

## طراحی و ساخت مدل فیزیکی شبیه سازی زمین لغزش با هدف ارزیابی توانایی روش های ژئوالکتریک در آشکار سازی هندسه زمین لغزش ها

علی رمزانی\*<sup>۱</sup>، میرستار مشین چی اصل<sup>۲</sup>، محسن شریعت جعفری<sup>۳</sup>، محمد عباسی<sup>۱</sup>

پذیرش مقاله: ۸۸/۶/۴

دریافت مقاله: ۸۷/۷/۲

### چکیده:

مطالعه پیرامون رخداد و رفتار زمین لغزش ها به منظور پایدارسازی و کاهش خطرات ناشی از آنها همیشه مورد توجه مهندسان بوده است. یکی از مسائل مهم در مطالعه زمین لغزش ها تعیین هندسه و عمق سطح گسیختگی است. امروزه روش های مختلفی برای بررسی هندسه زمین لغزش وجود دارد. روش های ژئوفیزیکی به ویژه روش مقاومت ویژه الکتریکی یکی از بهترین و سریع ترین روش ها است. در این تحقیق هدف، فراهم کردن یک بستر مناسب برای انجام مطالعات ژئوالکتریک روی مدل های آزمایشگاهی و کوچک مقیاس به منظور یافتن بهترین روش ها برای مطالعه زمین لغزش به روش مقاومت ویژه الکتریکی است. برای رسیدن به این هدف یک مدل فیزیکی شبیه زمین لغزش داخل یک تانک ژئوالکتریک طراحی و ساخته شد. مراحل آماده سازی و انجام تست های مختلف روی تانک ژئوالکتریک به منظور رسیدن به بهترین نتیجه طبق آخرین یافته ها، انجام گرفت. نتیجه نهایی مطالعه ژئوالکتریک، تهیه مقطع مقاومت ویژه ای است که بر مدل ساخته شده انطباق بسیار خوبی دارد و موید این واقعیت است که می توان تحقیقات گسترده ای در مورد روش های مختلف مطالعه ژئوفیزیکی و زمین لغزش ها انجام داد و بهترین روش را برای کار صحرایی انتخاب کرد.

**کلید واژه ها:** تانک ژئوالکتریک، شبه مقطع مقاومت ویژه، شبه زمین لغزش

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات G\_ali\_ramzani@yahoo.com

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۳- عضو هیئت علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

\* مسئول مکاتبات

## مقدمه

تعیین عمق و هندسه سطح گسیختگی زمین‌لغزش‌ها در تحلیل پایداری شیب‌ها و پیش‌بینی لغزش‌های احتمالی در آینده به منظور کاهش خطرات و خسارات زمین‌لغزش ضروری است. بدون داشتن اطلاعات در مورد سطح گسیختگی هیچ‌گونه تحلیل واقعی و دقیقی از چگونگی رفتارهای حرکتی شیب گسیخته شده نمی‌توان ارائه داد. علاوه بر این ارائه هرگونه راه‌حل برای پایداری شیب ناپایدار در اولین قدم منوط به شناسایی و تشخیص سطح لغزش است (۶). روش‌های متعددی برای تخمین عمق زمین‌لغزش وجود دارند که با توجه به اهمیت پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این روش‌ها تخمین عمق به روش ژئوفیزیکی می‌باشد. از بین روش‌های ژئوفیزیکی برای شناسایی بخش‌های زیرسطحی روش‌های لرزه‌نگاری و ژئوالکتریک متداول‌ترین روش‌ها می‌باشند، که روش مقاومت ویژه الکتریکی سریع‌تر و مقرون به صرفه‌تر می‌باشد (۲). به دلیل تغییر خواص فیزیکی توده سنگ یا خاک در اثر لغزش، مقاومت ویژه الکتریکی سطح پایین لغزنده نسبت به مقاومت ویژه سنگ‌های زیرسطح لغزش، تغییر می‌کند. از این اختلاف ناگهانی مقاومت ویژه می‌توان در تخمین عمق سطح لغزش استفاده نمود (۲). این‌گونه مطالعات امروزه در سراسر جهان انجام می‌شود. به عنوان نمونه، مطالعه توموگرافی مقاومت ویژه دو بعدی با تمایز مقاومت ویژه بسیار بالا که توسط پی‌گاری (E. Piegari, 2009) انجام شده را می‌توان نام برد. (Vincenzo lapena, 2004) یک توده لغزشی بسیار پیچیده را با توموگرافی دو بعدی مطالعه کرد. پرون، (A. perrone, 2004) با ترکیب مطالعات مقاومت ویژه دو بعدی و پتانسیل خودزا (SP) ابعاد یک توده لغزشی پیچیده به همراه الگوی جریان‌های آب در مرز گسیختگی را به دست آورد. بجنورنیک (Bjornheinke, 2009) روی یک توده لغزشی با استفاده از روش‌های لرزه‌ای دو و سه بعدی کار کرد. هلاکوی و همکاران (۱۳۸۵) توده لغزشی واقع در مسیر بزرگراه قزوین - رشت را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق جهت تعیین مقاومت ویژه واقعی و ضخامت لایه‌ها با استفاده از مقادیر مقاومت ویژه ظاهری از

مدل‌سازی معکوس دوبعدی استفاده گردید. نصرآزادانی و همکاران (۱۳۸۸) مطالعه مشابهی در فریدون شهر انجام داده‌اند.

### پیشینه استفاده از مدل‌های ژئوفیزیکی در بررسی‌های زیرسطحی

ساخت مدل فیزیکی پدیده‌های زمین‌شناسی در مقیاس آزمایشگاهی، روش تحقیق مناسبی در مطالعات ژئوفیزیکی است. برای پدیده‌ها و ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی، انجام مدل‌سازی‌های تئوری بسیار دشوار است و ناگزیر باید به مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی روی آورد. بررسی صحت مطالعات تئوری به راحتی در طبیعت امکان‌پذیر نیست در حالی که در آزمایشگاه به راحتی انجام می‌شود. در آزمایشگاه اثرات جانبی ناخواسته تقریباً حذف می‌شوند و می‌توان به راحتی بر روی فاکتور مورد نظر بدون توجه به اثر آن‌ها مطالعه کرد.

استفاده از مدل‌های ژئوفیزیکی روشی متداول در تحقیقات و بررسی‌های زیرسطحی است. آپارو (A. Apparao, 1970) یک تانک ژئوالکتریک از جنس چوب طراحی نمود و از آب به عنوان محیط همگن داخل تانک استفاده کرد، در این بررسی ساختارهای رسانا (به منظور مطالعه رگه‌های رسانا در طبیعت) مانند دایک در زوایای مختلف نسبت به افق به وسیله تعداد زیادی آرایش ژئوالکتریک مورد مطالعه قرار گرفت. الفسون (Karl J. Ellefsen, 2004) از یک تانک استوانه‌ای پلاستیکی برای مطالعه اثر دیواره چاه در مطالعات الکترومغناطیس استفاده کرد. دیلی (Daily et al, 1998) از یک مدل آزمایشگاهی برای بررسی آلودگی سازندهای رسوبی به هیدروکربن‌ها توسط روش IP استفاده نمود. مولو (Muluo, 2004) یک مدل آزمایشگاهی، برای بررسی جهت‌گیری شکستگی‌ها با استفاده از داده‌های لرزه‌ای طراحی کرد. ورسچور (D. J. Verschur, 2005) از یک مدل برای مطالعه ساختارهای پیچیده لایه‌ای به روش لرزه‌ای بهره برد. فارکوهارسون (Colin G. Farquharson, 2006) داده‌های مدل آزمایشگاهی را با داده‌های تئوری برای پاسخ الکترومغناطیس

اسکلت فلزی محکم به ابعاد  $300 \times 150 \times 120 \text{ cm}^3$  است. دو وجه آن از پلاکسی گلاس شفاف ساخته شده که امکان بررسی مقطع عرضی مدل را می‌دهد، و دو وجه دیگر تانک از ورقه‌های فلزی ساخته شده‌اند.

گام اول در طراحی یک تانک ژئوالکتریک عایق سازی الکتریکی دیواره‌ها است. عایق‌سازی توسط یک نارسانای بسیار خوب انجام گرفت و دیواره‌های فلزی داخل تانک به لحاظ الکتریکی ایزوله شد. ابعاد مدل زمین لغزش طراحی شده داخل تانک  $220 \times 150 \times 120 \text{ cm}^3$  است، شکل (۱).

مدل از دو لایه شیب‌دار با شیب ۱۰ درجه تشکیل شده، لایه پایه تحتانی به عنوان واحدی پایدار با استفاده از یک دیوار حائل چوبی، مصون از لغزش طراحی شده و بخاطر تمایز و شفاف از واحد لغزشی فوقانی، دارای بافت متخلخل و درشت‌دانه است. واحد بالایی که محیط در برگیرنده توده لغزشی است، یک توده خاک رسی (CH) تحکیم شده با رطوبت ۱۵ تا ۲۵ درصد می‌باشد.

در این تحقیق تأکید عمده روی آشکارسازی مرز گسیختگی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد مرز گسیختگی توده‌های لغزشی، عموماً پهنه‌هایی خرد شده هستند که در صورت عدم حضور آب دارای مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به محیط

اجسام مختلف مقایسه کرد. لای (W. L. Lai, 2006) از GPR در مطالعه خواص مواد دی‌الکتریک و تخلخل آن‌ها روی یک مدل فیزیکی استفاده نمود. اسلامی هرندی (۱۳۸۳) در بررسی لایه‌های شیب‌دار با استفاده از روش‌های مقاومت ویژه، از یک تانک حاوی آب استفاده کرد و نتایج تجربی و نظری را با هم مقایسه نمود. خاکی (۱۳۸۶) ساختارهایی مانند دایک، سیستم‌های چند جسمی و تاقدیس و ناودیس را با استفاده از یک تانک ژئوالکتریک پر شده از آب مورد بررسی قرار داد.

### طراحی و ساخت مدل فیزیکی زمین لغزش به منظور انجام مطالعات ژئوالکتریک

ساخت مدل‌های آزمایشگاهی زمین لغزش به منظور اهداف مختلف انجام می‌شود. ییم (S. C. Yim, 2009) از یک مدل فیزیکی برای شبیه‌سازی سونامی ایجاد شده توسط زمین لغزش بهره برد. مدل شامل یک توده لغزشی است که بر روی یک سطح شیب‌دار داخل حوضچه موج رانده می‌شود. جیا (G. W. Jia, 2009) توسط یک مدل فیزیکی اثرات سطح آب زیرزمینی را روی چگونگی رخداد زمین لغزش بررسی کرد. در این تحقیق یک تانک ژئوالکتریک جهت مطالعه شبه زمین لغزش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری طراحی شد. تانک دارای یک



شکل ۱- عایق گذاری داخل تانک و قطع تماس الکتریکی مدل و دیواره‌ها

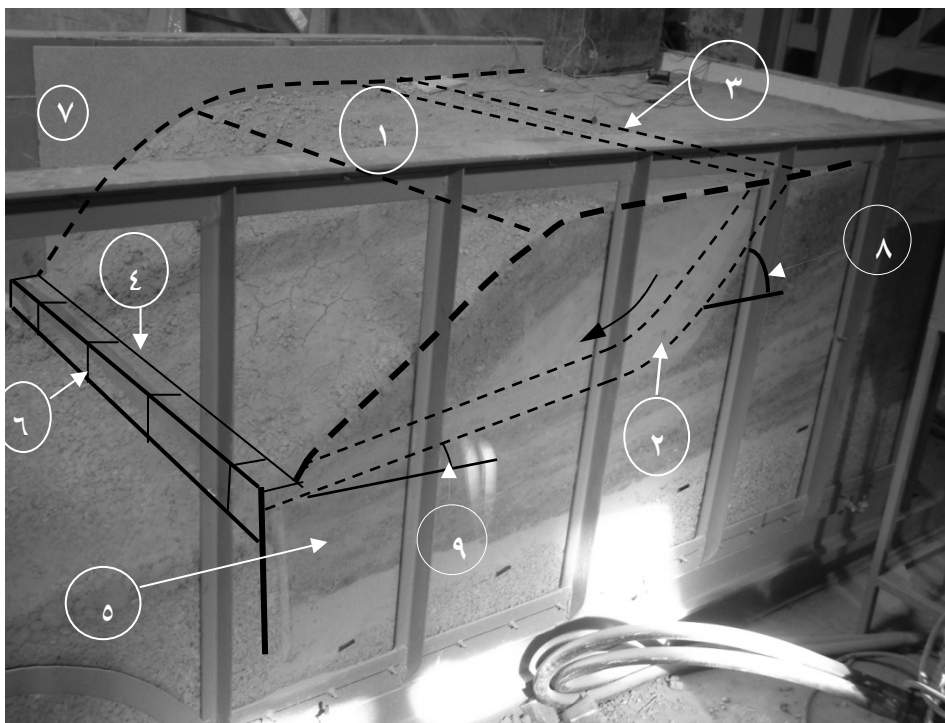
شبیه‌سازی، سطح گسیختگی با در نظر گرفتن شرایط واقعی انجام پذیرفت، به گونه‌ای که نتیجه آن در خروجی‌های دریافتی از طریق دستگاه ژئوالکترونیک، به طور بارز و شفاف قابل ارزیابی باشد.

مقاومت ویژه قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده مدل، قبل از عملیات ساخت اندازه‌گیری شد. این کار به منظور داشتن کنترل بر مواد تشکیل دهنده مدل از نظر مقاومت ویژه الکتریکی صورت گرفته است. اندازه‌گیری مقاومت ویژه توسط دستگاه داده‌برداری ژئوالکترونیک روی خاک‌های اولیه صورت گرفت شکل (۳).

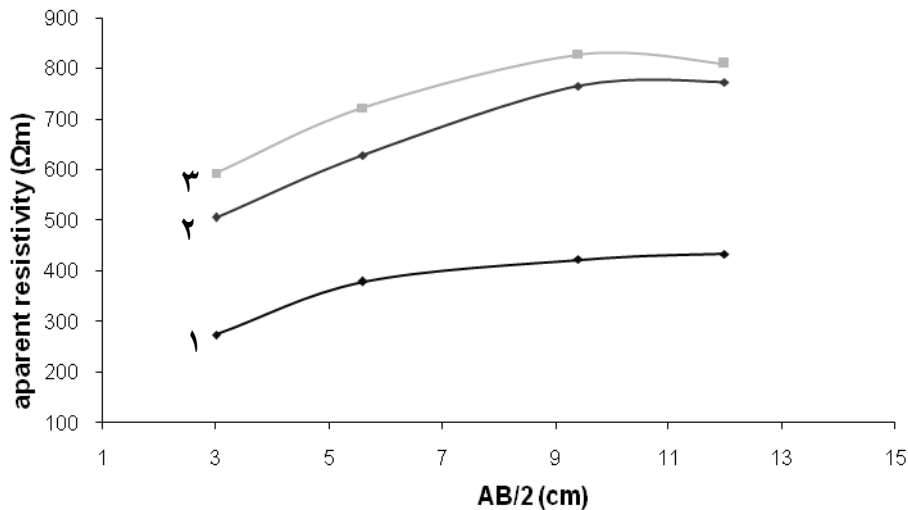
باتوجه به منحنی‌های مقاومت ویژه به دست آمده از مواد اولیه، ترکیب مناسبی از رس و ماسه برای شبیه‌سازی بخش‌های مختلف مدل فیزیکی لغزش استفاده شد، این ترکیب باید به گونه‌ای باشد که به طور شفاف ویژگی‌های هندسی یک

اطراف خود می‌باشند. در مرز گسیختگی، به دلیل خردشدگی مواد تخلخل افزایش می‌یابد و در یک محیط متخلخل به دلیل کاهش سطح تماس ذرات تشکیل دهنده خاک، جریان الکتریکی به سختی عبور می‌کند که باعث می‌شود این ناحیه مقاومت الکتریکی بالایی را نشان دهد. با این فرض در مدل فیزیکی با استفاده از یک لایه نازک متخلخل به ضخامت تقریبی ۷ سانتی‌متر مرز گسیختگی شبیه‌سازی گردید. مرز گسیختگی یک سطح ضعف، با مقاومت برشی ناچیز است. این سطح در شروع گسیختگی در بالادست دامنه دارای زاویه‌ای در حدود ۵۱ درجه با افق می‌باشد و در دوسوم آخر توده ناپایدار دارای شیبی حدود ۱۰ درجه و موازی لایه‌بندی است، شکل (۲).

با فرض این که توده‌های لغزشی در شرایط طبیعی به دلیل تغییر بافت ناشی از گسیختگی و لغزش، تفاوت معناداری از لحاظ ویژگی مقاومت الکتریکی از خود نشان می‌دهند در



شکل ۲- مدل فیزیکی شبیه‌سازی لغزش در آزمایشگاه. ۱: توده لغزشی رسی ۲: سطح لغزش شبیه‌سازی شده، ۳: گسیختگی کششی شبیه‌سازی شده فوقانی ۴: پنجه لغزش ۵: لایه تحتانی پایدار ۶: دیوار حائل مخصوص پایداری لایه تحتانی ۷: عایق دیواره تانک ۸: زاویه شروع گسیختگی با افق (۵۱ درجه) ۹: زاویه دوسوم آخر توده با افق (۱۰ درجه)



شکل ۳- مقاومت ویژه مواد اولیه مورد استفاده در شبیه سازی زمین لغزش در مدل فیزیکی (قبل از ساخت). (۱) توده خاک رس، (۲) شن و ماسه با کمی رس، (۳) ترکیب ماسه و رس

داده برداری اثری نگذارند. برای این منظور، در داخل تانک یک محیط همگن ایجاد نموده و با داده برداری مقاومت ویژه، گستره ای از فاصله الکترودی را که در آن بتوان از اثرات دیواره و کف تانک صرف نظر کرد مشخص نمودیم. برای انجام تست اولیه، ابتدا یک لایه همگن به ضخامت ۳۵cm در داخل تانک قرار می گیرد و نقطه وسط تانک را به عنوان مرکز آرایش در نظر گرفته و با یک آرایش مشخص داده برداری به روش VES انجام می گیرد، شکل ۴. با توجه به همگن بودن

لغزش را در بررسی های زیرسطحی با استفاده از ویژگی مقاومت ویژه آشکار می سازد.

#### تست اولیه تانک لغزش

تانک ژئوفیزیک عبارت است از فضایی که در داخل آن می توان پدیده های مختلف را به صورت مدل طراحی کرده و روی آن مطالعه ژئوفیزیک انجام داد. داخل تانک را محیطی بی نهایت بزرگ فرض می کنیم تا دیواره ها و کف تانک روی



شکل ۴- تست آستانه مجاز برداشت ژئوالکتریک در تانک زمین لغزش روی لایه شاهد اولیه

نقطه وسط آرایش را به سمت دیواره‌ها جابه‌جا کرده و با فواصل 20cm و 40cm از وسط تانک دوباره داده‌برداری VES انجام گرفت. شکل ۶ روند تغییر مقاومت ویژه با نزدیک شدن نقطه برداشت به دیواره‌ها را نشان می‌دهد.

نتایج داده‌برداری حاکی از این است که با نزدیک شدن به دیواره‌ها، در روند افزایش مقاومت ویژه با فاصله الکترودی تغییر عمده‌ای دیده نمی‌شود، و این مسئله بیان‌گر این است که افزایش مقاومت ویژه در فاصله الکترودی بزرگ تحت تأثیر کف تانک صورت می‌گیرد. به دلیل ضخامت کم لایه، کف تانک اثر زیادی روی داده‌های برداشت شده در فواصل الکترودی بزرگ می‌گذارد و محدوده داده‌برداری را کوچک می‌کند. با کامل شدن مدل و افزایش ضخامت لایه رسی، محدوده داده‌برداری بزرگ‌تری خواهیم داشت.

#### نتایج بررسی‌های زیرسطحی به روش مقاومت ویژه روی

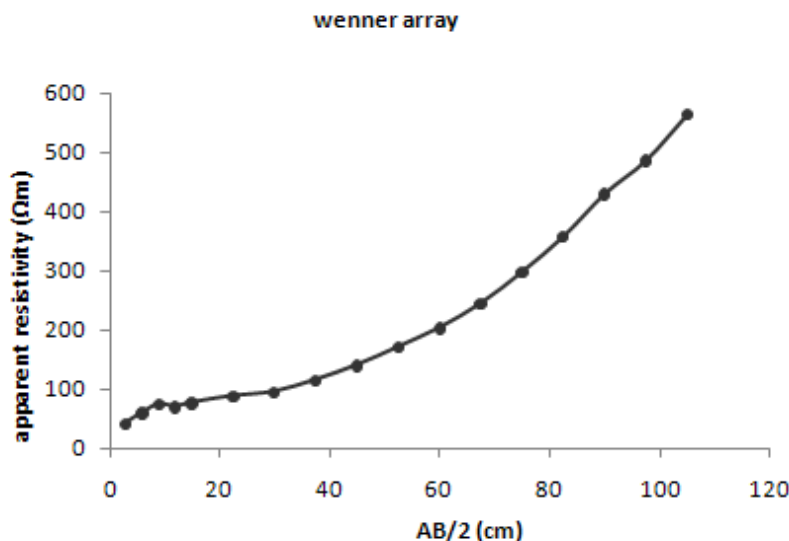
مدل زمین‌لغزش شبیه‌سازی شده

اولین مرحله داده‌برداری روی مدل فیزیکی زمین‌لغزش شبیه‌سازی شده به صورت پروفیل زنی (داده‌برداری به روش HES) روی یک خط عمود بر امتداد مرز لغزش، با آرایش الکترودی ونر می‌باشد شکل ۷.

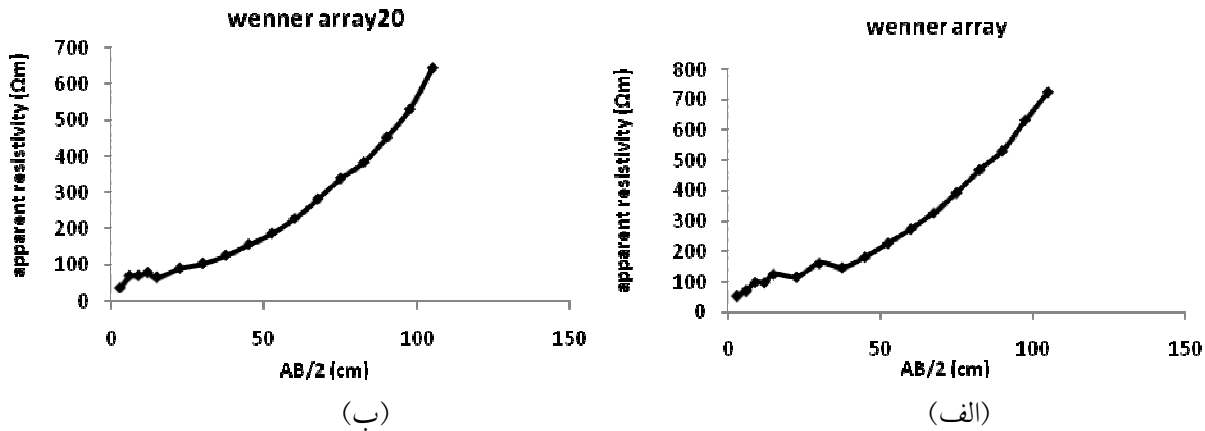
محیط انتظار می‌رود در تمام فواصل الکترودی، مقاومت ویژه‌های ثبت شده مقداری ثابت داشته باشند، ولی در عمل این‌گونه نیست. در فواصل الکترودی بزرگ دیواره‌ها و کف تانک روی مقاومت ویژه اثر گذاشته و مقادیر بزرگ‌تری نسبت به فواصل الکترودی کوچک‌تر ثبت می‌شود. داده برداری‌ها توسط دستگاه سوئدی ABEM 300 صورت گرفت.

منحنی شکل ۵ بیان‌گر مقاومت ویژه‌های ثبت شده در داده‌برداری VES با آرایش الکترودی ونر است.

مقاومت ویژه‌های پایین در فواصل الکترودی بسیار کوچک به دلیل اثرات الکترودهای فلزی به کار رفته است که مقاومت ویژه برداشت شده را کاهش می‌دهد. بعد از یک محدوده فاصله الکترودی کوچک که مقاومت ویژه مقدار تقریباً ثابتی دارد ( $AB/2 \approx 30\text{cm}$ )، با زیاد شدن فاصله الکترودی، مقاومت ویژه ثبت شده به دلیل اثرگذاری دیواره و کف تانک که مقاومت ویژه بالایی دارند، زیاد می‌شود. این منحنی بیان‌گر یک محدوده کوچک برای داده‌برداری است. این افزایش مقاومت ویژه می‌تواند به دلیل اثرات دیواره یا کف تانک باشد. در صورتی که تحت تأثیر کف تانک باشد با کامل شدن مدل و افزایش فاصله الکترودهای جریان تا کف تانک، بخش قابل توجه مشکل حل خواهد شد. برای بررسی این مطلب



شکل ۵- منحنی مقاومت ویژه برداشت شده توسط روش VES روی خط وسط مدل به منظور انجام تست اولیه تانک



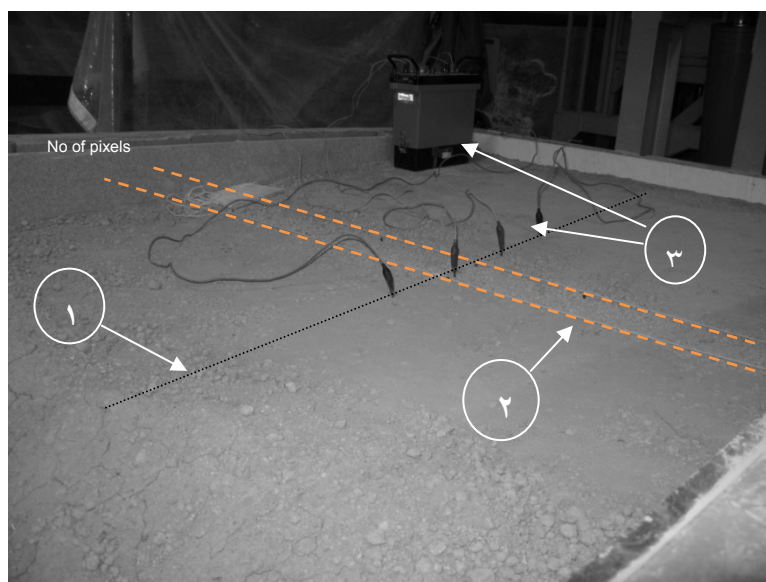
شکل ۶- منحنی‌های مقاومت ویژه برداشت شده با روش VES در نقطه‌ای با فاصله (الف) 40 cm و (ب) 20 cm از خط وسط

مقاومت ویژه کاهش می‌یابد. از طرفی به دلیل زاویه‌دار بودن آنومالی منحنی برداشت شده متقارن نیست و افت مقدار مقاومت ویژه در جهت شیب منحنی نرم‌تر می‌باشد. برای تأیید مفاهیم فوق، منحنی‌های مقاومت ویژه برای چند فاصله الکترودی مختلف رسم شدند، شکل ۹، که همه دارای ویژگی‌های بیان شده در بالا می‌باشند.

در مرحله بعد داده‌برداری سعی شد با استفاده از تفسیر وارون داده‌های مقاومت ویژه دو بعدی توسط نرم‌افزار RES2DINV، شکل، ابعاد و شیب آنومالی (سطح ضعف یا

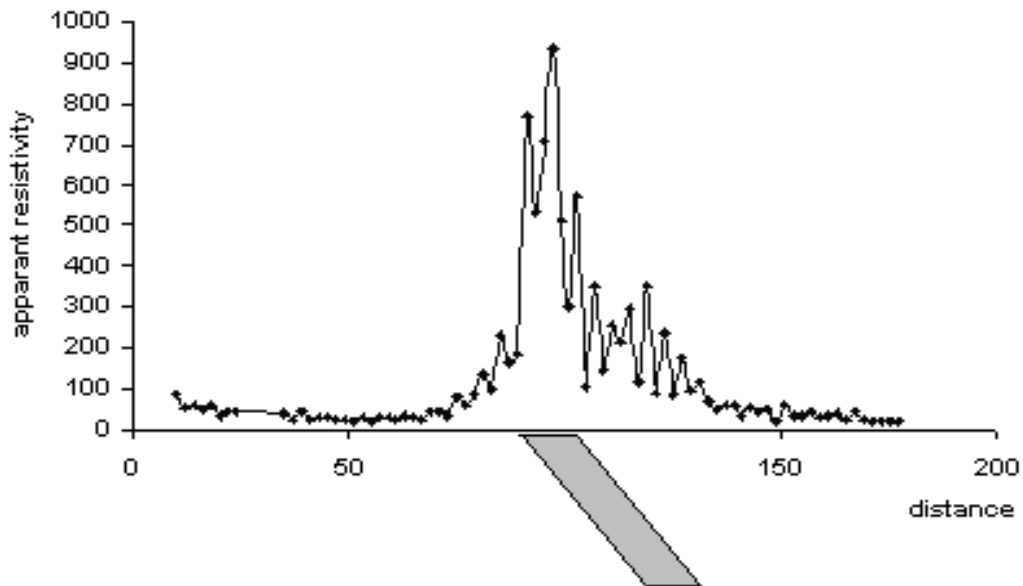
برای افزایش دقت در داده‌برداری از فواصل بسیار کوچک در جابه‌جایی مرکز آرایش ۲ سانتی‌متر استفاده شد. فاصله الکترودی برای اولین داده‌برداری  $a=2\text{cm}$  انتخاب شد. منحنی مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده نسبت به فاصله از یک مبدا اختیاری در زیر داده شده است. سطح ضعف فوقانی شبه زمین‌لغزش جهت بررسی نتایج در شکل ۸ با یک بانده نشان داده شده است.

با توجه به شیب‌دار بودن صفحه گسیختگی و مقاوم بودن آن با نزدیک شدن مرکز آرایش به مرز آنومالی، مقاومت ویژه برداشت شده افزایش می‌یابد و با گذشتن از مرز دوباره

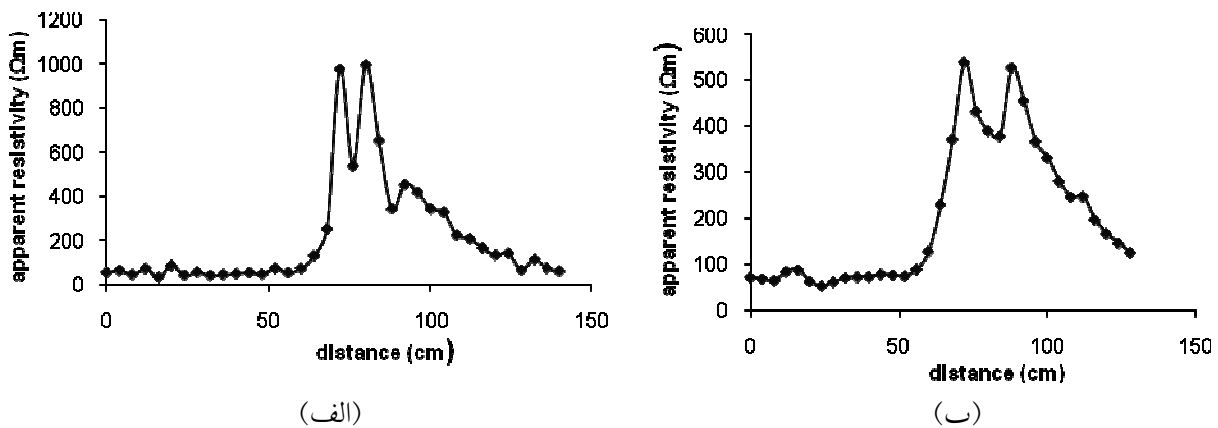


شکل ۷- داده‌برداری به روش ونر روی مدل فیزیکی زمین‌لغزش در راستای عمود بر مرز گسیختگی.

(۱) خط پروفیل زنی عمود بر راستای گسیختگی، (۲) مرز گسیختگی، (۳) دستگاه ژئوالکترونیک و تجهیزات وابسته به آن



شکل ۸- منحنی مقاومت ویژه حاصل از پروفیل زنی با آرایش و نر و فاصله الکترودی 2cm روی مرز گسیختگی شبه زمین لغزش



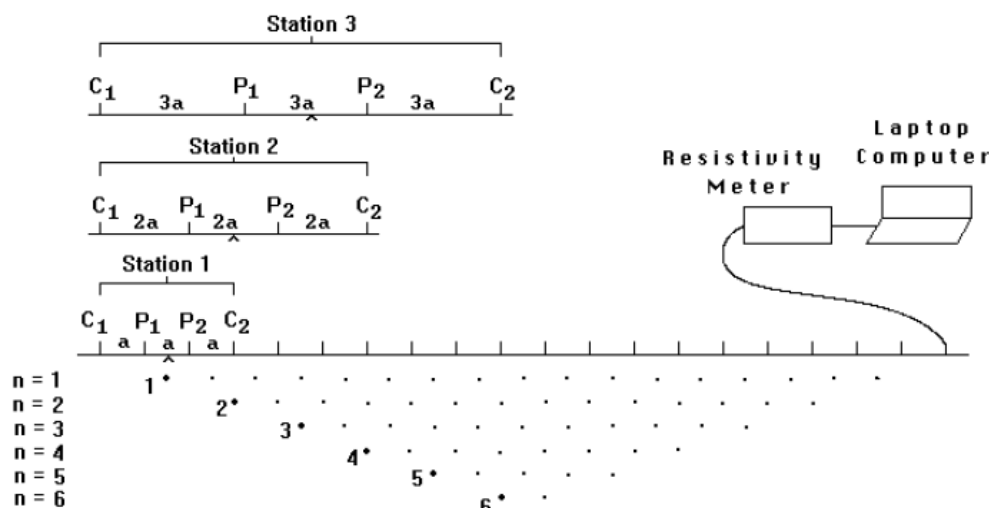
شکل ۹- منحنی مقاومت ویژه حاصل از پروفیل زنی با آرایش و نر و فاصله الکترودی (الف) 4cm و (ب) 12cm روی مرز گسیختگی شبه زمین لغزش

در این شبه مقطع محور افقی نشان‌دهنده فاصله از یک مبدأ اختیاری روی مدل و محور عمودی بیان‌گر عمق است. لازم است تصحیحات مربوط به اثر دیواره و احتمالاً کف تانک روی مقطع انجام شود. افزایش عمق روی شبه مقطع در اثر افزایش فاصله الکترودی صورت می‌گیرد به این معنی که پایین‌ترین ردیف دیتاپوینت‌ها (بیش‌ترین عمق در شبه مقطع) مربوط به بزرگ‌ترین فاصله‌های الکترودی است. اثرات دیواره و کف معمولاً روی این داده‌ها با افزایش مقاومت ویژه ظاهر می‌شود.

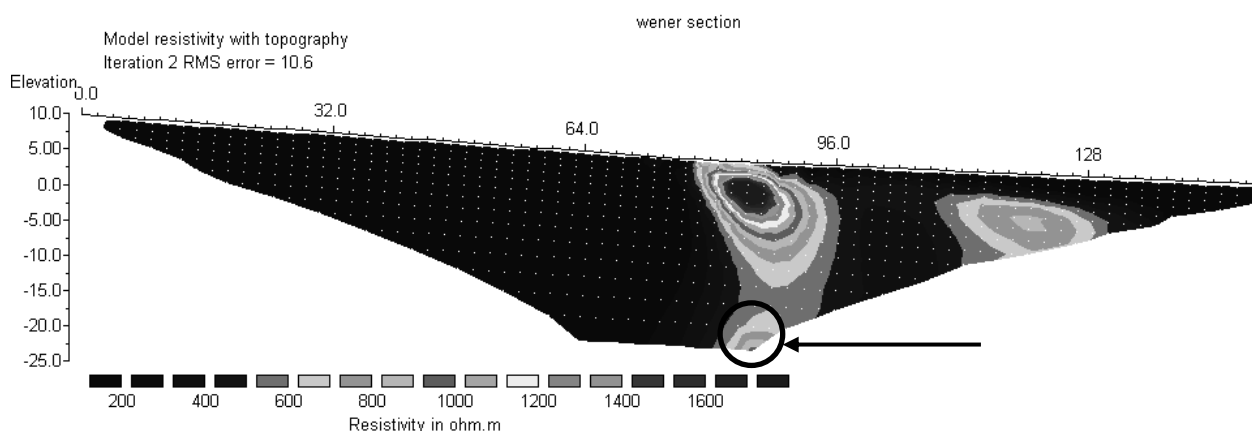
گسیختگی لغزش) یا مرز مقاوم شبه زمین لغزش را به دست آوریم. داده‌های ورودی به نرم‌افزار فرمت خاص خود را دارند، که داده‌برداری برای بدست آوردن شبه مقطع دو بعدی با کیفیت خوب باید با این فرمت انجام شود. شکل ۱۰ نشانگر نحوه داده‌برداری مناسب است.

داده‌برداری حاصل ترکیبی از سونداژزنی و پروفیل‌زنی الکتریکی است. در مجموع برای بدست آوردن یک شبه مقطع با وضوح بالا تعداد ۳۱۳ داده‌برداری مقاومت ویژه توسط آرایش الکترودی و نر انجام گرفت. شبه مقطع اولیه حاصل از روش وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.





شکل ۱۰- نحوه داده برداری برای رسم شبه مقطع مقاومت ویژه توسط نرم افزار RES2DINVE



Model resistivity with topography  
Iteration 2 RMS error = 10.6  
Horizontal scale is 12.09 pixels per unit spacing  
Vertical exaggeration in model section display = 0.90  
First electrode is located at 0.0 m.  
Last electrode is located at 156.0 m.

Unit Electrode Spacing = 2.00 m.

شکل ۱۱- شبه مقطع مقاومت ویژه اولیه. اثرات دیواره و کف تانک به صورت افزایش مقاومت ویژه در فاصله های الکترودی بزرگ، روی شبه مقطع نشان داده شده است.

نتیجه را بر واقعیت از نظر ابعاد و شیب صفحه بررسی می کنیم، شکل ۱۳.

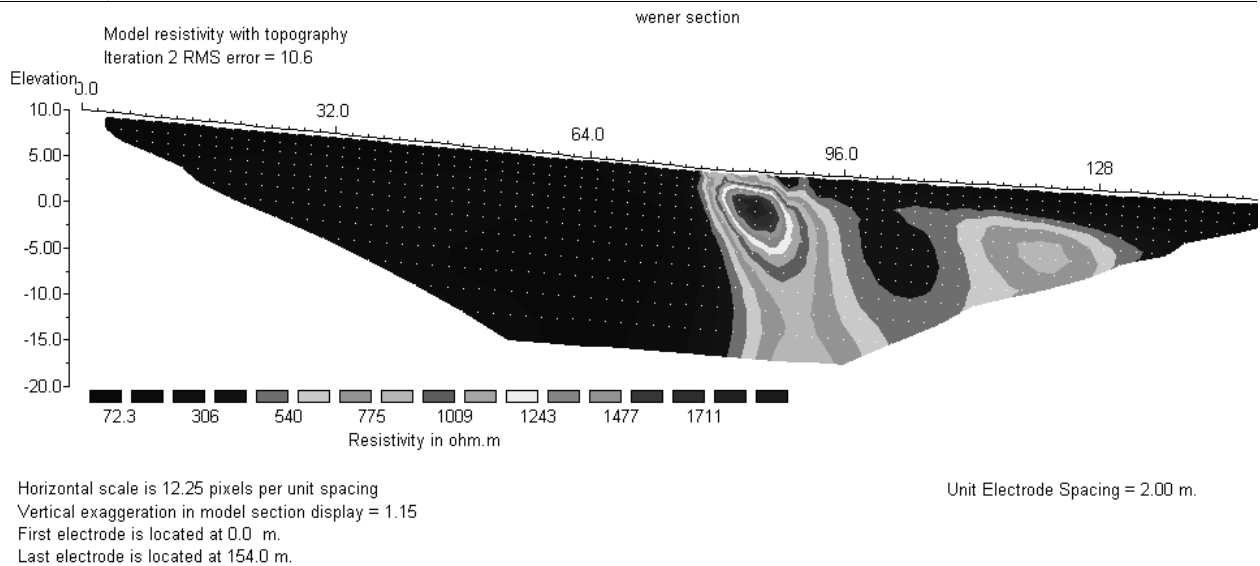
شبه مقطع انطباق بسیار خوبی با شکل آنومالی دارد.

### نتیجه گیری

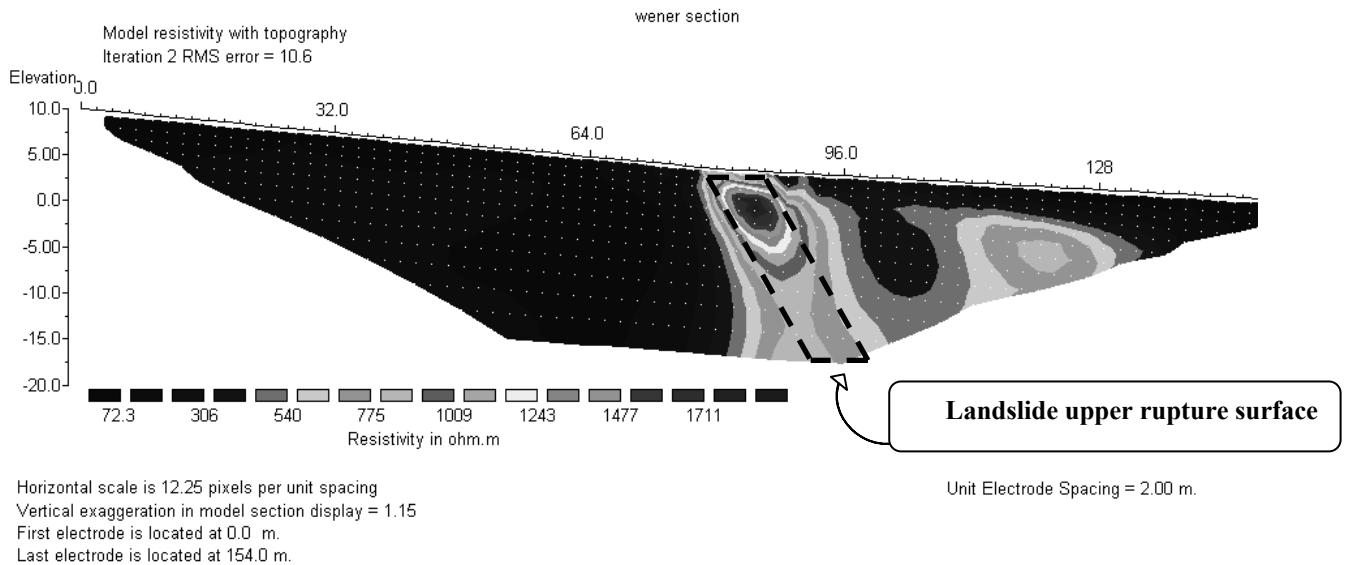
در این تحقیق سعی شد امکان انجام مطالعات ژئوالکتریک روی زمین لغزشها در یک مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد.

شبه مقطع بیانگر این است که در دیتاپوینت های عمیق افزایش مقاومت ویژه غیر عادی دیده می شود شکل ۱۱ که به نظر می رسد اثرات دیواره و کف تانک باشند. برای حذف این اثرات از یک سری داده ها با بزرگترین فاصله الکترودی صرف نظر می کنیم. این فرآیند آنقدر ادامه می یابد تا اثرات جانبی حذف شوند. شکل ۱۲ حاصل حذف اثر دیواره و کف از روی شبه مقطع مقاومت ویژه است.

در نهایت برای بررسی صحت نتایج به دست آمده، شکلی از آنومالی طراحی شده را به مقیاس شبه مقطع برده و انطباق



شکل ۱۲- شبه مقطع مقاومت ویژه نهایی پس از حذف اثرات دیواره و کف تانک



شکل ۱۳- مرز گسیختگی با مقیاس شبه مقطع

شبه مقطع مقاومت ویژه، شکل، ابعاد و شیب آنومالی را به خوبی نشان می‌دهد

به‌دست آمده، حاصل از پروفیل زنی روی مرز زمین‌لغزش در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند، که به عنوان یک نتیجه اولیه امکان انجام مطالعات ژئوالکتریک روی مدل فیزیکی را تأیید می‌کنند. شکل ۱۱ شبه مقطع اولیه قبل از اعمال تصحیح اثر دیواره و کف تانک را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ شبه مقطع نهایی است که در آن اثرات جانبی حذف شده‌اند و در نهایت شبه مقطع شکل ۱۳ نشانگر انطباق بسیار خوب نتایج به‌دست آمده از شبه مقطع مقاومت ویژه بر مرز شبه زمین‌لغزش

در گام اول با توجه به ویژگی‌های زمین‌لغزش‌های واقعی، یک شبه زمین‌لغزش به صورت مدل فیزیکی داخل یک تانک ژئوالکتریک طراحی و ساخته شد. ویژگی‌های زمین‌شناسی و به‌ویژه مقاومت ویژه الکتریکی قسمت‌های مختلف شبه زمین‌لغزش طراحی شده، مشابه یک زمین‌لغزش واقعی در نظر گرفته شدند. مراحل مختلف تست تانک برای حذف اثرات کف و دیواره تانک در دو مرحله روی لایه شاهد و مدل تکمیل شده انجام شد. اولین منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری

### سیاسگزاری

از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری بخاطر حمایت‌های فنی و مهندسی در انجام این تحقیق تشکر می‌شود. از آقای دکتر ضیاء‌الدین شعاعی، بخاطر مشاوره علمی و از آقایان دکتر جلیل وهابی و مهندس سیدرضا امام‌جمعه به‌خاطر مساعدت‌های فنی تشکر می‌شود.

طراحی شده است. نتایج این بخش از تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌های فیزیکی به‌ویژه در بحث زمین‌لغزش به خوبی می‌توانند امکان انجام مطالعات ژئوالکتریک به روش‌های مختلف را فراهم کنند و به محقق این امکان را بدهند که به دور از نویزها و سختی کار در طبیعت، بهترین روش‌ها برای انجام مطالعات ژئوالکتریک روی زمین‌لغزش‌های واقعی را به صورت عملی به‌دست آورد.

### منابع

- اسلامی هرندی، مجتبی. (۱۳۸۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: مطالعه نظری و تجربی روی لایه‌های شیب‌دار با روش مقاومت ویژه و مقایسه نتایج با لایه‌های افقی. گروه ژئوفیزیک دانشگاه رازی.
- بیت‌اللهی، علی. (۱۳۸۲) بررسی زمین‌لغزش‌ها با روش‌های ژئوالکتریک نشریه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- خاکی، محمود. (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: مقایسه روش‌های گوس نیوتون و شبه نیوتون در تفسیر وارون داده‌های مقاومت ویژه دوبعدی با آرایش‌های مختلف. گروه ژئوفیزیک دانشگاه رازی.
- شریعت جعفری، محسن، (۱۳۷۵) زمین‌لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی) انتشارات سازه نصرآزادانی، احمد. (۱۳۸۸) ارزیابی و تعیین سطح لغزش با استفاده از روش ژئوالکتریک (مطالعه موردی منطقه پیشکوه فریدونشهر) ششمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس، مهر ۱۳۸۸
- هلاکوئی، عبدالاحد. (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: مدل‌سازی معکوس ژئوالکتریک دو بعدی برای تعیین هندسه زمین‌لغزش در کیلومتر ۲۰+۵۲ بزرگراه قزوین-رشت. گروه ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Apparao and A. Roy (1971): Resistivity model experiments. *Geoexploration*, 9:195-205
- Björn Heincke, (2006): Characterizing an unstable mountain slope using shallow 2D and 3D seismic tomography. *Geophysics*, vol. 71, No. 6 november-december 2006; P. B241-B256.
- Colin G. Farquharson, (2006): Comparison of integral equation and physical scale modeling of the electromagnetic responses of models with large conductivity contrasts. *Geophysics*, vol. 71, No. 4 July-August 2006; P. G169-G177, 10 .
- Daily, W. D., Ramirez, A. L., and Johnson, R., (1998): Electrical impedance tomography of a perchloroethylene release: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2, 189-201.
- G. W. Jia (2009): Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels *Engineering Geology* 106 (2009) 92-103
- Karl J. Ellefsen, (2004): Numerical study of electromagnetic waves generated by a prototype dielectric logging tool. *Geophysics*, vol. 69, No. 1 (January - February 2004); P. 64-77.
- W. L. Lai, (2006): Experimental determination of bulk dielectric properties and porosity of porous asphalt and soils using GPR and a cyclic moisture variation technique *Geophysics*, vol. 71, No. 4 July-August 2006; P. K93-K102.
- Mu Luo and Brian J. Evansz, (2004): An amplitude-based multiazimuth approach to mapping fractures using P-wave 3D seismic data. *Geophysics*, vol. 69, No. 3 (May-June 2004); P. 690-698.
- A. Perrone, (2004): High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy) *Journal of Applied Geophysics* 56 (2004) 17- 29.
- E. Piegari, (2009): Electrical resistivity tomography and statistical analysis in landslide modelling: A conceptual approach *Journal of Applied Geophysics* (2009)

- D. J. Verschuur 1 and A. J. Berkhout, (2005): 2Removal of internal multiples with the common-focus-point (CFP) approach: Part 2-Application strategies and data examples. *Geophysics*, vol. 70, No. 3 (May-June 2005); P. V61-V72.
- Vincenzo Lapenna, (2005): 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in the Lucanian Apennine chain, southern Italy. *Geophysics*, vol. 70, No.3 (May-June 2005); P. B11-B18.
- S. C. Yim, (2009): Exprimental and computational activities at the Oregon state university NEES tsunami research facility Science of Tsunami Hazards, Vol. 28, No. 1, page 2 (2009).