University of Tehran Press

Journal of the Earth and Space Physics

Homepage: https://jesphys.ut.ac.ir

Vol. 49, No. 1, Spring 2023, P. 15-34

(Research Article)

Study of Landslides using electrical resistivity tomography (ERT) in the Kiasar-Semnan road, Iran

Emami, R.[1] ✉ | Rezapour, M.[2] | Faraji, M.[3]

1. **Corresponding Author**, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: rezaemami@alumni.ut.ac.ir
2. Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: rezapour@ut.ac.ir
3. Expert of Technical & Soil Mechanics Lab.co., Tabriz, Iran. E-mail: m-faraji@tsml.ir

(Received: 3 Feb 2022, Revised: 4 Sep 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 14 June 2023)

Summary

Landslides may be considered a common natural hazard. The events in many cases lead to significant economic losses as well as fatality damages. Therefore, the Investigation of landslides in order to reduce damage in the preliminary studies of construction projects, especially linear structures in areas with landslide potential is of great importance. Electrical tomography or electrical resistivity tomography (ERI) is a geophysical technique for imaging sub-surface structures (sliding surface in this case) from electrical measurements made at the surface or boreholes. In recent decades, geophysical methods have been widely used in landslide investigations. Among the geophysical methods, ERT is very useful for landslide investigation. In this study, after the landslides in the Langar and TelmaDarreh regions which two sections of Kiasar-Semnan road were destroyed by these landslides, field surveys were conducted on the sites. In this study, a total of six ERT profiles were carried out for landslides (four profiles on Langar and two profiles on TelmaDarreh landslides) investigation. All ERT profiles were performed normally in the direction of the landslide. The Langar Landslide (located in the Langar region in Mazandaran province) occurred on the Kiasar-Semnan road at longitude 53 36 02 and latitude 36 13 03. Due to this landslide, about 300 meters of the Kiasar-Semnan main road was completely destroyed. The TelmaDarreh landslide (located in the TelamaDarreh region in Mazandaran province) also occurred on the Kiasar-Semnan road at latitude 53 41 38 and latitude 36 14 59. After the landslide, about 20-30 meters of the Kiasar-Semnan main road sunk and has been repaired. In this study, the first stage in our electrical tomography was sending an electric current into the ground based on different arrays (dipole-dipole, pole-pole arrays, and Vertical Electrical Sounding) and then measuring the response of the earth in voltage. Bad data points were easily viewed as they appeared as stand out points because the values were displayed in the form of profiles for each data level. These bad data points could be due to the failure of the relays at one of the electrodes, poor electrode ground contact due to dry, sandy, or stony ground, attaching electrodes to wrong connectors, or shorting across the cables due to very wet ground conditions. In the next step for building the inversed resistivity model, the algorithms of well-known IPI2win and Res2dinv software were used.

It should be noted that geoelectrical techniques (such as ERT), like other geophysical methods, are used as a complement to other geotechnical methods such as drilling and sampling. Therefore, is noted that the results obtained are based only on the interpretation of electrical resistivity data. In the Langar landslide, according to the results of ERT models and the geology of the region, the existence of four main layers in sections was determined. The electrical resistivity tomography technique showed that the first layer is characterized by very low electrical resistivity (less than 20 ohmmeters) on the sections. This layer of clay is saturated with water. The second layer is with low electrical resistivity (20 to 100 ohmmeters). This layer is most likely a sand-clay layer with water-saturated sand. The third layer is with medium electrical resistivity (100 to 300 ohmmeters). This layer is composed of dense wet sand. The fourth layer has high electrical resistivity (more than 300 ohmmeters). This layer is the bedrock of the area. The depth of the bedrock increases along with the landslide mass from the landslide crown to the landslide heel so that the depth at the landslide center (middle of the valley) varies from 25 m (GH profile center) to 60 m (AB profile center) from the ground surface. The bedrock is located in the center of the landslide from the floor of the old road at a depth of about 50 to 60 meters. It is likely that the presence of a water-saturated clay layer on a layer of dense wet sand caused the Langar landslide in the area. Probably the rupture level starts from about 12 meters in the center of the GH profile and continues with 15 meters in the center of EF and reaches about 25 meters in the center of AB. The depth and topography of slip surfaces have been determined and expressed in all sections.

In the landslide of TelmaDarreh at the southern shoulder of the road, the depth of the bedrock starts from at least 2 meters in the center of the landslide and reaches about 6 to 8 meters so that the separation surface between the clay mass and saturated sand with the bedrock is broken. In this place, the depth of rupture in the center of the landslide is about 8 meters from the road surface. Due to the slope of the mountain, this depth reaches about 20 meters above the road at the bottom of the road and at the location of the CD profile.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography (ERT), Kiasar-Semnan road, Landslide, Langar and TelmaDarreh, Sliding surface.

Cite this article: Emami, R., Rezapour, M., & Faraji, M. (2023). Study of Landslides using electrical resistivity tomography (ERT) in the Kiasar-Semnan road, Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(1), 15-34. DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.338184.1007401

CC BY NC

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.338184.1007401

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

انتشارات دانشگاه تهران

فیزیک زمین و فضا

نشانی اینترنتی مجله: http://jesphys.ut.ac.ir

دوره ۴۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحهٔ ۱۵- ۳۴

(مقاله پژوهشی)

مطالعه مناطق لغزشی با روش توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) در جاده کیاسر- سمنان، ایران

رضا امامی[۱] ✉ | مهدی رضاپور[۲] | محمد فرجی[۳]

۱. **نویسنده مسئول**، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: rezaemami@alumni.ut.ac.ir

۲. گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: rezapour@ut.ac.ir

۳. آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تبریز، ایران. رایانامه: m-faraji@tsml.ir

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۲۴)

چکیده

زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان حوادث طبیعی رایج، در بسیاری موارد منجر به زیان‌های اقتصادی قابل‌توجه و حتی تلفات جانی می‌شود؛ بنابراین بررسی زمین‌لغزش‌ها به‌منظور کاهش خسارات ناشی در مطالعات اولیه پروژه‌های عمرانی مخصوصاً سازه‌های خطی در مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین منظور پس از وقوع زمین‌لغزش در مناطق لنگار و تلمادره که موجب تخریب قسمت‌هایی از جاده کیاسر- سمنان در استان مازندران شد، تحقیقات توموگرافی الکتریکی دوبعدی برای تشخیص سطح لغزش و توده ناپایدار در محل زمین‌لغزش‌ها صورت گرفت تا در ساخت جاده جدید ملاحظات لازم در نظر گرفته شود و از بروز خسارات بیشتر جلوگیری به عمل آید. در این تحقیق ابتدا داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در ۶ پروفایل با آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی، قطبی-قطبی و سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی با آرایه شلومبرژه برداشت شد. در مرحله دوم داده‌های صحرایی با استفاده از نرم‌افزارهای Res2dinv و IPI2win وارون و سپس نتایج مورد تفسیر قرار گرفتند. نتایج حاصل از توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) در زمین‌لغزش لنگار با توجه به خروجی مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و زمین‌شناسی منطقه، وجود ۴ لایه اصلی در مقطع‌ها را نشان می‌دهد. همچنین مطالعه نشان داد در زمین‌لغزش تلمادره سطح جدایش بین توده رس و شن و ماسه اشباع با سنگ بستر سطح گسیختگی زمین‌لغزش می‌باشد. مدل وارون مقاومت ویژه حاصل از داده‌های سونداژ الکتریکی در نرم‌افزار IPI2win فقط جهت مقایسه و نمایش یک مدل کلی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT)، جاده کیاسر-سمنان، زمین‌لغزش، لنگار و تلمادره، سطح لغزش.

۱. مقدمه

بنا به تعریف زمین‌لغزش عبارت است از حرکت ناگهانی یا تدریجی توده‌ای از لایه‌های سطحی زمین در امتداد شیب توپوگرافی که در اثر نیروی جاذبه زمین صورت می‌گیرد. ازآنجاکه این پدیده در مواردی با خسارت قابل‌توجه مالی و جانی همراه است، مطالعه مناطقی که زمینه وقوع زمین‌لغزه در آن‌ها وجود دارد اهمیت زیادی دارد. عوامل زیادی از جمله ساخت و جنس زمین‌شناسی، بارش باران، درجه حرارت و تغییرات آن، آب‌های زیرزمینی و پوشش گیاهی در ایجاد زمین‌لغزش مؤثرند. علی‌رغم وجود طبقه‌بندی‌های زیادی برای زمین‌لغزش، ساده‌ترین و رایج‌ترین طبقه‌بندی را وارنز (۱۹۷۸) ارائه کرده است که در آن زمین‌لغزش‌ها بر مبنای نوع حرکت مواد و نوع مواد درگیر در حرکت، تقسیم‌بندی شده‌اند. تقسیم‌بندی توسعه‌یافته توسط کرودن و وارنز (۱۹۹۶) بر اساس تقسیم‌بندی وارنز (۱۹۷۸) انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۱ آمده است (حفیظی و همکاران، ۱۳۸۹).

تأثیر زمین‌لغزش‌ها به سازه‌های خطی (نظیر جاده‌ها، بزرگراه‌ها و راه‌آهن) به علت طویل بودن و عبور از مناطق متفاوت با خصوصیات زمین‌شناسی متفاوت بیش از سازه‌های متمرکز است. خسارت جانی و مالی حاصل از زمین‌لغزه‌ها، هنگام بهره‌برداری از سازه‌های خطی، نتیجه حذف کردن یا بی‌توجه بودن به پارامترهای زمین‌شناختی مؤثر بر این سازه‌ها هنگام انتخاب مسیر ساختگاه است

استناد: امامی، رضا؛ رضاپور، مهدی و فرجی، محمد (۱۴۰۲). مطالعه مناطق لغزشی با روش توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) در جاده کیاسر- سمنان، ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۱)، ۱۵-۳۴. DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.338184.1007401

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/jesphys.2023.338184.1007401

(حفیظی و همکاران، ۱۳۸۹).

در ایران زمین‌لغزش‌ها همیشه مشکل‌آفرین بوده‌اند. ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین‌لغزه‌ها را دارد. این پدیده همه‌ساله در اکثر استان‌های کشور به‌ویژه استان‌های شمالی موجب خسارات اقتصادی فراوانی به صنعت، جنگل‌ها و مراتع، مزارع و خانه‌های مسکونی می‌شود. اکثر جاده‌های استان مازندران در رشته‌کوه‌های البرز کوهستانی واقع‌شده‌اند. به دلیل ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی رشته‌کوه البرز و فرسایش‌پذیری بسیار بالای این منطقه به دلیل رطوبت و بارندگی زیاد لغزش‌های بسیار زیادی در اکثر جاده‌های استان مازندران دیده می‌شود. در استان مازندران به دلیل لغزش‌های فراوان شاهد مسدود شدن جاده و نقص در حمل‌ونقل هستیم. وجود گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان، شیب‌های تند، بارندگی‌های فراوان و لایه‌های مارنی و شیلی متعلق به دوره میوسن موجب تشدید این فرآیند می‌باشد (درویش زاده، ۱۳۸۵).

زمین‌لغزش‌ها پدیده‌های پیچیده‌ای هستند که مطالعه آن‌ها لزوماً مستلزم یک رویکرد چند رشته‌ای مبتنی بر طیف وسیعی از مشاهدات از جمله نقشه‌برداری، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی، بررسی‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی، بررسی‌های ژئودتیکی، مشاهدات ماهواره‌ای و تجزیه‌وتحلیل داده‌های هواشناسی است (پرونه و همکاران، ۲۰۰۶؛ کاواباتا و باندیباس، ۲۰۰۹؛ دی باری و همکاران، ۲۰۱۱). ادغام تکنیک‌های مختلف باید به ما اجازه دهد که اطلاعات مفیدی را برای تمام مراحل چرخه زمین‌لغزش به‌دست آوریم و بر اشکالات هر روش اعمال شده غلبه کنیم. در چندین دهه گذشته، روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل ویژگی‌های اصلی خود مانند انعطاف‌پذیری، هزینه کم و دستیابی سریع، داده‌های با وضوح بالا و امکان بررسی یک منطقه بزرگ در مقایسه با سایر روش‌ها به کاربردی‌ترین تکنیک‌ها در طیف وسیعی از مطالعات زیست‌محیطی تبدیل شده‌اند (جانگمانز و گارامبویز، ۲۰۰۷). یکی از این رویکردها به بررسی زمین-لغزش‌ها اشاره دارد که در آن ژئوفیزیک پتانسیل زیادی برای کارایی خود نشان داده است.

جدول ۱. دسته‌بندی زمین‌لغزش‌ها بر مبنای طبقه‌بندی کرودن و وارنز (۱۹۹۶).

نوع حرکت			نوع مواد		
			سنگ بستر	خاک‌های مهندسی	
				عمدتاً ریز	عمدتاً درشت
سقوط			سقوط سنگ	سقوط خاک	سقوط واریزه
واژگونی			واژگونی سنگ	واژگونی خاک	واژگونی واریزه
لغزش‌ها	چرخشی		ریزش سنگ	ریزش خاک	ریزش واریزه
	انتقالی	واحد کم	لغزش بلوک سنگ	لغزش بلوک خاک	لغزش بلوک واریزه
		واحدهای زیاد	لغزش سنگ	لغزش خاک	لغزش واریزه
گسترش‌های جانبی			پخش سنگ	پخش خاک	پخش واریزه
جریان‌ها			جریان سنگ	جریان خاک	جریان واریزه
			بهمن سنگ	-	بهمن واریزه
			(خزش عمیق)	(خزش خاک)	
پیچیده و مرکب			ترکیب دو یا چند نوع حرکت اصلی در زمان و/یا مکان		

در دهه‌های اخیر، روش‌های ژئوفیزیکی به طور گسترده در تحقیقات زمین‌لغزش استفاده شده است. این روش‌ها برای تعیین ضخامت رسوبات آبرفتی، سرعت موج برشی، فرکانس بنیادی، عمق سنگ بستر، سطح آب زیرزمینی، سطح لغزش و غیره در مناطق لغزش به کار می‌روند (چوبستی و همکاران، ۲۰۱۳؛ رضایی و همکاران، ۲۰۱۵؛ فرسارد و همکاران، ۲۰۱۶؛ رضایی و چوبستی، ۲۰۱۷؛ رضایی و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های ژئوفیزیکی در مقایسه با روش‌های ژئوتکنیکی سریع، کم‌هزینه و غیرمخرب هستند و می‌توانند مناطق وسیعی را بررسی کنند. ازاین‌رو، علاقه عمومی به این روش‌ها در حال افزایش است (اوه و سان، ۲۰۰۸؛ دِوی و همکاران، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، روش‌های ژئوفیزیکی نیز معایبی دارند. این روش‌ها مستقیم هستند و تفسیر نتایج آن‌ها پیچیده است یا به پشتیبانی داده‌های ژئوتکنیکی تکمیلی نیاز دارد. علاوه بر این، با افزایش عمق نفوذ، دقت آن‌ها کاهش می‌یابد و نوفه بر نتایج تأثیر منفی می‌گذارد (لوک و همکاران، ۲۰۱۳؛ گوئیریئو و همکاران، ۲۰۱۷).

امروزه روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی در شناسایی زمین‌لغزش‌ها مانند شکست لرزه‌ای، انعکاس لرزه‌ای، اندازه‌گیری نوفه محیط، رادار نفوذی زمین، بررسی‌های الکترومغناطیسی و توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) استفاده می‌شود. در بین روش‌های ژئوفیزیکی، ERT برای بررسی زمین‌لغزش بسیار کارآمد است. اندازه‌گیری‌های ERT شامل تجهیزات کم‌وزن (برخلاف دیگر تجهیزات خسته‌کننده) می‌شود که کار را در زمین‌لغزش و مناطق دور آسان می‌کند. این روش بر اساس اندازه‌گیری‌های مقاومت الکتریکی است (گراندژان و همکاران، ۲۰۱۱؛ کاپیزی و مارتورانا، ۲۰۱۴؛ مریت و همکاران، ۲۰۱۴؛ لینگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ یانه و همکاران، ۲۰۱۷؛ اولمان و همکاران، ۲۰۱۸). اندازه‌گیری‌های یک‌بعدی (1-D) دارای محدودیت‌هایی هستند و معمولاً تغییرات افقی مقاومت الکتریکی زیرسطحی را نشان نمی‌دهند. بررسی‌های دوبعدی (2-D) به‌درستی تغییرات عمودی و افقی مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد. بررسی‌های سه‌بعدی زمان‌بر، پرهزینه، دشوار و معمولاً در شرایط توپوگرافی با شیب کمتر از ۲۰ درصد تکمیل می‌شوند (پرونه و همکاران، ۲۰۱۴؛ کاپیزی و مارتورانا، ۲۰۱۴).

عواملی مانند وجود خاک رس، درجه اشباع و شدت هوازدگی در سنگ‌ها بر مقاومت الکتریکی تأثیر می‌گذارد. ازاین‌رو، این روش به‌اندازه کافی برای شناسایی و رمزگشایی ساختارهای زیرسطحی حساس است (کولای و همکاران ۲۰۱۸). بررسی‌های ERT دوبعدی را می‌توان برای انواع مختلف زمین‌لغزش‌ها (انتقالی، چرخشی و غیره) و شرایط زمین‌شناسی (سنگ، خاک و ترکیبی از هر دو) مورد استفاده قرار داد که طیف وسیعی از کاربردها را شامل می‌شود. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که هندسه سطح لغزش و ساختارهای تغییرشکل زمین‌لغزش را می‌توان با استفاده از ERT دوبعدی شناسایی کرد و تعیین این ویژگی‌ها منجر به شناسایی جامع یک زمین‌لغزش می‌شود (لوک، ۲۰۰۴؛ دی باری و همکاران، ۲۰۱۱؛ مریت و همکاران، ۲۰۱۴).

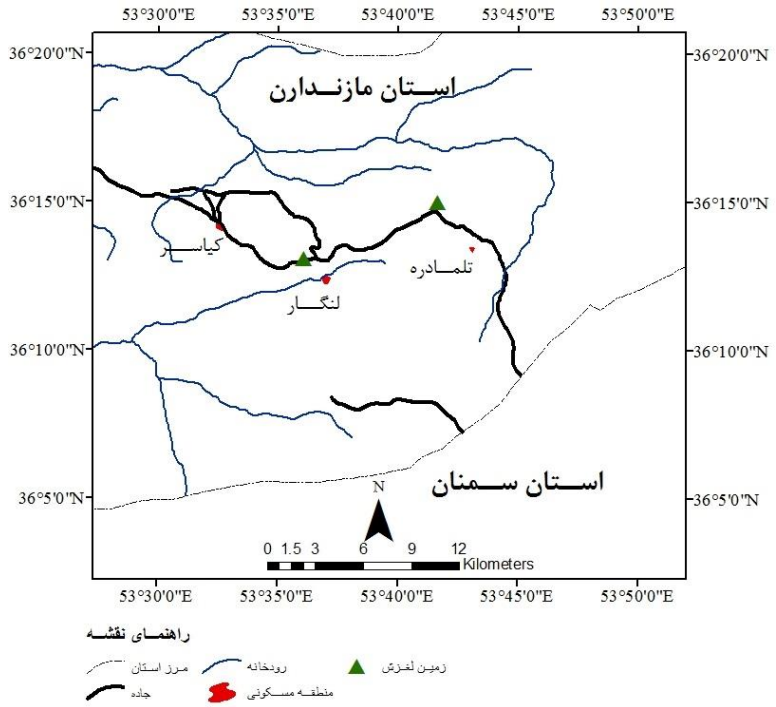
اگرچه این روش از دهه ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفته است. اذعان می‌شود که پیشرفت علمی در بررسی زمین-لغزش‌ها ناشی از توموگرافی مقاومت الکتریکی است که به نظر می‌رسد ابزاری مفید و تکنیکی مناسب برای مطالعه برخی از ویژگی‌های زمین‌لغزش با تمرکز بر هندسه، ساختار داخلی، سطح شکست، محتوای آب، خواص فیزیکی مواد زمین‌لغزش و حرکت توده‌ای رانش زمین باشد (مک کان و فورستر، ۱۹۹۰؛ هک، ۲۰۰۰؛ لاپنا و همکاران، ۲۰۰۵). این روش دارای قدرت تفکیک زیاد، قابلیت برداشت سریع داده‌ها و هزینه‌های اندک می‌باشد. به‌علاوه روش‌های مدل‌سازی پیشرفته نیز در این زمینه موجود است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶ و پاتلا، ۱۹۹۷) که تفسیر دقیق‌تر را در مناطقی که از نظر زمین‌شناسی پیچیده‌اند ممکن می‌سازد. روش‌های توموگرافی الکتریکی تطابق خوبی با اطلاعات زمین‌شناسی و چاه‌پیمایی و نمونه‌های مغزه‌ای نشان می‌دهند.

بارندگی‌های محلی می‌توانند باعث کاهش اصطکاک سطح لغزش شوند و مواد متخلخل را از آب اشباع نمایند. از نظر الکتریکی بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه کم ممکن است به دلیل محتوای زیاد املاح در سیال منفذی، وجود رس، دانه‌ریز بودن ذرات و یا ترکیبی از این عوامل باشند. بر این اساس قبل از گسیختگی زمین می‌توان مناطق مستعد گسیختگی را با روش‌های توموگرافی مشخص کرد.

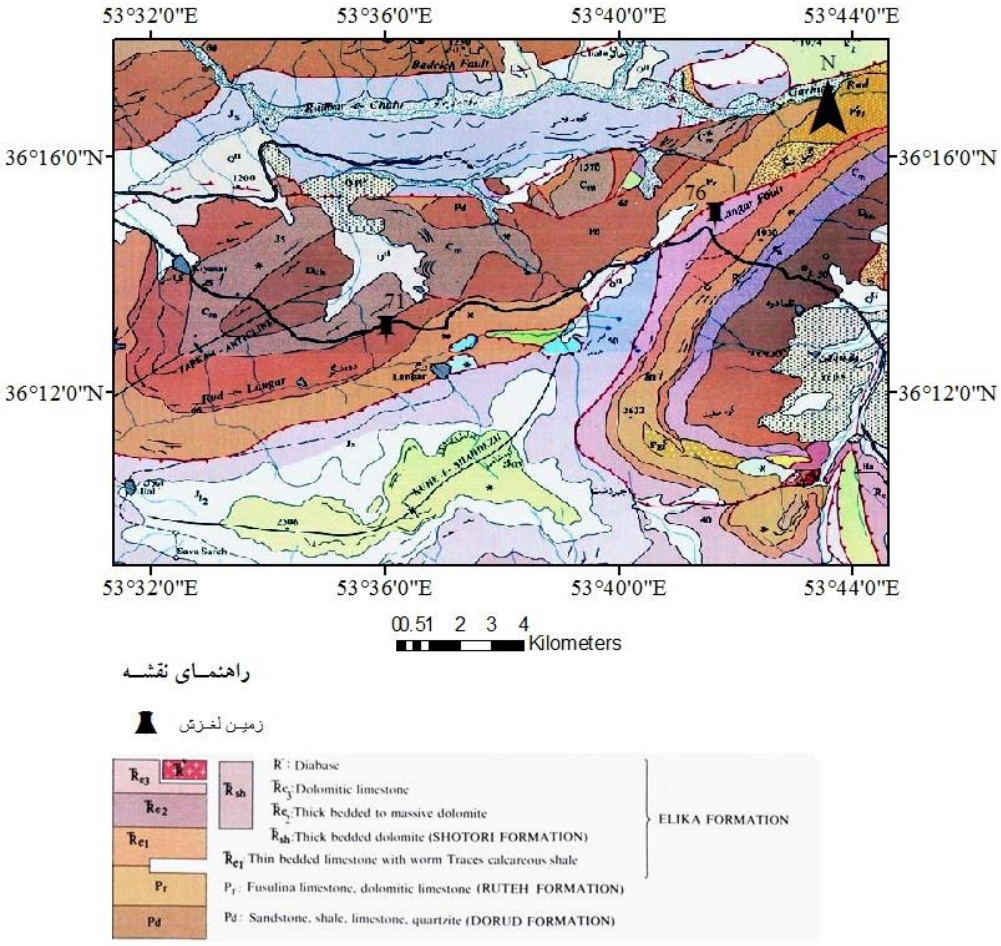
در این‌گونه از مناطق ایران کاربرد روش مقاومت ویژه الکتریکی در بررسی زمین‌لغزش‌ها یکی از متداول‌ترین روش‌ها به لحاظ دقت و سرعت می‌باشد (اجل لوئیان و همکاران، ۱۳۸۸). زمین‌لغزش‌ها در دو حالت قابل بررسی هستند: در حالت اول هدف بررسی احتمال وقوع زمین-لغزش در مناطقی است که زمینه وقوع این پدیده در آن‌ها وجود داشته باشد و در حالت دوم منظور از انجام مطالعات اندازه‌گیری مقاومت ویژه بررسی و تخمین ابعاد توده لغزنده پس از وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. در هر دو حالت مبانی نظری روش‌هایی که بکار گرفته می‌شود یکسان است.

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه مناطق لغزشی لنگار و تلمادره واقع در جاده کیاسر-سمنان در محدوده جنوب استان مازندران قرار می‌گیرد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ برگرفته از برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر محدوده موردمطالعه زمین‌لغزش تلمادره مشتمل بر سنگ آهک دولومیتی (سازند الیکا) و محدوده زمین‌لغزش لنگار مشتمل بر سنگ ماسه، شیل، سنگ آهک (سازند درود) می‌باشد. شیب لایه‌ها در منطقه به سمت شمال-شمال‌غرب می‌باشد. وقوع این زمین‌لغزش‌ها در چندین سال بعد از بهره‌برداری از جاده، حاکی از دخالت عامل دیگری نیز هست. به احتمال زیاد افزایش بارندگی شدید یا افزایش سربار جاده وقوع این حادثه را فراهم ساخته و با توجه به بالا بودن آسیب‌پذیری منطقه و نداشتن تکیه‌گاه، بخشی از دامنه دچار زمین‌لغزش شده است. زمین‌لغزش لنگار در واحد سنگی pd (سازند درود) رخ داده است. این واحد سنگی شامل ماسه‌سنگ، شیل، سنگ آهک و کوارتزیت است. سن این واحد کربونیفر-پرمین است (آقانباتی، ۱۳۸۳). امتداد لایه‌بندی شمال‌شرق-جنوب‌غرب و جهت شیب لایه‌بندی به سمت شمال‌غرب است. زمین‌لغزش تلمادره در واحد سنگی Re3 (سازند الیکا) قرار گرفته است. سنگ‌های تریاس پایینی-میانی البرز، ردیف‌های کربناتی آهکی-دولومیتی به نام «سازند الیکا» هستند که بُرش الگوی آن را کلاوس (۱۹۶۴) در دره نور و در ۵ کیلومتری پایین دست روستای الیکا، به ضخامت ۲۹۵ متر، مطالعه و معرفی کرده است (آقانباتی،۱۳۸۳). در محل بُرش الگو و سایر نقاط البرز، بخش پایینی سازند الیکا، ضخامتی متغیر از سنگ‌آهک‌های نازک‌لایه و آهک‌های مارنی است که کمی مارن و یا میان‌لایه‌های نازک دولومیت دارد. لایه‌بندی نازک، رنگ متمایل به خاکستری روشن، فراوانی ساخت‌های کرم‌مانند از ویژگی‌های بخش پایینی سازند الیکا است که شناسایی و تفکیک آن را از دولومیت‌های ضخیم لایه بخش بالایی فراهم می‌سازد. بخش بالایی سازند الیکا، در همه جا، کربنات‌های دولومیتی-آهکی، ضخیم لایه، روشن رنگ و متراکم به ضخامت‌های متفاوت (تا ۱۰۰۰ متر) هستند؛ که سیمای برجسته و کوه‌ساز دارند و به «دولومیت‌های الیکا» معروف‌اند. به جز سنگواره‌های میکروسکوپی ناچیز، دولومیت‌های الیکا سنگواره شاخص ندارند ولی معرف سنگ‌های تریاس میانی البرز هستند. با این وجود، در برخی نقاط البرز (شهمیرزاد)، لایه‌های بازپسین دولومیت الیکا میکروفسیل‌های آشکوب کارنین (آغاز تریاس پسین) دارند (آقانباتی،۱۳۸۳).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه موردمطالعه.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه؛ اقتباس از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر (برگرفته از پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور به نشانی الکترونیکی: www.ngdir.ir).

۳. مشاهدات صحرایی و طراحی عملیات برداشت داده

زمین‌لغزش لنگار در جاده کیاسر–سمنان واقع در منطقه لنگار در استان مازندران در طول جغرافیایی ۰۲ ۳۶ ۵۳ و عرض جغرافیایی ۰۳ ۱۳ ۳۶ به وقوع پیوسته است. در اثر این زمین‌لغزش در حدود ۳۰۰ متر از جاده ارتباطی کیاسر–سمنان به کلی تخریب شد. در شکل ۳ نمایی از موجی شدن زمین و روان‌شدگی در پایین دست جاده قدیمی قابل مشاهده است. تصویر ماهواره‌ای (شکل ۴) نیز نشان می‌دهد زمین‌لغزش باعث تخریب جاده قدیمی شده و به ناچار جاده جدیدی توسط اداره راه و شهرسازی استان مازندران احداث شده است.

زمین‌لغزش تلمادره نیز در جاده کیاسر–سمنان واقع در منطقه تلمادره استان مازندران در طول جغرافیایی ۳۸ ۴۱ ۵۳ و عرض جغرافیایی ۵۹ ۱۴ ۳۶ به وقوع پیوسته است. در اثر این زمین‌لغزش در حدود ۲۰ الی ۳۰ متر از جاده ارتباطی کیاسر–سمنان دچار فرورفتگی و در نتیجه تعمیر شده است. همان‌طور که در تصویر ماهواره‌ای (شکل ۵) دیده می‌شود زمین‌لغزش باعث ایجاد ریزش در پایین دست جاده شده است. عرض این زمین‌لغزش حدود ۳۰ متر می‌باشد.

طی بازدیدهای صحرایی (شکل ۳) که در روز یکشنبه به تاریخ ۹۴/۰۶/۰۸ و روز پنجشنبه به تاریخ ۹۴/۰۷/۱۶ از محل زمین‌لغزش‌ها در دو نقطه در جاده کیاسر–سمنان واقع در مناطق لنگار و تلمادره صورت گرفت، بر اساس هدف مطالعه و شرایط منطقه تصمیم گرفته شد از توموگرافی الکتریکی و سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی به منظور تعیین سطح گسیختگی و در صورت امکان تعیین عمق سنگ بستر استفاده شود.

(الف)

(ب)

شکل ۳. زمین‌لغزش لنگار: (الف) تصویر جاده قدیمی از نزدیک؛ (ب) نمایی از موجی شدن زمین و روان شدگی در پایین دست جاده قدیمی.

شکل ٤. زمین‌لغزش تلمادره: (الف) محل برداشت پروفیل AB، (ب) محل برداشت پروفیل CD؛ زمین‌لغزش لنگار: (ج) محل برداشت پروفیل AB، (د) محل برداشت پروفیل CD، (ه) محل برداشت پروفیل EF، (و) محل برداشت پروفیل GH.

در این مطالعه، برداشت‌های ژئوالکتریکی به روش‌های توموگرافی الکتریکی و سونداژ الکتریکی قائم در محدوده‌های لغزشی لنگار و تلمادره در جاده کیاسر–سمنان انجام شد. مطالعات میدانی شامل بازدید اولیه، تعیین موقعیت پروفیل‌ها و امکان‌سنجی انجام مطالعات و داده‌برداری ژئوالکتریک می‌باشد. موقعیت پروفیل‌ها و گمانه‌های الکتریکی (سونداژ) مطابق تصاویر ۵ و ۶ برای ۶ پروفیل به روش‌های آرایش دوقطبی–دوقطبی و قطبی–قطبی و برای ۱۱ نقطه به روش آرایش متقارن شلومبرژر طراحی و برداشت شد. موقعیت پروفیل‌ها و گمانه‌های الکتریکی و اندازه آن‌ها به‌گونه‌ای طراحی شد که با وجود محدودیت حتی‌الامکان گستره توده لغزشی با دقت نسبتاً خوب موردمطالعه قرار گیرد و سطح لغزش آن محاسبه شود. به‌طوری‌که در تمامی برداشت‌ها گسترش‌های الکترودی در جهت عمود بر شیب توپوگرافی زمین‌لغزش انتخاب‌شده‌اند تا جریان به‌طور یکنواخت و بدون تأثیر توپوگرافی به درون زمین نفوذ کند (حفیظی و همکاران، ۱۳۸۹).

در این مطالعه آرایه دوقطبی–دوقطبی به‌عنوان آرایه اصلی جهت پیمایش ژئوالکتریک به کار گرفته شد. مزیت این آرایه نسبت به سایر آرایه‌های ژئوالکتریک، قدرت تفکیک بالای آن در به تصویر کشیدن ساختارهای قائم از

جمله گسل‌خوردگی و سطوح گسیختگی (مانند سطح زمین‌لغزش) می‌باشد (داهلین و بینگ، ۲۰۰۱). پژوهش صورت گرفته توسط زو و همکاران (۲۰۰۲) نشان می‌دهد که از بین سه آرایه شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی و ونر، آرایه دوقطبی-دوقطبی به نحو بهتری در شناسایی زون‌های گسلی و سطوح گسیختگی مؤثر می‌باشد. در این آرایه متداول‌ترین حالت، قرار گرفتن الکترودها در یک امتداد است، یعنی چهار الکترود بر یک خط روی زمین نصب می‌شوند. در آرایه دوقطبی-دوقطبی دو پارامتر a و n مطرح است که a فاصله الکترودی و عدد n برابر با نسبت فاصله الکترودهای داخلی جریان و پتانسیل به فاصله دوقطبی پتانسیل یا دوقطبی جریان در دو طرف آرایه می‌باشد. در عملیات صحرائی الکترودهای جریان (C1 و C2) ثابت بوده و الکترودهای پتانسیل (P1 و P2) با فواصل ثابت (a) نسبت به یکدیگر قرار گرفته و با جابجایی الکترودهای پتانسیل به اندازه n*a، مقاومت ویژه اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله بعد با رسیدن الکترودهای پتانسیل به آخرین نقطه‌ای که مورد نظر است. اندازه‌گیری‌ها با جابجایی الکترودهای جریان به‌اندازه a دوباره به همان شکلی که توضیح داده شده مشابه حالت اول تکرار می‌شود. ضریب n بستگی به طول پروفیل دارد و با افزایش طول پروفیل این ضریب افزایش یافته است.

علاوه بر آرایه دوقطبی-دوقطبی از آرایه قطبی-قطبی نیز در برداشت داده در پروفیل‌های CD زمین‌لغزش‌ها استفاده شد. در این آرایه یکی از الکترودهای جریان (C_2) و یکی از الکترودهای پتانسیل (P_2) در فاصله بی‌نهایت (حداقل در فاصله ۵ برابری از الکترودهای C_1 و P_1) قرار داده می‌شود. این آرایه به دلیل عمق نفوذ زیاد و سادگی برداشت نسبت به آرایه دوقطبی-دوقطبی در مناطقی که توپوگرافی خشن و پوشش گیاهی زیاد باشد نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. پروفیل‌های برداشت‌شده در حالت دوبعدی به وسیله نرم‌افزار Res2Dinv مدل‌سازی شده‌اند. مختصات نقاط ابتدا و انتهای پروفیل‌ها و سونداژهای الکتریکی در زمین‌لغزش لنگار در جدول ۲ و پلان و موقعیت محل سونداژها در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۲. مختصات جغرافیایی پروفیل‌ها و محل گمانه‌های الکتریکی در زمین‌لغزش لنگار (اندازه‌گیری با استفاده از GPS صورت گرفته است).

Name	X (UTM)	Y (UTM)
A	۳۹S ۰۷۳۳۸۱۲	٤۰۱۱٥۲٤
B	۳۹S۰۷۳۳٦٥۱	٤۰۱۱٥۰٤
C	۳۹S ۰۷۳۳۷۷۱	٤۰۱۱٤٥٤
D	۳۹S۰۷۳۳٦۸٥	٤۰۱۱٤۳٤
E	۳۹S۰۷۳۳۸۱۳	٤۰۱۱۳۷۰
F	۳۹S۰۷۳۳٦٤۲	٤۰۱۱۳۲٥
G	۳۹S۰۷۳۳۸۰۲	٤۰۱۱۲۹۷
H	۳۹S۰۷۳۳٦۸۸	٤۰۱۱۲۷۹
S1_AB	۳۹S۰۷۳۳۷٤۲	٤۰۱۱٥۱۰
S2_AB	۳۹S۰۷۳۳۷۲۹	٤۰۱۱٥۰۳
S3_AB	۳۹S۰۷۳۳۷۱۱	٤۰۱۱٥۰۰
S1_EF	۳۹S۰۷۳۳۷۳۸	٤۰۱۱۳٤۷
S2_EF	۳۹S ۰۷۳۳۷۲٥	٤۰۱۱۳٤۳
S3_EF	۳۹S ۰۷۳۳۷۱۲	٤۰۱۱۳۳۸
S1_GH	۳۹S ۰۷۳۳۷٤۷	٤۰۱۱۲۸٦
S2_GH	۳۹S ۰۷۳۳۷۳۷	٤۰۱۱۲۸۷
S3_GH	۳۹S ۰۷۳۳۷۲٥	٤۰۱۱۲۸٦

شکل ۵. نقشه ماهواره‌ای منطقه زمین‌لغزش لنگار و موقعیت پروفیل‌ها و سونداژهای تهیه شده، پروفیل AB، EF و GH با آرایه دوقطبی-دوقطبی و CD با آرایه قطبی-قطبی برداشت شده است.

در جدول (۳) مختصات ابتدا و انتهای پروفیل‌ها و محل برداشت سونداژهای الکتریکی برداشت شده در زمین‌لغزش تلمادره مشخص شده است. در ضمن محل این مختصات در تصویر ماهواره‌ای (شکل ۶) نشان داده شده است.

در این تحقیق داده‌های توموگرافی مقاومت الکتریکی توسط دستگاه ARES ساخت شرکت GF Instrument برداشت شدند. در برداشت داده‌ها سعی شد تا داده‌ها با دقت و کیفیت بالا و میزان خطای کم در هر بار اندازه‌گیری برداشت شوند تا تفسیرهای نهایی دارای اعتبار بالایی باشند. این دستگاه با باطری ۱۲ ولت کار می‌کند و قابلیت ارسال جریان حداکثر تا ۲/۰ آمپر با توان ۳۰۰ وات را داراست و دارای قابلیت حمل آسان است. یکی از عوامل مهم در روند مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی کیفیت داده‌های میدانی است. معمولاً داده‌های با کیفیت خوب یک تغییر صاف از مقادیر مقاومت ظاهری در شبه مقطع را نشان می‌دهد. برای گرفتن یک مدل خوب، داده‌ها باید به همان اندازه کیفیت خوبی داشته باشند. اگر داده‌ها از کیفیت پایین‌تری برخوردار باشند در برداشت داده نقاط داده بد به راحتی به‌عنوان نقاط برجسته ظاهر می‌شوند. این نقاط داده بد می‌تواند به دلیل خرابی رله‌ها در یکی از الکترودها، تماس ضعیف با زمین الکترود به دلیل زمین خشک، شنی یا سنگلاخی، اتصال الکترودها به کانکتورهای اشتباه، یا اتصال کوتاه بین کابل‌ها به دلیل خیس بودن زمین باشد. با مقادیر مقاومت ظاهری به‌طور غیرمعمول بالا یا پایین، چندین کار وجود دارد که می‌توان انجام داد. در این‌گونه موارد می‌توان با رفع مشکل، برداشت دوباره در آن نقطه انجام گرفته سپس داده جدید جایگزین داده قبلی جایگزین شود. راهکار دوم استفاده از عامل میرایی بزرگ‌تر می‌باشد چون یک عامل میرایی بزرگ‌تر تمایل به تولید دارد مدل‌های نرم‌تر با ساختار کمتر و در نتیجه وضوح ضعیف‌تر دارند. در این مطالعه با توجه به اینکه موارد خیلی کمی با پرش داده مواجه شدیم که با بررسی و رفع مشکل برداشت دوباره انجام داده و داده جدید جایگزین شد.

جدول ۳. مختصات جغرافیایی پروفیل‌ها و محل گمانه‌های الکتریکی در زمین‌لغزش تلمادره (اندازه‌گیری با استفاده از GPS صورت گرفته است).

Name	X (UTM)	Y (UTM)
A	۳۹S ۰۷٤۲۰٦۱	٤۰۱٥۰۳۱
B	۳۹S ۰۷٤۱۹۹٦	٤۰۱٥۰٥۷
C	۳۹S ۰۷٤۲۰٦٤	٤۰۱٥۰٦٥
D	۳۹S ۰۷٤۲۰۳۸	٤۰۱٥۰۷٥
S1_AB	۳۹S ۰۷٤۲۰۳٥	٤۰۱٥۰٤۹
S2_AB	۳۹S ۰۷٤۲۰۲۷	٤۰۱٥۰٥۲

شکل ٦. نقشه ماهواره‌ای منطقه زمین‌لغزش تلمادره و موقعیت پروفیل‌ها و سوندژهای تهیه شده، پروفیل AB با آرایه دوقطبی–دوقطبی و CD با آرایه قطبی–قطبی برداشت شده است.

۴. روش‌شناسی

توموگرافی الکتریکی یک روش برداشت بهینه بوده که به‌منظور افزایش دقت و نیز بهبود قدرت تفکیک عمقی (قائم) و جانبی (افقی) در شناسایی اهداف زیرزمینی است (لوک، ۲۰۰۴). این روش را می‌توان در دو بخش طراحی شبکه و چگونگی برداشت داده‌ها و نیز مدل‌سازی داده‌های برداشت شده مورد بررسی قرار داد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). توموگرافی به معنی تشخیص توده بی‌هنجاری در زیر یک سطح می‌باشد. توموگرافی در واقع روشی است که می‌توان با آن گسترش فضایی یک خاصیت را از راه عبور یک جریان الکتریکی در همان فضا تعیین کرد، بنابراین اولین مرحله توموگرافی الکتریکی، فرستادن یک جریان الکتریکی به درون زمین و اندازه‌گیری پاسخ زمین به این جریان است که معمولاً بر حسب ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود.

برداشت‌های متداول توموگرافی الکتریکی به دو نوع دوبعدی (2D) و سه‌بعدی (3D) خلاصه می‌شوند. برداشت‌های دوبعدی به دلیل هزینه و زمان برداشت کمتر، به بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است (لوک، ۲۰۰۱).

مرحله مهم دیگر در این روش مدل‌سازی است که به دو صورت مدل‌سازی مستقیم (پیشرو) و مدل‌سازی معکوس

(وارونه) انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون‌وخطا با مدل‌های زمینی دوبعدی با استفاده از روش اجزاء محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد. مدل اولیه در این نوع از مدل‌سازی سلیقه‌ای بوده و بسته به تبحر و تجربه کارشناس ژئوفیزیک بهبود می‌یابد. در روش معکوس‌سازی بر خلاف مدل‌سازی مستقیم با استفاده از داده‌های به‌دست آمده، مدل زمین تخمین زده می‌شود و روشی پرکاربردتر و مرسوم‌تر در بررسی‌های ژئوفیزیکی است. در مدل‌سازی معکوس در ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز است (لوک، ۲۰۰۴). برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه دو روش معمول کمترین مربعات گوس–نیوتن و روش شبه نیوتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در نرم‌افزار Res2Dinv برای وارون‌سازی از دو روش معمول کمترین مربعات شامل گوس–نیوتن (لوک، ۲۰۰۱) و روش شبه نیوتن (لوک و بارکر، ۱۹۹۶) استفاده می‌شود. در روش گوس –نیوتن برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$(J^T J + \lambda I)\Delta q_k = J^T g \qquad (۱)$$

در رابطه بالا q بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت ویژه، g بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و محاسباتی، Δq بردار اغتشاش پارامترهای مدل، I ماتریس همانی، λ عامل میرایی، J ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی و در نهایت J^T ترانهاده ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی است. در روش گوس–نیوتن ماتریس ژاکوبین در هر تکرار باید محاسبه شود. این عمل باعث افزایش میزان محاسبات و زمان‌بر شدن مدل‌سازی می‌شود (لوک، ۲۰۰۴). روش‌های شبه نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به‌روزرسانی اجتناب می‌کنند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین J_0 برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد. مشتقات جزئی می‌تواند به‌طور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن به‌عنوان مدل اولیه، محاسبه شوند. با توجه به اینکه محدوده مطالعه و تعداد داده‌های برداشت شده در اندازه‌ای نیست که محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین باعث زمان‌بر شدن مدل‌سازی شود بنابراین وارون‌سازی در این مطالعه از طریق بهنگام‌سازی ماتریس ژاکوبین در هر تکرار جهت افزایش دقت مدل‌سازی استفاده می‌شود.

۵. بحث و بررسی نتایج حاصل از توموگرافی (ERT) و سونداژ الکتریکی (VES)

۵-۱. زمین‌لغزش لنگار

در این زمین‌لغزش از دو آرایه دوقطبی–دوقطبی و قطبی–قطبی برای توموگرافی الکتریکی و همچنین از آرایه شلومبرژه برای سونداژ الکتریکی قائم استفاده شده است. در نهایت تعداد ۴ پروفیل به روش توموگرافی الکتریکی و ۹ نقطه با سونداژ الکتریکی قائم در طول این پروفیل‌ها در محل زمین‌لغزش لنگار کار شد که با وارون‌سازی این داده‌ها ۷ مقطع به‌دست آمد که در این بخش از مقاله آورده شده است. پارامترهای برداشت پروفیل و سونداژها در زمین‌لغزش‌های لنگار و تلمادره به‌صورت اجمالی در جدول ۴ آورده شده است.

با مشاهده شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی پروفیل حاصل از سونداژ الکتریکی می‌توان دریافت که تغییرات مقاومت ویژه در محل پروفیل یک‌بعدی نیست و باید مدل‌سازی آن به‌صورت دوبعدی صورت گیرد؛ بنابراین تغییر نوع رسوبات و وجود ناپیوستگی در پروفیل‌ها در مقاطع حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار Res2Dinv به‌صورت دقیق‌تر قابل‌بررسی است. ازآنجاکه مدل‌سازی این پروفیل در نرم‌افزار Res2Dinv نیز با اعمال تصحیحات توپوگرافی انجام شده است، تفسیر نهایی در این مقاله روی مدل Res2Dinv که از دقت بیشتری برخوردار است، صورت می‌پذیرد. مدل وارون مقاومت ویژه در نرم‌افزار IPI2win فقط جهت مقایسه و نمایش یک مدل کلی ارائه شده است.

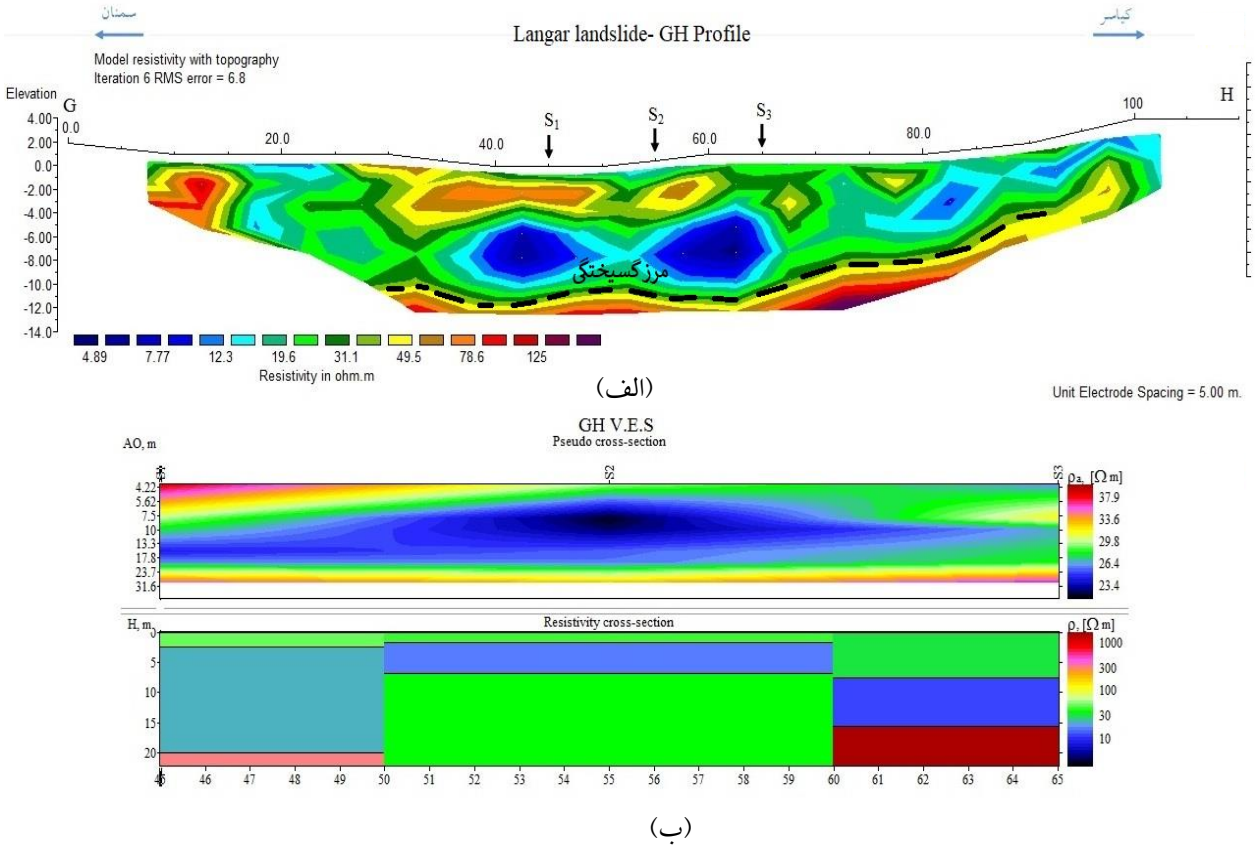
جدول ٤. پارامترهای برداشت‌های دوبعدی و سونداژها در زمین‌لغزش لنگار و تلمادره.

زمین‌لغزش لنگار				
پروفیل	طول پروفیل	فاصله الکترودها	نوع آرایه در برداشت دوبعدی	مشخصات سونداژها
پروفیل AB	۱۷۵ متر	۵ متر	دو قطبی-دو قطبی	سه سونداژ S1، S2 و S3 به فاصله ۱۰ متر از یکدیگر
پروفیل CD	۹۰ متر	۲ متر	قطبی قطبی	-----
پروفیل EF	۱۷۵ متر	۵ متر	دو قطبی-دو قطبی	سه سونداژ S1، S2 و S3 به فاصله ۱۵ متر از یکدیگر
پروفیل GH	۱۱۰ متر	۵ متر	دو قطبی-دو قطبی	سه سونداژ S1، S2 و S3 به فاصله ۱۵ متر از یکدیگر
زمین‌لغزش تلمادره				
پروفیل	طول پروفیل	فاصله الکترودها	نوع آرایه در برداشت دوبعدی	مشخصات سونداژها
پروفیل AB	۷۰ متر	۵ متر	دو قطبی- دو قطبی	سونداژ S1 و S2 به فاصله ۱۵ متر از هم
پروفیل CD	۲٤ متر	۲ متر	قطبی- قطبی	----

۵-۱-۱. شرح مقطع ژئوالکتریکی پروفیل GH

این پروفیل به طول ۱۱۰ متر با فواصل الکترودی ۵ تا ۳۵ متر (با ضریب ۵) به روش دوقطبی-دوقطبی در پایین جاده جدید اجرا شد. نقاطی که با رنگ آبی در این مقطع مشخص هستند نشانگر رس اشباع هستند (شکل ۶). تا عمق ۵ متری مخلوطی از رس و شن و ماسه اشباع وجود دارد که با مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر مشخص شده است. پایین‌تر از این لایه رس اشباع شروع می‌شود و تا عمق ۱۲ متری در مرکز پروفیل ادامه دارد دوباره لایه شن و ماسه اشباع از آب شروع می‌شود که با مقاومت ویژه بالاتر از ۵۰ اهم‌متر تا ۱۵۰ اهم‌متر مشخص شده است به احتمال زیاد سطح جدایش رس اشباع با شن و ماسه متراکم در عمق حدود ۱۲ متری در مرکز پروفیل به‌عنوان سطح گسیختگی زمین‌لغزش می‌باشد. با توجه به شواهد موجود سنگ بستر به احتمال زیاد پایین‌تر از رس و ماسه اشباع قرار داشته باشد که به دلیل کوتاه بودن طول پروفیل امکان داده‌برداری از اعماق زیرین نبوده است. با مقایسه نتایج حاصل از توموگرافی و نتایج به‌دست‌آمده از سونداژ الکتریکی در سه نقطه ۴۵، ۵۵ و ۶۵ متری پروفیل که در شکل (۷) نشان داده شده است به احتمال زیاد سنگ بستر از حدود ۱۵ متری در طرفین پروفیل تا ۲۵ متری در مرکز پروفیل شروع می‌شود. با توجه به اینکه محل به‌صورت دره U شکل بوده و جهت شیب به سمت مرکز می‌باشد بنابراین افزایش رسوب و عمق بستر در مرکز نسبت به طرفین منطقی می‌باشد.

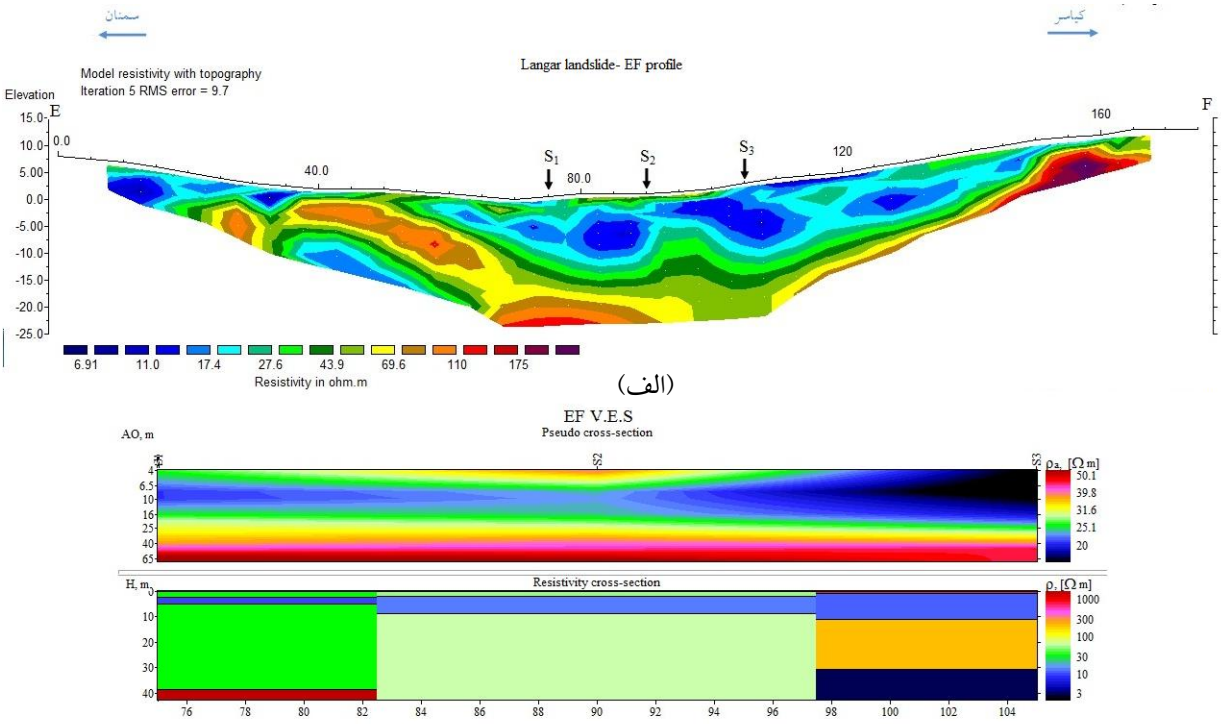
محل انتخاب سونداژها بر اساس محدودیت طول پروفیل و توپوگرافی و پوشش گیاهی منطقه صورت گرفت به‌طوری‌که مرکز پروفیل به‌عنوان سونداژ مرکزی و فاصله ۱۵ متری از سونداژ مرکز به‌عنوان محل دو سونداژ دیگر انتخاب شد. با توجه به عدم تطابق مقطع توموگرافی و نتایج حاصل از تفسیر داده‌های سونداژ S_2 در این پروفیل، این مسئله می‌تواند ناشی از عدم انتخاب نامناسب جایگاه سونداژها بنا به دلایلی که بالا ذکر شد اتفاق افتاده باشد. با توجه به اینکه مدل وارون مقاومت ویژه حاصل از داده‌های سونداژ الکتریکی در نرم‌افزار IPI2win فقط جهت مقایسه و نمایش یک مدل کلی ارائه شده است تفسیر نهایی بر اساس نتایج حاصل از توموگرافی می‌باشد.



شکل ۷. الف) مقطع وارون سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات پروفیل GH. مقیاس رنگی مقاومت ویژه خطی را نشان می‌دهد مقیاس فاصله قائم بر حسب ارتفاع نسبی است. ب) سوناژ الکتریکی پروفیل GH، بالا: شبه مقطع ژئوالکتریکی؛ پایین: مقطع ژئوالکتریکی.

۵-۱-۲. شرح مقطع ژئوالکتریکی پروفیل EF

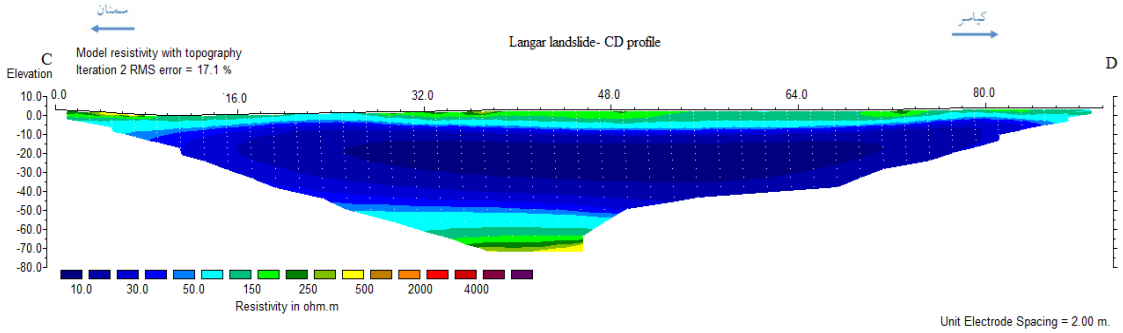
این پروفیل به طول ۱۷۵ متر فواصل الکترودی ۵ تا ۵۵ متر (با ضریب ۵) به روش دوقطبی-دوقطبی در بالای جاده قدیمی اجرا شد (شکل ۸). نقاطی که با رنگ آبی در این مقطع مشخص هستند نشانگر رس اشباع هستند. پایین‌تر از رس اشباع منطقه گذر از رس اشباع به شن و ماسه شروع می‌شود که با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۲۰ تا ۵۰ اهم‌متر مشخص است سپس شن و ماسه اشباع از آب شروع می‌شود که با مقاومت ویژه بالاتر از ۵۰ اهم‌متر مشخص شده است به احتمال زیاد سطح جدایش رس اشباع با شن و ماسه اشباع به‌عنوان سطح گسیختگی زمین‌لغزش می‌باشد. با توجه به شواهد موجود سنگ بستر به احتمال زیاد پایین‌تر از رس و ماسه اشباع قرار داشته باشد که به دلیل کوتاه بودن طول پروفیل امکان داده‌برداری از اعماق زیرین نبوده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از سونداژ الکتریکی در سه نقطه ۷۵، ۹۰ و ۱۰۵ متری پروفیل و تحلیل آن با استفاده از نرم‌افزار IPI2win می‌توان نتیجه گرفت که عمق سنگ بستر در مرکز پروفیل بیشتر از ۴۰ متر می‌باشد. عمق سنگ بستر در طرفین پروفیل کمتر از مرکز آن می‌باشد (شکل ۸).



شکل ۸. الف) مقطع وارون سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات پروفیل EF. مقیاس رنگی مقاومت ویژه خطی را نشان می‌دهد مقیاس فاصله قائم بر حسب ارتفاع نسبی است. ب) سونداژ الکتریکی پروفیل EF، بالا: شبه مقطع ژئوالکتریکی؛ پایین: مقطع ژئوالکتریکی.

۵-۱-۳. شرح مقطع ژئوالکتریکی پروفیل CD

این پروفیل به طول ۹۰ متر در شیب شمالی خاکریز جاده قدیمی با روش قطبی-قطبی به اجرا در آمد. تنها لایه‌های خاکریزی جاده قدیمی حدود ۱۰ متر می‌باشد که نمونه‌برداری با آرایه دوقطبی-دوقطبی به دلیل عمق نفوذ کم با توجه به محدودیت گسترش طولی پروفیل (حداکثر تا ۱۵ متر) هیچ نتیجه‌ای را به دنبال نداشت؛ بنابراین به دلیل عمق نفوذ بالا یک پروفیل را به روش قطبی-قطبی داده‌برداری نمودیم تا به عمق سنگ بستر در منطقه موردمطالعه پی ببریم. البته دقت و حساسیت پایین این آرایه از معایب آن می‌باشد. بیشترین عمق لایه‌های خاکریزی در مرکز پروفیل دیده می‌شود که حدود ۱۰ متر می‌باشد. لایه‌های خاکریزی در جاده‌سازی معمولاً از شن و ماسه متراکم تشکیل می‌شود و با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۱۰۰ الی ۲۵۰ اهم‌متری در شکل ۹ مشخص است که در محدوده مقاومت ویژه الکتریکی ذکر شده برای شن و ماسه اشباع قرار می‌گیرد. پایین‌تر از آن مخلوط شن و ماسه و رس اشباع می‌باشد که با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۵۰ اهم‌متر مشخص است. لایه سوم رس اشباع می‌باشد که از عمق ۲۰ متری تا ۴۰ متری گسترش دارد. لایه چهارم شن و ماسه اشباع می‌باشد که از عمق ۴۰ متری شروع و تا ۷۰ متری ادامه دارد. لایه بعدی سنگ بستر می‌باشد. با توجه به اینکه ضخامت لایه‌های خاکریزی جاده قدیم در محل پروفیل CD حدود ۸ الی ۱۰ متر می‌باشد سنگ بستر در حدود ۵۰ الی ۶۰ متری از کف جاده قدیمی شروع می‌شود.



شکل ۹. مقطع وارون‌سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات پروفیل CD. مقیاس رنگی مقاومت ویژه خطی را نشان می‌دهد مقیاس فاصله قائم بر حسب ارتفاع نسبی است.

۵-۱-۴. شرح مقطع ژئوالکتریکی پروفیل AB

این پروفیل به طول ۱۷۵ متر با فواصل الکترودی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر (با ضریب ۵) در پایین جاده قدیمی به روش دوقطبی-دوقطبی داده‌برداری شد. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است مرکز پروفیل محل انباشت رس می‌باشد. رس اشباع با مقاومت الکتریکی پایین‌تر از ۲۰ اهم‌متر از که با رنگ آبی از بقیه جدا شده است به‌خوبی قابل تشخیص است. در سمت چپ پروفیل بعد از یک لایه یک متری خاک کشاورزی شن و ماسه شروع می‌شود که دارای مقاومت ویژه الکتریکی بالای ۵۰ اهم‌متر می‌باشد. در سمت راست پروفیل نیز از عمق ۲ متری سطح زمین سنگ بستر شروع می‌شود که دارای مقاومت ویژه الکتریکی بالای ۵۰۰ اهم‌متر می‌باشد و حتی تا ۲۵۰۰ اهم-متر نیز می‌رسد. در مرکز پروفیل تا عمق ۲۵ متری رس اشباع وجود دارد. در مقایسه با پروفیل‌های قبلی می‌توان حدس زد لایه بعدی شن و ماسه اشباع می‌باشد. با توجه به شیب لایه شن و ماسه در سمت چپ و راست پروفیل، این لایه در مرکز از حدود ۳۰ متری شروع می‌شود. عمق سنگ بستر از تاج زمین‌لغزش (بالای جاده جدید (جنوب)) به سمت پایین پاشنه زمین‌لغزش (شمال) افزایش می‌یابد که این مسئله می‌تواند ناشی از افزایش عمق رسوبات آواری با افزایش عمق و شیب به سمت دره باشد. سطح گسیختگی زمین‌لغزش به احتمال زیاد سطح جدایش رس اشباع با شن و ماسه متراکم مرطوب باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از سونداژ الکتریکی در سه نقطه ۷۵، ۹۰ و ۱۰۵ متری پروفیل و تحلیل آن با استفاده از نرم‌افزار IPI2win می‌توان نتیجه گرفت که عمق سنگ بستر در مرکز پروفیل بیشتر از ۴۰ متر می‌باشد. عمق سنگ بستر در طرفین پروفیل کمتر از مرکز آن می‌باشد (شکل ۱۰).

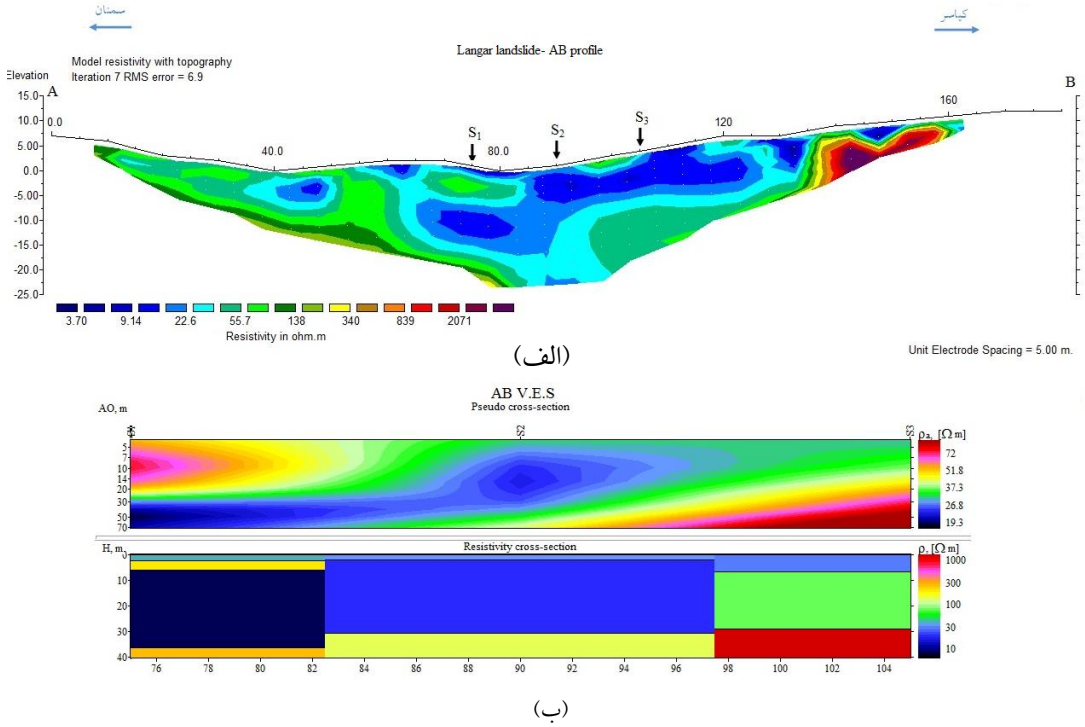
۵-۲. زمین‌لغزش تلمادره

در این زمین‌لغزش از آرایه دوقطبی-دوقطبی و قطبی-قطبی برای توموگرافی الکتریکی و همچنین از آرایه شلومبرژه برای سونداژ الکتریکی قائم استفاده شده است. در نهایت تعداد ۲ پروفیل به روش توموگرافی الکتریکی و ۲ نقطه به روش سونداژ الکتریکی قائم در محل زمین‌لغزش تلمادره کار شد که با وارون‌سازی این داده‌ها ۳ مقطع به‌دست آمد که در این بخش از گزارش آورده شده است.

۵-۲-۱. شرح مقطع ژئوالکتریکی پروفیل AB

این پروفیل به طول ۷۰ متر با فواصل الکترودی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر (با ضریب ۵) در محل زمین‌لغزش تلمادره در شانه جاده با آرایه دوقطبی-دوقطبی برداشت شد (شکل ۱۰). بر اساس این پروفیل عمق سنگ بستر بر روی جاده از حداقل ۵ متر در بین ۴۵ تا ۵۰ متر تا حداکثر ۸ متری در محل ۲۵ متر شروع می‌شود. این مقطع دارای دو سونداژ می‌باشد که به دلیل شرایط زمین‌شناسی و محدودیت، فاصله سوندازها ۱۵ متر از هم تعیین شد. نتایج

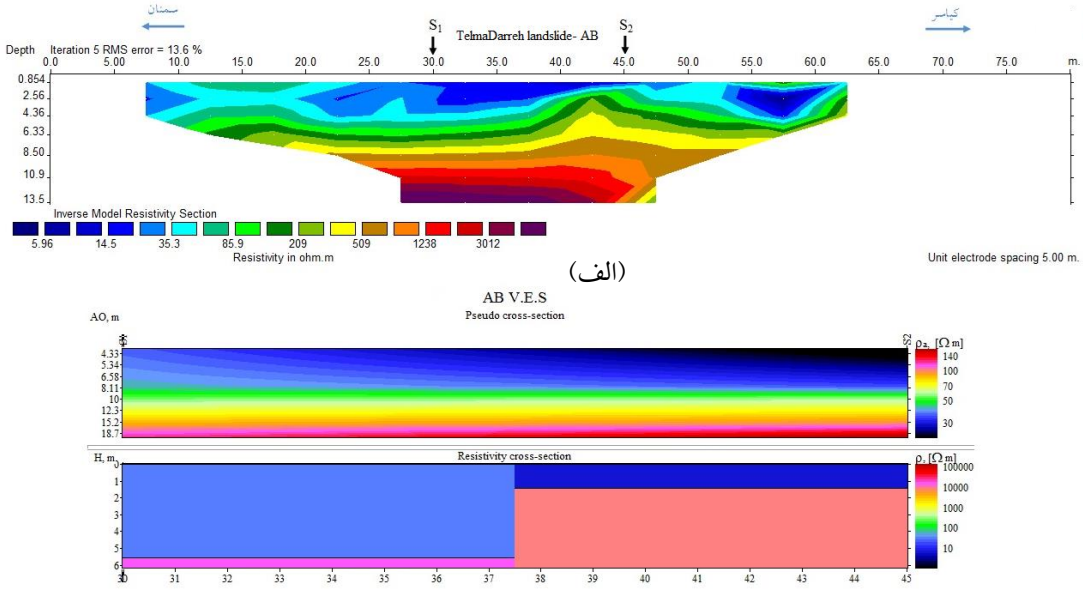
به‌دست‌آمده از سونداژ الکتریکی نیز نشان می‌دهد در ۴۵ متری سنگ بستر در حدود دو متری قرار دارد در حالی‌که در ۳۰ متری (مرکز زمین‌لغزش) در حدود ۸ متری قرار دارد (شکل ۱۱). نتایج به‌دست‌آمده از توموگرافی و سونداژ الکتریکی بر هم منطبق هستند و همدیگر را تائید می‌کنند.



(الف)

(ب)

شکل ۱۰. الف) مقطع وارون سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات پروفیل AB. مقیاس رنگی مقاومت ویژه خطی را نشان می‌دهد مقیاس فاصله قائم بر حسب ارتفاع نسبی است. ب) سونداژ الکتریکی پروفیل AB، بالا: شبه مقطع ژئوالکتریکی؛ پایین: مقطع ژئوالکتریکی.



(الف)

(ب)

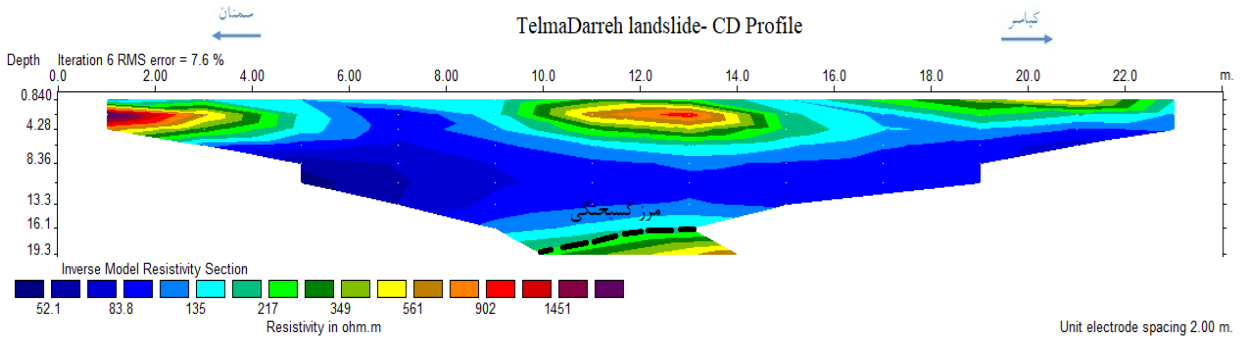
شکل ۱۱. الف) مقطع وارون سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات پروفیل AB. مقیاس رنگی مقاومت ویژه خطی را نشان می‌دهد مقیاس فاصله قائم بر حسب ارتفاع نسبی است. ب) سونداژ الکتریکی پروفیل AB، بالا: شبه مقطع ژئوالکتریکی؛ پایین: مقطع ژئوالکتریکی.

۵-۲-۲. شرح مقطع ژئوالکتریکی پروفیل CD

این پروفیل به طول ۲۴ متر در حدود ۸ متر پایین‌تر از جاده و در محل شیب خاکریز لغزشی جاده با آرایه قطبی-قطبی برداشت شد. نقاط با مقاومت ویژه الکتریکی بالا در عمق‌های نزدیک سطح زمین به احتمال زیاد قطعات جدا شده از سنگ بستر باشد. بر اساس این پروفیل سنگ بستر به احتمال زیاد در حدود ۲۰ متر پایین‌تر از خط تراز جاده قرار داشته باشد و آن را می‌توان به‌عنوان مرز گسیختگی در نظر گرفت (شکل ۱۲).

٦. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به‌منظور بررسی زمین‌لغزش‌های لنگار و تلمادره رخداده در جاده کیاسر-سمنان انجام شده است. در این مطالعه در مجموع تعداد ۶ پروفیل به روش توموگرافی الکتریکی (۴ پروفیل برای زمین‌لغزش لنگار و ۲ پروفیل برای زمین‌لغزش تلمادره) با آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-قطبی و ۱۱ سوندژ الکتریکی قائم با آرایه شلومبرژه در راستای ۴ پروفیل ذکر شده در محدوده دو زمین‌لغزش طراحی و اجرا شد. در مرحله بعد داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی Res2dinv و IPI2win به ترتیب مدل‌سازی معکوس دوبعدی و تک‌بعدی شدند. با توجه به اینکه روش ژئوالکتریک به مانند روش‌های دیگر ژئوفیزیکی به‌عنوان مکمل در کنار سایر روش‌ها مانند اطلاعات زمین‌شناسی دقیق محل و لاگ چاه‌ها و اطلاعات حفاری بکار می‌رود بنابراین یکی از مسائل مشکل‌ساز در تفسیر مقاطع به‌دست‌آمده از داده‌برداری ژئوالکتریکی در این مطالعه نبود این اطلاعات اضافی می‌باشد؛ بنابراین لازم به ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده تنها بر اساس تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد. در زمین‌لغزش لنگار با توجه به خروجی مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و زمین‌شناسی منطقه، وجود ۴ لایه اصلی در مقطع‌ها مشخص می‌شود. لایه اول با مقاومت ویژه الکتریکی خیلی پایین (کمتر از ۲۰ اهم‌متر) روی مقطع‌ها مشخص است. این لایه رس اشباع از آب می‌باشد. لایه دوم با مقاومت ویژه الکتریکی پایین (۲۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر) می‌باشد. این لایه به احتمال زیاد لایه شنی-رسی به همراه ماسه اشباع از آب می‌باشد. لایه سوم با مقاومت ویژه الکتریکی متوسط (۱۰۰ تا ۳۰۰ اهم‌متر) می‌باشد. این لایه شن و ماسه متراکم مرطوب می‌باشد. لایه چهارم دارای مقاومت ویژه الکتریکی بالا (بالاتر از ۳۰۰ اهم‌متر) می‌باشد. این لایه سنگ بستر منطقه می‌باشد. عمق سنگ بستر در طول توده لغزشی از تاج زمین‌لغزش تا پاشنه زمین‌لغزش افزایش می‌یابد به‌طوری‌که عمق در مرکز لغزش (وسط دره) از ۲۵ متر (مرکز پروفیل GH) تا ۶۰ متر (مرکز پروفیل AB) از سطح زمین متغیر است. سنگ بستر در مرکز زمین‌لغزش از کف جاده قدیم در عمق حدود ۵۰ متر الی ۶۰ متری قرار دارد. به احتمال زیاد حضور لایه رس اشباع از آب روی لایه‌ای از شن و ماسه متراکم مرطوب باعث رخداد زمین‌لغزش لنگار در منطقه شده است.



شکل ۱۲. مقطع وارون‌سازی شده به روش وارون‌سازی کمترین مربعات پروفیل CD. مقیاس رنگی مقاومت ویژه خطی را نشان می‌دهد. مقیاس فاصله قائم بر حسب ارتفاع نسبی است.

به‌طوری‌که احتمالا سطح گسیختگی از حدود ۱۲ متر در مرکز پروفیل GH شروع و با ۱۵ متر در مرکز EF ادامه و در مرکز AB به حدود ۲۵ متر می‌رسد. عمق و توپوگرافی سطح لغزش در همه مقاطع تعیین و بیان شده است. با توجه به U شکل بودن محل و افزایش عمق رسوبات در مرکز، بیشترین عمق سطح لغزش و سنگ بستر را در مرکز دره شاهد هستیم به‌طوری‌که هرچه قدر به سمت طرفین پیش می‌رویم عمق گسیختگی و سنگ بستر کاهش پیدا می‌کند. در زمین‌لغزش تلمادره در محل شانه جنوبی جاده عمق سنگ بستر از حداقل ۲ متر در مرکز زمین‌لغزش شروع و به حدود ۶ الی ۸ متری می‌رسد به‌طوری‌که سطح جدایش بین توده رس و شن و ماسه اشباع با سنگ بستر سطح گسیختگی زمین‌لغزش می‌باشد. در این محل عمق گسیختگی در مرکز زمین‌لغزش از سطح جاده حدود ۸ متر می‌باشد. با توجه به شیب‌دار بودن دامنه کوه این عمق در پایین جاده و در محل پروفیل CD به حدود ۲۰ متر از سطح جاده می‌رسد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نگارندگان بر خود لازم می‌دانند که از آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان مازندران و استان آذربایجان‌شرقی به خاطر تسهیل و همکاری در انجام برداشت‌های صحرایی قدردانی و تشکر نمایند.

منابع

آقانباتی، س. ع. (۱۳۸۳). *زمین شناسی ایران*، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

اجل لوئیان، ر.، دادخواه، ر. و حسین میرزایی، ز. (۱۳۸۸). *کاربرد زمین‌شناسی مهندسی در تونل‌ها*، انتشارات فرهیختگان علوی.

حفیظی، م. ک.، عباسی، ب. و اشتری تلخستانی، ا. (۱۳۸۹). بررسی زمین لغزش گردنه صائین اردبیل به منظور تامین ایمنی راه با روش توموگرافی الکتریکی دوبعدی و سه بعدی. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۶(۱)، ۱۷-۲۸.

درویش زاده، ع. (۱۳۸۵). *زمین‌شناسی ایران، چینه‌شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم*، انتشارات امیرکبیر.

Bruno, F., & Marillier, F. (2000). Test of highresolution seismic reflection and other geophysical techniques on the Boup landslide in the Swiss Alps. *Surv. Geophys*, 21, 333–348.

Capizzi, P., & Martorana, R. (2014). Integration of constrained electrical and seismic tomographies to study the landslide affecting the cathedral of Agrigento. *J Geophys Eng*, **11**(4), 045009.

Choobbasti, A.J., Rezaei, S., & Farrokhzad, F. (2013). Evaluation of site response characteristics using microtremors. *Gradev*, 65, 731–741.

Cruden D.M., & Varnes D. J. (1996). Landslide types and processes. In: Turner A.K.; Shuster R.L. Landslides: Investigation and Mitigation. *Transport. Res. Bd. Spec. Rep*, 247, 36-75.

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

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

Devi, A., Israil, M., Anbalagan, R., & Gupta, PK. (2017). Subsurface soil characterization using geoelectrical and geotechnical investigations at a bridge site in Uttarakhand Himalayan region. *J Appl Geophys*, 144, 78–85.

Fressard, M, Maquaire, O., Thiery, Y., Davidson, R., & Lissak, C. (2016), Multimethod characterisation of an active landslide: case study in the pays d'Auge plateau (Normandy, France). *Geomorphology*, 270, 22–39.

Grandjean, G., Gourry, J.C., Sanchez, O., Bitri, A., & Garambois, S. (2011). Structural study of the Ballandaz landslide (French alps) using geophysical imagery. *J Appl Geophys*, 75(3), 531–542.

Guerriero, L., Bertello, L., Cardozo, N., Berti, M., Grelle, G., & Revellino, P. (2017). Unsteady sediment discharge in earth flows: a case study from the mount Pizzuto earth flow, southern Italy. *Geomorphology*, 295, 260–284.

Hack, R. (2000), Geophysics for slope stability, *Surveys in Geophysics*, 21(4), 423-448.

Jongmans, D., & Garambois, S. (2007). Geophysical investigation of landslides: a review, Bulletin de la Société géologique de France, 178(2), 101-112.

Kawabata, D., & Bandibas, J. (2009). Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN). *Geomorphology*, 113, 97–109.

Kolay, P.K., Burra, S.G., & Kumar, S. (2018). Effect of salt and NAPL on elec trical resistivity of fine-grained soil-sand mixtures. *Int J Geotech Eng*, 12(1), 13–19.

Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E., & Sdao, F. (2005). D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine chain, southern Italy, *Geophysics*, 70(3), B11-B18.

Ling, C., Xu, Q., Zhang, Q., Ran, J., & Lv, H. (2016). Application of electrical resistivity tomography for investigating the internal structure of a translational landslide and characterizing its groundwater circulation (Kualiangzi landslide, Southwest China). *J Appl Geophys*, 131, 154–162.

Loke, M.H., & Barker, R.D. (1996). Rapid leastsquares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophys Prospect*, 44(1), 131–152.

Loke, M.H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo software, Penang, Malaysia.

Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., & Wilkinson, P.B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *J Appl Geophys*, 95, 135–156.

Loke, M.H. (2001). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys: RES2DINV Manual, IRIS Instruments, www.iris-instrument.com.

McCann, D., & Forster, A. (1990). Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations, *Engineering Geology*, 29(1), 59-78.

Merritt, A.J., Chambers, J.E., Murphy, W., Wilkinson, P.B., West, L.J., Gunn, D.A., Meldrum, P.I., Kirkahm, M., & Dixon, N. (2014). 3D ground model development for an active landslide in Lias mudrocks using geophysical, remote sensing and geotechnical methods. *Landslides*, 11, 537–550.

Oh, S., & Sun., C.G. (2008). Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. *Environ Geol*, 54, 31–42.

Patella, D. (1997). Introduction to ground surface self-potential tomography, *Geophys. Prospect*, 45, 653– 681.

Perrone, A., Iannuzzi, A., Lapenna, V., Lorenzo, P., Piscitelli, S., Rizzo, E., & Sdao, F. (2004). High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 56, 17-29.

Perrone, A., Zeni, G., Piscitelli, S., Pepe, A., Loperte, A., Lapenna, V., & Lanari, R.(2006). Joint analysis of SAR interferometry and electrical resistivity tomography surveys for investigating ground deformation: the case-study of Satriano di Lucania (Potenza, Italy). *Eng. Geol*. 88, 260-273.

Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S., (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review. *Earth-Sci Rev*, 135, 65–82.

Rezaei, S., & Choobbasti, A.J. (2017). Application of microtremor measurements to a site effect study. *Earthq Sci*. https://doi.org/10.1007/ s11589-017-0187-2.

Rezaei, S., Choobbasti, A.J., Soleimani, & Kutanaei, S. (2015). Site effect assessment using microtremor measurement, equivalent linear method and artificial neural network (case study: Babol, Iran). *Arab J Geosci*, 8, 1453–1466.

Rezaei, S., Shooshpasha, I., & Rezaei, H. (2018). Evaluation of landslides using ambient noise measurements (case study: Nargeschal landslide). *Int J of Geotech Eng*, https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1431354.

Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., Maurer, H., Wagner, F.M., Johnson, T.C., & Chambers, J.E. (2018). Optimized survey design for electrical resistivity tomography: combined optimization of measurement configuration and electrode placement. *Geophys J Int*, https://doi.org/10. 1093/gji/ggy128

Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes, in R.L. Schuster and R.J. Krizek (eds.), Landslides: Analysis and Control, Nat'l. Res. Council, Wash., D.C., Transport. Res. Bd. Spec. Rep, 176, 11-33.

www.ngdir.ir.

Zhou, W., Beck, B. F., & Adams, A. L.(2002). Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology*, 42, 922-928.

Yannah, M., Martens, K., Van Camp M., & Walraevens, K. (2017). Geophysical exploration of an old dumpsite in the perspective of enhanced landfill mining in Kermt area, *Belgium. B Eng Geol Eenviron*. https:// doi.org/10.1007/s10064-017-1169-2.