

مقاله پژوهشی

## مقایسه نتایج وارون‌سازی داده‌های ژئوالکتریکی و لرزه‌نگاری انکساری به منظور تعیین پتانسیل زمین‌لغزش در محدوده آزادراه تهران - شمال

اسماء بیابانی<sup>۱</sup>، میثم عابدی<sup>۲\*</sup>، غلامحسین نوروزی<sup>۳</sup>، مسعود مجرب<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، asmabiabani1@ut.ac.ir

۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، maysamabedi@ut.ac.ir

۳. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، norouzih@ut.ac.ir

۴. دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، mmojarab@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۱

### چکیده

محدوده لغزشی مورد بررسی در البرز مرکزی و جنوب راندگی شمال تهران با جهت شیب به سمت شمال قرار گرفته است. وجود این راندگی سبب قرارگیری واحدهای متفاوت توف و کنگلومرا در کنار هم شده است. سنجش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی با برداشت ۳۱ سونداژ الکتریکی در محدوده مورد مطالعه بر روی چهار نیمرخ طراحی شده است. بیشینه فرستنده‌های جریان تا عمق ۶۰۰ متر انجام پذیرفته است. روش برداشت داده‌ها بر اساس آرایه شلومبرژه با فواصل داده‌برداری یکسان است. روش‌های سونداژزنی الکتریکی به علت تطابق خوبی که با اطلاعات زمین‌شناسی، چاه‌پیمایی و نمونه‌های مغزه‌ای نشان می‌دهند مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر مبنای مدل‌سازی ژئوالکتریکی، مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی سطح زمین لغزش تهیه شد. برای استخراج مدل دقیق‌تری از سطح زمین لغزش، برداشت لرزه‌نگاری انکساری نیز در طول سه نیمرخ و فاصله بین گیرنده‌ها (ژئوفون‌ها) ۸ تا ۱۰ متر در نظر گرفته شد که با طراحی ۹ شوت (چشمه) لرزه‌ای بر روی هر نیمرخ، زمان رسید اولین پرتوی لرزه‌ای برای مدل‌سازی به کار گرفته شد. بر روی هر نیمرخ فاصله دورافت‌ها از اولین ژئوفون ۳۰ و ۵۰ متر فرض شد. با مدل‌سازی وارون زمان سیر پرتوهای لرزه‌ای بر اساس مسیر حرکت پرتو از چشمه به ایستگاه، مدل سرعت امواج اولیه تصویر شد. به طور ویژه با تمرکز بر مقایسه مدل‌سازی وارون این دو روش ژئوفیزیکی سعی شد که مدل زیرسطحی دقیق سطح زمین لغزش احتمالی از روی مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و سرعت انتشار امواج لرزه‌ای آرایه شود.

### کلمات کلیدی

وارون‌سازی، ژئوفیزیک، ژئوالکتریکی، لرزه‌نگاری انکساری، زمین‌لغزش

## ۱- مقدمه

درباره وارون‌سازی هر یک از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری انکساری منابع متعددی وجود دارد (دی و موریسون، ۱۹۷۹؛ تسورلس و همکاران ۱۹۹۹؛ موزر، ۱۹۹۱). نکته کلیدی استفاده از وارون‌سازی تلفیقی به عنوان یکی از زمینه‌های مورد توجه پژوهشگران در سال‌های اخیر است (هامدان و وافیدیس، ۲۰۱۲؛ شان و همکاران، ۲۰۱۴). دمیرچی و همکاران (۲۰۱۹)، از مدل‌سازی وارون تلفیقی روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، مگنتوتلوریک و لرزه‌نگاری نتیجه گرفتند که مدل حاصل از وارون‌سازی تلفیقی مقاومت و سرعت بهتر از مدل‌سازی مجزای آن‌هاست. در بررسی یک زمین‌لغزش، کیئو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از وارون‌سازی ترکیبی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری به ساخت مدلی رسیده‌اند که نتایج آن با اطلاعات گمانه سازگار است.

هدف اصلی این پژوهش آن است که از برداشت‌های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری انکساری برای شناخت بهتر توده مستعد لغزش بهره گرفته شود. بنابراین، با طراحی برداشت ژئوفیزیکی دقیق، داده با کیفیت بالا در ابتدا ثبت خواهد شد و در ادامه، مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و سرعت انتشار موج اولیه ( $V_p$ ) به صورت دوبعدی در امتداد نیمرخ‌های برداشت تصویر خواهد شد. در انتها، مدل زمین‌شناسی سطح لغزش احتمالی از روی مدل‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد خواهد شد.

## ۲- روش تحقیق

روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی به عنوان یک روش مقاومت‌ویژه الکتریکی با دقت بالا، کاربرد فراوانی در بخش‌های معدنی، زیست‌محیطی، عمرانی و مهندسی مخاطرات دارد. قابلیت‌های این روش شامل صرفه‌جویی زمانی، کاهش هزینه و نیز تفسیر آسان باعث شده تا در طول چندین دهه، این روش همچنان پرکاربرد باقی بماند. در این مطالعه برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در شبکه‌ای منظم با استفاده از دستگاه ژئوالکتریک WDDS-1 ساخت شرکت BTKS انجام گرفته است. داده‌های ژئوالکتریکی در کیلومتر دوم با ۳۱ سونداژ بر روی چهار پروفیل به فاصله بیشینه فرستنده‌های جریان تا ۶۰۰ متر برداشت شده است (شکل ۱) (مهندسان مشاور بنیان زمین پایدار، ۱۳۹۷). در روش سونداژزنی الکتریکی مقاطع مقاومت ظاهری به دست آمده به علت پیچیدگی‌های ساختاری زمین قابل تفسیر نیستند و این مقاطع با استفاده از روش‌های حل وارون در نهایت منجر به ارائه مدلی واقعی از زمین می‌شوند که مقاومت ظاهری حاصل از آن مدل کمترین اختلاف را با

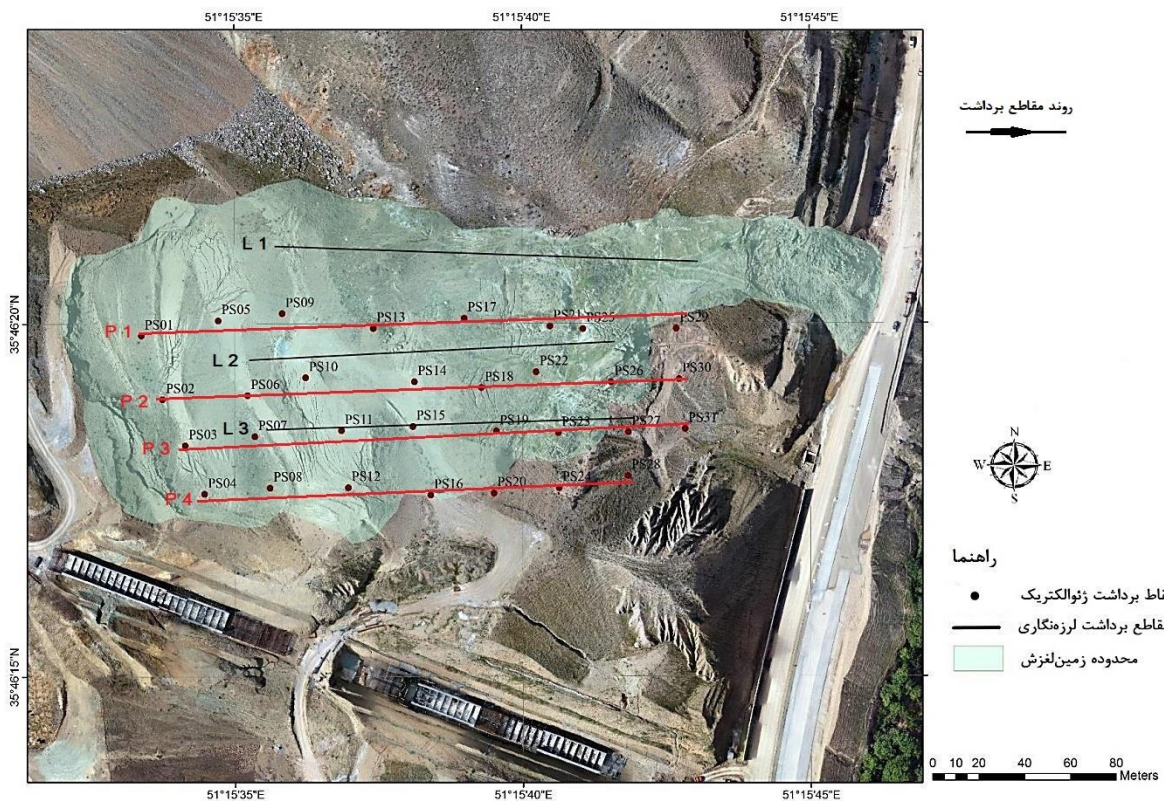
مشخصه زمین‌لغزش‌ها توزیع گسترده، فراوانی زیاد، حرکت سریع و زیان‌های فاجعه‌بار است که در مناطق پرجمعیت می‌تواند آسیب‌های جدی و جبران‌ناپذیری را وارد سازد. از این جمله می‌توان به زمین‌لغزش سال ۲۰۱۴ در ولایت بدخشان افغانستان که منجر به کشته شدن حدود ۲۷۰۰ نفر و زمین‌لغزش سال ۲۰۱۵ در استان شانژی چین که منجر به ناپدید شدن ۶۴ نفر شد اشاره کرد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۷). در ایران به دلیل وجود توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها را شامل می‌شوند. فاجعه‌آمیزترین و دل‌خراش‌ترین زمین‌لغزش‌ها در ایران و بسیاری از نقاط دیگر جهان با زمین‌لغزه‌های شدید تحریک و آغاز می‌شوند.

شناسایی دقیق سطح لغزش احتمالی، حجم مواد ناپایدار و درک مکانیزم احتمالی ناپایداری برای انجام فرآیندهای پایدارسازی در مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و مدیریت پروژه‌های عمرانی بسیار اهمیت دارد. پایدارسازی توده‌های مستعد لغزش در بسیاری از موارد امکان‌پذیر است و روش‌های متعددی برای آن وجود دارد (علیزاده، ۱۳۹۳). برای شناسایی زمین لغزش استفاده از یک روش به تنهایی معمولاً با عدم قطعیت بالایی همراه است. دو روش کلی برای اکتشاف و بررسی سطوح زمین‌لغزش شامل روش مستقیم (حفر گمانه اکتشافی) که علاوه بر صرف هزینه بالا و زمان‌بر بودن، این روش تنها اطلاعات نقطه‌ای ارائه می‌کند و روش غیرمستقیم (سنجش از دور، ژئوفیزیک و نشاير آن) وجود دارد. سنجش‌های ژئوفیزیکی معمولاً اطلاعات را در دو یا سه بعد حاصل می‌کنند (پروانه و همکاران، ۲۰۱۴). از اهداف کاوش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات زمین‌لغزش می‌توان به بازسازی هندسه توده لغزیده (گسترش جانبی و ضخامت آن)، تشخیص سطح لغزش بین توده لغزشی و سنگ‌بستر زیرین و بررسی حرکت و تجمع شار آب زیرزمینی اشاره کرد (برونو و ماریلر، ۲۰۰۰). در نتیجه، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مختلف با ارائه اطلاعات دقیق‌تر درک بهتر شرایط زیرسطحی زمین را مقدور می‌سازد و سبب پوشش نقاط ضعف احتمالی هر یک از روش‌ها می‌شود. در بررسی پایداری دامنه‌ها از روش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌ای (سنکایا و همکاران، ۲۰۱۹)، ترموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (پروانه و همکاران، ۲۰۱۴)، پتانسیل خودزا و گراویتی (هاک، ۲۰۰۰) استفاده شده است.

بنابراین یک فیلتر میان گذر را به محدوده فرکانسی حاصل می توان به کار برد. داده های حاصل بر روی دستگاه ذخیره شده و از طریق کابل شبکه قابل انتقال به برنامه ها و دیگر کامپیوترهای شخصی برای پردازش ارسال می شوند. چشمه انرژی مورد استفاده برای تولید امواج تراکمی از انفجار حاصل شده است. دورافت های دور علاوه بر افزایش دقت نتیجه نهایی، عمق دسترسی را نیز افزایش می دهند. با توجه به وجود توپوگرافی و محدودیت در گسترده کردن سیم های رابط، فاصله بین ژئوفون ها و چشمه ها نسبت به تغییرات توپوگرافی متغیر است و در نتیجه طول تقریبی هر پروفیل از ۱۸۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است. در محل هر چشمه چاله هایی برای قرار دادن مواد منفجره تا عمق نیم متر ایجاد شده است. مواد منفجره برای ۲۹ انفجار انجام شده به مقدار ۱۲ کیلوگرم امولایت استفاده شده است که برای دورافت های دورتر به نسبت مواد بیشتری استفاده شده است.

مقاومت های ظاهری برداشت شده (مشاهده شده) داشته باشد. روش های معمول برای حل وارون و دستیابی به مدل واقعی زمین بر اساس روش های خطی شده کمترین مربعات رایج است.

لرزه نگاری انکساری (شکست مرزی) هنگامی کاربرد دارد که بتوان پرتوهای شکسته شده را دریافت کرد، به ویژه هنگامی که هدف مطالعه لایه های زمین از طریق برداشت سطحی باشد. اساس کار در این حالت آن است که سرعت لایه ها با عمق افزایش یابد یعنی سرعت موج در هر لایه از لایه فوقانی بیشتر و از لایه تحتانی کمتر باشد. در این مطالعه برداشت لرزه نگاری انکساری با دستگاه ۲۴ کاناله MK6 در طول سه پروفیل با فاصله بین گیرنده ها (ژئوفون ها) ۸ تا ۱۰ متر و تعداد ۹ شوت (چشمه) بر روی هر پروفیل انجام پذیرفته است. بر روی هر پروفیل فاصله دورافت ها از اولین ژئوفون ۳۰ و ۵۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). محدوده فرکانسی یک موج طولی معمولی به طور تقریبی ۳۰ تا ۷۰ هرتز است؛

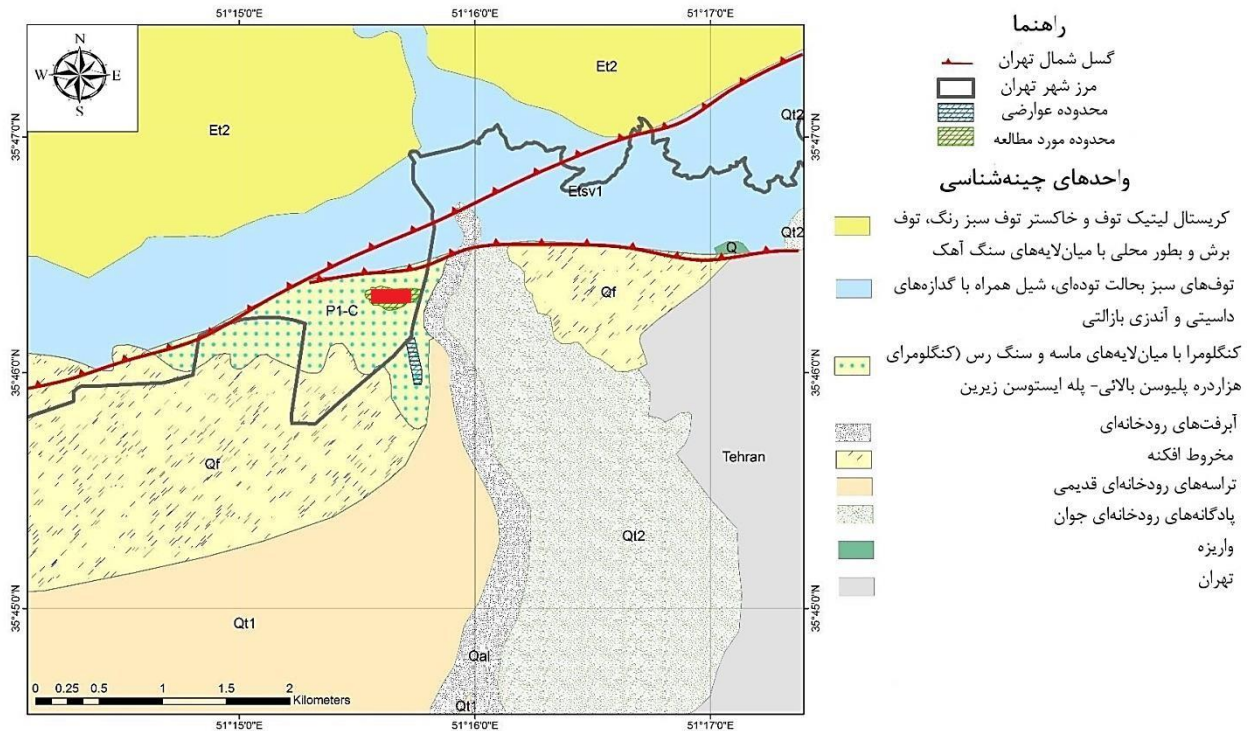


شکل ۱- موقعیت ایستگاه های برداشت داده های ژئوالکتریکی (خطوط قرمز رنگ) و مقاطع لرزه نگاری انکساری (خطوط سیاه) روی تصویر برگرفته از گوگل ارث محدوده زمین لغزش

### ۳- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی یکصد هزار تهران محدوده مورد مطالعه در جنوب این راندگی قرار دارد که در کنگلومرای هزار دره با میان لایه‌های ماسه سنگ و رس قرار گرفته است (شکل ۲). این سازند، با ناپیوستگی (دگرشیب و یا هم‌شیب) روی سنگ‌های قدیمی‌تر، به ویژه توفیت‌های سازند کرج قرار گرفته است. واحدهای توفی سازند کرج در شمال راندگی شمال تهران قرار دارد.

محدوده لغزشی مورد بررسی در البرز مرکزی و جنوب راندگی شمال تهران با جهت شیب به سمت شمال قرار گرفته است. با توجه به بازدیدهای میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و همچنین فوتوگرامتری، زمین لغزش محدوده کیلومتر دوم از نوع زمین لغزش چرخشی مرکب است. وجود این راندگی سبب قرارگیری واحدهای متفاوت و مستعد لغزش در کنار هم شده



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده کیلومتر ۲ آزادراه تهران شمال (باز ترسیم شده از نقشه زمین‌شناسی یکصد هزار تهران). محدوده زمین لغزش احتمالی مورد مطالعه و موقعیت پروفیل‌های برداشت ژئوفیزیکی (مستطیل قرمز رنگ) روی نقشه نشان داده شده است.

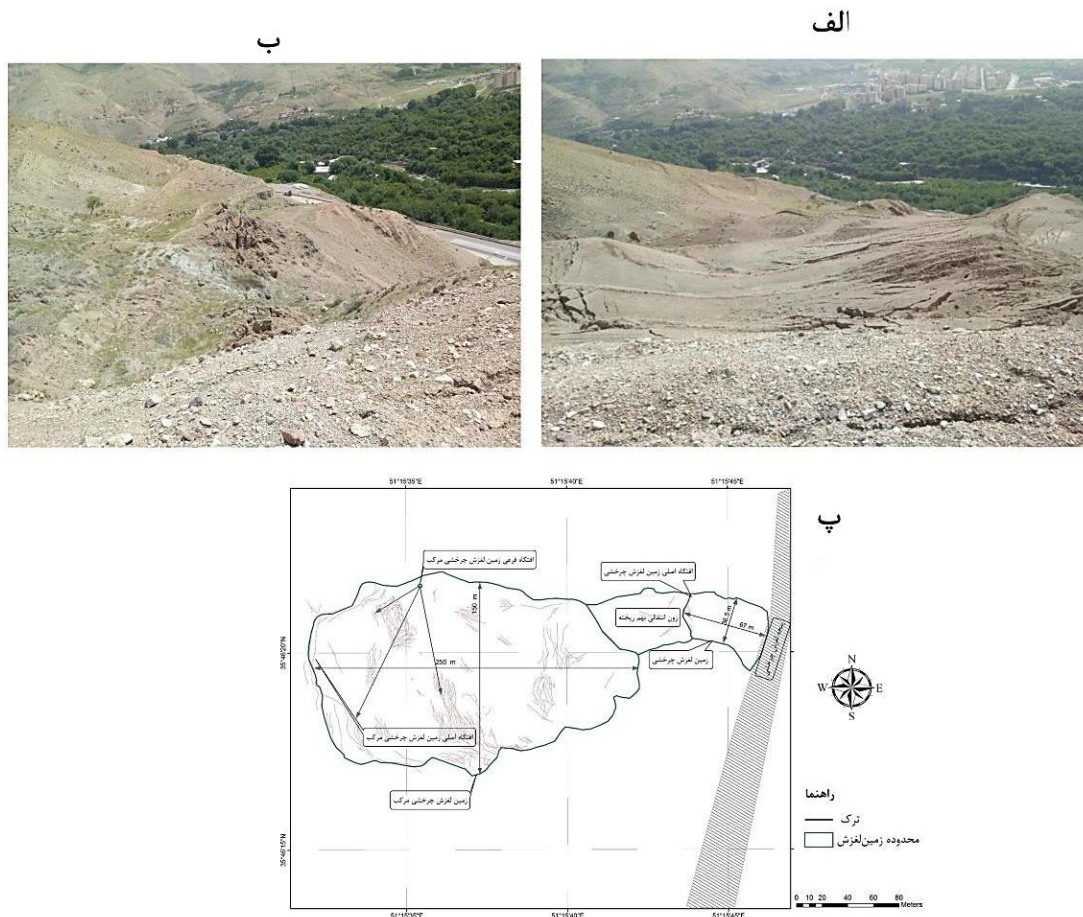
که پاسخ عبور یک میدان فیزیکی از آن مشابه مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی باشد. در اینجا، مدل فیزیکی یک نمایش ریاضی فرضی از زمین است که یک سری پارامترهای فیزیکی دارد. هدف، تعیین این پارامترها از روی داده‌های مشاهده شده است. پاسخ مدل، عبارت است از داده‌های مصنوعی مربوط به پارامترهای مدل که با استفاده از روابط ریاضیاتی حاکم بر مدل تولید می‌شوند. برای تعیین مقاومت‌ویژه حقیقی ساختارهای زیرسطحی از روی مقادیر ظاهری آن، از روش‌های وارون‌سازی نرم‌افزارهای رایانه‌ای استفاده می‌شود. مدل‌سازی هر دو پایگاه داده ژئوفیزیکی مبتنی بر رهیافت وارون‌سازی متمرکز است (پورتی‌گاوین و زادانوف، ۱۹۹۹) که کمک می‌کند مرزهای لایه‌بندی زمین با دقت بالاتری در محدوده مورد مطالعه بازیابی شود. از پکیج نرم‌افزاری Zond برای مدل‌سازی داده‌ها استفاده شده است.

در شکل ۳- الف گسترش واحدهای کنگلومرای در محدوده لغزش قابل مشاهده است. وجود گسل‌های محلی سبب در کنار هم قرار گرفتن واحدهای کنگلومرای و توفی در کنار یکدیگر می‌شود که در شکل ۳- ب در بررسی‌های صحرائی مشاهده شده است.

کوهستانی بودن منطقه به همراه واحدهای کنگلومرای و ماسه‌سنگی در کنار توف‌ها منطقه را مستعد زمین لغزش کرده است. به طوری که در تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های صحرائی، کاسه لغزشی و ترک‌های متعددی در محدوده زمین لغزش قابل مشاهده است. در شکل ۳- پ توزیع ترک‌های کششی که روند غالب شمالی- جنوبی را دارند و هندسه زمین لغزش نشان داده شده است (مهندسان مشاور بنیان زمین، ۱۳۹۷).

### ۴- نتایج مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی

در وارون‌سازی ژئوفیزیکی، هدف یافتن مدلی از زمین است



شکل ۳. الف) نمای زمین‌لغزش در بررسی‌های صحرایی از بالا، ب) واحدهای کنگلومرای و توفی در محدوده زمین‌لغزش، پ) ترک‌های کنشی در محدوده زمین‌لغزش (گزارش نهایی مطالعات ژئوفیزیکی، ۱۳۹۷).

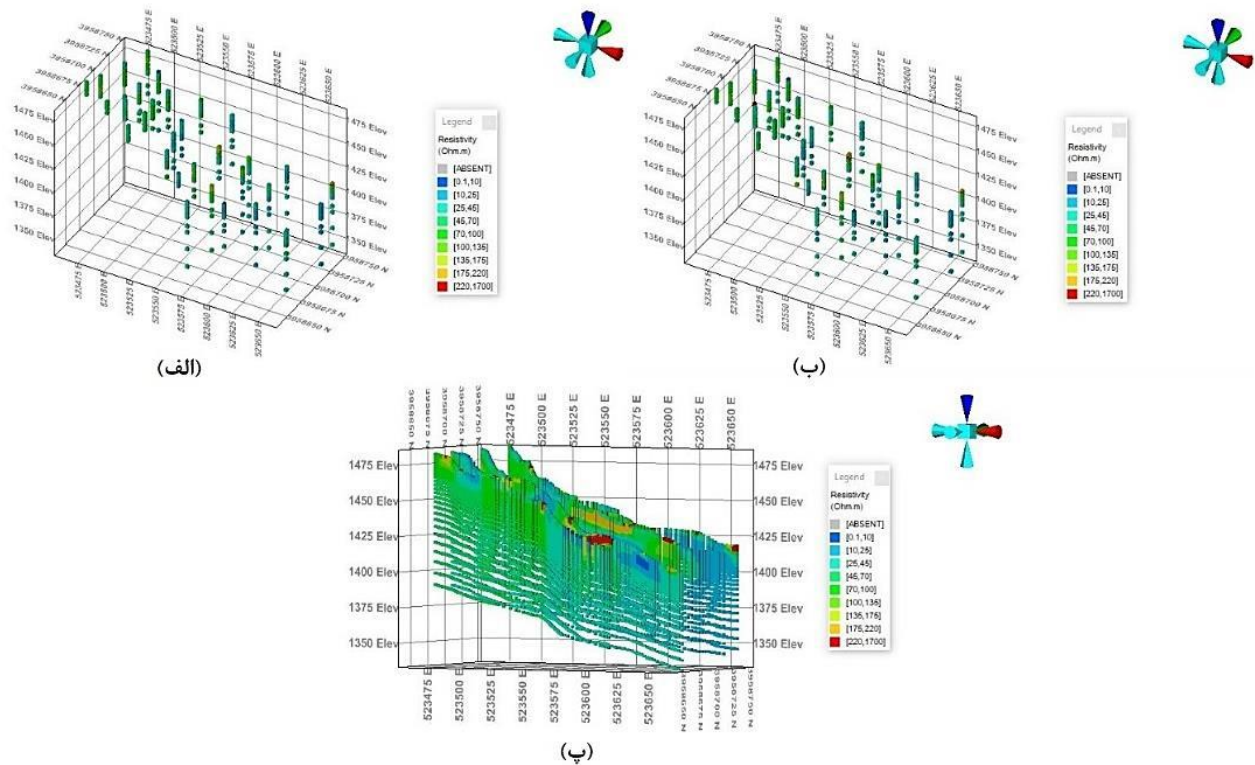
الف)، مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری پیش‌بینی شده (شکل ۴-ب) و مدل مقاومت‌ویژه واقعی زمین (شکل ۴-پ) برای پروفیل‌های برداشت ژئوالکتریک همراه با توپوگرافی و نمایش سه‌بعدی و در مختصات واقعی زمین مرجع شده ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشهود است، داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری (الف) با طیف گسترده مقاومت الکتریکی تطابق نسبتاً خوبی را با داده‌های محاسبه شده نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت نتایج حاصل از وارون‌سازی در این مرحله اعتبار بالایی دارد. وارون‌سازی به صورت دو بعدی و در امتداد هر کدام از چهار پروفیل الکتریکی به صورت مجزا انجام شده است.

بر اساس مدل‌سازی‌های انجام گرفته بر روی مقاطع ۴ پروفیل برداشت شده در محدوده این مطالعه، مقاطع مدل مقاومت واقعی زمین به دست آمده‌اند. گسترش عمقی مدل به دست آمده بر مبنای یک‌چهارم فاصله بین فرستنده‌های جریان در این محدوده نیز تا عمق ۸۰ متری از سطح زمین است. بر اساس مدل‌های به دست آمده در همه مقاطع سه لایه با

در مبحث مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، عوامل متعددی روی روند مدل‌سازی قطعاً تاثیرگذار است. گسسته‌سازی فضای مدل با روابط مبتنی بر توابع انتگرالی، تفاضل محدود، المان محدود و یا حجم محدود می‌تواند منجر به نتایجی با دقت متفاوت در مدل‌سازی پیشرو مدل‌های ژئوفیزیکی با شرایط زمین‌شناسی متنوع شود. علاوه بر گسسته‌سازی فضای مدل، نحوه مش‌بندی ساختاری و یا غیرساختاری و یا مش تلفیقی، نحوه دخیل کردن اثر سطح توپوگرافی و به کارگیری الگوریتم‌های متنوع وارون‌سازی (مجزا، تلفیقی، مشارکتی و توأم) همگی عوامل موثر در کنترل دقت مدل‌سازی انجام گرفته است (یاری و همکاران، ۲۰۲۱؛ للیور و فارکواریسون، ۲۰۱۳، للیور و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۰). در این پژوهش به دلیل تمرکز بر تفسیر نتایج حاصل از مدل‌سازی مجزای هر پایگاه داده، موارد فوق بررسی نشده است.

#### ۴-۱- نتایج بدست آمده از برداشت ژئوالکتریکی

مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه ظاهری برداشت شده (شکل ۴-



شکل ۴- نمایش سه بعدی (الف) مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده، (ب) مقاومت ویژه پیش بینی شده و (پ) مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد ۴ پروفیل برداشت

۴-۱-۲- نتایج بدست آمده از داده‌های ژئوالکتریک در امتداد پروفیل شماره دو

در مقطع الکتریکی پروفیل شماره دو نیز سه لایه با تفکیک مقاومتی بالا مشخص شده‌اند. مقطع تفسیر شده زمین‌شناسی آرایه شده برای پروفیل شماره دو مانند پروفیل شماره یک، نشان‌دهنده وجود سه لایه‌بندی و همچنین یک سطح جداکننده آبرفت کنگلومرای و سنگ توف در این پروفیل است (شکل ۵-ب).

۴-۱-۳- نتایج بدست آمده از داده‌های ژئوالکتریک در امتداد پروفیل شماره سه

در پروفیل شماره سه نیز همانند پروفیل‌های یک و دو، سه لایه با تفکیک مقاومتی بالا در شکل‌ها مشخص شده‌اند. مقطع تفسیر شده زمین‌شناسی آرایه شده برای پروفیل شماره سه مانند پروفیل‌های شماره یک و دو، نشان‌دهنده وجود سه لایه‌بندی و همچنین یک سطح جداکننده آبرفت و سنگ توف در این پروفیل است (شکل ۵-پ).

۴-۱-۴- نتایج بدست آمده از داده‌های ژئوالکتریک در امتداد پروفیل شماره چهار

در امتداد مقطع عمقی پروفیل شماره چهار لایه رویی با عمق ۲۰ تا ۳۰ متر، متشکل از آبرفت هزاردره و توف با گستره

مقاومت‌های الکتریکی متفاوت قابل تفکیک‌اند. اول ناحیه‌ای با مقاومت کم (عمدتاً کمتر از ۲۰ اهم‌متر) و لایه دوم که به صورت یک ساختار کلی در همه مقاطع دیده می‌شود، ساختاری با مقاومت بالاتر (۲۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر) است. همچنین لایه‌های زیرین مقاطع مشخص است. این دو ساختار مقاومتی مشاهده شده در همه مقاطع قابل رویت‌اند.

۴-۱-۱- نتایج بدست آمده از داده‌های ژئوالکتریک در امتداد پروفیل شماره یک

در امتداد مقطع عمقی پروفیل شماره یک، لایه سطحی که عمق آن تا ۲۰ تا ۳۰ متر دیده می‌شود. لایه‌ای از مصالح ناهمگن که گستره مقاومت الکتریکی آن از ۵۰ تا ۱۰۰ و در بخش‌هایی تا ۲۰۰ اهم‌متر می‌رسد قابل رویت است. این لایه بر اساس مشاهدات صحرایی، نواحی خرد شده ترکیبی از آبرفت هزار دره به همراه رخنمون‌هایی از توف است. در زیر این لایه، لایه‌ای با مقاومت کمتر از ۵۰ اهم‌متر به عنوان لایه آبرفتی و کنگلومرای سازند هزار دره تفسیر شده است. همچنین در پایین این لایه که به صورت تقریباً منظم در همه مقاطع تکرار شده است، لایه‌ای با مقاومت بالا وجود دارد که می‌تواند حاکی از وجود سنگ‌های مقاومت بالای توف البرز باشد (شکل ۵-الف).

#### ۴-۲-۲- نتایج بدست آمده از داده‌های لرزه‌ای در امتداد پروفیل شماره دو

پروفیل شماره دو با راستای جنوب شرق - شمال غرب و تقریباً موازی با پروفیل شماره یک در مقابل پروفیل شماره ۲ ژئوالکتریک و بخش میانی ناحیه مورد بررسی برداشت شده است. تعداد گیرنده‌های این پروفیل ۲۴ ژئوفون و تعداد چشمه‌ها ۹ است. بر روی این پروفیل ۵ چشمه در محدوده دورافت کم و ۴ چشمه با دورافت زیاد در فواصل ۵۰ متر از اولین و ۳۰ متر از آخرین گیرنده قرار داده شده‌اند.

با توجه به مقاطع ارایه شده در این پروفیل نیز سه لایه با تفکیک سرعت موج لرزه اولیه متفاوت در شکل‌ها مشخص شده‌اند. مقطع تفسیر شده زمین‌شناسی ارایه شده برای پروفیل شماره دو مانند پروفیل شماره یک، نشان‌دهنده وجود سه لایه‌بندی و همچنین یک سطح جدا کننده آبرفت کنگلومرایی و سنگ توف در این پروفیل است و به علت درزه و شکاف کمتر سرعت موج بیشتر از لایه سطحی است (شکل ۶-ب).

#### ۴-۲-۳- نتایج بدست آمده از داده‌های لرزه‌ای در امتداد پروفیل شماره سه

پروفیل شماره سه با راستای جنوب - شمال در بخش میانی ناحیه مورد بررسی و در مقابل پروفیل ۱ ژئوالکتریک برداشت شده است. تعداد گیرنده‌های این پروفیل ۲۴ ژئوفون و تعداد چشمه‌ها ۷ است. بر روی این پروفیل ۵ چشمه در محدوده دورافت کم و ۴ چشمه با دورافت زیاد در فواصل ۵۰ و ۳۰ متر از اولین و آخرین گیرنده قرار داده شده‌اند. در این پروفیل نیز همانند پروفیل‌های یک و دو، سه لایه با تفکیک سرعت موج اولیه بالا در شکل‌ها مشخص شده‌اند. مقطع تفسیر شده زمین‌شناسی ارایه شده برای پروفیل شماره سه مانند پروفیل‌های شماره یک و دو، نشان‌دهنده وجود سه لایه‌بندی و همچنین یک سطح جدا کننده آبرفت و سنگ توف در این پروفیل است (شکل ۶-پ).

در شکل ۷ مدل سرعت  $V_p$  در امتداد سه پروفیل برداشت لرزه‌نگاری انکساری به صورت سه‌بعدی ارایه شده است تا با نمایشی بهتر، پیکربندی سطح زمین لغزش احتمالی در این محدوده قابل رویت باشد.

مقاومت الکتریک از ۵۰ تا ۱۰۰ و در بخش‌هایی تا ۲۵۰ اهم‌متر است. لایه دوم، با مقاومت کمتر از ۵۰ اهم‌متر به عنوان لایه آبرفتی و کنگلومرایی سازند هزار دره در نظر گرفته شده است. لایه سوم با مقاومت و بر اساس مشاهدات صحرائی و گزارش زمین‌شناسی موجود به عنوان سنگ‌های مقاومت بالای توف البرز تفسیر شده است (شکل ۵-ت).

#### ۴-۲-۴- نتایج بدست آمده از برداشت لرزه‌نگاری انکساری

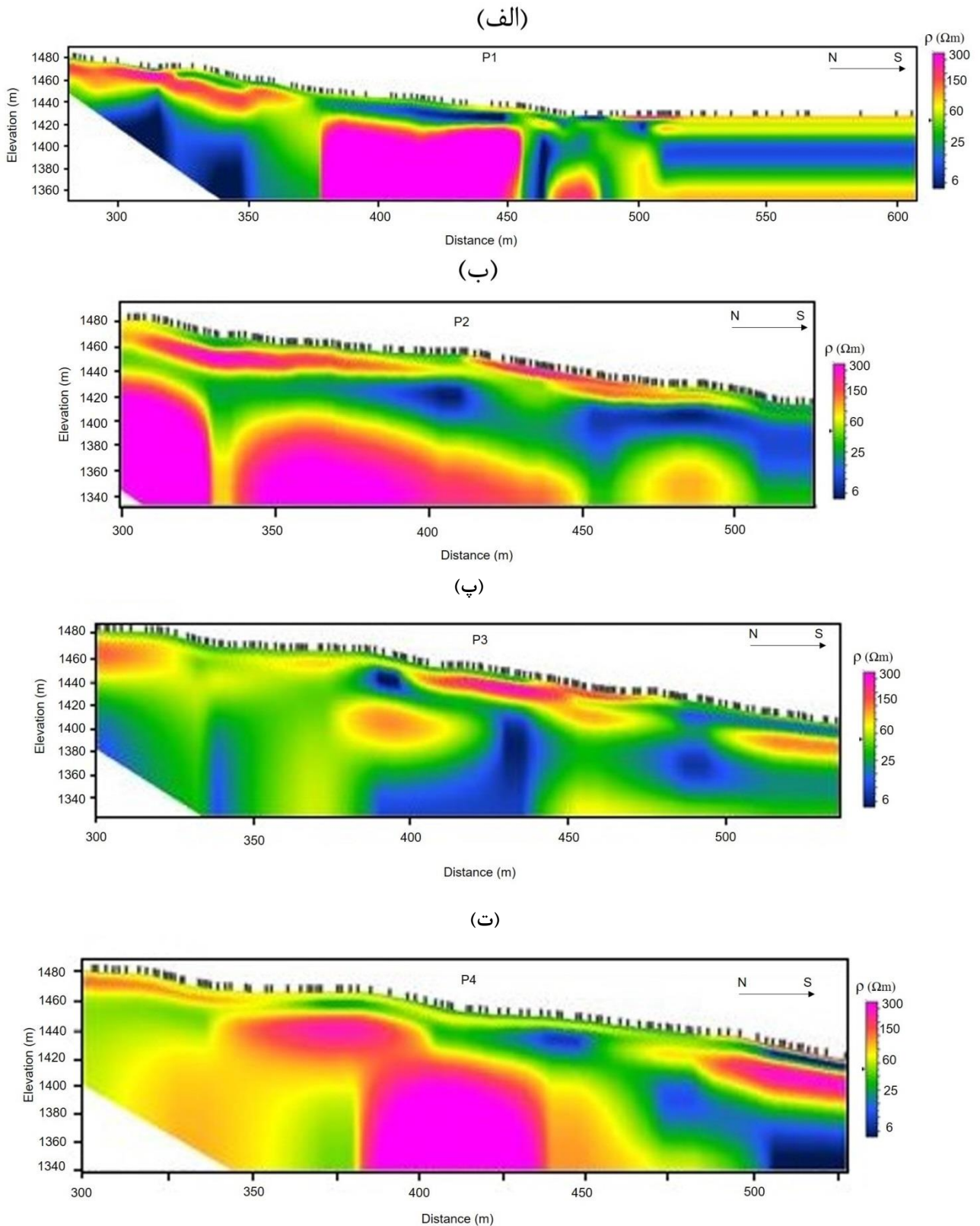
وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای انکساری به طور معمول برای محاسبه مدل عمق - سرعت در اعماق کم مورد استفاده قرار می‌گیرد (پولامانا پالیل، ۱۹۹۴). توموگرافی لرزه‌ای یکی از روش‌های تفسیر داده‌های لرزه‌ای است که در آن از روش‌های وارون‌سازی بر روی یک شبکه برای تعیین سرعت در سلول‌های دو بعدی در طول یک پروفیل، برای به دست آوردن مدل سرعت استفاده می‌شود؛ در نتیجه توموگرافی لرزه‌ای در بسیاری از موارد مدلی ارایه می‌دهد که تفکیک‌پذیری و دقت بالایی دارد. توموگرافی لرزه‌ای بهترین برازش مدل سرعت را با تکرار مقایسه اختلاف سرعت ساختارها با داده‌های مشاهده شده ایجاد می‌کند (شین، ۱۹۹۹). در شکل ۶، داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی بعد از وارون‌سازی دو بعدی داده لرزه انکساری، انطباق خوبی با هم روی نمودارهای زمان - فاصله در امتداد سه پروفیل لرزه‌ای دارد.

#### ۴-۲-۱- نتایج بدست آمده از داده‌های لرزه‌ای در امتداد پروفیل شماره یک

بخش پروفیل شماره یک با راستای جنوب شرق - شمال غرب در بخش پایینی ناحیه مورد بررسی برداشت شده و در مقابل پروفیل ۳ ژئوالکتریک است. تعداد گیرنده‌های این پروفیل ۲۴ ژئوفون و تعداد چشمه‌ها ۹ است. بر روی این پروفیل ۵ چشمه در محدوده گیرنده‌ها<sup>۱</sup> و ۴ چشمه با دورافت زیاد<sup>۲</sup> در فواصل ۵۰ متر از اولین گیرنده و ۳۰ متر از آخرین گیرنده قرار داده شده‌اند. با توجه به مقاطع ارایه شده سه لایه با تفکیک سرعت انتشار موج اولیه متفاوت در شکل‌ها مشخص شده‌اند. مقطع تفسیر شده زمین‌شناسی ارایه شده برای پروفیل شماره یک نشان‌دهنده وجود سه لایه‌بندی و همچنین یک سطح جداکننده آبرفتی کنگلومرایی و سنگ توف در این پروفیل و این لایه دارای سرعت موج کم است (شکل ۶-الف).

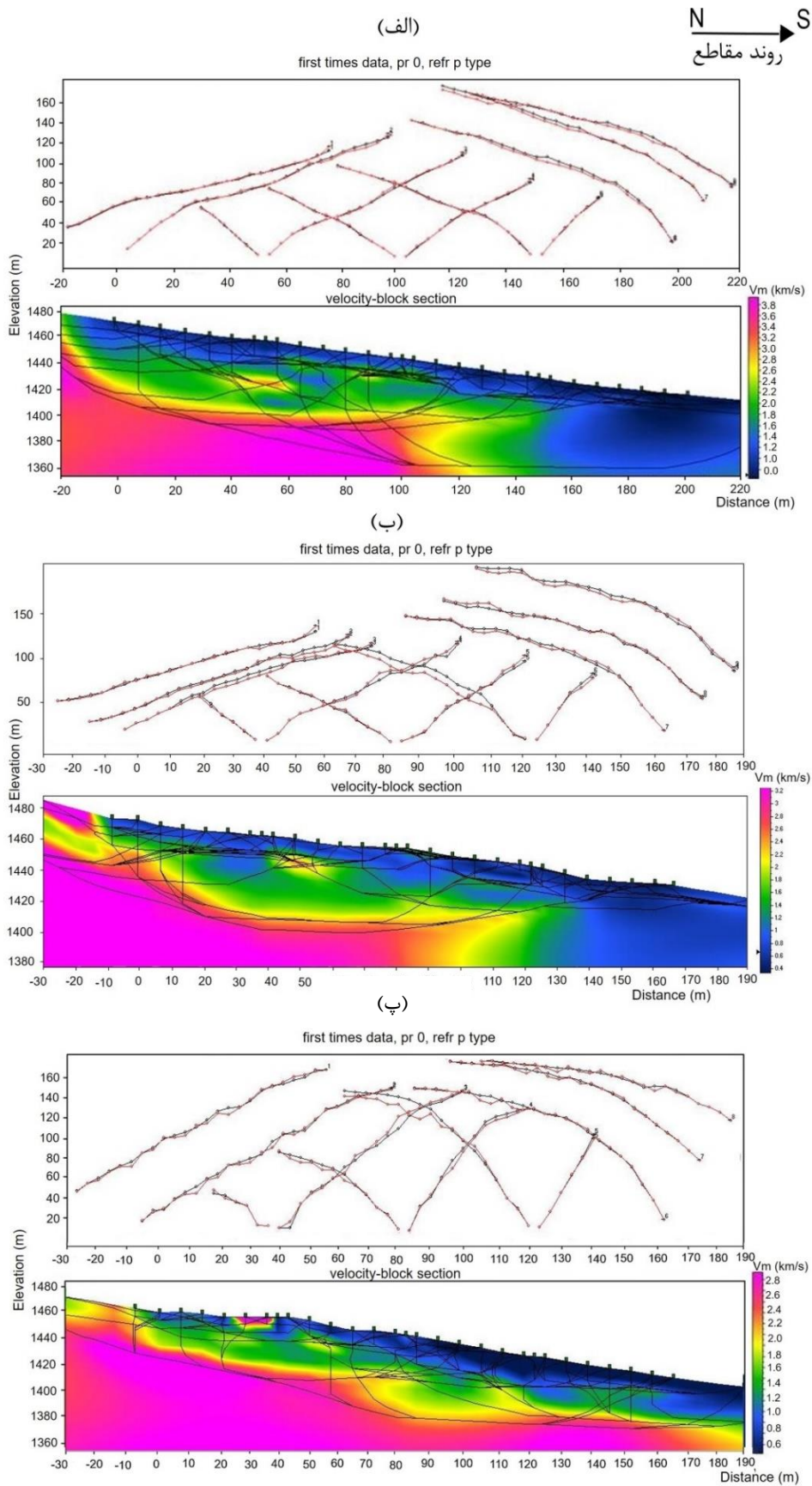
<sup>1</sup> Near Shot

<sup>2</sup> Far Shot

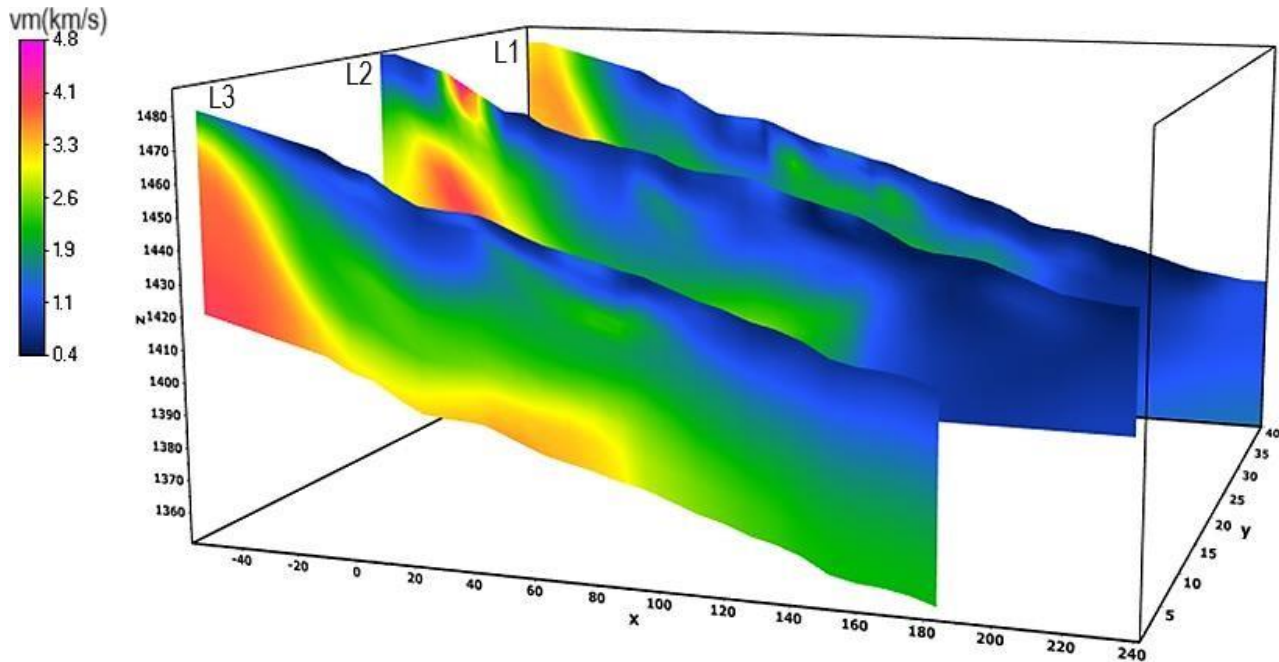


شکل ۵- مدل مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده از حل وارون در امتداد پروفیل (الف) ۱، (ب) ۲، (پ) ۳، (ت) ۴





شکل ۶- نمودار زمان - فاصله داده مشاهده شده و پیش بینی شده و مقطع سیر پرتوی لرزه ای روی مدل سرعت در امتداد پروفیل (الف) ۱، (ب) ۲ و (پ) ۳



شکل ۷- نمایش سه بعدی مدل سرعت  $V_p$  (کیلومتر بر ثانیه) در امتداد سه پروفیل برداشت لرزه‌ای

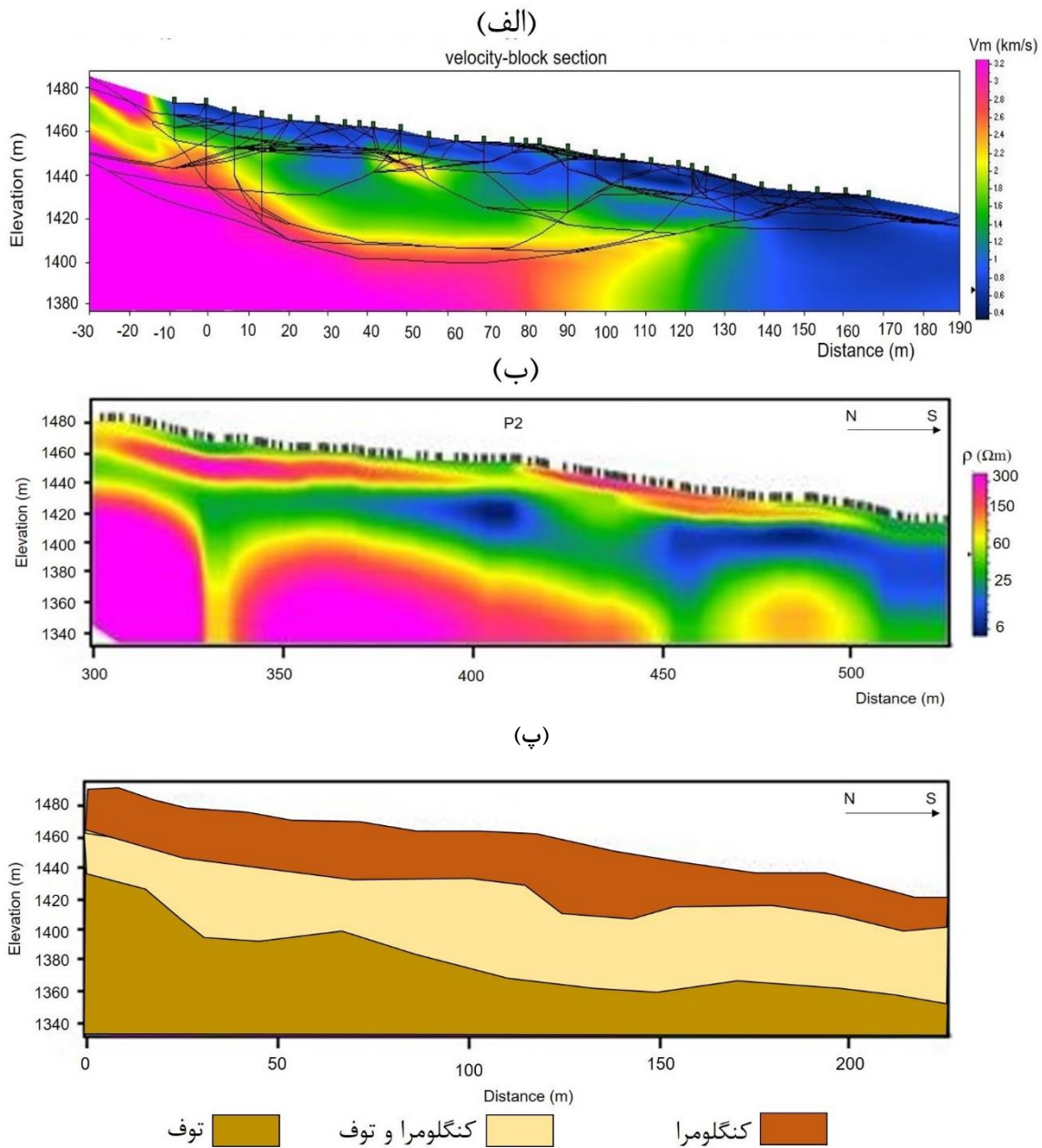
#### ۵- تفسیر زمین‌شناسی سطح زمین لغزش

با توجه به نوع انتشار پرتوهای لرزه‌ای که در هر تکرار مبتنی بر مدل سرعت به روز رسانی خواهد شد، مشخص است که مدل سرعت تنها در محدوده لایه اول و دوم قابل اعتماد است و اعماق بیشتر را شامل نمی‌شود؛ چون پرتوهای لرزه‌ای در آنجا سیر نکرده است تا اثر خواص فیزیکی زمین روی ژئوفون منعکس شود (شکل ۶). بنابراین، خارج از این محدوده مدل سرعت قابل اعتماد نیست. در لایه اولی که از مدل سرعت تهیه شده است، ساده‌سازی انجام گرفته است چون چندین زون کوچک با سرعت متفاوت در آن قابل مشاهده شده است که به عارضه‌های زمین‌شناسی و موادی با جنس متفاوت از توف، ماسه سنگ و کنگلومرا برمی‌گردد اما آنچه از این مدل‌سازی قابل استنتاج است این است که وضعیت کل لایه اول و همچنین مرز آن با لایه پایینی تا حدودی قابل شناسایی است که می‌تواند کمک شایانی به تفسیر راحت‌تر داده الکتریکی باشد. از آنجایی که مدل الکتریکی به سطح توپوگرافی و ناهمگنی لایه اول خیلی حساس است و مفسر را با مشکل مواجه می‌کند، تعیین لایه‌بندی اعماق کم با روش لرزه‌ای و ادغام آن با نتایج الکتریکی، دید بهتری از سطح زمین لغزش را می‌کند.

در شکل ۸- پ سه لایه مشخص شده است که لایه سطحی لایه‌های ناهمگن و با تغییرات سرعتی زیاد است که می‌تواند ناشی از وجود درزه و شکاف‌های موجود و ترکیب

لایه کنگلومرایی / ماسه‌ای با رخنمون‌های توفی باشد. این لایه در بیشتر نواحی دارای سرعت موج اولیه کم است (شکل ۸- الف). در زیر این لایه، لایه‌ای با سرعت موج ۱۲۰۰ تا ۲۲۰۰ متر بر ثانیه مشخص شده است که به احتمال فراوان لایه آبرفتی درشت‌دانه هزار دره در قطعه مورد بررسی است. پایین‌تر از لایه آبرفت کنگلومرایی، لایه‌ای با سرعت بیش از ۲۵۰۰ متر بر ثانیه قرار دارد که نشان‌دهنده وجود لایه‌ای سنگی احتمالاً از جنس توف است. با توجه به بازدهی‌های به عمل آمده از ناحیه مورد بررسی و گزارش زمین‌شناسی جنس سنگ پی در اینجا را می‌توان به توف‌های سنگی نسبت داد. در این بخش نیز می‌توان سطح جداکننده میان آبرفت کنگلومرایی و لایه سطحی را به عنوان سطح لغزش در نظر گرفت (شکل ۸- الف). بر مبنای دو داده مقاومت‌ویژه الکتریکی و سرعت انتشار موج اولیه، در نهایت مدل زمین‌شناسی سطح زمین لغزش احتمالی در شکل ۸- پ استنتاج شد.

تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ساختارهای زیرسطحی ناشی از وجود سه ساختار با تفکیک مقاومت ویژه الکتریکی قابل توجه است (شکل ۸- ب). ساختار سطحی ناحیه‌ای با تغییرات مقاومتی است که می‌تواند ناشی از وجود ترک و شکاف‌های سطحی و نیمه‌عمیق تا عمق ۱۰ متری از سطح زمین و همچنین وجود مصالح آبرفتی و توفی باشد که به صورت رخنمون‌های سنگی پدیدار شده‌اند. در زیر این ساختار



شکل ۸- تفسیر تلفیقی مدل زمین لغزش در امتداد پروفیل ۲ ژئوالکتریکی، (الف) سرعت موج اولیه، (ب) مقاومت ویژه الکتریکی و (پ) تفسیر زمین شناسی سطح زمین لغزش

پروفیل ژئوالکتریک در محدوده زمین لغزش، چهار پروفیل سرتاسری از بالاتر از افتگاه مشاهده شده تا موقعیت جاده ترسیم شده است؛ نکته قابل توجه در تمامی مقاطع عرضی، وجود آنومالی‌های افقی است که به دلیل وجود تفاوت در میزان دانه بندی، اندازه گراول‌ها و احتمالاً رطوبت از هم تفکیک شده‌اند. تقریباً تمامی مقاومت‌های برداشت شده در یک بازه‌اند که نشانه ثابت بودن تغییرات جنس است. لایه‌های افقی در مقاطع ژئوفیزیکی، برش عرضی لایه‌های شیب‌دار زمین شناسی را به خوبی توجیه می‌کند. همچنین، آنومالی واضحی نسبت به

ساختار لایه‌ای با مقاومت کمتر (عمدتاً کمتر از ۶۰ اهم‌متر) دیده می‌شود که نشانگر وجود مصالح آبرفتی کنگلومرایی هزار دره عمدتاً از نوع سیلت و قلوه‌سنگ است. وجود این لایه با این مشخصات و گستردگی آن در تمام قطعه به صورت تقریباً یکنواخت می‌تواند عامل اصلی لغزش انجام گرفته باشد. در قطعه مورد بررسی، در زیر ساختار مصالح آبرفتی کنگلومرایی هزار دره و بر اساس مدل‌سازی دوبعدی و سه بعدی انجام شده پیکره‌ای با حجم بالا قرار دارد که مقاومت الکتریکی بالای آن می‌تواند آن را به سنگ‌های توفی ارتباط دهد. بر روی چهار

*resistivity tomography techniques in subsurface investigations*”, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 34(1), 93-111.

3. Baranwal, V.C.; Dalsegg, E.; Dretvik, H.; Rønning, J.S.; Tønnesen, J.F.; and Solberg, I.L.; 2014; “*Delineation of Clay Layers in a Landslide Area in Norway Using Frequency Domain Helicopter-borne EM Survey. In Near Surface Geoscience 2014-20<sup>th</sup>. European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*”, European Association of Geoscientists & Engineers, 1, 1-5.
4. Cardarelli, E.; Cercato, M.; Cerreto, A.; and Di Filippo, G.; 2010; “*Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities*”, Geophysical prospecting, 58(4), 685-695.
5. Demirci, İ.; Candansayar, M.E.; Vafidis, A.; and Soupios, P.; 2017; Two dimensional joint inversion of direct current resistivity, radio-magnetotelluric and seismic refraction data: An application from Bafra Plain, Turkey” Journal of Applied Geophysics, 139, 316-330.
6. Dey, A.; and Morrison, H.F.; 1979; “Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures”. Geophysical Prospecting, 27, 106-136.
7. Drahor, M.G.; 2006; “*Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey*”, Journal of Applied Geophysics, 59(3), pp.205-223.
8. Gallardo, L.A.; and Meju, M.A.; 2004; “*Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints*” Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109(B3).
9. Hack, R.; 2000; “*Geophysics for slope stability*”, Surveys in geophysics, 21(4), 423-448.
10. Hamdan, H.A.; and Vafidis, A.; 2013; “*Joint inversion of 2D resistivity and seismic travel time data to image saltwater intrusion over karstic areas*”, Environmental Earth Sciences, 68(7), 1877-1885.
11. Hellman, K.; Ronczka, M.; Günther, T.; Wennermark, M.; Rücker, C.; and Dahlin, T.; 2017; “*structurally coupled inversion of ERT and refraction seismic data combined with cluster-based model integration*”, Journal of Applied Geophysics, 143, 169-181.
12. Kieu, D.T.; Pham, N.D.; and Lai, H.P.; 2019; “*Integration of geoelectrical and seismic Engineers*”, 1, 1-5.
13. Loke, M.H.; and Barker, R.D.; 1996; “*Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion I*”, Geophysical prospecting, 44(3), 499-523.
14. Loke, M.H.; 2004; “*Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*”.

اختلاف جنس در پروفیل‌های عرضی، طولی و سه بعدی مشاهده نمی‌شود؛ غیر از ابتدای پروفیل‌های طولی و عرضی که پیش‌تر علت آن بیان شده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

دو روش مورد استفاده در این مطالعه مشخصه‌های کاملاً متفاوتی از مصالح زیرسطحی را مورد بررسی قرار داده‌اند. روش مقاومت‌سنجی الکتریکی به تغییرات مقاومت‌ویژه مواد می‌پردازد که با توجه به اطلاعات اولیه از شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد نظر و وجود دو لایه با تفکیک مقاومت‌ویژه بالا (لایه‌های آبرفتی کنگلومرای با مقاومت الکتریکی متوسط و لایه‌های سنگی توفی با مقاومت الکتریکی بالاتر)، تفکیک بسیار قابل قبولی در نتایج به وجود آمده است که می‌توان محل تماس این لایه‌ها را در داده‌ها مشخص کرد. به علاوه روش لرزه‌نگاری انکساری که در بخش دیگر این تحقیق استفاده شد قدرت تفکیک‌پذیری بالایی در تعیین محل تماس دولایه با اختلاف امپدانس بالا و در نتیجه سرعت موج اولیه دارد. با توجه به انرژی مناسب مورد استفاده در این مطالعه برای چشمه‌های لرزه‌ای که از نوع انفجاری بوده است، نتایج حاصل شده علاوه بر مطابقت مناسب در هر سه پروفیل برداشت شده دارای قدرت تفکیک بالایی در محل تماس لایه‌های آبرفتی و سنگ توف در محل مورد بررسی است.

همچنین به منظور نتیجه‌گیری دقیق‌تر برای تعیین صفحه لغزش تطابق لایه‌های به دست آمده از روش لرزه‌نگاری انکساری مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به روش مدل‌سازی حل وارون بر اساس مسیر پرتو در این مطالعه، مسیرهای پرتو و محل‌های منکسر شدن آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است و در تعیین محل نهایی صفحه لغزش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بخش سونداژ الکتریکی، عمق لایه‌ها و زاویه تقریبی شیب با نتایج ارایه شده در بخش داده‌های لرزه‌نگاری تطابق قابل قبولی دارند. حال آنکه با توجه به تعداد زیاد داده‌ها در روش ژئوالکتریکی، نتیجه ارایه شده بر اساس داده‌های الکتریکی می‌تواند ملاک عمل مناسب‌تری برای نتیجه اصلی این مطالعه قرار گیرد.

## منابع

۱. گزارش نهایی مطالعات ژئوفیزیکی به روش ژئوالکتریک و لرزه‌نگاری شکست مرزی، مهندسی مشاور بنیان زمین پایدار، ۱۳۹۷.
2. Akingboye, A.S. and Ogunyele, A.C., 2019; “*Insight into seismic refraction and electrical*”.

26. Perrone, A.; Lapenna, V.; and Piscitelli, S.; 2014; "Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review", *Earth-Science Reviews*, 135, 65-82.
27. Portniaguine, O.N.; and Zhdanov, M.S.; 1999; "Focusing geophysical inversion images". *Geophysics*, 64, 874-887.
28. Pullammanappallil, S.K.; and Louie, J.N.; 1994; "A generalized simulated-annealing optimization for inversion of first-arrival times", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), 1397-1409.
29. Roy, L.; Sen, M.K.; McIntosh, K.; Stoffa, P.L.; and Nakamura, Y.; 2005; "Joint inversion of first arrival seismic travel-time and gravity data", *Journal of Geophysics and Engineering*, 2(3), 277-289.
30. Şenkaya, M.; Babacan, A.E.; and Karşı, H.; 2019; "Preliminary results of Integrated Geophysical Surveying in an active landslide in Işıklar-Trabzon, Turkey. In 10th Congress of the Balkan Geophysical Society", *European Association of Geoscientists &*
31. Shan, C.; Bastani, M.; Malehmir, A.; Persson, L.; and Engdahl, M.; 2014; Integrated 2D modeling and interpretation of geophysical and geotechnical data to delineate quick clays at a landslide site in southwest Sweden. *Geophysics*, 79(4), EN61-EN75.
32. Shin, C.; Ha, J.; and Jang, S.; 1999; "Refraction tomography by blocky parameterization".
33. Tsourles, P.I.; Symanski, J.E.; and Toskas, G.N.; 1999; "The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays". *Geophysics*, 64, 1357-1363.
34. Working Party on World Landslide Inventory; 1990; "A suggested method for reporting a landslide" *Bulletin IAEG*, 41, 5-12.
35. Yari, M.; Nabi-Bidhendi, M.; Ghanati, R.; and Shomali, Z.H.; 2021; "Hidden layer imaging using joint inversion of P-wave travel-time and electrical resistivity data". *Near Surface Geophysics*, 19, 297-313.
36. Zhao, L.; Zuo, S.; Deng, D.; Han, Z.; and Zhao, B.; 2018; "Development mechanism for the landslide at Xinlu Village, Chongqing, China", *Landslides*, 15(10), 2075-208.
15. Lelievre, P.; and Farquharson, C.G.; 2013; "Gradient and smoothness regularization operators for geophysical inversion on unstructured meshes". *Geophysical Journal International*, 195(1), 330-341.
16. Lelievre, P.; Farquharson, C.G.; and Hurich, C.A.; 2011; "Inversion of first-arrival seismic traveltimes without rays, implemented on unstructured grids". *Geophysical Journal International*, 185(2), 749 - 763.
17. Lelievre, P.; Farquharson, C.G.; and Hurich, C.A.; 2010; "Computing first-arrival seismic traveltimes on unstructured 3-D tetrahedral grids using the Fast Marching Method". *Geophysical Journal International*, 184(2), 885 - 896.
18. Marescot, L.; Lopes, S.P.; Rigobert, S.; and Green, A.G.; 2008; "Nonlinear inversion of geoelectric data acquired across 3D objects using a finite-element approach", *Geophysics*, 73(3), F121-F133.
19. Moser, T.J.; 1991; "Shortest path calculation of seismic rays". *Geophysics*, 56(1), 59-67.
20. Mostafaei, K.; and Ramazi, H.; 2018; "Compiling and verifying 3D models of 2D induced polarization and resistivity data by geostatistical methods". *Acta Geophysica*, 66(5), 959-971.
21. Özyıldırım, Ö.; Demirci, İ.; Gündoğdu, N.Y.; and Candansayar, M.E.; 2020; "Two dimensional joint inversion of direct current resistivity and radiomagnetotelluric data based on unstructured mesh", *Journal of Applied Geophysics*, 172, 103885.
22. Palmer, D.; 1980; "The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Society of Exploration Geophysicists*".
23. Pareta, K.; Kumar, J.; and Pareta, U.; 2012; "Landslide hazard zonation using quantitative methods in GIS", *Int J Geospatial Eng Technol*, 1(1), 1-9.
24. Patella, D.; 1997; "Introduction to ground surface self-potential tomography", *Geophysical Prospecting*, 45(4), 653-681.
25. Perrone, A.; Vassallo, R.; Lapenna, V.; and Di Maio, C.; 2008; "Pore water pressures and slope stability: a joint geophysical and geotechnical analysis", *Journal of Geophysics and Engineering*, 5(3), 323-337.