

بررسی زمین لغزش گردنه صائین اردبیل به منظور تأمین ایمنی راه با روش توموگرافی الکتریکی دو بُعدی و سه بُعدی

محمد کاظم حفیظی^{۱*}، بهمن عباسی^۲ و احمد اشتری تلخستانی^۳

^۱ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوالکتریک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران
^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوالکتریک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۴/۵، پذیرش نهایی: ۸۸/۲/۲۲)

چکیده

بررسی زمین لغزش‌ها در مناطقی که از لحاظ توپوگرافی و اقلیمی دارای پتانسیل لغزش هستند، به منظور کاهش خسارات در بررسی‌های اولیه پروژه‌های عمرانی مخصوصاً سازه‌های خطی از اهمیت بسزایی برخوردار است. به همین منظور پس از وقوع زمین لغزش خردادماه سال ۱۳۸۴ صائین اردبیل که موجب از بین رفتن قسمتی از جاده نیر- سراب شد، تحقیقات توموگرافی ژئوالکتریک دو بُعدی برای تشخیص توده ناپایدار در محل 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 داده‌های حاصل از سونداژ ژئوالکتریک با روش وارون‌سازی دو بُعدی و سه بُعدی بلوکی مورد تفسیر قرار می‌گیرد که به خوبی قادر به تشخیص گسترش هندسی زمین لغزش و سطح لغزش است. براین اساس محل عبور سازه خطی که ایمنی لازم را داشته باشد پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: زمین لغزش، توموگرافی الکتریکی، وارون‌سازی بلوکی، روش کمترین مربعات، سطح لغزش

Safety assessment of landslides by electrical tomography: A case study from Ardabil, Northwestern Iran

Hafizi, M. K.¹, Abbassi, B.² and Ashtari Talkhestani, A.³

¹Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²M.Sc. Student of Geoelectric, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³M.Sc. Student of Geoelectric, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 25 June 2008, Accepted: 12 May 2009)

Abstract

Introduction: Occurrence of landslides depends on several factors such as the composition and structure of earth materials, rainfall level, temperature, groundwater regime and cover crops. Landslides are a main natural hazard in Iran, because of its special geological conditions and its mountainous active tectonic regime. Linear civil structures, such as roads, highways and railways, face serious problems in Iran, because of their long length which exposes them to several various geological features. For analyzing the stability of these structures, several geophysical methods, such as electrical tomography methods are frequently used. The main purposes of geophysical surveys are reconstruction of landslide geometry, detection of sliding surface (between sliding mass and bed rock), and exploration of the groundwater flow regime which is a stimulant factor before landslide occurrence.

Regional Geology: Based on the geological map of Sarab (1:100000), Rhyolitic and Dacitic lavas form the bed rock of the region with basaltic highlands. A major portion of road on the path consisted of alluvial river terraces and their great ability to absorb water which caused muddy materials to overflow and spontaneously move towards the valley. The main reason for this hazard is the base loss in down range. The landslide occurred several years after the utilization of the road, indicating the involvement of another factor which is the increase in intense rainfall during the previous months. This causes the region's high vulnerability and lack of base, during landslides.

Electrical Tomography: Electrical tomography or electrical resistivity tomography (ERI) is a geophysical technique for imaging sub-surfaces structures (sliding surface in this case) from electrical measurements made at the surface or boreholes. So the first stage in our electrical tomography was sending an electric current into the ground and then measuring the response of the earth in voltage. In the next step for building the inversed resistivity model, the algorithms of well know software Res2dinv (for making two-dimensional inversed model) and Res3dinv (for making three-dimensional inversed model) was used.

A simple way to utilize blocky inverse modeling is the application of the ordinary least square equations. In this method, the model that best fits the data is achieved through a method of optimization.

Discussions and Conclusion: The Schlumberger array was used for data acquisition. From 99 soundings which were carried out in this area, 90 soundings are selected for inversed modeling in 6 profiles. Due to the high noise levels in the surface, more damping (attenuation) coefficient was considered for surface data. Subsurface materials due to water absorption have more moisture with low resistivity, in contrast with the mass above the sliding surface, with relatively higher resistivity. 2D Electrical Tomography generally shows the location of Landslide Valley that can be seen most particularly in place of resistivity profiles P4 and P5. 3D Electrical Tomography has also been used for acquiring a 3D view from the sliding surface. In these models, the sliding surface is at depths up to 60m. Application geotechnical data may improve the inverse modeling images for upcoming exploration programs.

Key words: Landslide, Electrical Tomography, Blocky inversion, Least square method, Sliding surface

۱ مقدمه

در مناطقی که زاویه شیب توپوگرافی از زاویه آستانه اصطکاک خاک بیشتر شود، وقوع زمین لغزش محتمل است. عوامل مؤثر در زمین لغزش عبارتند از ساخت و جنس زمین شناسی، بارش باران، درجه حرارت و تغییرات آن، آب های زیرزمینی و پوشش گیاهی. وارنز (۱۹۷۸) طبقه بندی جدیدی عرضه کرد که در آن زمین لغزش ها براساس پارامترهای ثابتی تقسیم بندی شده بودند (جدول ۱). طبقه بندی وارنز بر دو مینا استوار است: الف) نوع حرکت مواد و ب) نوع مواد درگیر در حرکت.

این طبقه بندی تاکنون در حکم ساده ترین و رایج ترین نوع دسته بندی زمین لغزش ها در سراسر دنیا به کار رفته است. کرودن و وارنز (۱۹۹۶) تصحیحی روی تقسیم بندی قدیمی عملی ساختند که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. البته طبقه بندی های دیگری نیز وجود دارد که متغیرهای بیشتری نظیر سرعت حرکت و محتوای آب، هوا و یخ زدگی مصالح را دخالت داده اند. در شکل ۲ تصویری طرحوار از یک اسلامپ (براساس تقسیم بندی وارنز، یک

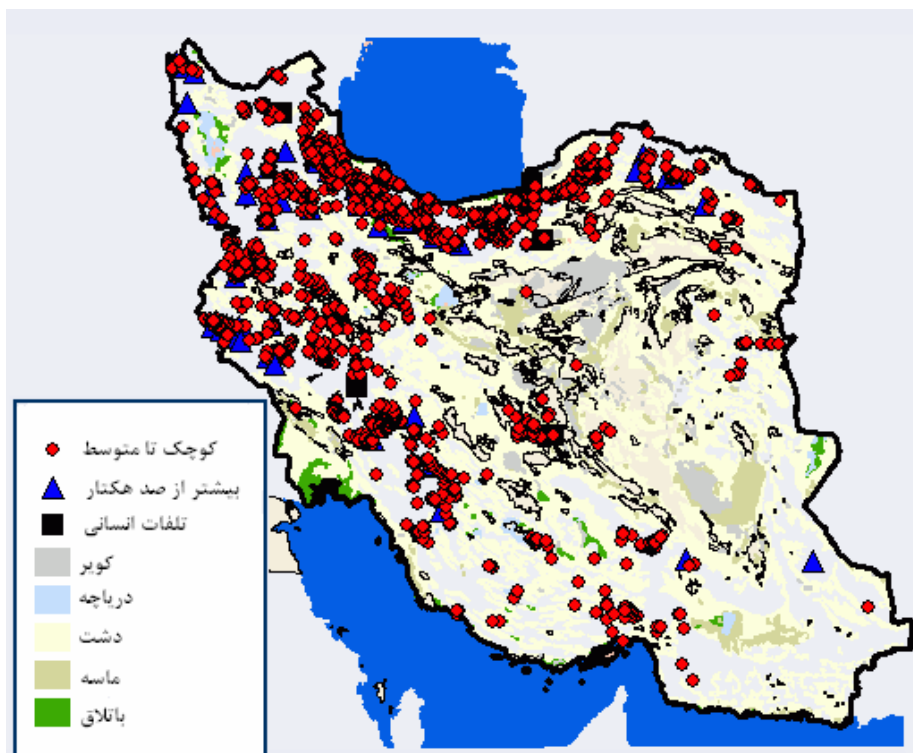
حاصل از زمین لغزش‌ها، هنگام بهره‌برداری از سازه‌های خطی، نتیجه حذف کردن یا بی‌توجه بودن به پارامترهای زمین‌شناختی مؤثر بر این سازه‌ها هنگام انتخاب مسیر (ساختگاه) است.

روش‌های ژئوفیزیکی متفاوتی برای بررسی پدیده‌های ژئوتکنیکی وجود دارد. به‌ویژه روش‌هایی نظیر لرزه‌ای، ژئوالکتریکی، ژئومغناطیسی، گرانی‌سنجی، زمین‌گرماسنجی و GPS از مهم‌ترین روش‌ها در بررسی زمین لغزش‌ها هستند. اهداف کاوش‌های ژئوفیزیکی را می‌توان در سه مورد خلاصه کرد (برونو و ماریلر، ۲۰۰۰) (۱) بازسازی هندسه توده زمین لغزیده (گسترش جانبی و ضخامت آن). (۲) تشخیص سطح لغزش (sliding surface) بین توده زمین لغزیده و سنگ بستر زیرین. (۳) بررسی حرکت و تجمع شار آب زیرزمینی که می‌تواند

نوع لغزش دورانی) با مشخصات فیزیکی‌اش نشان داده شده است که معمول‌ترین نوع زمین لغزش است.

در ایران، زمین لغزش‌ها همیشه مشکل آفرین بوده‌اند (شکل ۱). ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین لغزش‌ها را دارد. این پدیده همه‌ساله در اکثر استان‌های کشور موجب خسارت‌های اقتصادی فراوانی به صنعت، جنگل‌ها و مراتع، مزارع و خانه‌های مسکونی می‌شود.

تأثیر زمین لغزش‌ها بر سازه‌های خطی (نظیر جاده‌ها، بزرگراه‌ها و راه‌آهن) به‌علت طولیل بودن و عبور از مناطق متفاوت با خصوصیات زمین‌شناختی متفاوت، بیش از سازه‌های متمرکز است. خسارت‌های جانی و مالی



شکل ۱. نقشه پراکنندگی زمین لغزش‌های ایران (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین).

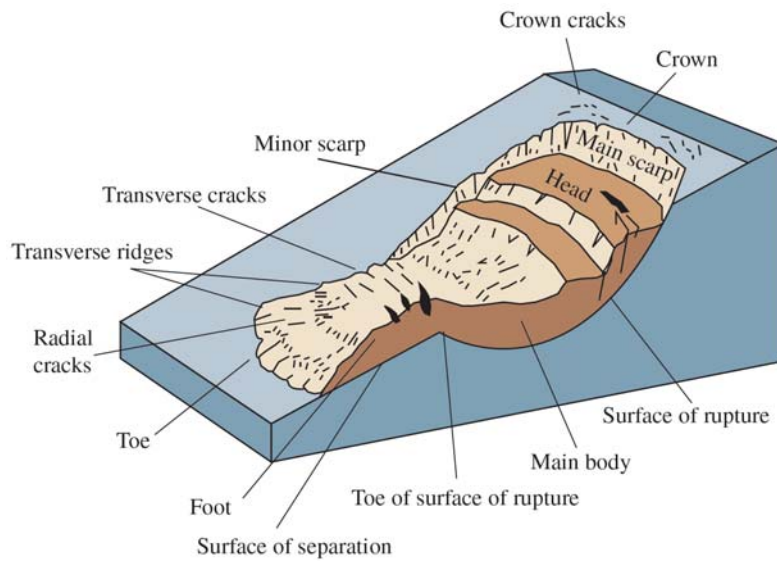
جدول ۱. دسته‌بندی زمین لغزش‌ها بر مبنای طبقه‌بندی کروند و وارنز (۱۹۹۶).

Type of movement		Type of material			
		Bedrock	Engineering soils		Predominantly coarse
			Predominantly fine		
Falls		Rockfall	Earth fall	Debris fall	
Topples		Rock topple	Earth topple	Debris topple	
Slides	Rotational	Rock slump	Earth slump	Debris slump	
	Translational	Few units	Rock block slide	Earth block slide	Debris block slide
		Many units	Rock slide	Earth slide	Debris slide
Lateral spreads		Rock spread	Earth spread	Debris spread	
Flows		Rock flow	Earth flow	Debris flow	
		Rock avalanche		Debris avalanche	
		(Deep creep)	(Soil creep)		
Complex and compound		Combination in time and/or space of two or more principal types of movement			

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 کنند.

از نظر الکتریکی، بی‌هنجاری‌های مقاومت‌ویژه کم ممکن است به دلیل محتوی 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. امروزه از روش‌های ژئوفیزیکی در بررسی اثر زمین لغزش، چه در زمینه سازه‌های متمرکز (دراهور، ۲۰۰۶)، و چه در زمینه سازه‌های خطی یانگ (۲۰۰۴) استفاده گسترده شده است.

محرک زمین لغزش باشد. بررسی‌های اخیر توجه زیادی به روش‌های ژئوالکتریکی نظیر روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (کلربوت و معیر، ۱۹۷۳؛ گیانو و همکاران، ۲۰۰۰؛ گریفیت و بارکر، ۱۹۹۳؛ لوک و بارکر، ۱۹۹۶؛ رویل و همکاران، ۲۰۰۲ و ویلماز، ۲۰۰۷) و روش پتانسیل خودزا (کلربوت و معیر، ۱۹۷۳؛ لوک، ۱۹۹۹؛ کروند و وارنز، ۱۹۹۶ و پرونا و همکاران، ۲۰۰۴) معطوف کرده است. هر دوی این روش‌ها دارای قدرت تفکیک زیاد، قابلیت برداشت سریع داده‌ها و هزینه‌های اندک هستند. به‌علاوه روش‌های مدل‌سازی وارون 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.



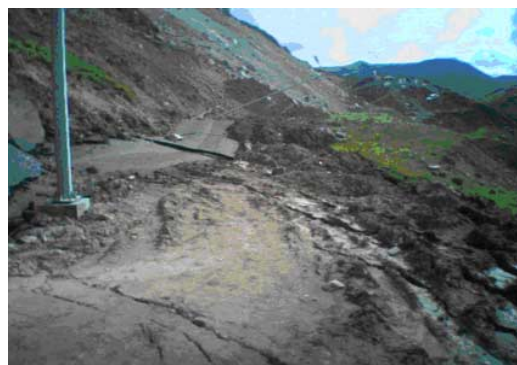
شکل ۲. اسلامپ، معمول‌ترین نوع زمین لغزش (USGS).

۲ مشاهدات

در تاریخ ۱۶ خرداد ماه ۱۳۸۴ و در ساعت ۲۱، زمین لغزشی نسبتاً بزرگ در ۱۲ جاده نیر- سراب استان اردبیل به وقوع پیوست. طول و عرض جغرافیایی این زمین لغزش به ترتیب ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه و ۳۷ درجه و ۵۹ دقیقه است. محل وقوع این زمین لغزش در حاشیه غربی یکی از سرشاخه‌های رودخانه بالیخلوچای است. به دنبال زمین لغزش، ۶ دستگاه خودرو به داخل دره پرتاب شد و در اثر حادثه ۱ نفر جان خود را از دست داد. در حدود ۳۵۰ متر از جاده ارتباطی نیر- سراب نیز به کلی تخریب شد و حدود ۱۰۰ میلیارد ریال خسارت به بارآمد.

(شکل ۳).

همان‌طور که در عکس ماهواره‌ای منطقه دیده می‌شود (شکل ۴)، زمین لغزش باعث تغییر مسیر جاده شده است. برای به دست آوردن بهترین مسیر (کوتاه‌ترین مسیر ممکن) که ایمنی راه را هم تضمین کند، از کاوش‌های ژئوالکتریکی استفاده شده است. به این ترتیب مناطق دارای پتانسیل زمین لغزش و خاک ناپایدار مشخص شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تعمیر جاده بر این مبنا و همچنین حفاری‌های ژئوتکنیکی صورت گرفته است.



شکل ۳. تخریب جاده و واژگونی تیرهای روشنایی به علت زمین لغزش (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین).



شکل ۴. عکس ماهواره‌ای منطقه. تاثیر وقوع زمین لغزش بر تغییر مسیر جاده به وضوح مشخص است (Google Earth).

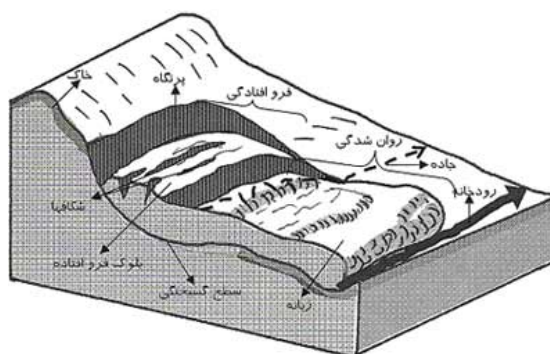
۱-۲ زمین‌شناسی منطقه

شد تا مواد زیرین جاده به هنگام وقوع لغزش حالت روانه گلی به خود بگیرند و به صورت زبانه به سمت دره حرکت کنند. در بالادست این زمین لغزش، پدیده افتادگی زمین (slump) به خوبی دیده می‌شود و در پایین دست آن نوعی روان‌گرایی دیده می‌شود که دارای حرکت برشی-چرخشی است و صفحه لغزش به صورت قاشقی است (شکل‌های ۲ و ۵). مقدار جابه‌جایی مواد در جهت افقی، براساس مقدار جابه‌جایی صورت گرفته در جاده، بین ۱۰ تا ۲۰ متر و در جهت عمودی بین ۱ تا ۷ متر است.

براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ سراب، سنگ بستر منطقه از نوع گدازه‌های ریولیتی و داسیتی و در ارتفاعات بالادست آن بازالتی است. محل وقوع زمین لغزش نیز از سنگ‌های آذرآواری و به‌طور عمده پومیس تشکیل شده است. لایه‌ای ضخیم از مارن آهکی و خاک که در برخی قسمت‌ها ضخامت آن به بیش از ۱۰ متر می‌رسد، سطح دامنه را پوشانده است. جاده در قسمت عمده‌ای از مسیر روی تراس آبرفتی کناره رودخانه احداث شده بود (شکل ۵-الف و ب) و قابلیت زیاد آن برای جذب آب موجب



شکل ب



شکل الف

شکل ۵. زمین لغزش حاصل از احداث جاده روی تراس رودخانه. الف) شکل طرحوار این پدیده و ب) نمایی واقعی از این پدیده در منطقه. پرتگاه زمین لغزش و منطقه روان شدگی به خوبی در عکس قابل مشاهده است (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین).

به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های نیم‌رخ‌های دوبعدی در کنار هم قرار داده شده‌اند و با استفاده از نرم‌افزار Res3dinv روی آنها وارون‌سازی سه‌بعدی صورت گرفته است.

به دلیل آنکه محل تماس (کنتاکت) سطح لغزش، یک مرز ناگهانی (sharp) است، برای مدل‌سازی وارون از روش وارون‌سازی بلوکی (blocky inversion) استفاده شده است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). به‌طور کلی، گاهی زمین‌شناسی زیرسطحی متشکل از تعدادی ناحیه همگن است که با مرزهای تیزی از هم جدا شده‌اند. در چنین مواردی، سعی می‌شود تغییرات مطلق مقادیر مقاومت ویژه مدل کمینه شود (کلربوت و معیر، ۱۹۷۳). یک راه ساده برای به‌کاربردن روش وارون‌سازی بلوکی در معادلات حداقل مربعات معمولی، کاربرد روش حداقل مربعات دگربار-وزن‌داده‌شده به صورت تکراری (iteratively reweighted least - squares method) است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). مدلی که بهترین برازش را با داده‌های واقعی داشته باشد از راه یک روش بهینه‌سازی به‌دست می‌آید. معادله این روش بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\left(J^T J + \lambda F_R \right) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k$$

$$F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z$$

Δq عبارت است از بردار تغییر پارامتر مدل. C_x ، C_y و C_z ماتریس‌های هموارکننده در جهت‌های x ، y و z هستند. α_x ، α_y و α_z نیز، وزن‌های نسبی داده شده به فیلترهای هموارکننده در جهت‌های x ، y و z هستند. R_m و R_d ماتریس‌های وزن دهنده‌اند و طوری تعیین می‌شوند که در فرایند وارون‌سازی، مولفه‌های گوناگون بردارهای مدل ناهموار (roughness vector) و داده‌های ناجور (data misfit vector) وزن‌های مشابهی داشته باشند (لوک و بارکر، ۱۹۹۶ و لوک، ۱۹۹۹). λ

دلیل اصلی این‌گونه زمین‌لغزش‌ها، از بین رفتن تکیه‌گاه دامنه در پایین‌دست آن است با این حال این زمین‌لغزش در گروه لغزش‌های طبیعی طبقه‌بندی می‌شود (پدرام، ۱۳۷۳). وقوع این زمین‌لغزش در چندین سال بعد از بهره‌برداری از جاده، حاکی از دخالت عامل دیگری نیز هست. افزایش بارندگی شدید در طول ماه‌های گذشته زمینه را برای وقوع این حادثه فراهم ساخته و با توجه به بالا بودن آسیب‌پذیری منطقه و نداشتن تکیه‌گاه، بخشی از دامنه دچار زمین‌لغزش شده است. این عامل همراه با قرارگیری دامنه در کنار رودخانه و فرسایش دیواره رود با آب، آسیب‌پذیری دامنه را افزایش داده است.

۳ روش کار

توموگرافی به معنی تشخیص یک توده بی‌هنجاری در زیر یک سطح است. 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 برحسب ولتاژ اندازه گرفته می‌شود.

در مرحله بعد، برای وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه، از نرم‌افزارهای Res2dinv (برای وارون‌سازی دوبعدی) و Res3dinv (برای وارون‌سازی سه‌بعدی) استفاده شده است. برای رسم نقشه‌ها و مقاطع نیز از نرم‌افزارهای سرفر (Surfer) و اسلایسردایسر (Slicer Dicer) استفاده شده است. داده‌های مقاومت ویژه در نرم‌افزار Res2dinv به صورت آرایه عمومی (General array) داده شده است. در این روش مختصات هر الکترود به نرم‌افزار داده می‌شود و نرم‌افزار صرف‌نظر از نوع آرایه به‌کار رفته در کار صحرائی، به مدل‌سازی وارون (inverse modeling) می‌پردازد (لوک، ۱۹۹۹). سپس

توپوگرافی زمین لغزش انتخاب شده‌اند تا جریان به طور یکنواخت و بدون تاثیر توپوگرافی به درون زمین نفوذ کند.

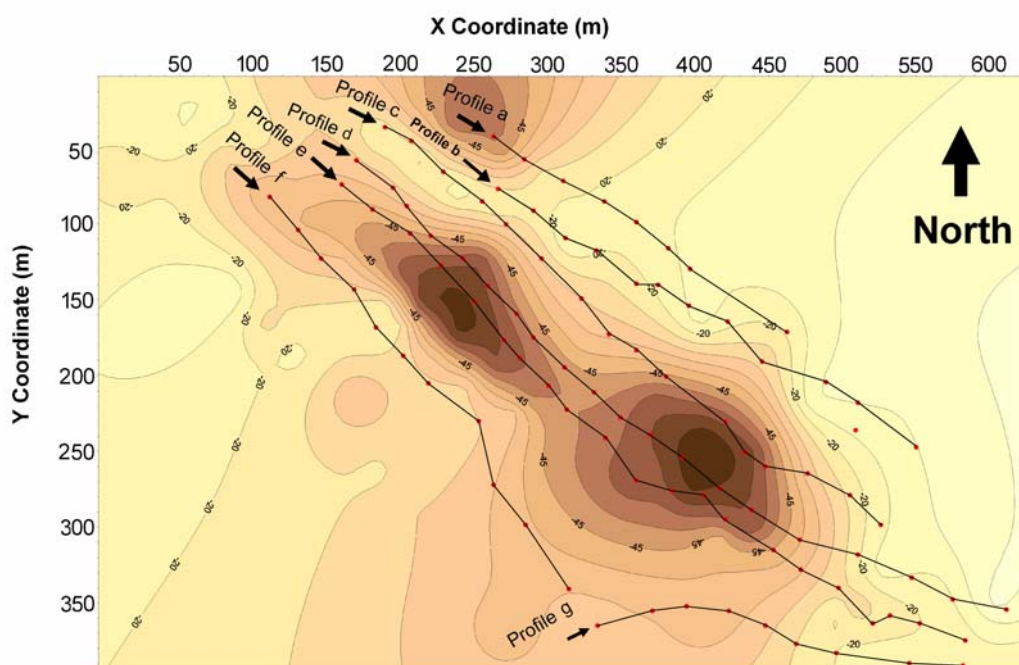
به دلیل مقادیر زیاد نوفه در داده‌های سطحی، ضریب میرایی بیشتری برای این داده‌ها در نظر گرفته شده است (ضریب در هر دو حالت دو و سه‌بُعدی، ضریب ۲ در نظر گرفته شده است). از این جهت که محل تماس سطح لغزش، یک مرز نیمه‌قائم است، در وارون‌سازی دو بُعدی، هموارسازی در راستای قائم، ۱٫۵ برابر راستای افقی صورت گرفته است ($\alpha_z/\alpha_x = 1.5$). در وارون‌سازی سه بُعدی به دلیل آنکه در راستای Y پوشش داده‌ای کمتر است، هموارسازی در این راستا باید کمتر صورت گیرد. بنابراین برای هموارسازی، وزن‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\alpha_z = 1.5 \text{ و } \alpha_y = 0.75, \alpha_x = 1$$

عبارت است از ضریب مارکوآرت (Marquardt) یا ضریب میرایی (damping). ضریب میرایی، محدوده تغییراتی را که Δq می‌تواند داشته باشد، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶ و لوک، ۱۹۹۹). هرچه میزان نوفه زمینه بالاتر باشد، باید ضریب میرایی بالاتری را بکاربرد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶ و لوک، ۱۹۹۹).

۴ بحث

برای این کار از آرایه شلومبرژه برای برداشت صحرائی استفاده شده است. با استفاده از دستگاه فرستنده جریان مدل SAS-300C، ساخت کارخانه ABEM سوئد، تعداد ۹۹ سونداژ در این منطقه کار شده که از این تعداد ۹۰ سونداژ در قالب ۶ نیم‌رخ در این مقاله آورده شده است (شکل ۶). گسترش‌های الکترونی در جهت عمود بر شیب



شکل ۶. نقشه توپوگرافی منطقه و موقعیت نیم‌رخ‌ها و سونداژها. از داده‌های نیم‌رخ g در این مقاله استفاده نشده است.

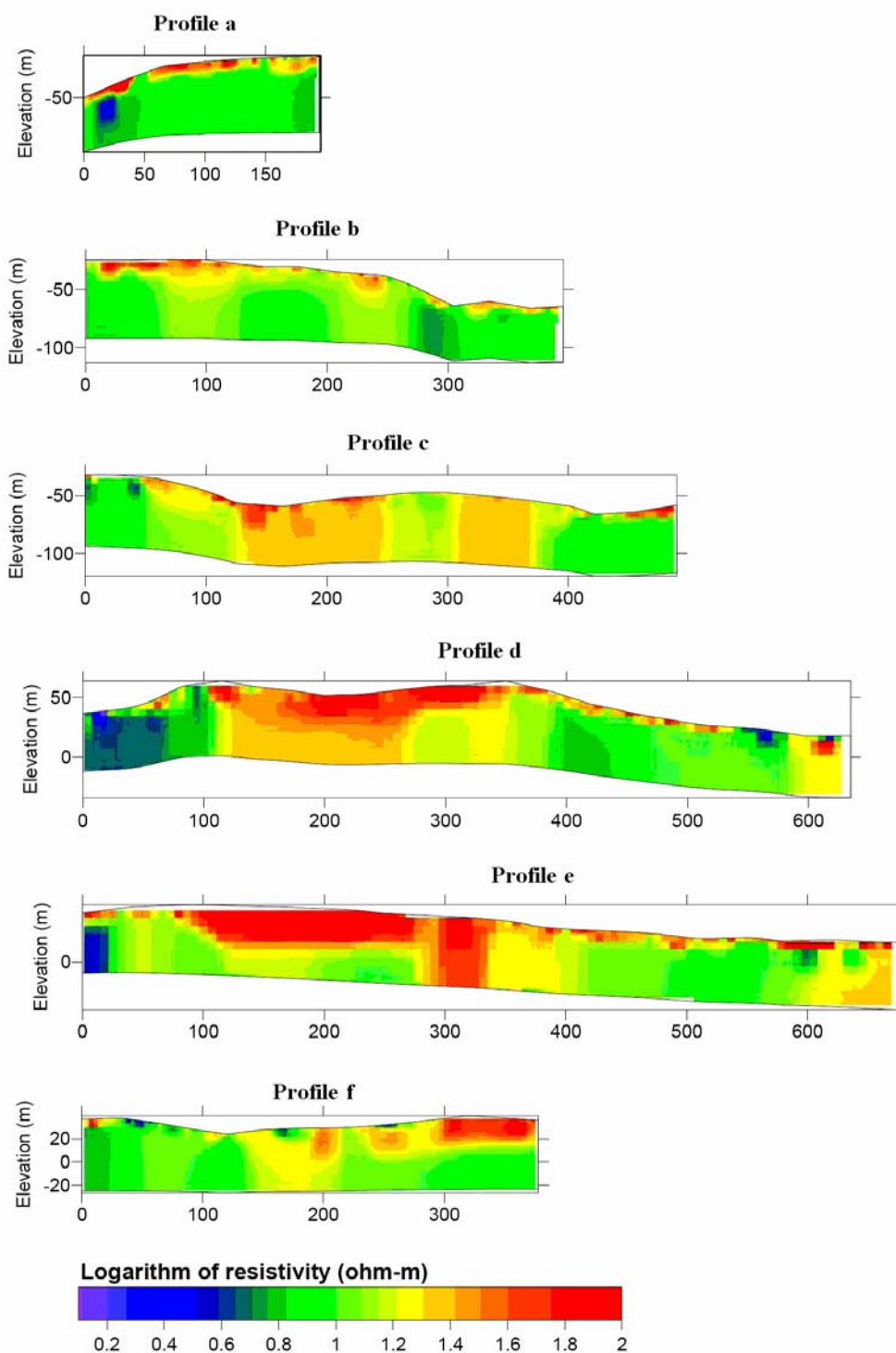
شکل سمت راست، برای نشان دادن مرز دقیق سطح لغزش، اثر تقاطع سطح لغزش با صفحه افقی به صورت مرز سیاه- سفید نشان داده شده است. مرز بین سیاه و سفید آنقدر تغییر داده شده است تا شکل بهینه سطح لغزش به دست آید (هندسه‌ای مشابه شکل ۲). شکل بهینه سطح لغزش برای مرز ۱۶ اهم- متر به دست آمده است. بر این اساس همان‌طور که دیده می‌شود، سطح لغزش تا اعماق حدود ۶۰ متر امتداد دارد.

۵ نتیجه‌گیری

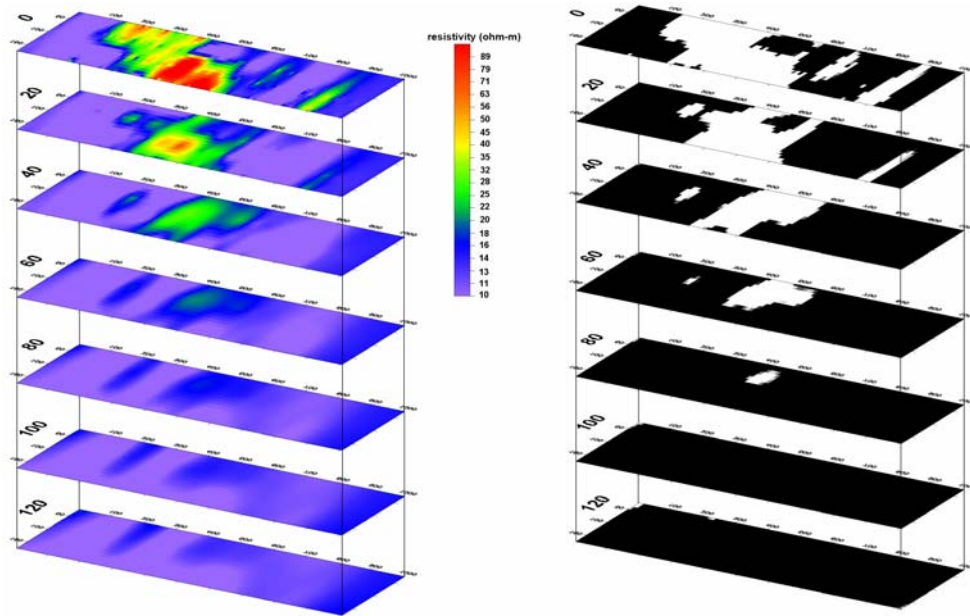
پس از زمین لغزش خرداد ماه ۱۳۸۴ صائین اردبیل نتایج به دست آمده از توموگرافی الکتریکی به منظور بررسی و تعیین محل امن عبور جاده نیر- سراب به کار گرفته شد. نتایج حاکی از موفقیت این روش در بازسازی هندسه توده زمین لغزیده است. گسترش سطح لغزش محاسبه شده به روش توموگرافی الکتریکی، حداکثر تا اعماق ۶۰ متری است. مقاومت ویژه بهینه سطح لغزش در مرز ۱۶ اهم- متر در نظر گرفته شده است. در حالت دو بُعدی برای تعیین این مرز، به دلیل بروز عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های دو بُعدی، بهتر است از داده‌های گمانه‌ای نیز استفاده شود. با دانستن اینکه مرز سطح لغزش از نظر مقاومت ویژه یک مرز ناگهانی است، می‌توان از روش وارون‌سازی بلوکی برای مدل‌سازی استفاده کرد که این روش تا حدودی عدم قطعیت را در مدل‌سازی دو بُعدی کاهش می‌دهد. همچنین در این تحقیق از وارون‌سازی بلوکی سه بُعدی نیز استفاده شده است که باز هم تا حدود بسیار زیادی، مدل‌سازی را بی‌نیاز از داده‌های گمانه‌ای می‌سازد و قطعیت مدل نهایی را افزایش می‌دهد.

در شکل ۷، مقاطع حاصل از وارون‌سازی دو بُعدی به روش کمترین مربعات آورده شده است (لوک و بارکر، ۱۹۹۶ و لوک، ۱۹۹۹). سطح لغزش، خود را در مرز رنگ‌های زرد و سرخ نشان داده است، یعنی مقاومت ویژه‌های حدود ۴۰ اهم- متر. مواد زیر سطح لغزش به علت جذب آب و رطوبت بیشتر دارای مقاومت ویژه کمتری هستند در صورتی که توده‌های بالای سطح لغزش، دارای مقاومت ویژه نسبی بیشتری‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین مقاومت ویژه در محل نیم‌رخ‌های d و e دیده می‌شود، که منطبق با محل دره حاصل از زمین لغزش است. در واقع، به علت لغزش توده مقاوم در این محل، این توده در سطح زمین پدیدار شده است. در نیم‌رخ a، قسمت ابتدای نیم‌رخ یک بی‌هنجاری رسانا را نشان می‌دهد. در انتهای نیم‌رخ b، یک ناحیه رسانا دیده می‌شود که به نظر در اثر وقوع زمین لغزش از بخش مقاوم جدا شده است. خصوصیات الکتریکی سطح لغزش در نیم‌رخ‌های c و d در ظاهر چندان واضح نیست. به نظر می‌رسد که سطح لغزش حالت یکنواخت ندارد. پیشنهاد می‌شود برای بررسی‌های دقیق‌تر، از اطلاعات ژئوتکنیکی منطقه برای بهینه‌سازی نتایج الکتریکی استفاده شود. در نیم‌رخ e کتراست دوسوی سطح لغزش کم شده است، که این می‌تواند به دلیل تغییر شکل پلاستیک زمین و انباشته شدن طبقات در پایین دست به صورت روان‌گرایی باشد. در نیم‌رخ f نیز شیب توپوگرافی کمتر شده و عمق سطح لغزش کاهش یافته است.

در شکل ۸ نیز نتایج مدل‌سازی وارون سه بُعدی آورده شده است. مقاطع افقی برای فواصل عمقی ۲۰ متری آمده است (شکل سمت چپ). قسمت مرکز مقاطع تا عمق ۶۰ متری دارای مقاومت ویژه ۳۰ تا ۹۰ اهم- متر است که از رسوبات مارن آهکی سطحی لغزیده ناشی می‌شود. این رسوبات مارن آهکی روی رسوبات رسی زیرین با مقاومت ویژه حدود ۱۰ اهم- متر قرار گرفته است. در



شکل ۷. مقاطع وارون‌سازی شده به روش وارون‌سازی بلوکی. مرز سرخ - زرد، محل تقاطع سطح لغزش با صفحه قائم مقاطع را نشان می‌دهد. مقیاس رنگی، لگاریتم مقاومت ویژه را نشان می‌دهد. مقیاس فاصله قائم برحسب ارتفاع نسبی است.



شکل ۸. مقاطع افقی برای فواصل عمقی ۲۰ متری. بیشینه مقاومت ویژه مدل، ۹۰ اهم-متر است که در دره زمین‌لغزش دیده می‌شود. به‌علاوه عمق سطح لغزش در دره زیاد، و به سمت ارتفاعات کمتر می‌شود. در سمت راست نیز مرز سطح لغزش (مقاومت ویژه ۱۶ اهم-متر) در مقاطع افقی با رنگ‌های سیاه و سفید نشان داده شده است. مقیاس قائم و افقی یکسان نیست.

منابع

- ملی داده‌های علوم زمین کشور.
- پدرام، ح.، ۱۳۷۳، نظری به زمین‌لغزش‌های ایران، علل وقوع و نحوه پراکندگی آنها: مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بررسی راهبردهای کاهش خسارات زمین‌لغزش در کشور، صفحه ۳۶۵ - ۳۸۹.
- پایگاه ملی داده‌های علوم زمین: www.ngdir.com.
- کمک پناه، ع.، منتظرالقائم، س.، و چدنی، ا.، ۱۳۷۳، زمین‌لغزش و مروری بر زمین‌لغزش‌های ایران - جلد اول، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- مختاری، د.، ۱۳۸۴، گزارش مقدماتی از زمین‌لغزش ۱۶ خردادماه ۱۳۸۴ در مسیر جاده نیر- سراب، استان اردبیل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تبریز.
- نصیری، ش.، ۱۳۸۳، نگرشی بر زمین‌لغزش‌های ایران: بررسی موردی ناپایداری شیب‌ها در جاده هراز: پایگاه
- Bogoslovsky, V.A. and Ogilvy, A.A., 1977, Geophysical methods in the investigation of landslides, *Geophysics*, **42**, 562- 571.
- Bruno, F. and Marillier, F., 2000, Test of high-resolution seismic reflection and other geophysical techniques on the Boup landslide in the Swiss Alps, *Surv. Geophys*, **21**, 333-348.
- Claerbout, J.F., and Muir, F., 1973, Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, **38**, 826-844.
- Cruden D.M. and Varnes D. J., 1996, - Landslide types and processes. In: Turner A.K.; Shuster R.L. (eds) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transport. Res. Bd. Spec. Rep. **247**, pp 36-75.
- Drahor, M.G., 2006, Application of electrical resistivity tomography technique for investigation of landslides: a case from Turkey, *J. Environ. Geol*, **50** (2).
- Giano, S.I., Lapenna, V., Piscitelli, S. and Schiattarella, M., 2000, Electrical imaging and self-potential surveys to study the geological

- setting of the Quaternary slope deposits in the Agri high valley (Southern Italy), *Ann. Geofis.*, **43**, 409–419.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D., 1993, Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology, *J. Appl. Geophys.*, **29**, 211–226.
- Loke, M.H., 1999, Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least squares method, Software manual, <http://www.abem.se>.
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophys. Prospect.*, **44** (1), 131–152.
- Patella, D., 1997, Introduction to ground surface self-potential tomography, *Geophys. Prospect.*, **45**, 653–681.
- Perronea, A., Iannuzia, A., Lapenna, V., Lorenzob, P., Piscitellia, S., Rizzoa, E. and Sdaob, F., 2004, High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy), *J. Appl. Geophys.*, **56**, 17–29.
- Revil, A., Hermitte, D., Voltz, M., Moussa, R., Lacas, J.G., Bourrie', G. and Trolard, F., 2002, Self-potential signals associated with variations of the hydraulic head during an infiltration experiment, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (7), 1106.
- Schmutz, M., Albouy, Y., Guerin, R., Maquaire, O., Vassal, J., Schott, J.J. and Descloitres, M., 2000, Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super Sauze earthflow (France), *Surv. Geophys.*, **21**, 371–390.
- 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.
- Wolke, R. and Schwetlick, H., 1988, iteratively reweighted least square algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons: *SIAM Journal of Scientific and Stat. Comput.*, **9**, 907-921.
- Yang, C.H., 2004. Landslide investigation in the Li-Shan area using resistivity image profiling method, SEG Technical Program Expanded Abstracts - pp. 1417-1420.
- Yilmaz, S., 2007, Investigation of Gürbulak Landslide Using 2D Electrical Resistivity Image Profiling Method (Trabzon, Northeastern Turkey). *J. Environ. Eng. Geophys.*, **12**, 199-205.