

## مدل سازی پیشرو و وارون داده ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی سطح زمین لغزش با مش غیر ساختاری، مطالعه موردی: آزادراه تهران - شمال

اسماء بیابانی<sup>۱</sup>، میثم عابدی<sup>۱\*</sup>، غلامحسین نوروزی<sup>۱</sup>، مسعود مجرب<sup>۱</sup>  
۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

\* نویسنده مسئول مکاتبات: maysamabedi@ut.ac.ir

### واژگان کلیدی

توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی  
مش غیر ساختاری،  
زمین لغزش

### چکیده

بررسی های ژئوالکتریک یکی از روش های رایج تصویربرداری ژئوفیزیک زیرسطحی است که بینش قابل توجهی در مورد خواص الکتریکی اهداف مورد تجسس ارائه می دهد. در این پژوهش سعی شده است با بکارگیری مش غیر ساختاری، نواحی با توپوگرافی خشن و شدید و همچنین ساختاری های الکتریکی با هندسه پیچیده را مورد بررسی قرار داد. یک روش رایج در بررسی های ژئوفیزیکی کم عمق، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) برای تعیین وضعیت لایه های زمین از نظر خواص الکتریکی و متعاقباً نمایش سطح زمین لغزش احتمالی است. از یک برنامه توسعه یافته به نام ResIPy استفاده شد تا توپوگرافی سطح را با استفاده از مش مثلثی مبتنی بر الگوریتم های اجزای محدود برای حل مسائل پیشرو و وارون ژئوالکتریک بازیابی نمود. در ابتدا، یک زمین لغزش مصنوعی شبیه سازی الکتریکی شد که استفاده از مش غیر ساختاری تا حدودی منجر به شناسایی دقیق تر سازندهای زمین شناسی نسبت به مش ساختاری با امان مستطیلی گردید؛ همچنین زمان اجرای الگوریتم با مش جدید به حافظه کمتری نیاز داشت. سپس داده های میدانی از یک محدوده زمین لغزش مستعد در حدود ۱۰ کیلومتری شمال غرب استان تهران (محدوده کیلومتر دوم جاده تهران - شمال) با استفاده از ۳۱ سونداژ الکتریکی بر روی چهار پروفیل ERT به فاصله ۲۰ متر در امتداد سطح لغزشی بررسی شد. سطح مورد تجسس بسیار لغزش پذیر است زیرا مربوط به منطقه ای با مقاومت ویژه الکتریکی پایین و متشکل از مصالح ناهمگن (آبرفت و توف) بود. بر روی محدوده زمین لغزش، سه لایه با تباین مقاومت ویژه الکتریکی بارز قابل تفکیک است. لایه سطحی متشکل از مواد ناهمگن با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۳۰ تا ۱۰۰ اهم متر است و در بخش هایی تا ۲۰۰ اهم متر مرتبط با نواحی خرد شده آبرفت - توف قابل رؤیت است. این لایه تا عمق ۱۵ تا ۲۰ متر در مقاطع دیده می شود. لایه ای با مقاومت کمتر از ۴۰ اهم متر هم به عنوان لایه آبرفتی و کنگلومرایی قابل مشاهده است. در اعماق بیشتر لایه ای وجود دارد که شامل سنگ های مقاومت بالای توف البرز می باشد.

## ۱- مقدمه

روش های مقاومت ویژه الکتریکی از اوایل سال ۱۹۰۰ میلادی جهت حل مسائل متنوع مورد استفاده قرار گرفت و از سال ۱۹۷۰ با توجه به توسعه پردازش های رایانه ای که برای تحلیل داده های آن مورد نیاز است گسترش یافت. ژئوفیزیک یک روش غیرمخرب تصویربرداری مبتنی بر تباین موجود در خصوصیات فیزیکی اهداف زیرسطحی است که گستره کاربرد متنوعی دارد. مطالعات ژئوفیزیکی در مقابل گمانه، شفت یا حفاری که تنها نمونه هایی از شناسایی محلی (نقطه ای) فراهم می کنند، امکان شناسایی سریع و مداوم مناطق نسبتاً وسیع را فراهم می کنند. اندازه گیری های مقاومت ویژه الکتریکی از قدمت و جایگاه حائز اهمیتی در حل مسائل متنوع برخوردار است (Mita et al. 2018). روش های توموگرافی لرزه ای (Adamczyk et al. 2013; Stucchi et al. 2014) و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (Pasierb et al. 2019; Alpaslan and Bayram 2020) از میان طیف وسیعی از روش های ژئوفیزیکی، در مطالعه زمین لغزش کاربرد گسترده تری دارند. در بسیاری از مطالعات اکتشافی، ادغام چندین روش ژئوفیزیکی می تواند تأثیر قابل توجهی برای رفع ابهامات ناشی از مدل سازی فیزیکی داشته باشد (Ramazi and Mostafaie 2013; Qanbari et al. 2020). جدا از آرایه الکتریکی مورد استفاده در اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی با جریان مستقیم، دو روند اندازه گیری در مطالعات مقاومت ویژه وجود دارد. یکی زمانی که مقاومت ویژه را در عمق بررسی می کنند، که این روش را گمانه زنی قائم الکتریکی می نامند. روش دیگر دنبال کردن تغییرات جانبی مقاومت ویژه در یک عمق نسبتاً ثابت است که پروفیل زنی مقاومت ویژه نامیده می شود. از تلفیق این دو روش می توان برای تصویرسازی الکتریکی اهداف زیرسطحی استفاده کرد.

به منظور نمایش خواص الکتریکی زیرسطحی واقعی از داده های ژئوالکتریک ظاهری اندازه گیری شده، نیاز به استفاده از روش های وارون سازی است. از آنجا که ساختارهای زمین شناسی مانند گسل ها، چین خوردگی ها و رگه ها اغلب پیچیده هستند و پارامترهای ژئوفیزیکی مانند رسانایی الکتریکی نیز معمولاً ناهمگن هستند، حل هر مسئله وارون سازی مستلزم حل مسئله پیشرو برای نوع مشابه ساختار زیرسطحی است. روش پیشرو، بر اساس شهود زمین شناسی و ژئوفیزیک و یک مدل پیش فرض برای منبع ناهنجاری، داده های مصنوعی تولید خواهد کرد که باید با ناهنجاری مشاهده شده مقایسه شود. هدف از وارون سازی یافتن بهترین مدلی است که به قدر کافی به داده های اندازه گیری شده نزدیک باشد. در مطالعات ژئوالکتریکی، هدف به حداقل رساندن عدم برازش بین داده اندازه گیری شده توسط چند الکتروود و پاسخ پیش بینی شده حاصل از یک مدل ژئوالکتریکی است. به دلیل ماهیت غیرخطی مسئله، وارون سازی با روشی تکراری اجرا خواهد شد تا زمانی که میزان عدم برازش بین پاسخ پیش بینی شده و داده اندازه گیری ها در یک بازه معین قرار گیرد (Boyd et al., 2019).

با پیشرفت سریع ابزارهای محاسباتی، فناوری های نرم افزاری و

روش های عددی در ریاضیات کاربردی، قابلیت حل مسائل ژئوفیزیک (اعم از روش پیشرو و وارون) به شدت افزایش یافته است. روش های عددی که برای مدل سازی داده های حاصل از برداشت ژئوالکتریک مورد استفاده قرار می گیرند، رویکردهای مبتنی بر انتگرال گرین، تفاضل محدود<sup>۱</sup> (FD) و اجزای محدود<sup>۲</sup> (FE) هستند. اگرچه تفاضل محدود ساده تر از رویکرد اجزای محدود است، اما بر مبنای مش ساختاری است که در نواحی با توپوگرافی ناهموار راه حل مناسبی ارائه نمی دهد. از سوی دیگر در دهه های اخیر روش اجزای محدود توسعه بیشتری یافته است، که از مزایای آن امکان بکارگیری مش غیرساختاری می باشد. ابزارهایی مانند *pyGIMLI* (Rücker et al. 2017) و *ResIPy* (Blanchy et al. 2020)، هر دو نمونه های موفق از نرم افزار مورد استفاده جهت مدل سازی با مش غیرساختاری هستند. رویکرد مقاومت ویژه جریان مستقیم (DCR) را می توان از لحاظ مدل سازی پیشرو و وارون با مش غیرساختاری کد نویسی کرد (Ren and Tang 2010). علاوه بر این، (Akca 2016) و (Key 2016) ترکیبی از مش های ساختاری و غیرساختاری برای کاهش زمان محاسبه فرایند وارون سازی برای پلاریزاسیون القایی حوزه زمان (IP) و مگنتوتلوریک (MT) پیشنهاد کردند. اگرچه به طور معمول، مش FD از سلول های مستطیلی تشکیل شده است که به راحتی نمی توانند با توپوگرافی های واقعی مطابقت داشته باشند؛ اما (Erdoğan et al. 2008) با استفاده از تعریف قیود شرایط مرزی مناسب بر این مشکل غلبه کردند. همچنین محققان دیگر (به عنوان مثال Akça and Basokur 2010; Thomas and Carsten 2011) روی معرفی مش غیرساختاری برای محاسبات پیشرو و وارون سازی FE و FD برای نشان دادن مرزهای ساختاری پیچیده با کاهش زمان محاسبات کار کردند. علاوه بر این، (Demirci et al. 2012) دریافتند که اگر مرز ساختار زیرزمینی موازی با توپوگرافی سطح نباشد، مرزهای این ساختارها ممکن است با موفقیت از وارون سازی با استفاده از راه حل پیشرو FD با سلول های مثلثی حل شود. به طور خلاصه، گسسته سازی ساختاری یک مدل فیزیکی محدودیت هایی برای تصویربرداری صحیح از هندسه پیچیده و حفظ تنوع توپوگرافی ناهموار دارد. بنابراین، بکارگیری مش بندی غیرساختاری ضرورت خواهد داشت. برای مدل سازی دقیق ویژگی فیزیکی و دخیل کرد اثر توپوگرافی بسیار ناهموار، مش غیرساختاری در مطالعات دوبعدی یا سه بعدی، سه هدف اصلی را دنبال می کند که عبارتند از: کاهش پارامترهای مدل؛ قابلیت ساخت هرگونه توپوگرافی ناهموار دلخواه و بازیابی دقیق تر هندسه هدف مورد تجسس (Abedi 2020).

حرکت و جابجایی توده های مواد دامنه از عمده ترین مخاطرات طبیعی در مناطق با توپوگرافی ناهموار می باشد، که آسیب های جبران ناپذیری به سازه های مهندسی، منابع آب و پوشش گیاهی می رساند. جهت شناسایی و درک درست این مخاطره واقع در آزادراه تهران- شمال، از

<sup>1</sup> Finite Difference

<sup>2</sup> Finite Element

۱۹۷۹ کوئفود آن را ارائه کرد) در آورد و تصویر مقاومت ویژه ظاهری آن را برای هر آرایه الکترودی محاسبه کرد. الگوریتم به کار رفته و روش معمول جهت حل وارون و دست یابی به مدل واقعی بر اساس روش کمترین مربعات می باشد. یکی از نرم‌افزارهایی که اخیراً بر این اساس نوشته شده و کاربرد زیادی در مطالعات مقاومت ویژه دارد، *ResIPy* نام دارد. فرایند وارون‌سازی که به علت پیچیدگی ساختارهای زمین و غیرقابل تفسیر بودن داده ظاهری مورد استفاده قرار می گیرد، زمانی به پایان می رسد که خطای عدم برازش داده (مقاومت ویژه ظاهری پیش بینی شده حاصل از مدل سازی با مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده) کمتر از نیم تا یک درصد باشد؛ در غیر این صورت، میزان خطای عدم برازش برای اصلاح پارامترهای مدل استفاده میشود (*Jeshvaghani and Darijani 2014*).

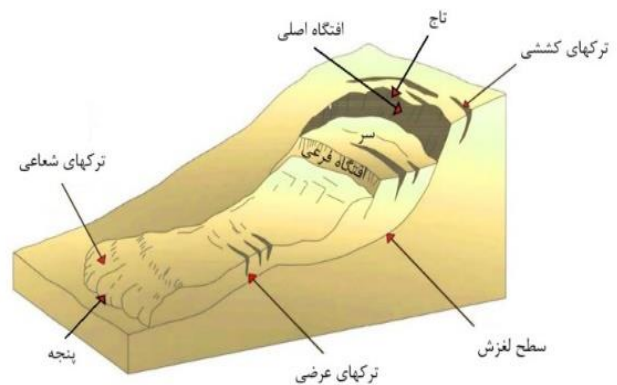
در مدل مصنوعی مورد استفاده جهت شبیه سازی سطح لغزش واقعی در نزدیکی آزادراه تهران- شمال، یک مدل سه لایه شیب دار با مقاومت ویژه الکتریکی متفاوت در نظر گرفته شد (شکل ۲ الف). از مشاهدات میدانی و بررسی گمانه، سه بخش سنگ‌شناسی در زیر زمین لغزش شناخته شده است؛ (۱) منطقه کم عمق بلافاصله در زیر سطح زمین متشکل از سنگ‌های مقاومت بالای توف البرز با مقاومت ۲۰۰۰ اهم متر تشکیل شده است، (۲) سنگ های کربناته، آبرفتی و کنگلومرایی به همراه توف با مقاومت ۲۰۰ اهم متر، (۳) سنگ های ترک خورده مانند آبرفت سیلت با مقاومت ۲۰ اهم متر (جدول ۱). در نتیجه این مدل با استفاده از مش ساختاری و غیرساختاری گسسته می‌شود. مرزهای تباین مقاومت ویژه نیز در نتیجه وارونگی مش غیرساختاری بهتر از مش ساختاری است؛ بالاخص لایه اول که پیوستگی الکتریکی آن بهتر بازیابی شده است (شکل‌های ۲ ب و ۲ ج). برای لایه های عمیق تر تفاوت چندانی بین دو نوع مش بندی رؤیت نشد.

مش مثلثی (غیرساختاری) می‌تواند فضای مدل را با استفاده از اجزای کمتر در مدل‌سازی (تعداد المان) و با راه‌حل های وارون سریع تر نشان دهد. علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، وارونگی مراحل کمتری برای تکمیل نیاز دارد (شکل ۳). جدول ۲ خطای مربعات میانگین ریشه را برای هر مدل وارون نشان می‌دهد. به دلیل ضعف مش منظم، برای ساختارهای دارای هندسه نامنظم و سطوح با توپوگرافیکشن، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی هر جزء شبکه به درستی محاسبه نمی‌شود و نتایج حاصل دارای خطای بزرگتری است. همچنین زمان اختصاص یافته به انجام فرایند مدل سازی مستقیم/پیشرو با استفاده از مش منظم طولانی‌تر از مش نامنظم می‌باشد، که در نتیجه مقدار فضای حافظه کامپیوتر بیشتری را لازم دارد. برای مدل مصنوعی شبیه سازی شده، هم مش ساختاری و هم غیرساختاری (شکل ۲ ب و ۲ ج)، با دقت نسبتاً خوبی مدل‌های مقاومت ویژه را بازیابی کرده است و داده پیش بینی شده فاصله زیادی با مقادیر واقعی مشاهده شده ندارد (شکل ۴).

روش ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است. داده‌های حاصل از برداشت الکتریکی با آرایه شلومبرژه بر روی سطح زمین لغزش در نرم‌افزار *ResIPy* بر مبنای مش‌های ساختاری و غیرساختاری مدل شدند. این آرایه الکتریکی، حساسیت بالاتری در نمایش بهتر مرز لایه بندی زمین خواهد داشت. برای محاسبه مدل پیشرو، کد منبع باز *R2* (مدل سازی دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی) از مش اجزای محدود استفاده می‌کند. کد *R2* به طور ضمنی مش‌های ساختاری ساده ایجاد می‌کند و امکان خواندن مش‌های ساختاری یا غیرساختاری تولید شده را فراهم می‌کند. این کد از سلول‌های مثلثی با افزایش طول عمودی و جانبی برای ایجاد مش غیرساختاری استفاده می‌کند. هنگام استفاده از روش‌های مبتنی بر مش ساختاری برای تولید مش با سلول‌های چهارضلعی، طول عمودی سلول‌ها با افزایش عمق محدوده مدل سازی بیشتر می‌شود، اما طول‌های جانبی ثابت می‌مانند؛ که منجر به افزایش پارامترهای مدل در مدل سازی با مش ساختاری خواهد شد و متعاقباً زمان مدل سازی افزایش می‌یابد.

## ۲- شبیه‌سازی سطح زمین لغزش با مدل سازی ژئوالکتریکی

هر توزیع رسانایی با هندسه دوبعدی را می‌توان به صورت مدل مصنوعی شبیه سازی کرد و تصویر رسانایی یا مقاومت ویژه آن را برای هر آرایه الکترودی ایجاد کرد. آرایه های برداشت ونر به دلیل فاصله یکسان چهار الکتروود و همچنین آرایه شلومبرژه به دلیل قدرت تفکیک قائم زیاد و کارایی بالا در سونداژ الکتریکی، بیشترین کاربرد را مطالعات مهندسی دارند. از آنجایی که مطالعه حاضر بر روی سطح زمین لغزش صورت گرفته است، شماتیکی از این مخاطره طبیعی در شکل ۱ آورده شده است.

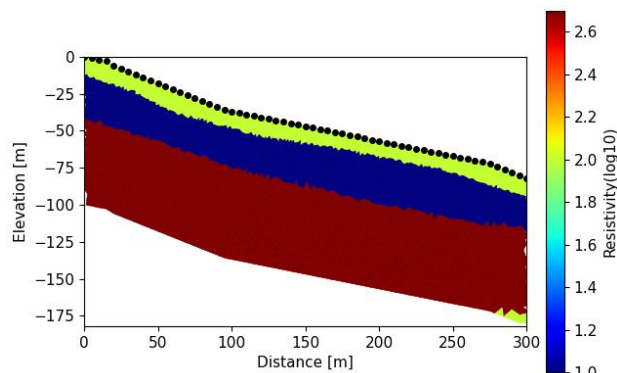


شکل ۱: شمایی کلی از سطح یک زمین لغزش و اجزاء آن (Highland and Bobrowsky 2008).

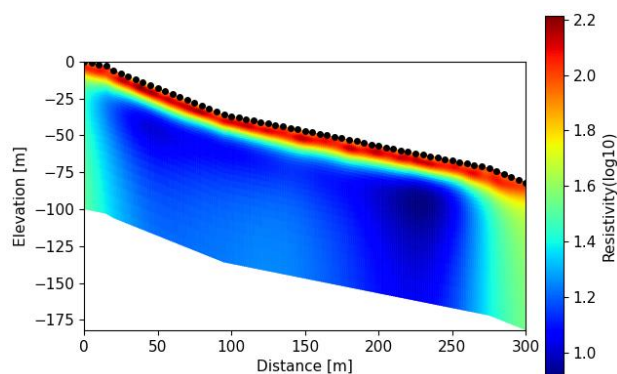
در راستای ارزیابی روش های وارون‌سازی، از داده‌های به دست آمده از مدل‌های پیشروبه منظور یافتن مدل توزیع مقاومت ویژه استفاده می‌شود که بهترین برازش را با داده‌های مشاهده شده داشته باشند. با استفاده از کانولوشن، هر توزیع رسانایی دوبعدی را می‌توان مشابه مدل سازی پیشرو داده‌های گمانه‌زنی قائم الکتریکی، بصورت مدل مقاومت ویژه (که در سال

### ۳- وضعیت زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

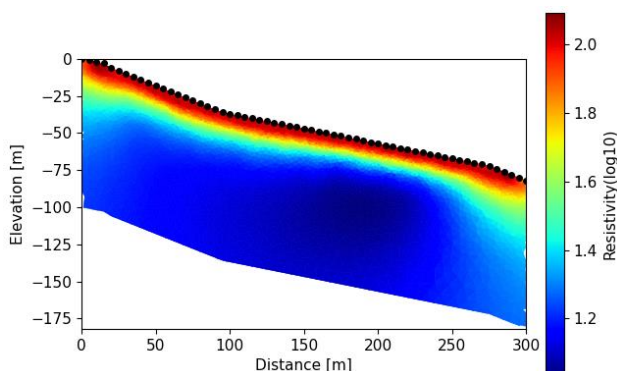
در مناطق کوهستانی کشور ایران به دلیل دارا بودن شرایط نامساعد توپوگرافی، زمین شناسی، ژئومورفولوژی، تکتونیکی و اقلیمی، پدیده زمین لغزش یکی از متداول ترین مخاطرات طبیعی است. در شکل ۵، نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش استان تهران با استفاده از روش داده محور بر مبنای شش عامل موثر بر زمین لغزش؛ مقدار شیب، جهت شیب، جنس مصالح زمین شناسی، فاصله از گسل، شتاب زمین لرزه و میزان بارندگی نشان داده شده است (Kamranzad et al. 2016).



(الف)



(ب)

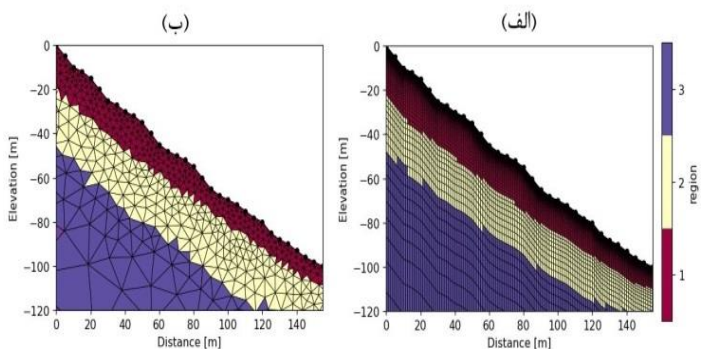


(ج)

محدوده لغزشی مورد بررسی در البرز مرکزی و جنوب راندگی شمال تهران با جهت شیب به سمت شمال قرار گرفته است. وجود این راندگی سبب قرارگیری واحدهای متفاوت در کنار هم شده است. براساس نقشه زمین شناسی تهران با مقیاس ۱/۱۰۰,۰۰۰، محدوده مورد مطالعه در جنوب این راندگی واقع شده (شکل ۶-الف)، که در کنگلومرای هزاردره با میان لایه های ماسه و سنگ رس قرار گرفته است. این سازند، با ناپیوستگی (دگرشیب و یا هم شیب) بر روی سنگ های قدیمی تر، به ویژه توفیت های سازند کرج قرار گرفته اند. واحدهای توفی سازند کرج در شمال راندگی شمال تهران قرار دارد.

در این زمین لغزش سه لایه سنگ شناسی وجود دارد که لایه اول متشکل از آبرفت کنگلومرا هزار دره، لایه دوم متشکل از کنگلومرا و توف و لایه سوم متشکل از توف است. وجود نواحی احتمالی آبدار و نفوذ آب در لایه های کنگلومرای تغییرات بالایی را ایجاد می کنند و سطح جدا کننده میان آبرفت کنگلومرای و لایه سطحی سنگ توف را به عنوان سطح لغزش می توان در نظر گرفت.

از نقطه نظر تکتونیکی، منطقه مورد مطالعه بین دو گسل راندگی موازی با رشته کوه البرز قرار دارد (شکل ۶ الف). وجود این گسل ها در مجاورت زمین لغزش مورد مطالعه باعث خرد شدن و شکستن سنگ ها و رسوبات شده است. علاوه بر این، فعالیت های تکتونیکی در محل گسل باعث گسترش درزه ها و ترک ها با ناپایداری حرکت توده ای شده و به نفوذ آب اجازه می دهد تا رطوبت را در سطوح زیرین جمع کند و تکامل ناپایداری را تسریع کند (A.R.Abassi 1384).



شکل ۳: نحوه گسسته سازی سطح زمین لغزش، مش چهار ضلعی (الف)، مش مثلثی (ب).

جدول ۱: اطلاعات الکتریکی سطح زمین لغزش شبیه سازی شده بر مبنای مشاهدات صحرائی.

مقاومت ویژه الکتریکی (اهم متر)	واحد سنگی
۲۰۰۰	سنگ های مقاومت بالای توف البرز
۲۰۰	سنگ های کربناته، آبرفتی و کنگلومرای به همراه توف
۲۰	آبرفت سیلت

شکل ۲: شبیه سازی الکتریکی سطح زمین لغزش، مدل مقاومت ویژه الکتریکی سطح زمین لغزش (الف)، مدل وارون با مش چهار ضلعی (ب)، مدل وارون با مش مثلثی (ج).



نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۳، ۱۴۰۱.

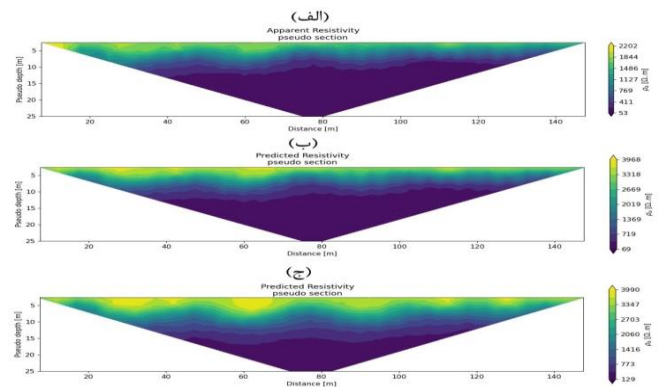
مانند رطوبت، تخلخل و شوری، بر عمق نفوذ تأثیر می‌گذارند (Loke 2015). لوک روشی را ارائه کرد که در آن تبدیل داده‌های مقاومت ویژه ظاهری برداشتی با استفاده از فیلتری که بر مبنای سهم سیگنالی مقاطع پایه‌گذاری شده است عمل می‌کند. داده‌های تبدیلی تخمین خوبی از توزیع واقعی مقاومت ویژه ارائه می‌دهد. در اینجا از روش کمترین مربعات برای برازش بین داده‌های حاصل از مدل سازی وارون (پیش بینی) و برداشتی (مشاهده ای) استفاده شده است.

#### ۴-۱- برداشت داده سونداژ الکتریکی

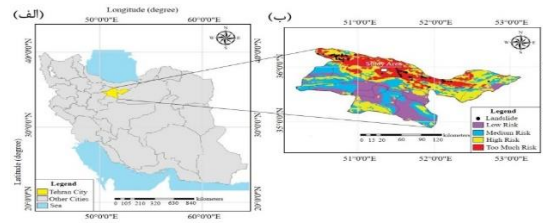
یکی از روش‌های معمول مقاومت ویژه الکتریکی به خصوص برای طبقات افقی گمانه‌زنی قائم الکتریکی است که در آن با ثابت نگه داشتن نقطه اندازه‌گیری، مقاومت ویژه ظاهری به ازای فاصله‌های مختلف الکتریکی برای هر آرایه انتخابی اندازه‌گیری می‌شود. به این ترتیب مقاومت ویژه ظاهری برحسب تابعی از فاصله الکترودی اندازه‌گیری می‌شود. برداشت داده‌ها در محدوده کیلومتر دوم آزادراه تهران- شمال با استفاده از ۳۱ سونداژ بر روی چهار پروفیل طراحی شده است. هر پروفیل به طول تقریبی ۲۰۰ متر با ۸ سونداژ که فاصله تقریبی بین نقاط هر سونداژها در امتداد یک پروفیل به فاصله ۲۰ متر بوده انجام پذیرفته است (شکل ۶ ب). برداشت داده‌ها در شبکه نشان داده شده، با فاصله بیشینه فرستنده‌های جریان تا ۶۰۰ متر انجام شده است. روش برداشت داده‌ها براساس آرایه شلومبرژه با فواصل داده‌برداری یکسان می‌باشد. این آرایه تفکیک پذیری بالاتری جهت شناسی لایه بندی زمین دارد. برداشت داده‌ها با استفاده از دستگاه ژئوالکتریک *WDDS-1* ساخت شرکت *BTSK* صورت گرفته است.

جدول ۲: نتایج شبیه سازی الکتریکی زمین لغزش مصنوعی.

پارامتر	مش ساختاری	مش غیرساختاری
کل زمان محاسبه	۶۸.۵	۴.۵
تعداد تکرار	۴	۳
<i>RMS</i> نهایی	۱.۰۲	۱.۰۰
کل حافظه مورد نیاز	۲.۶۲۹ Gb	۰.۰۱۳ Gb
تعداد سلول‌های فضای مدل	۵۲۸۰	۴۵۷۶



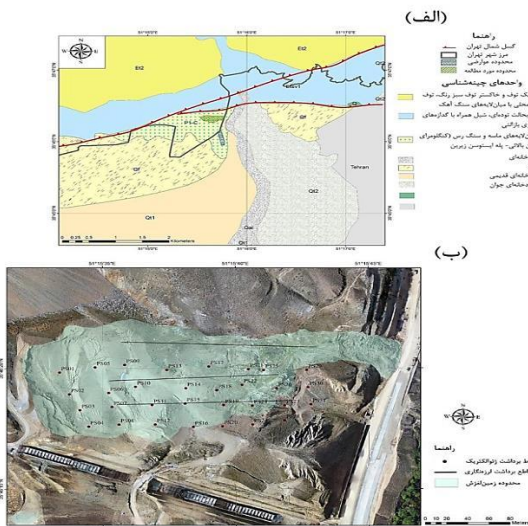
شکل ۴: تصویر داده های مقاومت ویژه الکتریکی مدل شبیه‌سازی شده سطح زمین لغزش، داده مشاهده شده (الف) و داده پیش‌بینی شده بعد از وارون سازی با مش‌های چهار ضلعی (ب) و مثلثی (ج).



شکل ۵: نقشه پهنه‌بندی ریسک زمین لغزش ایران (الف) و نقشه ریسک زمین لغزش استان تهران (ب). محدوده مورد مطالعه روی شکل با مستطیل سفید مشخص شده است (Damavandi et al. 2022).

#### ۴-۲- مدل سازی مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده مورد مطالعه

در توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی از الکترودهای جریان مستقیم برای تعیین توزیع جریان الکتریکی در یک محیط زمین‌شناسی و متعاقباً تصویرسازی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در میدان الکتریکی (با تفکیک پذیری با وضوح بالا) طبق قانون اهم استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری درقسمت‌های مختلف، می‌توان مقاومت ویژه زیرسطحی را با توجه به هدف مطالعه تعیین کرد. به طور کلی الکترودها در امتداد یک خط عمود بر امتداد احتمالی ساختار مورد تجسس قرار می‌گیرند و مقاومت ویژه زیر آن خط در دو بعد محاسبه می‌شود. پارامترهای محیط،



شکل ۶: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (الف) و تصویر هوایی از محدوده برداشت سونداژهای ژئوالکتریکی به همراه پروفیل‌های برداشت (ب). محدوده مورد مطالعه در شکل الف به رنگ سبز روشن نمایش داده شده است.

۳۹.۵	۱۳۰۱.۵	کل زمان محاسبه	۴
۴	۵	تعداد تکرار	
۱.۲۷	۱.۰۰	RMS نهایی	
۰.۰۳۵ Gb	۳.۱۴۶ Gb	کل حافظه مورد نیاز	

## ۲-۴- مدل سازی وارون داده الکتریکی واقعی با مش ساختاری و غیرساختاری

به علت پیچیدگی، ساختارهای زمین قابل تفسیر نیستند و از وارون سازی به منظور ارائه تقریبی مدل واقعی از زمین که مقاومت ویژه ظاهری آن مدل کمترین اختلاف را با مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده داشته باشد، استفاده می شود. روش معمول برای وارون سازی و رسیدن به مدل واقعی بر اساس روش کمترین مربعات است.

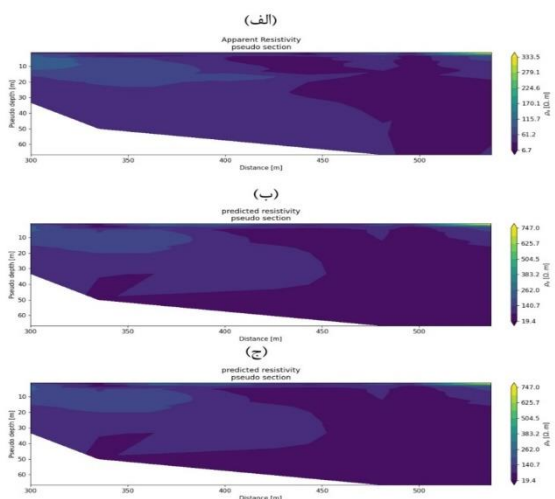
از تصاویر داده های مقاومت ویژه ظاهری (شکل های ۷ الف، ۹ الف، ۱۱ الف و ۱۳ الف) و پیش بینی شده به دست آمده از مش های ساختاری (شکل های ۷ ب، ۹ ب، ۱۱ ب و ۱۳ ب) و غیرساختاری (شکل های ۷ ج، ۹ ج، ۱۱ ج و ۱۳ ج)، در امتداد پروفیل های مختلف می توان نتیجه گرفت که هر دو روش هماهنگی نسبتاً خوبی بین داده های واقعی و محاسبه شده نشان می دهند. با این حال، اطلاعات ارائه شده به صورت مقایسه ای از نتایج (جدول ۳) این واقعیت را تأیید می کند که استفاده از یک الگوریتم مبتنی بر مش مثلی به زمان کمتری برای به دست آوردن یک نتیجه قابل قبول نیاز دارد. مش غیرساختاری به اجزای کمتری نسبت به مش ساختاری برای تصویربرداری از توپوگرافی سطح و ساختارهای زیرزمینی نیازمند است. همچنین دریافتیم که با مش غیرساختاری خطاهای عددی تا حدودی کاهش می یابد. در نتیجه، نرم افزار سریعتر و قابل اعتمادتر از وارون سازی با مش ساختاری برای شبیه سازی توپوگرافی سطحی پیچیده است. الگوریتم های مبتنی بر مش ساختاری (شکل های ۸ الف، ۱۰ الف، ۱۲ الف و ۱۴ الف) و غیرساختاری (شکل های ۸ ب، ۱۰ ب، ۱۲ ب و ۱۴ ب) برای وارون سازی داده های برداشتی به طور جداگانه استفاده شد. وارون سازی با مش غیرساختاری در تمایز ساختارهای رسانا و مقاوم نسبت به مش ساختاری موفق تر بود. در تمامی مدل های مقاومت ویژه الکتریکی مبتنی بر مش ساختاری، هاله ای از پخش شدگی مدل الکتریکی به سمت اعماق قابل رویت است (مثلاً شکل ۱۲-الف) که با مرز لایه بندی زمین در این محدوده منطبق نیست.

جدول ۳: اطلاعاتی در مورد وارون سازی داده سونداژ الکتریکی در محدوده مورد مطالعه به همراه تعداد سلول های فضای مدل و زمان اجرای برنامه.

پروفیل	پارامتر	مش ساختاری	مش غیرساختاری
۱	کل زمان محاسبه	۳۰۱۱.۵	۱۰۴.۵
	تعداد تکرار	۳	۳
	RMS نهایی	۱.۳۵	۱.۰۹
۲	کل حافظه مورد نیاز	۵.۶۰۵ Gb	۰.۱۴۴ Gb
	کل زمان محاسبه	۴۷۹۹.۵	۱۸۹.۵
	تعداد تکرار	۳	۴
۳	RMS نهایی	۱.۰۴	۱.۰۰
	کل حافظه مورد نیاز	۵.۳۹۶ Gb	۰.۱۵۹ Gb
	کل زمان محاسبه	۲۲۸۲.۵	۱۰۵.۵
	تعداد تکرار	۴	۳
	RMS نهایی	۱.۰۰	۱.۲۹
	کل حافظه مورد نیاز	۴.۲۷۹ Gb	۰.۱۷۳ Gb

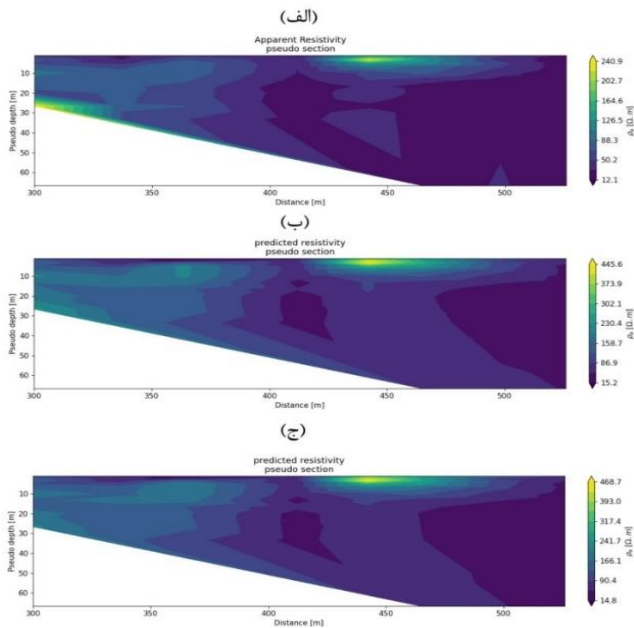
## ۳-۴- مدل زمین شناسی سطح زمین لغزش

مقاطع لیتولوژی پیشنهادی از روی مدل های توزیع مقاومت ویژه الکتریکی وارون شده و مشاهدات زمین شناسی در محدوده مورد مطالعه به صورت تقریبی و ساده سازی شده در شکل ۱۵ ترسیم شده است. در همه مقاطع محدوده زمین لغزش، سه ساختار زمین شناسی با تباین مقاومت ویژه الکتریکی فرض شده است. (۱) لایه سطحی که عمق آن ۱۵ تا ۲۰ متر در مقاطع دیده می شود که متشکل از مصالح ناهمگن با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۳۰ تا ۱۰۰ و در بخش هایی تا ۲۰۰ اهم متر می رسد. این نواحی خرد شده ترکیبی از آبرفت به همراه توف است. (۲) لایه ای با مقاومت کمتر از ۴۰ اهم متر به عنوان لایه آبرفتی و کنگلومرای تفسیر شده است. (۳) در لایه پایین لایه ای با مقاومت بالا وجود دارد که براساس مشاهدات صورت گرفته شامل سنگ های مقاومت بالای توف البرز می باشد. سطح جدا کننده میان آبرفت کنگلومرای و لایه سطحی را به عنوان سطح لغزش در نظر می گیریم و می توان گفت که سنگ پی ما توف است. نکته قابل توجه در تمام مقاطع عرضی وجود آنومالی های افقی است که به دلیل وجود تفاوت در میزان دانه بندی، اندازه گراول ها و احتمال رطوبت از هم تفکیک شده اند. همچنین تراز آب زیرزمینی در بازدید میدانی مشاهده نشده و تنها لایه های با تخلخل بالا که احتمالاً توسط بارندگی مرطوب شده اند، وجود دارد.

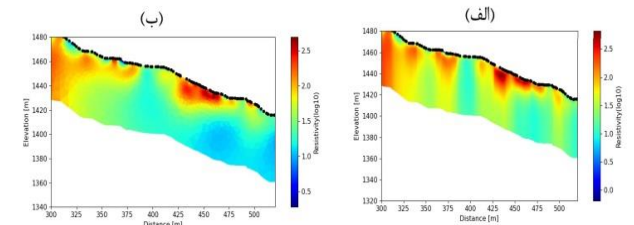


شکل ۷: داده مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۱، داده مشاهده شده (الف) و داده پیش بینی شده بعد از وارون سازی با مش های چهار ضلعی (ب)، مثلی (ج).

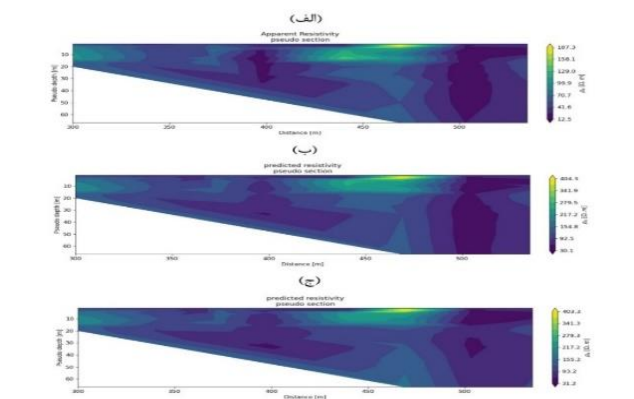
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۳، ۱۴۰۱.  
 زمین‌لغزش مناسب است، که متعاقباً ترسیم سطح لغزش را ممکن می‌سازد. در نتیجه، استفاده از آن به همراه سایر روشهای دیگر برای نظارت بر زمین‌لغزش‌ها برای ارائه هشدارهای اولیه خطر به منظور جلوگیری از آسیب به ساختمان‌ها یا جان انسان‌ها بسیار توصیه می‌شود.



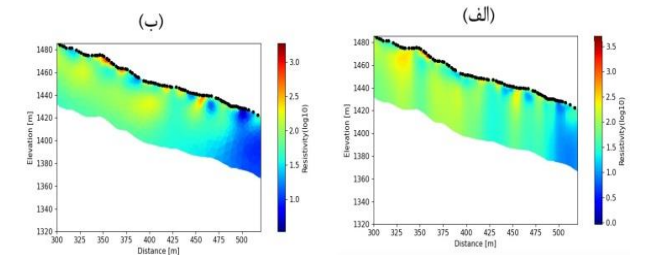
شکل ۹: داده مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۲، داده مشاهده شده (الف) و داده پیش‌بینی شده بعد از وارون‌سازی با مش‌های چهار ضلعی (ب)، مثلثی (ج).



شکل ۱۰: مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۲ با مش‌های چهار ضلعی (الف) و مثلثی (ب).



شکل ۱۱: داده مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۳، داده مشاهده شده (الف) و داده پیش‌بینی شده بعد از وارون‌سازی با مش‌های چهار ضلعی (ب)، مثلثی (ج).



شکل ۸: مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۱ با مش‌های چهار ضلعی (الف) و مثلثی (ب).

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شد با بررسی نتایج مدل سازی ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی، احتمال رخداد زمین‌لغزش آزادراه تهران- شمال مشخص شود. برای مدل‌سازی پیشرو مدل الکتریکی، از روش اجزای محدود استفاده شد. معمولاً پیاده سازی الگوریتم‌های مدل‌سازی مبتنی بر اجزای محدود پیچیده تر، اما دقیق تر از روش تفاضل محدود عمل خواهند کرد. این قابلیت با گسترش کاربرد مش غیرساختاری بر طرف شده است و امکان مدل‌سازی سریع و دقیق را می‌دهد. در این مطالعه عملکرد هر دو الگوریتم چهارضلعی و مثلثی برای وارون‌سازی دو بعدی با استفاده از داده‌های مصنوعی و میدانی حاصل از برداشت ژئوالکتریکی با توپوگرافی ناهموار مورد بررسی قرار گرفت. مش غیرساختاری با توجه به بهترین نشان دادن توپوگرافی و مدل سازی عددی در زمان مورد انتظار و داشتن دقت بالاتر در نمایش نتیجه نهایی از انواع مش ساختاری بهتر است و همینطور مش مثلثی امکان استفاده از هندسه پیچیده تر را فراهم میکند.

با توجه به مشاهدات صحرایی منطقه مورد مطالعه، مدل مصنوعی زمین‌لغزش با سه لایه ساخته شد. لایه اول متشکل از سنگ‌های مقاومت بالای توف البرز با مقاومت ۲۰۰۰ اهم متر، لایه دوم شامل سنگ‌های کربناته، آبرفتی و کنگلومرایی به همراه توف با مقاومت ۲۰۰ اهم متر و لایه سوم متشکل از سنگ‌های ترک خورده مانند آبرفت سیلت با مقاومت ۲۰ اهم متر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد مدل سازی با مش غیرساختاری به اجزای کمتری نسبت به مش ساختاری برای بازیابی توپوگرافی ناهموار نیاز دارد. در نتیجه، نرم‌افزار وارون‌سازی برای شبیه‌سازی مدل سطح زمین‌لغزش با توپوگرافی ناهموار را سریعتر انجام داد.

برای همه پروفیل‌ها برداشتی روی محدوده مستعد زمین لغزش، سه ساختار با تفکیک مقاومت ویژه الکتریکی قابل توجه مشخص شده‌اند. لایه سطحی متشکل از مصالح ناهمگن با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۳۰ تا ۱۰۰ و در بخش‌هایی تا ۲۰۰ اهم‌متر، نواحی خرد شده ترکیبی از آبرفت به همراه توف است که تا عمق ۱۵ تا ۲۰ متر در مقاطع دیده می‌شود.

لایه‌ای با مقاومت کمتر از ۴۰ اهم‌متر به عنوان لایه آبرفتی و کنگلومرایی تفسیر شده است. در لایه پایین لایه‌ای با مقاومت بالا وجود دارد که براساس مشاهدات صورت گرفته شامل سنگ‌های مقاومت بالای توف البرز می‌باشد. نشان داده شد که رویکرد ژئوالکتریکی برای بررسی



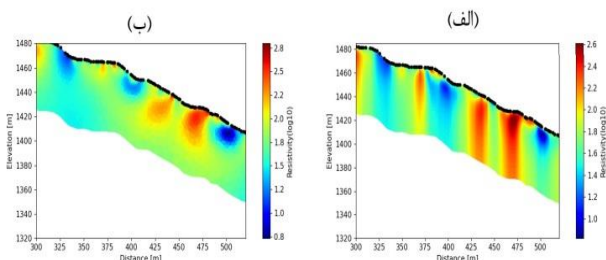
بیابانی و همکاران، مدل سازی پیشرو و وارون داده ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی سطح زمین لغزش با مش غیرساختاری، صفحات ۲۰۲-۲۱۲.

## ۶- سپاس گذاری

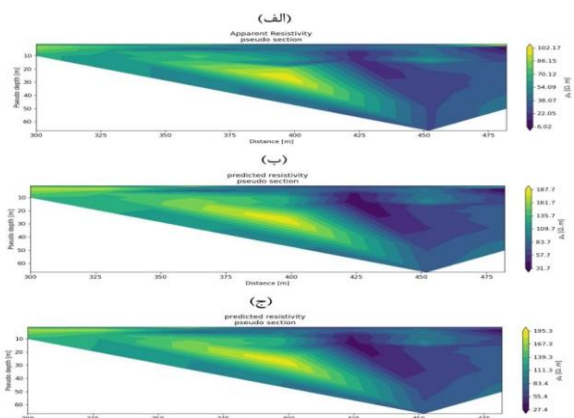
نویسندگان قدردان کمک‌های دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران و مهندسين مشاور بنیان زمین پایدار برای ارائه داده‌ها می‌باشند.

## ۷- منابع

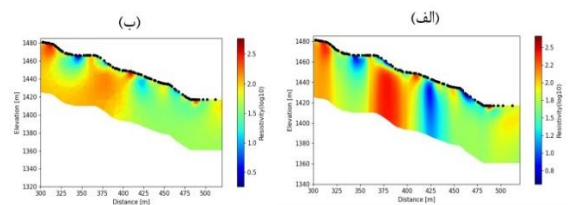
- Abassi, R., Yassaghi, R., 2005, Geometry and kinematic analysis of Laniz structural sub-zone; evidence for structural evolution of south central Alborz. *Geoscience*, 56:152-167.
- Abedi, M., 2020, A focused and constrained 2D inversion of potential field geophysical data through Delaunay triangulation, a case study for iron-bearing targeting at the Shavaz deposit in Iran. *Prostaglandins and Other Lipid Mediat*, 95:106408
- Adamczyk, A., Malinowski, M., Malehmir, A., 2013, Application of first-arrival tomography to characterize a quick clay landslide site in Southwest Sweden. *Acta Geophys*, 61:1057-1073.
- Akca, I., 2016, ELRIS2D: A MATLAB Package for the 2D Inversion of DC Resistivity/IP Data. *Acta Geophys*, 64:443-462.
- Akça, I., Basokur, A.T., 2010, Extraction of structure-based geoelectric models by hybrid genetic algorithms. *Geophysics*, 75.
- Alpaslan, N., Bayram, M., 2020, Landslide study with 2D electrical resistivity tomography (ERT): A case study from Turkey. *Carpathian J Earth Environ Sci*, 15:391-403.
- Blanchy, G., Saneiyani, S., Boyd, J., McLachlan, M., Binley, A., 2020, ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling. *Comput Geosci*,
- Boyd, J., Blanchy, G., Saneiyani, S., McLachlan, P., Binley, A., 2019, 3D Geoelectrical Problems With ResIPy, an Open Source Graphical User Interface for Geoelectrical Data Processing. *FastTimes*, 24:85-92.
- Damavandi, K., Abedi, M., Norouzi, GH., Mojarab, M., 2022, Geoelectrical characterization of a landslide surface for investigating hazard potency, a case study in the Tehran- North freeway, Iran. *Int J Min Geo-Engineering*.
- Demirci, I., Erdoğan, E., Candansayar, M.E., 2012, Two-dimensional inversion of direct current resistivity data incorporating topography by using finite difference techniques with triangle cells: Investigation of Kera fault zone in western Crete. *Geophysics*, 77.
- Erdoğan, E., Demirci, I., Candansayar, M.E., 2008, Incorporating topography into 2D resistivity modeling using finite-element and finite-difference approaches.
- Kamranzad, F., Mohasel Afshar, E., Mojarab, M., Memrian, H., 2016, Landslide hazard zonation in Tehran province using data-driven and AHP methods. *Geoscience*, 25:101-114.
- Highland, L.M., Bobrowsky, P., 2008, The landslide Handbook - A guide to understanding landslides. *US Geol Surv Circ*, 1-147.
- Jeshvaghani, M.S., Darijani, M., 2014, Two-dimensional geomagnetic forward modeling using adaptive finite



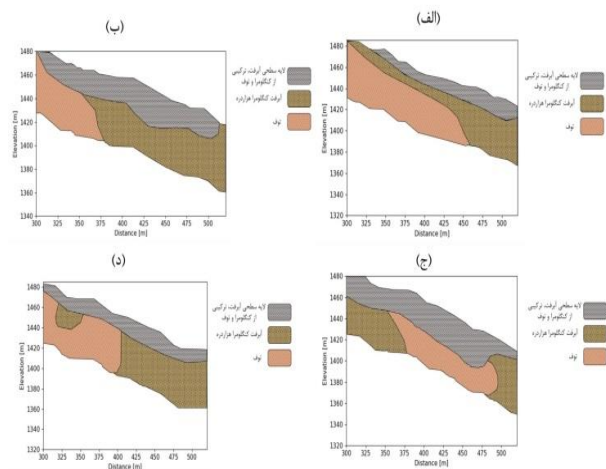
شکل ۱۲: مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۳ با مش های چهار ضلعی (الف) و مثلثی (ب).



شکل ۱۳: داده مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۴، داده مشاهده شده (الف) و داده پیش بینی شده بعد از وارون سازی با مش های چهار ضلعی (ب)، مثلثی (ج).



شکل ۱۴: مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد پروفیل ۴ با مش های چهار ضلعی (الف) و مثلثی (ب).



شکل ۱۵: مدل زمین شناسی سطح زمین لغزش در امتداد پروفیل های ۱ (الف)، ۲ (ب)، ۳ (ج) و ۴ (د).



- element method and investigation of the topographic effect. *J Appl Geophys*, 105:169–179.
- Key, K., 2016, MARE2DEM: A 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. *Geophys J Int*, 207:571–588.
- Loke, M.H., 2015, Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Mita, M., Glazer, M., Kaczmarzyk, R., Dabrowski, M., Mita, K., 2018, Case study of electrical resistivity tomography measurements used in landslides investigation, Southern Poland. *Contemp Trends Geosci*, 7:110–126.
- Pasierb, B., Grodecki, M., Gwóźdź, R., 2019, Geophysical and geotechnical approach to a landslide stability assessment: a case study. *Acta Geophys*, 67:1823–1834.
- Ren, Z., Tang, J., 2010, 3D direct current resistivity modeling with unstructured mesh by adaptive finite-element method. *Geophysics*, 75:6–17.
- Report of BZP consult engineers, 2018.
- Rücker, C., Günther, T., Wagner, F.M., 2017, pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Comput Geosci*, 109:106–123.
- Stucchi, E., Ribolini, A., Anfuso, A., 2014, High-resolution reflection seismic survey at the Patigno landslide, Northern Apennines, Italy. *Near Surf Geophys*, 12:559–571.
- Thomas, G., Carsten, R., 2011, Boundless Electrical Resistivity Tomography BERT – the user tutorial. *Interface* 1–28.

