016, The Mount Pizzuto earth flow: deformational pattern and recent thrusting evolution: Journal of Maps, **12**(5), 1187–1194.
- Hibert, C., Grandjean, G., Bitri, A., Travelletti, J., and Malet, J. P., 2012, Characterizing landslides through geophysical data fusion: example of the La Valette landslide (France): Engineering Geology, **128**, 23–29.
- Hu, J., Li, S., Li, L., Shi, S., Zhou, Z., Liu, H., and He, P., 2018, Field, experimental, and numerical investigation of a rockfall above a tunnel portal in southwestern China: Bulletin of Engineering Geology and Environment, **4**, <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1152-y>.
- Kolay, P. K., Burra, S. G., and Kumar, S., 2018, Effect of salt and NAPL on electrical resistivity of fine-grained soil-sand mixtures:

- Topsakal, E., and Topal, T., 2015, Slope stability assessment of a re-activated landslide on the Artvin-Savsat junction of a provincial road in Meydancik, Turkey: *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 1769–1786.
- Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Maurer, H., Wagner, F. M., Johnson, T. C., and Chambers, J. E., 2018, Optimized survey design for electrical resistivity tomography: combined optimization of measurement configuration and electrode placement: *Geophysical Journal International*, **214**(1), 108–121, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy128>.
- Watlet, A., Kaufmann, O., Triantafyllou, A., et al., 2018, Imaging groundwater infiltration dynamics in the karst vadose zone with long-term ERT monitoring: *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**(2), 1563–1592.
- Yang, C. H., 2004, Landslide investigation in the Li-Shan area using resistivity image profiling method: SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1417–1420.
- Yannah, M., Martens, K., Van Camp, M., and Walraevens, K., 2017, Geophysical exploration of an old dumpsite in the perspective of enhanced landfill mining in Kermt area, Belgium: *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1169-2>.
- Yilmaz, S., and Narman, C., 2015, 2-D electrical resistivity imaging for investigating an active landslide along a ridge way in Burdur region, southern Turkey: *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 3343–3349.
- Zhou, W., Beck, B. F., and Adams, L., 2002, Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography: *Environmental Geology*, **42**, 922–928.
- Rezaei, S., Shooshpasha, I., and Rezaei, H., 2020, Evaluation of landslides using ambient noise measurements (case study: Nargeschal landslide): *International Journal of Geotechnical Engineering*, **14**(4), 409–419, <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1431354>.
- Rønning, J. S., Ganerød, G. V., Dalsegg, E., and Reiser, F., 2014, Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model: *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, **73**, 1225–1244.
- Sass, O., Bell, R., and Glade, T., 2008, Comparison of GPR, 2D-resistivity and traditional techniques for the subsurface exploration of the Öschingen landslide, Swabian Alb (Germany): *Geomorphology*, **93**(1), 89–103.
- Soto, J., Galve, J. P., Palenzuela, J. A., Azañón, J. M., Tamay, J., and Irigaray, C., 2017, A multi-method approach for the characterization of landslides in an intramontane basin in the Andes (Loja, Ecuador): *Landslides*, **14**(6), 1929–1947, <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0830-y>.
- Suryo, E. A., 2013, Real-time prediction of rainfall induced instability of residual soil slopes associated with deep cracks: Doctoral dissertation, Queensland University of Technology.
- Szokoli, K., Szarka, L., Metwaly, M., Kalmár, J., Prácer, E., and Szalai, S., 2017, Characterization of a landslide by its fracture system using electric resistivity tomography and pressure probe methods: *Acta Geodetica et Geophysica*, <https://doi.org/10.1007/s40328-017-0199-3>.

Study of landslide potential in Chaybagh region with 2D electrical resistivity tomography method

Reza Emami¹, Mehdi Rezapour^{2*} and Mohammad Faraji³

¹ Ph.D. in Seismology, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor of Seismology, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran,

³ M.Sc. in Engineering Geology, Expert of Technical & Soil Mechanics Lab.co., Tabriz, Iran

(Received: 10 February 2022, Accepted: 11 July 2023)

Summary

Landslides are natural hazards that cause severe fatalities and financial losses. Various methods are used to analyze landslides. Among those, geotechnical and geophysical methods are used due to their accuracy and low cost, respectively. In geophysical methods, electrical resistivity tomography (ERT) is widely used for near-surface exploration of landslide areas characterized by a complex geological environment. In this study, two-dimensional electrical resistivity tomography (ERT) studies have been used to define the subsurface structure and landslide geometry of Chaybagh. Over the past decade, technological advances in field data acquisition systems and the development of new algorithms for tomographic inversion have made this technique more suitable for studying landslide areas. In order to reduce the possible damages in the preliminary studies of construction projects, especially linear structures, it is very important to study the areas with slip potential.

Following the widening the road in a part of Sari-Shirgah road in the Chaybagh area of North Savadkuh County, which overturned a freight train downstream due to bending of railway tracks, a large gap was created. In order to determine the cause of this accident and the possibility of landslides in the area, 2D geoelectric tomography was performed and necessary considerations were taken into account for reconstruction of the new road to prevent further damages. According to the geological map of Ghaemshahr 1/100000, the study area includes conglomerate, silty marl, sandstone and siltstone. At the bottom of the landslide area is the Talar River bed, which includes alluvial fans, floodplains, old and young rivers and streams, alluvial floodplains, older coastline deposits, and non-hardened alluvium of the present age in the bed of rivers. In this study, the data obtained from the profiles with Dipole-Dipole and Pole-Pole arrays and geoelectric sounding were interpreted by two-dimensional inversion method in Res2dinv software.

The results of the study show that on the upper slope of the road, a small landslide surface is observed at a depth of 4 to 5 meters. This landslide occurred at a small level and has nothing to do with landslides and road gaps, but there is a large-scale landslide potential in the area with landslides at a depth of 30 to 35 meters above the road surface in the future so that groundwater flux accumulation can trigger landslides. Therefore, designing of drainage for engineering structures in this part of the road is essential to prevent road collapse, accidents and possible losses. Moreover, the possibility of landslides in the designs should be considered

Keywords: landslide potential, Electrical Resistivity Tomography (ERT), inversion, least squares method, landslide surface, Chaybagh