

تعیین سطح لغزش و حجم روباره توده ریزشی بر اساس اندازه‌گیریهای ژئوفیزیکی (مطالعه موردی توده ریزشی مجاور تونل خالنجه)

غلام جوان دولوئی، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
محمدرضا عباسی، دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
سیدمحمد جعفریان، کارشناس ارشد شرکت ناودیس راه، تهران

چکیده

بررسی تصاویر ماهواره‌ای در گستره مورد مطالعه ارزیابی شده است. نتایج این مطالعه حضور یک لایه اشباع از آب را در محدوده پاشنه لغزش و در فصل مشترک بین سطح لغزش مستحکم با لایه بالایی آن نشان می‌دهد. جمع شدن این آبها باعث کاهش میزان چسبندگی لایه‌های ریزشی و طبیعتاً تسریع در فرآیند رانش زمین را موجب می‌گردد. بنابراین رانش توده لغزشی جدا شده از محل اصلی خود در آینده نزدیک حتمی است. در این راستا، اتخاذ تمهیدات لازم برای رانش توده با حجم بیش از سیصد هزار متر مکعب در سمت جنوبی مسیر ریل‌گذاری ضروری است.

کلیدواژه‌ها: توده ریزشی، ژئوالکترونیک، لرزه‌نگاری، سطح لغزش، مخاطرات زمین‌شناسی

۱- مقدمه

روشهای متداول در کاوشهای ژئوفیزیکی بر مبنای مطالعه برخی از ویژگیهای مواد تشکیل‌دهنده زمین ابداع شده‌اند که اندازه‌گیری و بررسی این ویژگیها در سطح زمین امکان شناسایی و تعیین موقعیت ساختمانهای مختلف زمین‌شناسی، معادن و مخازن حاوی مواد گوناگون در زیر زمین را فراهم می‌کند. در بررسیهای کم عمق، روشهای الکترونیک و لرزه‌نگاری شکست مرزی از تنوع و کاربرد بیشتری برخوردارند که مواردی چون سهولت، سرعت انجام عملیات و هزینه پایین، موجب کاربرد بیشتر این روشها در بررسیهای کمی و کیفی مطالعات مهندسی محدوده ساختگاه تأسیسات و سازه‌های بزرگ و مهم و زمین لغزشهای خطرناک شده است.

برای تعیین ضخامت لایه‌های سطحی در گستره زمین-لغزه روشهای متعددی وجود دارد. در این پژوهش برای بررسی سطح لغزش و همچنین محاسبه حجم سازندهای قابل ریزش از روشهای ژئوفیزیکی (ژئوالکترونیک و لرزه‌نگاری شکست مرزی) استفاده شده است. علت استفاده از روش ژئوالکترونیک قدرت تفکیک بالای این روش برای شناسایی لایه‌های آبدار در گستره لغزش است که موضوعی مهم در تسریع رانش توده‌های ناپایدار است. هر چند که استفاده از روش لرزه‌نگاری به خاطر بالا بودن دقت آن در محاسبه ضخامت لایه‌ها خصوصاً تعیین سطح لغزش متداول می‌باشد. البته تلفیق نتایج روشهای لرزه‌نگاری و ژئوالکترونیک منجر به تحلیل قابل اعتمادتر و واقع‌بینانه‌تر پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی می‌شود. به عنوان نمونه مطالعه موردی برداشتهای ژئوفیزیکی در گستره توده لغزشی مجاور تونل دوم خالنجه از قطعه ۵/ب راه آهن غرب کشور با توانمندی ۲۵ گمانه الکترونیک و ۷ پروفیل لرزه‌نگاری شکست مرزی ۲۴ ژئوفونی به منظور محاسبه حجم توده ریزشی ناپایدار و تعیین سطح لغزش طراحی و اندازه‌گیری شده است. برداشتهای الکترونیک به روش آرایش متقارن شلومبرژه انجام شده است. درحالی که برداشتهای لرزه‌نگاری با گیرنده‌های قائم موج تراکمی (P) به روش لرزه‌نگاری شکست مرزی با استفاده از چشمه انرژی ترکیبی چکش و مواد ناریه انجام شده است. بر اساس پردازشهای انجام شده بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزارهای مدلسازی، وضعیت لایه‌بندی و سطح لغزش به صورت سه بعدی به تصویر کشیده شده است. علاوه بر آن پتانسیل لغزش زمین با مشاهدات صحرائی و

روشهای مقاومت ویژه الکتریکی از کاربردی ترین روشهای متداول کاوشهای ژئوفیزیکی هستند که علاوه بر کاربرد در مطالعات مهندسی کارایی قابل توجهی در شناسایی و بررسی عوارض مختلف زمین شناسی دارند. کاربرد روش مقاومت ویژه الکتریکی در بررسی زمین لغزه‌ها^۱ یکی از متداولترین کاربردها به لحاظ دقت و سرعت انجام روش می‌باشد. به طور کلی مهمترین کاربرد روشهای مقاومت ویژه الکتریکی عبارتند از: تعیین ویژگیهای لایه‌های زمین و رسوبات آبرفتی و توپوگرافی سنگ کف؛ تشخیص و تعیین موقعیت شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های جانبی در لایه‌ها؛ تعیین موقعیت و بررسی ابعاد حفره‌های زیرزمینی و مسیر قناتها؛ بررسی زمین لغزه‌ها با تأکید بر تعیین شیب و سطوح لغزش؛ بررسیهای کمی و کیفی سفرهای آب زیرزمینی که شامل مواردی از قبیل تشخیص سطح ایستایی، تعیین مرز آبهای شور و شیرین و همچنین تعیین جهت جریانهای آب زیرزمینی می‌باشد.

هدف عمده در استفاده از روشهای لرزه‌ای عبارت است از ایجاد موج لرزه‌ای توسط چشمه ضربه‌ای یا انفجاری در یک نقطه معین و اندازه‌گیری شکل، دامنه و زمان رسید موج درگیرنده‌های لرزه‌ای که معمولاً در امتداد یک خط مستقیم آرایش یافته‌اند. با معلوم بودن زمان سیر موج تا هر یک از گیرنده‌ها و مسیر امواج لرزه‌ای، می‌توان سرعت موج را محاسبه نمود. علاوه بر آن با اندازه‌گیری دامنه موج اصلی در هر گیرنده می‌توان کاهش یا افزایش دامنه موج را به صورت تابعی از فاصله بررسی و نمایش داد.

در روش لرزه‌نگاری شکست مرزی از امواجی استفاده می‌شود که تحت زاویه حد به مرز مشترک دو لایه برخورد می‌کنند که به همین علت به سر موج^۲ معروف هستند و در امتداد مرز دو لایه حرکت می‌کنند. از زمان رسید این امواج به گیرنده‌های لرزه‌ای برای تعیین عمق فصل مشترک استفاده می‌شود [۲]. برداشت داده‌ها در این روش در امتداد خط پروفیلی شامل تعداد معینی از ژئوفونها (معمولاً ۲۴ عدد) انجام می‌گیرد. پس از برداشت داده‌ها در محل مورد بررسی، لازم است تا اولین رسید فاز موج را قرائت نموده و زمان آن را در یک جدول ثبت کرد. این کار برای تمام گیرنده‌های لرزه‌ای و برای تمام چشمه‌ها انجام می‌شود. پس از آن می‌توان منحنی زمان رسید را رسم کرد. این منحنی شامل خطوطی است که هر کدام متعلق به یک چشمه است. زمان اولین رسید موجها دارای یک شیب است که به ما عکس سرعت را نشان می‌دهد و در واقع بخشی از کار در این روش به دست آوردن دقیق این زمانها و شیبها است.

روشهای مقاومت ویژه الکتریکی از کاربردی ترین روشهای متداول کاوشهای ژئوفیزیکی هستند که علاوه بر کاربرد در مطالعات مهندسی کارایی قابل توجهی در شناسایی و بررسی عوارض مختلف زمین شناسی دارند. کاربرد روش مقاومت ویژه الکتریکی در بررسی زمین لغزه‌ها^۱ یکی از متداولترین کاربردها به لحاظ دقت و سرعت انجام روش می‌باشد. به طور کلی مهمترین کاربرد روشهای مقاومت ویژه الکتریکی عبارتند از: تعیین ویژگیهای لایه‌های زمین و رسوبات آبرفتی و توپوگرافی سنگ کف؛ تشخیص و تعیین موقعیت شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های جانبی در لایه‌ها؛ تعیین موقعیت و بررسی ابعاد حفره‌های زیرزمینی و مسیر قناتها؛ بررسی زمین لغزه‌ها با تأکید بر تعیین شیب و سطوح لغزش؛ بررسیهای کمی و کیفی سفرهای آب زیرزمینی که شامل مواردی از قبیل تشخیص سطح ایستایی، تعیین مرز آبهای شور و شیرین و همچنین تعیین جهت جریانهای آب زیرزمینی می‌باشد.

مطالعه عوارض عمقی زمین شناسی که بارزترین نمونه آنها لایه‌بندی‌های موازی با سطح افق می‌باشند، با بررسی تغییرات عمقی مقاومت ویژه ظاهری صورت می‌گیرد. این بررسیها که تحت عنوان سونداژ الکتریکی (گمانه الکتریکی) مطرح شده است، با افزایش فاصله الکترودهای جریان و تکرار اندازه‌گیری مقاومت ویژه ظاهری در یک نقطه انجام می‌شود.

همراه با افزایش فاصله الکترودها، عمق نفوذ جریان در زمین افزایش می‌یابد. به این ترتیب مقاومت ویژه لایه‌های عمیق تر نیز بر مقدار مقاومت ویژه ظاهری تأثیر می‌گذارد، چرا که مقاومت ویژه ظاهری بیانگر مقدار متوسط مقاومت ویژه محدوده‌ای از زمین است که به دو سطح هم پتانسیل که از محل الکترودهای پتانسیل می‌گذرند، محدود می‌شود. عمق این محدوده برابر با عمق نفوذ مؤثر جریان الکتریکی است.

با مشخص شدن میزان تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در نقطه مورد نظر و مقایسه این تغییرات با منحنی‌های اولیه مرجع و استفاده از مدلسازی مستقیم و معکوس می‌توان ضخامت و مقاومت ویژه واقعی لایه‌های زمین را در محل هر سونداژ (گمانه الکتریکی) مشخص نمود. با در

برداشت گردید. موقعیت گمانه‌های الکتریکی به گونه‌ای طراحی گردید که حتی‌الامکان گستره توده لغزشی با دقت نسبتاً خوب مورد مطالعه قرار گیرد و سطح لغزش و حجم روباره قابل ریزش آن محاسبه گردد. شایان ذکر است به منظور تعیین سطح توده لغزش در محل ریل‌گذاری که در پایین توده لغزشی و حاشیه جنوبی رودخانه گاماسیاب قرار گرفته است تعداد هفت گمانه الکتریکی (سوداژ) به فاصله تقریبی ۴۰ متر از هم مطابق تصویر (۱) طراحی و برداشت گردید. علت اصلی طراحی و برداشت نقاط در محور ریل‌گذاری مشخص شدن عمق واقعی سطح لغزش در مسیر ریل‌گذاری و چگونگی ارتباط آن با سطح شیب‌دار غیرریزشی توده لغزشی بوده است.

۲-۲- طراحی عملیات و ثبت داده‌های لرزه‌نگاری شکست مرزی

طراحی عملیات ثبت موج تراکمی (P) در امتداد پنج خط لرزه‌نگاری با راستای شرق به غرب انجام شده است، تصویر (۱)، خط لرزه‌نگاری شماره (۱) متشکل از دو پروفیل لرزه‌ای R و G است که هر پروفیل دارای ۲۴ گیرنده لرزه‌ای تک مؤلفه‌ای قائم (ژئوفون موج P) بوده است. فاصله تقریبی گیرنده‌ها حدود ۴ متر در نظر گرفته شده است.

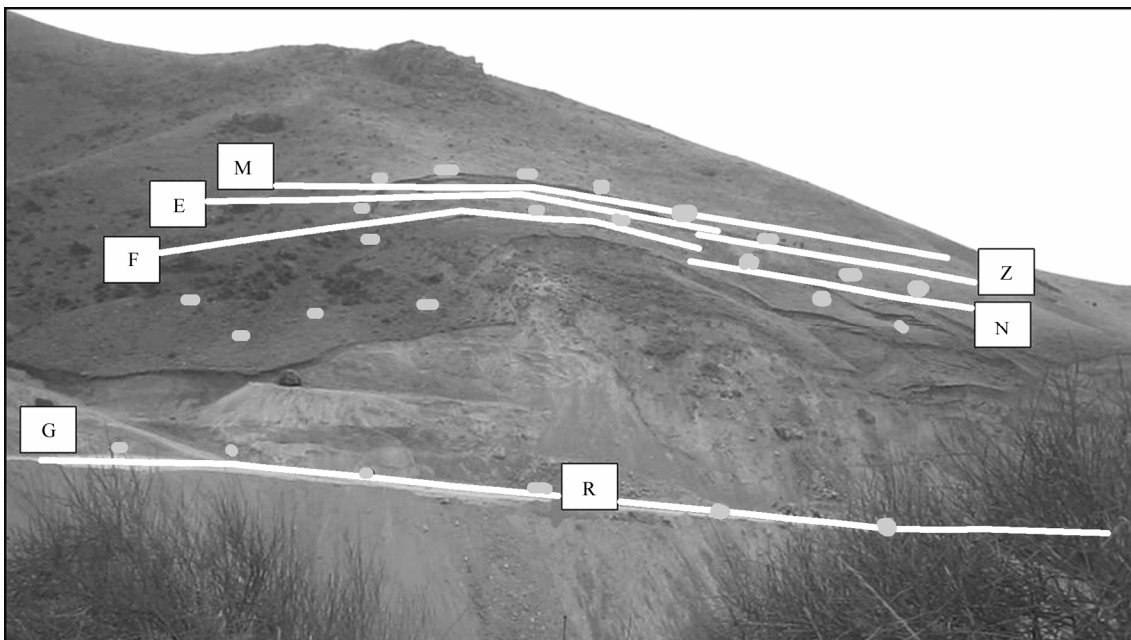
شایان ذکر است با توجه به نتایج آزمایشگاهی و مطالعات وسیع ژئوفیزیکی گستره سرعت موج تراکمی برای مواد موجود در طبیعت مشخص شده‌اند که می‌توانند به عنوان شاخص برای تعیین جنس لایه‌های زمین‌شناسی از روی مقاطع لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

تجربه چند ساله مطالعات ژئوفیزیک نشان داده است که تلفیق نتایج روشهای ژئوفیزیکی منجر به جوابهای پایدارتر و قابل اعتمادتر برای حل مسائل مورد نظر می‌شود که به عنوان نمونه به مطالعات آزادی و همکاران [۳] برای شناسایی گسل کهریزک با استفاده از روشهای مجموعه‌ای ژئوفیزیک^۳ می‌توان اشاره نمود. هدف اصلی این مقاله بررسی کارایی روش مجموعه‌ای ژئوفیزیک شامل روش ژئوالکتریک و روش لرزه‌نگاری در مطالعات مهندسی زمین-شناسی خصوصاً محاسبه سطح لغزش و حجم توده‌های ریزشی در حاشیه مسیر راه‌آهن می‌باشد.

۲- طراحی عملیات ژئوفیزیکی (ژئوالکتریک و لرزه‌نگاری) در گستره توده لغزش

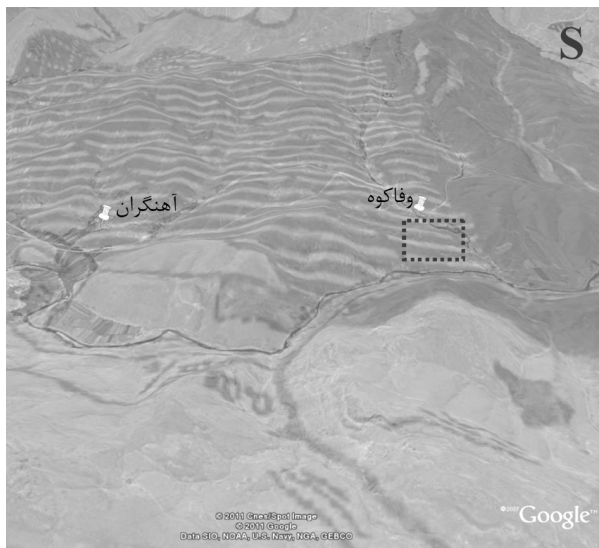
۱-۲- طراحی و برداشت داده مقاومت ویژه الکتریکی

موقعیت گمانه‌های الکتریکی (سوداژ) مطابق تصویر (۱) برای ۲۵ نقطه طراحی و به روش آرایش متقارن شلومبرگر



تصویر (۱): نقشه موقعیت گمانه‌های الکتریکی (دایره‌ها) و پروفیل‌های لرزه‌نگاری (خطوط ممتد R, G, F, N, E, Z, M).

سنگی را می‌توان در رده‌بندی کاتاکلاسیته‌ها قرارداد که کمترین چسبندگی میان سطوح منفصل را دارد. محلی که امروز در آن لغزش فعال زمین پدیدار شده است در فاصله ۳/۵ کیلومتری گسل عهد حاضر قرار می‌گیرد. جایی که محور تونل و بخش طراحی آتی راه‌آهن می‌گذرد منطبق بر دره‌ای است که رودخانه گاماسیاب از کف آن می‌گذرد. این دره دارای روند خاوری-باختری است. بخش بزرگ پوشش سازندهای سنگی را آبرفتهای دوران پلیاستوسن میانی با ضخامت حداکثر ۵ متر می‌پوشاند، تصویر (۲).



تصویر (۲): نقشه برجسته زمین‌شناسی منطقه و محل لغزش فعال (مربع نقطه چین).

لغزشها و ریزشهای توده‌های سنگ و آبرفت در مناطق کوهستانی می‌تواند دلایل متفاوتی داشته باشد. یکی از پدیده‌هایی که افزون بر لغزش زمین اتفاق می‌افتد با نام نشست^۵ در بسیاری از نقاط جهان (سرزمینهای با زمینساخت فعال و یا غیرفعال) گزارش شده است. این پدیده با تشکیل گسلهای کششی هم سو با شیب توپوگرافی و یا بر خلاف آن با طولهای نزدیک به حداکثر ۵ کیلومتر معرفی شده است. این گسلهای کششی مقدمه جابه‌جاییها است که می‌تواند منجر به رانشهای بزرگ شود. در راستای این گسلهای کششی در شیبه‌ها پله‌های عظیم دیده می‌شود و یا با افزای گسلی بروز می‌کند. این گسلهای کششی همسو با شیب توپوگرافی است.

طراحی خطوط لرزه‌نگاری شماره‌های (۲) تا (۵) به گونه‌ای بوده است که حتی‌الامکان در گستره توده لغزشی انجام شود. در این راستا، خط لرزه‌نگاری (۲) شامل یک پروفیل (F) ۲۴ ژئوفونی، خط لرزه‌نگاری (۳) شامل دو پروفیل (E, Z) هر یک با توانمندی ۲۴ ژئوفون و خط لرزه‌نگاری (۴) دارای یک پروفیل (N) ۲۴ ژئوفونی می‌باشند. در همه پروفیل‌های خطوط لرزه‌نگاری (۲) تا (۴) فاصله ژئوفونها ۴ متر در نظر گرفته شده است. در امتداد خط لرزه‌نگاری (۵) تعداد یک پروفیل (M) ۲۴ ژئوفونی با فاصله بین ژئوفونی ۸ متر در نظر گرفته شده است. در مجموع خطوط لرزه‌نگاری پنجگانه به گونه‌ای طراحی شده‌اند که تمام گستره لغزش را پوشش می‌دهد.

۳- ویژگیهای زمین‌شناختی و تکتونیک منطقه

از دیدگاه ساختاری منطقه مورد مطالعه در پهنه سنندج-سیرجان و زاگرس قرار دارد. مرز ساختاری میان زاگرس و این پهنه را گسل عهد حاضر^۴ از یکدیگر جدا می‌سازد. این گسل با روند شمال باختری- جنوب خاوری از گسلهای فعال ایران به شمار می‌رود که شاهد زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی بسیاری است و برای اولین بار با ارائه سازوکار و مشخصات هندسی آن توسط چالنگو و براد [۴] معرفی شد. محل رانش زمین میان روستاهای وناکوب، خالنج و آهنگران واقع شده است. سنگهایی که در جنوب رود گاماسیاب قرار می‌گیرند از نوع گابرو هستند که ساختار دانه‌ای آن حکایت از تکتونیزه شدن آن در شرایط دگرشکلی خمیری دارد. بلورهای پیروکسن و پلاژیوکلاز به صورت بارز کشیده شده‌اند، به گونه‌ای که این سنگ را می‌توان در رده میلونیت‌ها قرار داد. بعد از فاز دگرشکلی خمیری در یک فاز دگرشکلی شکننده این سنگها به شدت خرد شده‌اند. چگالی شکستگی‌هایی که این سنگها را متأثر کرده‌اند حاکی از دگرشکلی و اعمال تنش بیشتر از یک فاز دارد که این توده‌های سنگی را به حالت کاتاکلاسیته امروزی در آورده‌اند. در این دگرشکلی شکننده توده‌های سنگی فرصت ترمیم و بازسازی درزه‌های ایجاد شده (پر شدن درزه‌ها با کانیهای دیگر) را نداشته‌اند. به این خاطر این توده‌های

مدلسازی برای محاسبه ضخامت و سرعت انتشار موج در لایه‌های مختلف در محیط نرم‌افزار انجام گرفته است. مدلسازی در این شیوه به دو صورت مستقیم و معکوس در صورت وجود تعداد داده کافی انجام می‌گیرد. سپس مقادیر به دست آمده برای سرعت و ضخامت در زیر هر گیرنده و چشمه لرزه‌ای در امتداد هر پروفیل لرزه‌ای ترسیم می‌شود.

بررسی نتایج به دست آمده از پردازش داده لرزه‌ای نشان می‌دهد که بر اساس تغییرات سرعت انتشار موج تراکمی می‌توان حداکثر سه لایه در امتداد خطوط لرزه‌نگاری مطالعه شده به شرح زیر تشخیص داد:

- لایه اول دارای سرعت ۷۰۰-۹۰۰ متر بر ثانیه برای موج تراکمی است که اصولاً به آبرفتهای دانه درشت نسبت داده می‌شود که حداکثر ضخامت ۱۰ متر در امتداد خطوط لرزه‌نگاری شماره (۱) و (۵) مشاهده شده است. البته شایان ذکر است که یک لایه خاک رس ریز دانه در امتداد خط لرزه‌نگاری شماره (۳) با سرعت انتشار موج ۳۳۰ متر بر ثانیه تشخیص داده شده است که در سایر نقاط توده ریزشی کمتر مشاهده شده است.

- لایه دوم معمولاً دارای سرعت ۱۰۰۰-۲۰۰۰ متر بر ثانیه برای انتشار موج تراکمی است که عمدتاً با توجه به رخنمون حاشیه زمین‌لغزه همان آبرفتهای لایه اول است منتها دانه‌بندی آن درشت‌تر و از نوع سیلابی و آواری هستند. بنابراین لایه دوم نیز از ناپایداری قابل‌ملاحظه برخوردار است و در اثر وزن، نیروهای کششی جانبی و مرطوب شدن توانمندی لغزش را دارند. حداکثر ضخامت محاسبه شده برای لایه دوم ۲۵ متر می‌باشد که در امتداد خط لرزه‌نگاری شماره (۵) مشاهده می‌شود.

- لایه سوم دارای سرعت ۳۰۰۰-۵۵۰۰ متر بر ثانیه برای انتشار موج تراکمی محاسبه شده است. این مقدار سرعت متعلق به توده‌های آذرین منطقه می‌باشد که پی سنگ زیرین توده ریزشی را تشکیل می‌دهد. سطح مشترک لایه سوم با لایه دوم به عنوان سطح لغزش در گستره مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. مقطع عرضی تغییرات سرعت موج تراکمی با عمق برای خط لرزه‌نگاری شماره (۴) به عنوان نمونه نشان داده شده است، شکل (۱).

یکی از عوامل مؤثر در نشستها و تشکیل گسله‌های کششی، جنبشهای ناگهانی‌اند که همزمان با زمین‌لرزه به وجود می‌آیند. در مناطقی که گسله‌های فعال باعث زمین‌لرزه‌های ویرانگر می‌شوند، از این نوع نشستها دیده می‌شود. اشباع شدن از آب و قرارگیری در ارتفاعات می‌تواند چنین جابه‌جاییهایی را بعد از وقوع زمین‌لرزه تشدید کند. با توجه به اینکه توده لغزشی به فاصله ۳/۵ کیلومتری گسل عهد حاضر قرار می‌گیرد و با توجه به سابقه زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی که آخرین آنها در سیلاخور به وقوع پیوست، می‌توان بروز لغزش و جابه‌جایی توده‌های سنگی-آبرفتی و یا ریزش سنگ را در شعاع ۲۰ کیلومتری گسل عهد حاضر به شکل مؤثر انتظار داشت. دو عامل مؤثر که باید مد نظر قرار گیرند زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه است. در این ساختگاه توده‌های سنگی سرپانتینیت با لایه‌های آبرفتی پلاستوسن میانی پوشیده شده‌اند. توده‌های سنگی یاد شده به علت هوازدگی و خرد بودن آنها در اثر تنشهای زمینساختی وارد شده از دیگر عوامل تشدید کننده نبود استحکام در تشکیلات زمین‌شناسی است. دومین عامل توپوگرافی نسبتاً شدید دره‌های منتهی به رودخانه گاماسیاب می‌باشد که باعث تشدید در امر لغزش توده‌های خاک و سنگ شده است.

۴- پردازش و تحلیل داده ژئوفیزیکی (لرزه‌نگاری و ژئوالکتریک)

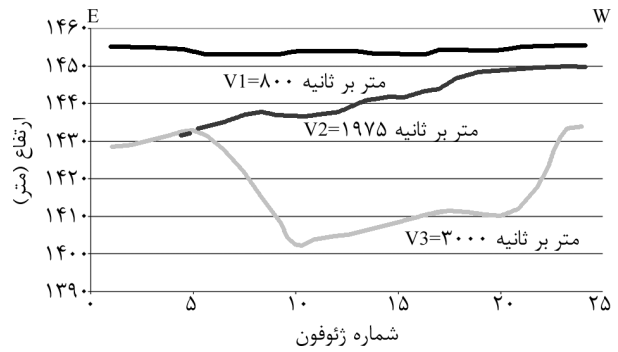
۴-۱- پردازش و تحلیل داده لرزه‌نگاری شکست مرزی

داده‌های لرزه‌نگاری شکست مرزی برداشت شده در امتداد پنج خط لرزه‌نگاری از نوع موج تراکمی (P) بوده است. برای پردازش داده‌های رقمی لرزه‌ای ثبت شده از نرم‌افزارهای متداول استفاده شده است. در این راستا، پس از تبدیل فرمت و اعمال فیلترهای رقمی متعدد برای کاهش سطح نویز و افزایش سیگنال به نویز برای قرائت زمان رسید اولین موجهای تراکمی اقدام شده است. سپس با تنظیم مشخصات گیرنده‌ها و چشمه‌ها و زمانهای قرائت شده، منحنی‌های زمان-مسافت برای هر پروفیل لرزه‌ای ترسیم شده است. پس از تعیین تعداد لایه‌ها بر روی منحنی،

شده به این روش را مقطع الکتریک می‌نامند.

نتیجه‌گیری کلی از بررسی مقاطع الکتریکی را می‌توان این گونه جمع‌بندی نمود که با توجه به رخنمونهای سطحی و مشاهدات زمین‌شناسی، و در نظر گرفتن استانداردهای موجود، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی مواد تشکیل‌دهنده لایه‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه را به پنج نوع کلی می‌توان تقسیم نمود: ۱- لایه‌هایی که مقدار مقاومت ویژه الکتریک کمتر از ۲۵ اهم متر را نشان می‌دهند، آبرفتهای اشباع از آب هستند؛ ۲- لایه‌هایی که مقدار مقاومت ویژه الکتریکی آنها بیشتر از ۲۵ اهم متر و کمتر از ۵۰ اهم متر تخمین زده شده است، لایه‌های آبرفتی مرطوب هستند؛ ۳- لایه‌های با مقاومت ویژه الکتریکی بیش از ۵۰ اهم متر و کمتر از ۱۵۰ اهم متر به رسوبات سیلابی نسبت داده شده‌اند؛ ۴- لایه‌های با مقاومت ویژه الکتریکی بیش از ۱۵۰ اهم متر و کمتر از ۳۵۰ اهم متر لایه‌هایی متراکم خرد شده منظور شده‌اند؛ ۵- لایه‌هایی که مقاومت ویژه الکتریکی بیش از ۳۵۰ اهم متر را دارند در ردیف لایه‌های پایدار و غیر ریزشی قرار گرفته‌اند.

پس از پردازش داده‌های الکتریک و محاسبه مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در زیر هر گمانه الکتریکی به تفکیک لایه‌های با ضخامت مشخص، هدف ما ارائه تصویری سه بعدی از تغییرات مقاومت ویژه و گسترش لایه‌ها در جهت‌های سه گانه است. بر این اساس از نرم‌افزار *MSG* استفاده شده است. با تنظیم پارامترهای متعدد ورودی برنامه از جمله مختصات مکانی هر گمانه الکتریکی و مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های مختلف به همراه ضخامت آنها می‌توان تصاویر سه بعدی از محدوده مورد مطالعه را پس از پیکربندی سلولی گستره مورد مطالعه ارائه نمود. لذا در مطالعه حاضر پس از طی مراحل آماده‌سازی، تصویر سه بعدی توده ریزشی مورد مطالعه مطابق شکل (۲) ارائه شده است. قابلیت نرم‌افزار *MSG* به گونه‌ای است که می‌توان از زاویه‌های مختلف تصاویر سه بعدی را مورد بررسی قرار داد. برای تجسم بهتر وضعیت لایه‌بندی، مدل سه بعدی را ۹۰ درجه حول محور *Z* چرخانده‌ایم که شکل (۲) ایجاد شده است. اگر سمت چرخش پاد ساعتگرد باشد، مدل بالایی و اگر سمت چرخش ساعتگرد باشد، مدل پایینی شکل (۲) ایجاد می‌شود.



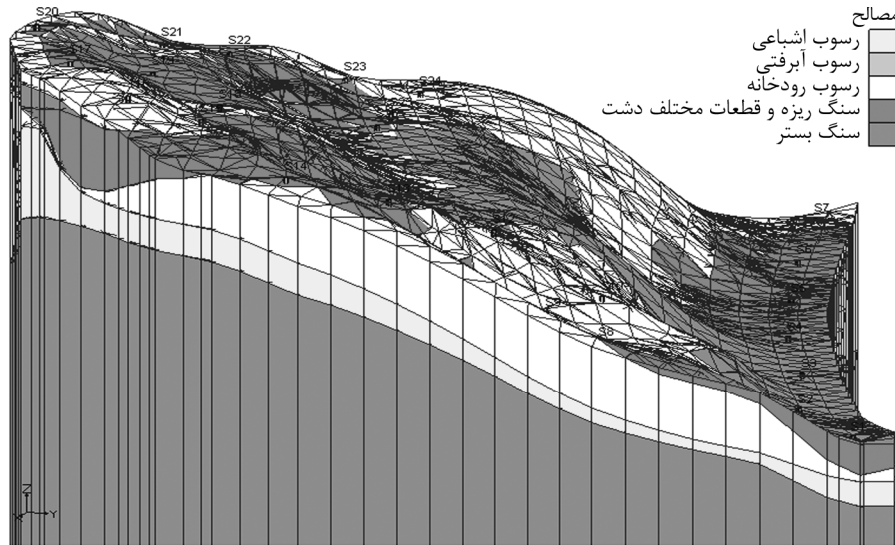
شکل (۱): مقطع عرضی تغییرات سرعت موج تراکمی بر حسب عمق در امتداد خط لرزه‌نگاری شماره چهار.

۴-۲- پردازش و تحلیل داده ژئوالکتریک

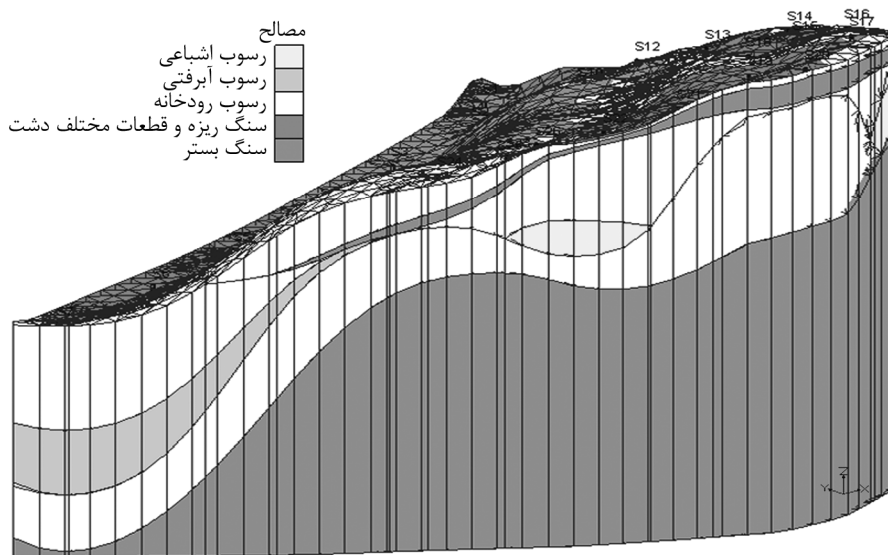
داده ژئوالکتریک برای ۲۵ نقطه مطابق تصویر (۱) اندازه‌گیری شده است. هر نقطه به گمانه الکتریکی (سونداژ الکتریک) معروف است که در محل آن با ارسال جریان الکتریکی در الکترودهای جریان و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در محل الکترودهای پتانسیل می‌توان تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی نقطه میانی را به روش آرایش شلومبرگر به دست آورد. ثبت داده‌ها به صورت فوق به داده‌های مقاومت سنجی نیز مشهور است. در این روش مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر گمانه الکتریکی در برگه‌های مشخص ثبت می‌گردد. سپس با محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری هر بار ارسال جریان و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل می‌توان جدول تغییرات مقاومت ویژه ظاهری بر حسب فاصله الکترودهای جریان را برای هر گمانه الکتریکی (سونداژ) تهیه نمود. برداشت داده برای تمام گمانه‌های الکتریکی به صورت یک فایل رقمی به عنوان ورودی نرم‌افزار *IPI2win* برای محاسبه تعداد لایه‌ها، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی هر لایه و ضخامت لایه‌ها در نظر گرفته شده است. از پردازش داده‌های هر گمانه الکتریکی به روش مدل‌سازی مستقیم و در صورت ضرورت مدل‌سازی معکوس پارامترهای تعداد لایه، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی و ضخامت لایه‌ها محاسبه شده است. در مرحله دیگر مقادیر پارامترهای محاسبه شده برای چند گمانه الکتریکی که در یک امتداد قرار گیرند به صورت همزمان ترسیم شده است. پس از درون‌یابی داده‌ها، لایه‌بندی زمین برحسب تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی زمین انجام شده است. مقطع عرضی محاسبه

نمایش داده شده است. جدول ارائه شده در حاشیه این شکل پارامترهای محاسباتی برای هر لایه می‌باشد که آخرین مقدار حجم را برای لایه مورد نظر برحسب مترمکعب نشان می‌دهد. برآورد اولیه از بررسی مقادیر حجم ارائه شده در این مطالعه مجموع حجم‌های محاسبه شده برای تمام لایه‌های بالای لایه مستحکم است که حجم کل توده غیرمستحکم اعم از لایه‌های سطحی، آبرفتهای ریز و درشت دانه و سیلابی و حتی سنگهای خرد شده آواری را بر حسب اندازه‌گیریهای الکتریکی ارائه می‌دهد که رقمی حدود ۷۰۰ هزار متر مکعب است. اما با توجه به شیب سطح لغزش و توپوگرافی آن بیش از ۵۰ درصد روباره فوق غیرقابل ریزش خواهد بود.

بررسی شکل (۲) نشان می‌دهد که نفوذ آب به درون لایه‌های پایینتر از چه موقعیت و محدوده‌ای امکانپذیر شده است. علاوه بر آن حد فاصل لایه‌های ریزشی با لایه مستحکم و پایدار لایه‌های اشباع از آب و یا مرطوب قرار دارد. یک موضوع وجود دارد که احتمال وقوع لغزش توده غیرپایدار را تسریع می‌کند. امکانپذیر نمودن محاسبه حجم لایه‌ها به صورت مجزا از توانمندیهای نرم‌افزار MSG می‌باشد. بنابراین با توجه به تقسیم‌بندی کلی که در بخش قبل انجام گرفت، تصاویر سه بعدی گستره هر لایه به طور مجزا برای تمام محدوده مورد مطالعه تهیه شده است که به عنوان نمونه برای لایه آبرفتهای سیلابی و دانه درشت در شکل (۳)

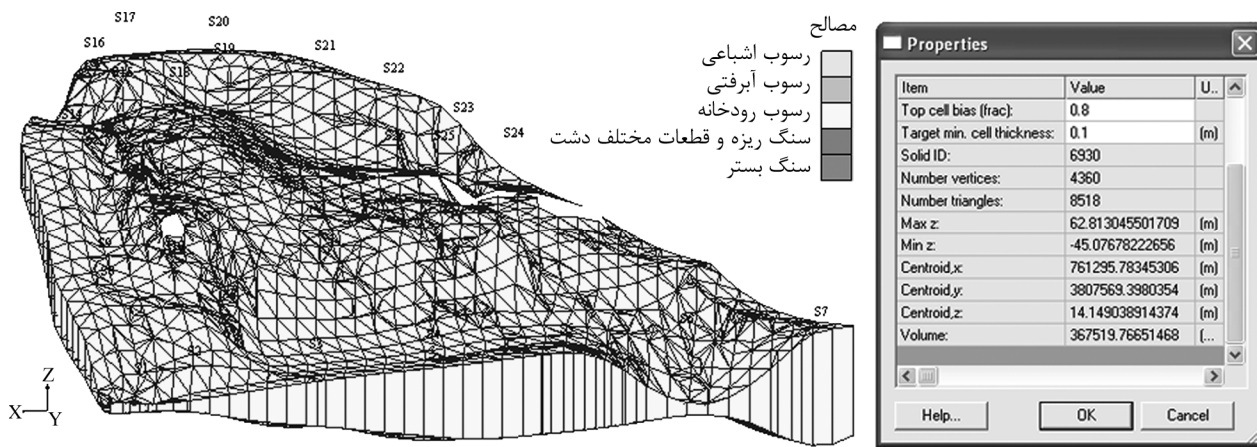


(الف) دید به طرف غرب (بالا)



(ب) دید به طرف شرق (پایین)

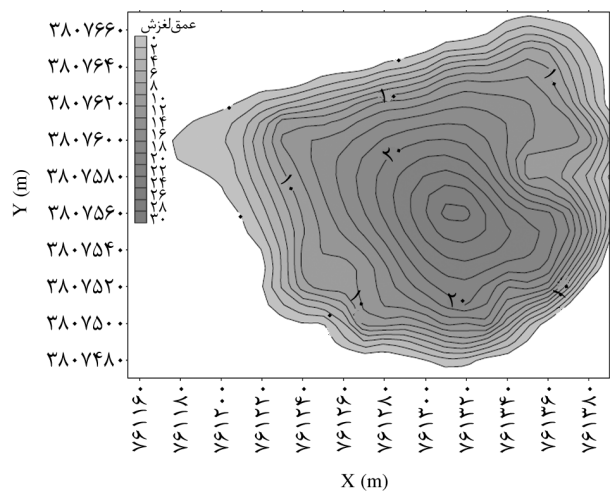
شکل (۲): نمایش سه بعدی مقاومت ویژه و گسترش لایه‌ها در جهات مختلف.



شکل (۳): گسترش لایه با مقاومت ویژه ۵۰-۱۵۰ اهم متر که از آبرفت متراکم سیلابی تشکیل شده است.

۵- محاسبه حجم روباره‌های ناپایدار

از مقایسه داده‌های لرزه‌نگاری و داده‌های الکتریک حداکثر عمق سطح شیب‌دار ریزشی ۳۰ متر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نقشه توده ریزشی ناپایدار هم ضخامت مطابق شکل (۴) تهیه و ارائه شده است. عمیق‌ترین نقطه توده ریزشی با رنگ تیره‌تر بر روی توده ریزشی مشخص شده است.



شکل (۴): نقشه هم ضخامت توده ریزشی ناپایدار.

شایان ذکر است خطوط هم ضخامت شکل (۴) ضخامت توده ریزشی را در موقعیت هر نقطه (X, Y) بر حسب متر نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن یک جسم سه بعدی در محل X, Y نقطه مورد نظر می‌توان حجم مؤثر توده ریزشی ناپایدار را محاسبه نمود. بنابراین حجم مؤثر توده ریزشی ناپایدار ۳۴۰ هزار و ۹۱۲ متر مکعب برآورد می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بر اساس پردازش داده ژئوفیزیکی توسط نرم‌افزارهای مدل‌سازی، وضعیت لایه‌بندی و سطح لغزش به صورت سه بعدی به تصویر کشیده شده است. در این مطالعه، حجم مؤثر ۳۴۰ هزار متر مکعب برای توده ریزشی ناپایدار محاسبه شده است که مؤید توانمندی لغزش زمین در مجاورت تونل دوم خالنج در آینده نزدیک می‌باشد. این موضوع با مشاهدات صحرایی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای در گستره مورد مطالعه نیز تأیید شده است. علاوه بر آن، نتایج این مطالعه حضور یک لایه اشباع از آب را در محدوده پاشنه لغزش و در فصل مشترک بین سطح لغزش مستحکم با لایه بالایی آن را نشان می‌دهد. جمع شدن این آبها باعث کاهش میزان چسبندگی لایه‌های ریزشی و طبیعتاً تسریع در فرآیند رانش زمین را موجب می‌گردد. بنابراین رانش توده لغزشی جدا شده از محل اصلی خود در آینده نزدیک حتمی است.

با توجه به نزدیکی گسل لرزه‌خیز عهد حاضر و احتمال ریزش سنگ و آبرفت به صورت لغزش زمین، انجام مطالعات تکمیلی لغزش توده‌های خاک و سنگ به منظور تهیه نقشه برآورد خطر در گستره ۲۰ کیلومتری از محور راه آهن پیشنهاد می‌شود. علاوه بر آن با رخداد یک زمین‌لرزه با بزرگی ۵/۵ به بالا، احتمال ریزش و بسته شدن رودخانه وجود دارد. در صورت هر گونه ریزش در محورهایی که راه آهن به موازات رودها عبور می‌کند خطر آب گرفتگی و ایجاد دریاچه‌های موقت دور از انتظار نیست. با در نظر گرفتن تمهیدات مناسب پایداری و سبک‌سازی توده لغزش مورد

3. Azadi, A., Hessami, Kh., and Javan-Doloei, G. (2010). Integrated geophysical methods for determining geometry of the Kahrizak fault, Tehran, Iran, *Natural Hazards*, 54(3), 13p.
4. Tchalenko, J.S. and Braud, J. (1974). Seismicity and structure of the Zagros (Iran): the main recent fault between 33 and 35 N., *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, 277(1262), 1-25.

نظر می‌توان از آسیب‌های جدی ناشی از وقوع رویدادهای محتمل برای مسیر راه‌آهن غرب کشور جلوگیری نمود.

۷- سپاسگزاری

از آزمایشگاه مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای تهیه تجهیزات ژئوفیزیکی مورد نیاز این پروژه قدردانی می‌شود.

۹- پانویس

- ۱- *Landslides*
- ۲- *Head Wave*
- ۳- *Integrated Geophysical Method*
- ۴- *Main Recent Fault (MRF)*
- ۵- *Sackung*
- ۶- *Groundwater Modeling System (MSG)*

۸- مراجع

1. Dobrin, B.M. and Savit, C.H. (1988). *Introduction to geophysical prospecting*, 4th Edition, McGraw-Hill, 622p.
2. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., and Keys, D.A. (1988). *Applied geophysics*, Cambridge University Press, New York, 568p.