

کاربرد روش مقاومت ویژه الکتریکی در مطالعات زمین لغزش، مطالعه موردی زمین لغزش محور پونل-خلخال

هاشم رنجی رودپشتی، شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

زمین لغزش یکی از حوادث مخرب با منشأ طبیعی (شیب‌های تند، بارندگی و زلزله) و یا مصنوعی (جاده‌سازی، سبک‌سازی پایین دست توده خاک و ...) است که هر ساله باعث بروز خسارات جانی مالی فراوانی در بسیاری از نقاط دنیا می‌شود. در کشور ایران به دلیل توپوگرافی عمدتاً کوهستانی حوالی رشته کوه‌های البرز و زاگرس و تنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، شرایط طبیعی برای ایجاد زمین‌لغزش وجود دارد که وقوع آن‌ها اثرات اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای را ایجاد می‌نماید. در سال‌های اخیر روش‌های ژئوفیزیکی کمک ارزنده‌ای در جهت شناخت ساختارهای زمین‌شناسی و رفع ابهامات مختلف پیش روی مهندسین عمران نموده است. زمانی که منطقه گسترده‌ای مستعد لغزش است یا در آن لغزش رخ داده باشد، این روش‌ها امکان مطالعه تغییرات مکانی و زمانی ساختارهای زمین‌شناسی و تعیین محل بهینه گمانه‌های اکتشافی را می‌دهند. هدف از یادداشت فنی حاضر، بررسی انواع مختلف زمین لغزش و امکان مطالعه آن توسط روش‌های ژئوفیزیکی است. همچنین، نمونه‌ای از مطالعات ژئوفیزیک به منظور بررسی زمین‌لغزش محور پونل-خلخال ارائه گردیده است. در این مطالعه از روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی با آرایش شلومبرژه برای مطالعه تا عمق حدود ۵۰ متر استفاده شد. علت وقوع این لغزش، تغییر کاربری زمین، زهکشی نامناسب آب سطحی، وجود گسل و ایجاد یک محدوده کاملاً اشباع از آب در عمق ۱۰-۳۰ متری سطح زمین بوده است. براساس مطالعات مقاومت‌ویژه الکتریکی، زمین لغزش این محدوده از نوع انتقالی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ژئوفیزیک، مقاومت ویژه الکتریکی، زمین لغزش، پونل-خلخال

۱- مقدمه

تسهیل در تجزیه و تحلیل پایداری و کاهش خطرات ناشی از آن ضروری است. شناسایی ساختار زمین‌لغزش به طور سنتی براساس مشاهدات ژئومورفولوژیک و در صورت امکان با کمک داده‌های زیرسطحی محدود (حاصل از گمانه‌ها یا حفاری) بدست می‌آید. با وجود متداول بودن این روش‌ها، اجرای آن‌ها اغلب پرهزینه است و نیاز به کار پرحمت میدانی دارد. در دو دهه گذشته، ژئوفیزیک کم عمق با ظهور

هدف اصلی مطالعه زمین لغزش، شناخت فرآیند و تحلیل خطوط پیش‌بینی زمین لغزش در آینده برای کاهش پیشرفت و خسارات ناشی از آن می‌باشد [۵]. طبیعت پیچیده بسیاری از لغزش‌ها نیازمند بررسی ویژگی‌های آنها به گونه‌ای دقیق و با جزئیات بیشتر است. برای دستیابی به این هدف، شناخت ساختار داخلی زمین لغزش و محیط اطراف آن به منظور

تصویربرداری^۱ دو بعدی، سه بعدی و در حال حاضر چهار بعدی تکامل یافته است. این تکنیک ها امکان مطالعه تغییرات مکانی و زمانی ساختارهای زمین شناسی را می دهد. روش های ژئوفیزیکی جزو روش های غیرمستقیم در نظر گرفته می شوند که عموماً به صورت غیرمخرب منطقه وسیعی را با هزینه نسبتاً کم مورد ارزیابی قرار می دهند. خوشبختانه روش های ژئوفیزیکی با مطالعه زیرسطحی محدوده های مستعد زمین لغزش یا در حال لغزش، قادر به شناسایی منشا و عوامل زمین شناسی آنها هستند. در ادامه انواع زمین لغزش، عوامل ایجاد و استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی در شناسایی آنها مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- زمین لغزش

یکی از انواع ناپایداری دامنه ای که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی را بر زندگی انسان ها وارد می نماید پدیده زمین لغزش است. ایجاد خسارت فراوان به منابع طبیعی و مسکونی، هدررفت سریع خاک، تخریب اراضی کشاورزی، مسکونی، جنگل ها، جاده ها از جمله خسارت های ناشی از زمین لغزش است. در واقع زمین لغزش یک پدیده مخرب است و باعث به وجود آمدن خسارات جبران ناپذیری می شود که دفع آنها مستلزم صرف وقت و هزینه هنگفتی است. شناخت نواحی مستعد وقوع زمین لغزش و حرکات توده ای از ضروریات مدیریت منابع طبیعی و برنامه ریزی توسعه ای و عمرانی است [۲]. براساس نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش ایران [۳] عمده زمین لغزش های کشور در قسمت شمالی و غرب کشور و در امتداد رشته کوه های البرز و زاگرس رخ داده است. بنابراین شناخت نواحی مستعد، فرایند وقوع و هندسه زمین لغزش برای انجام تحلیل های پایداری بسیار اهمیت دارد.

۲-۱- انواع زمین لغزش

گسیختگی دامنه ای بطور ساده، ناشی از عملکرد گرانج زمین بر روی توده ای از مصالح است که می تواند به آهستگی بخزد (خزش)، بطور آزاد فرو افتد (ریزش)، در امتداد یک

سطح گسیختگی بلغزد (لغزش) و یا مانند دوغاب جریان پیدا کند (جریان). انواع مختلف حرکت زمین در شکل ۱ نشان داده شده است [۴]. در زمین لغزش دورانی سطح لغزش به صورت منحنی است و حرکت لغزش حول محور عمود بر راستای لغزش رخ می دهد. در زمین لغزش انتقالی، لغزش بر روی یک سطح تقریباً مسطح و مقاوم رخ می دهد. در لغزش بلوکی و سقوط سنگ، جداشدگی بین سنگ ها در راستای شیب رخ می دهد درحالی که در زمین لغزش نوع واژگونی، از محل گسیختگی، چرخش به سمت جلو رخ می دهد. جریان زمین، براساس سرعت و نوع مواد جابجا شده به انواع جریان واریزه (سرعت کم)، بهمن واریزه (سرعت زیاد)، جریان زمین (خاک یا گل) و خزش تقسیم می شوند

۲-۱-۱- عوامل ایجاد زمین لغزش

دلایل زمین شناسی، ژئومورفولوژی و انسانی مختلفی در ایجاد زمین لغزش نقش دارند. عوامل زمین شناسی شامل: وجود مواد حساس و ضعیف (مانند رس ها)، وجود مصالح فرسایش یافته، وجود مواد ترک خورده، درزدار و شکافدار، ناپوستگی با جهت یافتگی مخالف (لا به بندی، شیب توزیته، گسل، سطوح تماس و ...) و تفاوت در نفوذ پذیری و یا سختی مواد هستند. از عوامل ژئومورفولوژی می توان به: بالا آمدگی ناشی از فعالیت های تکتونیکی یا آتشفشانی، حذف فشار سر بار ناشی از ذوب یخچال ها، فرسایش رودخانه ای، موج یا یخچال در پنجه دامنه یا حاشیه کناری آن، فرسایش زیرزمینی (انحلال^۲، جوشش^۳)، بارگذاری رسوبی بر روی دامنه یا بالای آن، حذف پوشش گیاهی و آتش سوزی، خشکسالی، ذوب شدن برف ها، هوازگی ناشی از یخ زدن- ذوب شدن و هوازگی ناشی از انقباض-انبساط اشاره نمود. عوامل انسانی موثر بر زمین لغزش شامل: حفاری بر روی دامنه یا پنجه آن، بارگذاری بر روی دامنه یا پنجه آن، افت سطح آب زیر زمینی، قطع درختان جنگلی، آبیاری، معدن

2- Solution

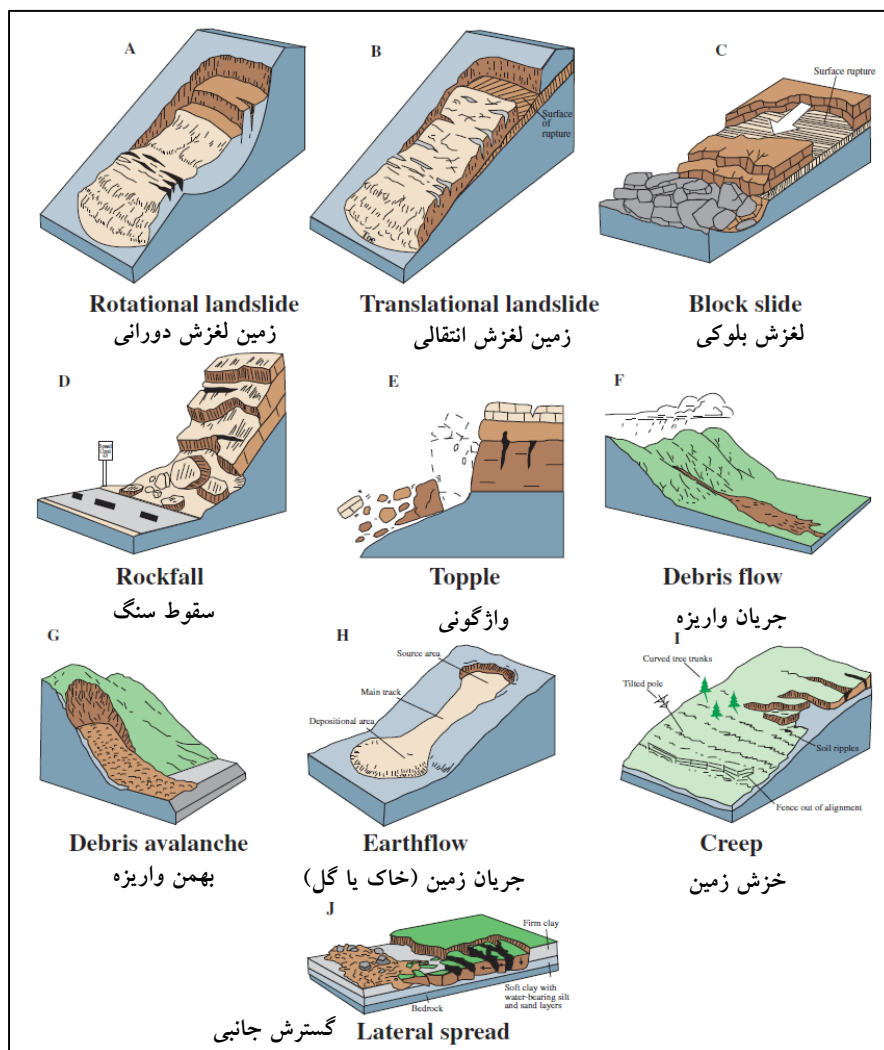
3- Piping

1- Tomography

بیومهندسی)، مسطح کردن شیب یا ساخت دوباره آن، بالا یا پایین بردن سطح جاده به ترتیب برای مستحکم کردن ترانشه یا برداشتن وزن از روی لغزش، نصب زهکش و طراحی و ساخت سازه‌های نگهدارنده و مهارها مانند نیلینگ، شمع کوبی، انکراژ، دیوار حائل، توری گذاری و ... دانست [۵].

کاری، نوسانات لرزه‌ای مصنوعی و نشت آب از تاسیسات می‌باشند.

روش‌هایی که امروزه برای حل مشکل توده‌های ناپایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد را می‌توان به طور خلاصه شامل: حذف مصالح لغزش، کاشت گیاهان بر روی شیب (روش



شکل ۱- انواع مختلف حرکت زمین [۳]

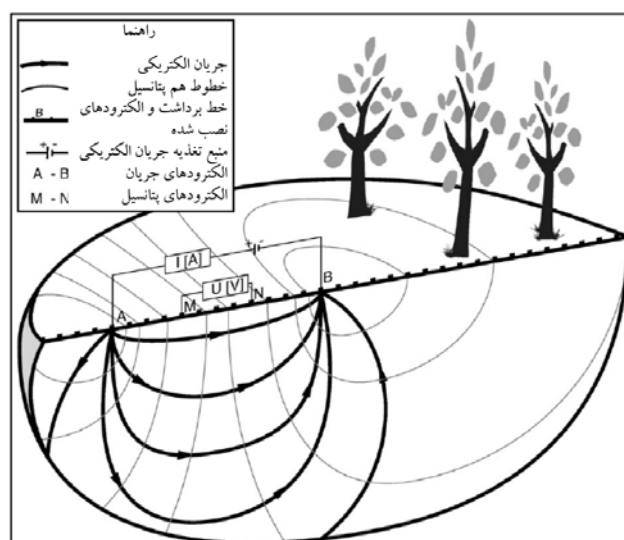
الکتریکی می‌باشد. این روش می‌تواند اطلاعات زمین‌شناسی زیرسطحی سودمندی فراهم نماید. روش مقاومت ویژه الکتریکی، بعنوان یک روش اکتشافی، در ابتدا توسط برادران شلومبرژه در دهه ۱۹۲۰ بکار گرفته شد. روش مقاومت ویژه الکتریکی در سال‌های اخیر موفقیت زیادی در حل مشکلات زمین‌شناسی آب، مطالعات زمین‌شناسی، مطالعات مهندسی

۳- روش مقاومت ویژه الکتریکی

کاوش‌های الکتریکی، از متنوع‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است. این روش‌ها بر پایه آشکارسازی اثرهای سطحی حاصل از عبور جریان یا امواج الکتریکی و الکترومغناطیسی درون زمین استوار است. یکی از ویژگی‌های الکتریکی زمین، وجود تغییرات هدایت الکتریکی در سنگ‌ها و کانی‌ها است. یکی از مهمترین روش‌های الکتریکی روش مقاومت ویژه

عمران و مطالعات زیست محیطی داشته است. بدلیل سرعت بالای برداشت داده‌ها و توانایی در برداشت انبوه نمونه از زیر سطح و همچنین مناسب بودن در شناسایی حفره‌ها و دیگر ساختارها، در عمق‌های مختلف، این روش بعنوان موفق‌ترین روش در مطالعات مهندسی معرفی شده است.

اساس کار این روش ارسال جریان الکتریکی مستقیم یا متناوب (با فرکانس کم در حد چند هرتز) به داخل زمین و اندازه‌گیری آن در فواصل منظم بر روی زمین یا داخل چاه می‌باشد. دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که نسبت $\Delta V / I$ را با دقت بسیار زیاد اندازه‌گیری می‌کنند. معمولاً ΔV برحسب میلی‌ولت و I بر حسب میلی‌آمپر اندازه‌گیری می‌شود. بدین ترتیب با اندازه‌گیری این دو پارامتر، مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری با توجه به نوع آرایش الکترودی و فاکتور هندسی آن (K) قابل محاسبه است. نحوه اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی در یک مطالعه مقاومت ویژه الکتریکی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- نحوه برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی. ارسال جریان توسط الکترودهای A و B و تغییرات پتانسیل الکتریکی بر روی سطح توسط الکترودهای M و N

مقاومت ویژه الکتریکی پارامتری است که به عوامل مختلفی (پارامترهای فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک) حساس

می‌باشد [۶]. عوامل تاثیر گذار بر مقاومت ویژه الکتریکی شامل، ماهیت مواد (به خصوص درصد رس)، میزان رطوبت و هدایت الکتریکی آن‌ها، و همچنین هوازدهی سنگ و شکستگی موجود در آن است. این مسئله دلیل استفاده فراوان این روش برای مطالعات زمین لغزش را توضیح می‌دهد. هدف اصلی از به کارگیری روش مقاومت ویژه الکتریکی برای مطالعات زمین لغزش، شناسایی سطح لغزش می‌باشد و تقریباً همه محققین با استفاده از توموگرافی الکتریکی ادعا می‌کنند که آن را تشخیص داده‌اند. انواع مختلفی از لغزش‌ها توسط محققین با روش مقاومت ویژه الکتریکی مطالعه گردیده است. حالت اول، ممکن است لغزش در محل برخورد با لایه مقاوم از لحاظ زمین‌شناسی مانند شیل و سنگ آهک [۷] یا سطح بین ماسه سنگ و رس [۸] و یا رس بر روی ماسه رخ دهد. در حالت دیگر، ناحیه همگن از زمین تحت تاثیر توده لغزشی قرار گرفته و باعث ایجاد مقاومت ویژه الکتریکی متغیر در داخل توده لغزشی از جنس رسی [۹-۱۱] و یا دگرگونی [۱۲] و [۱۳] می‌شود. جابجایی مواد توسط توده لغزشی باعث هوازدهی مصالح و افزایش مقدار رطوبت می‌گردد. به نظر می‌رسد میزان اطمینان از این روش در مطالعات زمین لغزش، به نوع لغزش یا مواد درگیر در حرکت توده لغزشی بستگی ندارد [۱۴]. اگرچه در گذشته تمایل به استفاده از آرایه‌های مختلف در یک پروفیل وجود داشت، اخیراً آرایه‌های ونر و ونر-شلومبرژه در مطالعه لغزش‌های کم عمق و غیرپیچیده مورد توجه هستند. تفسیر کیفی داده‌ها از چالش‌های اصلی روش مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد و تفسیر کمی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی زمین از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین از چالش‌های بزرگ دیگر این روش، پردازش تلفیقی چند روش ژئوفیزیکی (لرزه نگاری، الکترومغناطیسی) جهت دستیابی به نتایج با دقت بالاتر است. در بخش بعد به روش‌شناسی مقاومت ویژه الکتریکی پرداخته می‌شود.

۴- مطالعه موردی، زمین لغزش محور پونل-خلخال توسط شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

در مطالعه حاضر از روش مقاومت ویژه الکتریکی جهت شناسایی ساختارهای زمین شناسی و علل وقوع زمین لغزش استفاده شد. تجهیزات مورد استفاده در عملیات کاوش مقاومت ویژه الکتریکی برای این مطالعه، دستگاه ARES ساخت شرکت GF Instrument کشور چک با توان خروجی ۳۵۰ وات است (شکل ۳ Reference source Error! (not found. آرایه الکترودی اجرا شده در این مطالعات، سونداژ شلومبرژه با حداکثر فاصله الکترودهای جریان ۳۰۰ متر بوده است. هدف از این روش، ترسیم تغییرات جانبی و قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری و حقیقی بر حسب عمق کاوش است. اساس این روش نفوذ جریان الکتریکی در اعماق بیشتر با افزایش فاصله الکترودهای جریان از هم می باشد. بدین ترتیب با تغییر محل الکترودهای پتانسیل و جریان در طول خط پروفیل، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری بر حسب تابعی از فاصله الکترودی و محل قرارگیری الکترودها بدست می آید. با استفاده از این آرایه تصویری یک بعدی از مقاومت ویژه الکتریکی زمین در نقطه مورد آزمایش به دست می آید. پردازش داده های مقاومت ویژه الکتریکی در این مطالعه توسط نرم افزار IPI2win انجام پذیرفته است.



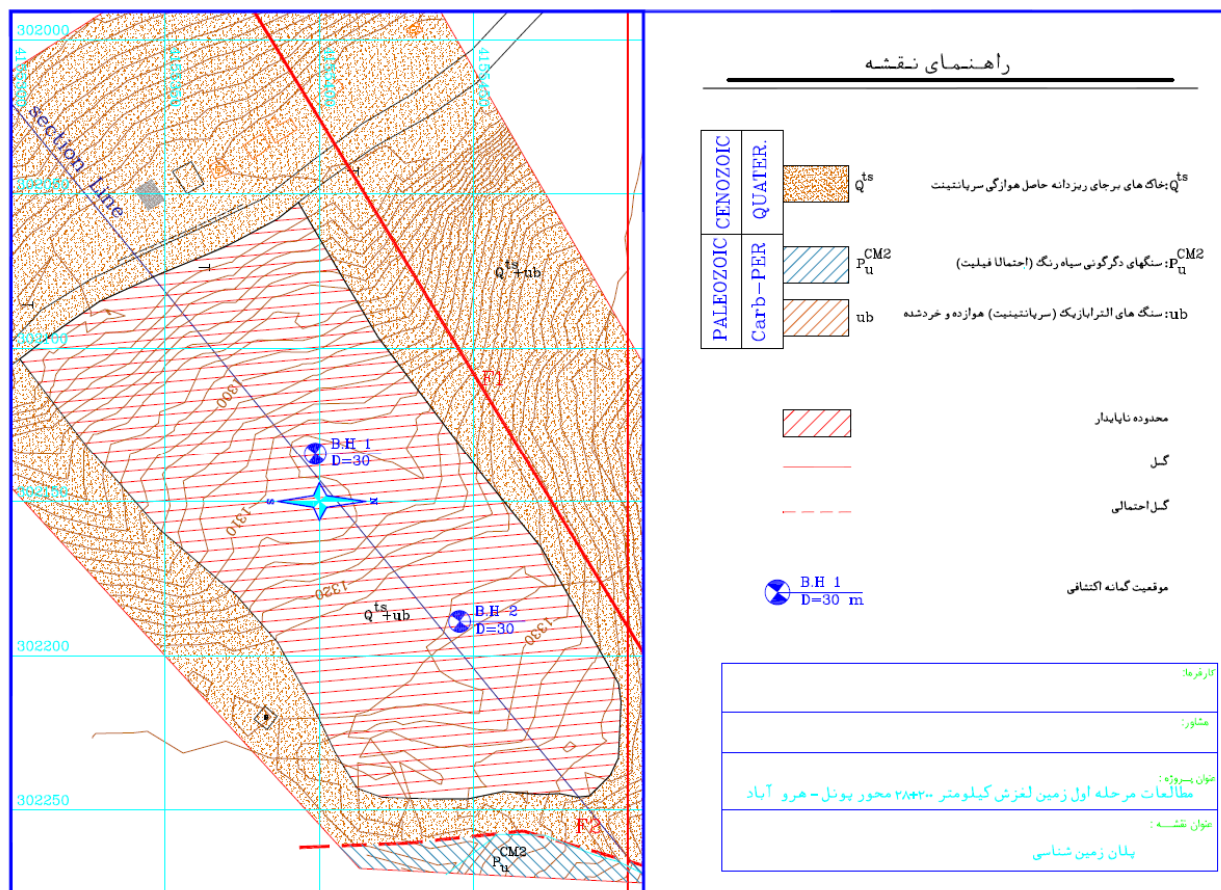
شکل ۳- تصویری از دستگاه و تجهیزات جانبی مقاومت ویژه الکتریکی (دستگاه ARES ساخت کشور چک)

۴-۱- زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در جاده پونل- هروآباد در ۴۰ کیلومتری پونل قرار دارد. براساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خلخال-رضوانشهر [۱]، محدوده مورد مطالعه بر روی سنگ های دگرگونی قرار دارد. با توجه به نقشه ۱:۱۰۰۰ تهیه شده توسط شرکت مهندسین مشاور پروژه، دو گسل مهم در محدوده زمین لغزش قابل مشاهده است. لایه های زمین شناسی موجود در محدوده مورد مطالعه شامل خاک های برجای عهد حاضر، سنگ های دگرگونی (احتمالاً فیلیت) و الترابازیک هستند (شکل ۴).

۴-۲- برداشت داده ها در محدوده مورد مطالعه

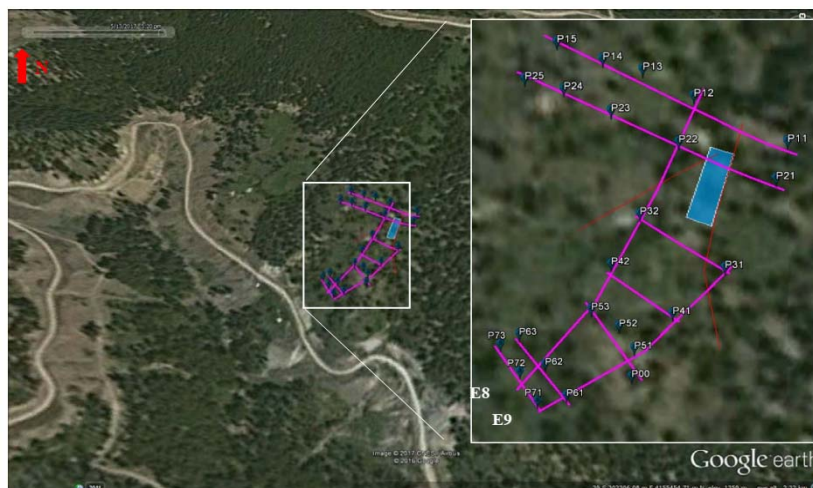
مطالعات ژئوفیزیک در محدوده توده لغزشی واقع در ۲۸+۲۰۰ متر محور پونل- هروآباد به روش مقاومت ویژه الکتریکی جهت شناسایی لایه بندی و ساختارهای زمین شناسی انجام پذیرفت. جهت انجام این مطالعات تعداد ۲۴ نقطه مقاومت ویژه الکتریکی با آرایه شلومبرژه در قالب ۹ پروفیل برداشت شد. آرایه الکترودی اجرا شده در این مطالعات، شلومبرژه با حداکثر فاصله الکترودهای جریان ۳۰۰ متر بوده است. وجود شیب تند ایجاد شده توسط زمین لغزش در قسمت غربی و دره عمیق در قسمت شرقی محدوده مورد مطالعه از محدودیت ها در هنگام عملیات برداشت داده، بوده است. شکل ۵ تصاویری از توده لغزشی و عملیات آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی را نشان می دهد. محل سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی و پروفیل های اجرا شده بر روی نقشه ماهواره ای شکل ۶ نیز نمایش داده شده است. دو گسل شناسایی شده از تحلیل داده ها، با رنگ قرمز بر روی این نقشه آورده شده است.



شکل ۴- نقشه ۱:۱۰۰۰ محدوده ناپایدار



شکل ۵- اجرای سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده توده لغزشی



شکل ۶- محل سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی (نقاط آبی)، پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی (بنفش)، گسل‌های شناسایی شده (قرمز) و محدوده احتمال نفوذ آب به لایه‌های زیرین (مستطیل آبی رنگ) در محدوده زمین لغزش

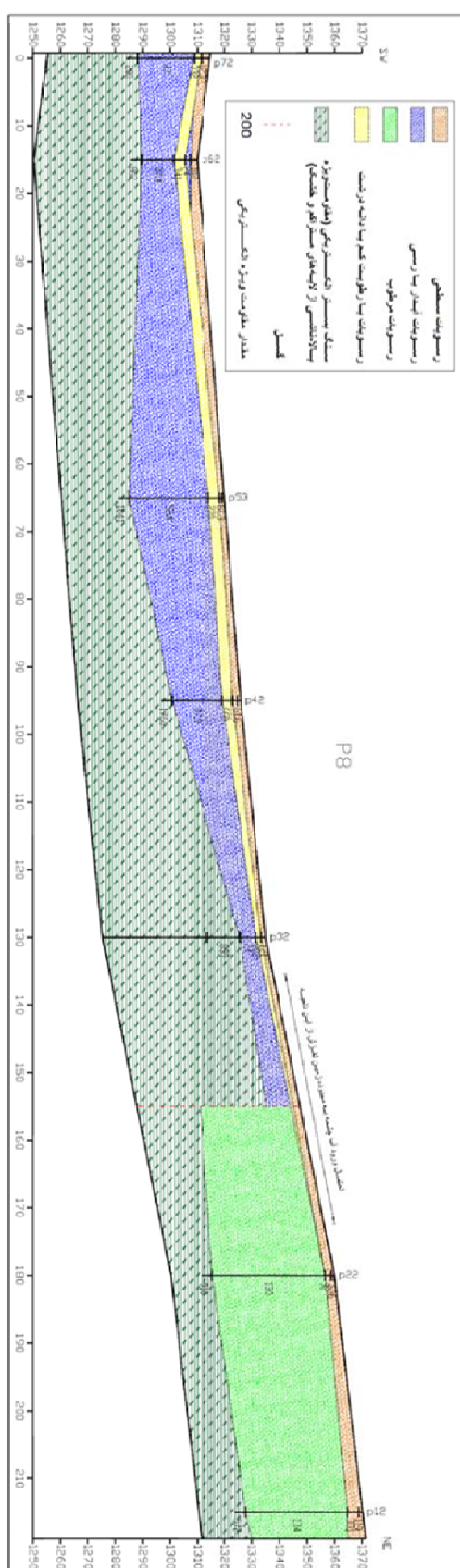
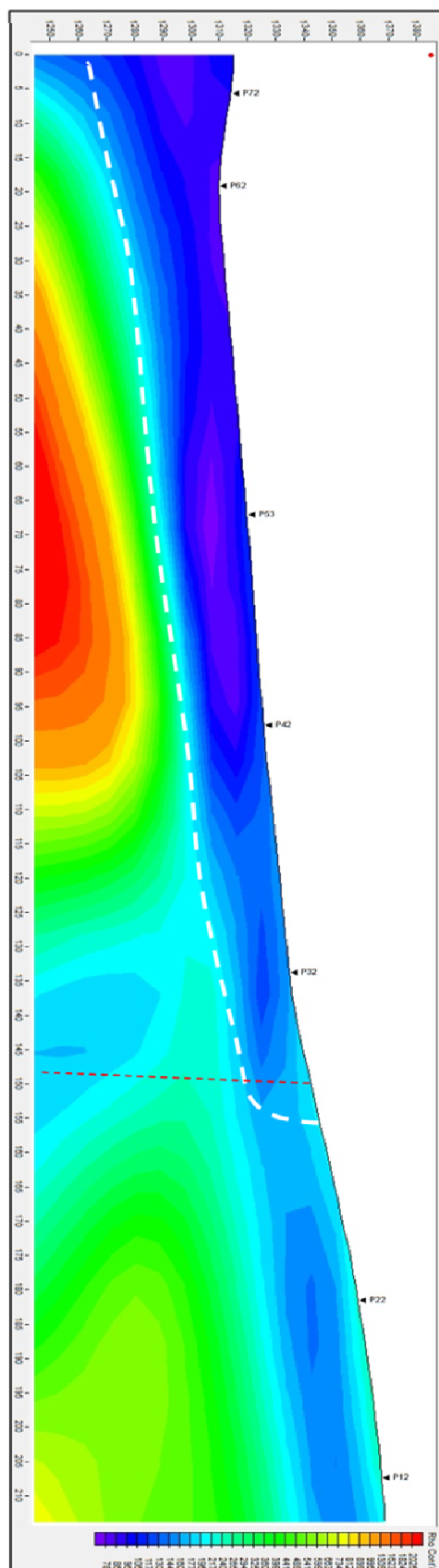
۴-۳- تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

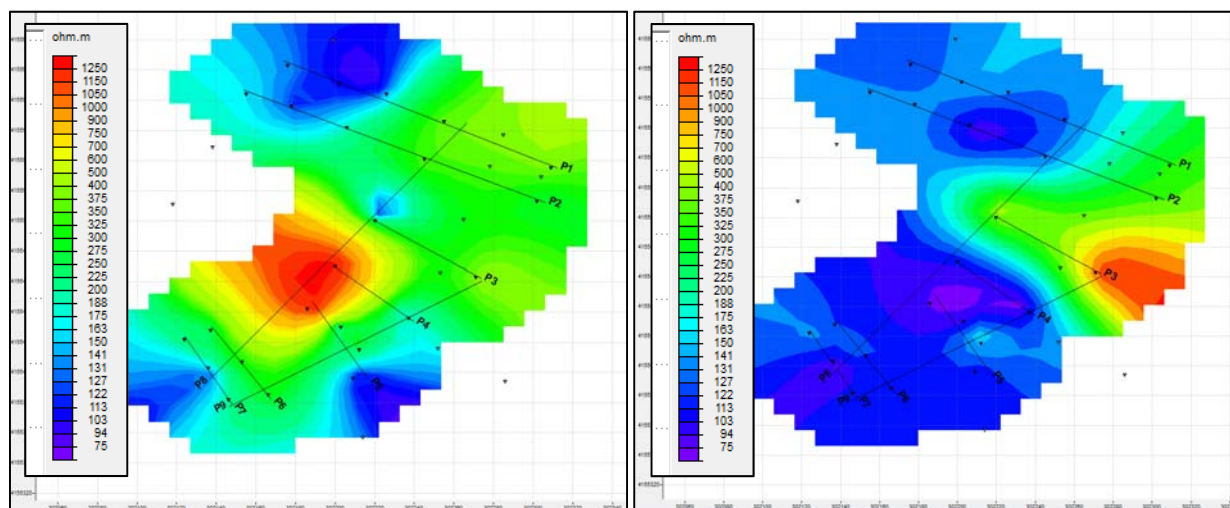
داده‌های سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی توسط نرم‌افزارهای IPI2win و WinGLink پردازش گردیدند. سپس مدل‌های دوبعدی از این سونداژها در راستای هر پروفیل تهیه شد. تفسیر زمین‌شناسی حاصل از پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی به صورت خط چین در مقاطع دوبعدی مربوط به آن (شکل ۷) نشان داده شده است. در شکل ۷ نیز نقشه مقاومت ویژه الکتریکی افقی از اعماق ۲۰ و ۵۰ متر نمایش داده شده است. در نهایت، از تحلیل مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی مقاطع زمین‌شناسی هر پروفیل تهیه گردید (شکل ۸). عمق تقریبی رسوبات مرطوب (عامل رانش) در مقاطع زمین‌شناسی قابل تشخیص است. همچنین در نقشه ماهواره‌ای شکل ۶ گسل‌ها و محل احتمالی نفوذ آب به لایه‌های زیرین (از چشمه موجود در محدوده مورد مطالعه) نمایش داده شده است. در یادداشت فنی حاضر تفسیر یکی از پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی اجرا شده در محدوده لغزشی ارائه می‌گردد.

پروفیل هشت (E8) که در راستای جنوب غربی-شمال شرقی اجرا شد، به خوبی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی و ضخامت لایه رسانا را از پایین دست زمین لغزش تا قسمت انتهایی آن در بالای شیب به تصویر می‌کشد (شکل ۸) طول

این پروفیل ۲۱۵ متر است. مقاومت ویژه الکتریکی بسیار پایین (۲۵ اهم متر) لایه رسوبات در سونداژ P32 تا عمق ۱۰ متر نشان از ورود آب به لایه‌های رسوبات از محدوده اطراف این سونداژ است. بیشترین ضخامت رسوبات آبدار در این پروفیل مربوط به سونداژ P53 با ۳۲ متر می‌باشد. با توجه به مقطع مقاومت ویژه الکتریکی و زمین‌شناسی این پروفیل در فاصله بین سونداژهای P32 و P22 گسلی عبور می‌کند. داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی با دو گمانه حفر شده در این پروفیل همخوانی دارد.

نقشه مقاومت ویژه الکتریکی افقی محدوده مورد مطالعه در دو عمق ۲۰ و ۵۰ متری در شکل ۹ نشان داده شده است. این نقشه‌ها، برش افقی از تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی زمین را ارائه می‌کند. نقشه مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به عمق ۲۰ متری، لایه‌های رسانا با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۷۰ اهم متر (رطوبت بالا و یا رسی) را نشان می‌دهد. قرارگیری لایه‌های با مقاومت ویژه الکتریکی بالا در قسمت شرقی و بالادست محدوده در کنار لایه‌های رسانا قسمت غربی در نقشه مقاومت ویژه الکتریکی عمق ۲۰ متری نشان از وجود گسل است. براساس نقشه مقاومت ویژه الکتریکی عمق ۵۰ متری محدوده مورد مطالعه، لایه‌های زیرین عمدتاً مقاومت ویژه الکتریکی بالای ۲۰۰ اهم متر دارند که مربوط به سنگ بستر یا رسوبات خشک می‌باشد.





شکل ۹- نقشه مقاومت ویژه الکتریکی افقی از محدوده مورد مطالعه در عمق ۲۰ متر (تصویر سمت راست) و ۳۰ متر (تصویر سمت چپ).

۵- نتیجه گیری

شرقی و بالادست محدوده به لایه‌های زیرین باشد. رسانندگی الکتریکی بالای لایه‌ها در عمق‌های ۱۰-۳۰ متر نشان از وجود رطوبت بسیار زیاد یا وجود لایه رسی آبدار در این محدوده می‌باشد. این نفوذ آب به لایه‌های رسوبی احتمالا از قسمت شمال شرقی محدوده لغزش و در محل تلاقی دو گسل شناسایی شده رخ می‌دهد. بنابراین، زهکشی آب چشمه از بالادست محدوده لغزش یکی از راه حل‌های جلوگیری از لغزش بیشتر است. گسیختگی رخ داده در این محدوده از نوع زمین لغزش انتقالی واریزه با درصد رطوبت زیاد (و یا اشباع) بر روی مصالح خشک زیرین است.

۶- مراجع

- (۱) سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۶، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش ایران.
- (۲) رضانی، ب.، ابراهیمی، ه.، ۱۳۸۸، زمین لغزش و راهکارهای تثبیت آن، فصلنامه جغرافیایی آمایش، شمار ۷.

- [3] USGS, 2004, Landslide Types and Processes, <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>.
- [4] Keller, G. and Sherar, J., 2003. Low-volume roads engineering: Best management practices. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1819), pp.174-181.

لغزش یکی از پدیده‌های مخرب با منشأ طبیعی یا مصنوعی است که باعث تخریب سیستم‌های برق رسانی، آبرسانی، راه‌ها، ساختمان‌ها و زمین‌های کشاورزی می‌گردد. زمین لغزش‌ها ساختارهای پیچیده‌ای هستند که در آن‌ها انواع مختلفی از خصوصیات زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیک و هیدروژئولوژیک قابل مشاهده است. بررسی ساختارهای ناهمگن یکی از مباحث بسیار پیچیده برای ژئوفیزیک نزدیک به سطح است. توسعه روش‌های ژئوفیزیکی 2D و 3D موجب افزایش علاقه به ارزیابی حجم توده لغزشی، مشخص کردن خواص فیزیکی مواد توده لغزشی و تعیین جریان آب‌های زیرزمینی در داخل و اطراف آن شده است. تصاویر زیرسطحی مقاومت ویژه الکتریکی در مناطق لغزش، اطلاعات موثر و مفیدی در مورد توزیع تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ارائه می‌دهند که جهت شناسایی مرز بین توده لغزشی و سنگ بستر بسیار ارزشمند است. به طور خاص، این روش را می‌توان جهت تعیین مشخصه هندسی یک توده لغزشی، شناسایی مناطق بالقوه ناپایدار و همچنین تعریف محیط زمین‌شناسی در مناطق ناپایدار به کاربرد.

با توجه به مطالعه ژئوفیزیکی انجام شده در محدوده زمین لغزش ۲۸+۲۰۰ محور پونل-خلخال به نظر می‌رسد عامل اصلی لغزش، نفوذ آب از چشمه موجود در قسمت

- [5] Lan, H.X., Zhou, C.H., Wang, L.J., Zhang, H.Y. and Li, R.H., 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering geology*, 76(1-2), pp.109-128.
- [6] Telford, W.M., Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics* (Vol. 1). Cambridge university press.
- [7] Batayneh, A.T. and Al-Diabat, A.A., 2002. Application of a two-dimensional electrical tomography technique for investigating landslides along the Amman–Dead Sea highway, Jordan. *Environmental Geology*, 42(4), pp.399-403.
- [8] Havevith, H.B., Jongmans, D., Abdrakhmatov, K., Trefois, P., Delvaux, D. and Torgoev, I.A., 2000. Geophysical investigations of seismically induced surface effects: case study of a landslide in the Suusamyр valley, Kyrgyzstan. *Surveys in geophysics*, 21(4), pp.351-370.
- [9] Caris, J.P.T. and Van Asch, T.W., 1991. Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. *Engineering Geology*, 31(3-4), pp.249-276.
- [10] Schmutz, M., Albouy, Y., Guérin, R., Maquaire, O., Vassal, J., Schott, J.J. and Descloîtres, M., 2000. Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super Sauze earthflow (France). *Surveys in Geophysics*, 21(4), pp.371-390.
- [11] Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E. and Sdao, F., 2005. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine chain, southern Italy. *Geophysics*, 70(3), pp.B11-B18.
- [12] Meric, O., Garambois, S., Jongmans, D., Wathelet, M., Chatelain, J.L. and Vengeon, J.M., 2005. Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), pp.1105-1115.
- [13] Lebourg, T., Binet, S., Tric, E., Jomard, H. and El Bedoui, S., 2005. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure on part of a deep seated landslide. *Terra Nova*, 17(5), pp.399-406.
- [14] Perrone, A., Lapenna, V. and Piscitelli, S., 2014. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Reviews*, 135, pp.65-82.