

شناسایی شاخه‌های فعال گسل‌های مدفون به منظور ارزیابی مخاطرات زمین‌لرزه

در کلان‌شهر تبریز

محمدحسین رضائی مقدم*؛ استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

شهرام روستایی؛ استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

توحید رحیم‌پور؛ پژوهشگر پسادکتری گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

عبدالحمید سرتیپی؛ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴

چکیده

این پژوهش با هدف شناسایی شاخه‌های فعال گسل‌های مدفون در کلان‌شهر تبریز و تحلیل مخاطرات مورفوتکتونیک مرتبط با آن‌ها انجام شده است. تبریز به دلیل قرارگیری در مجاورت گسل اصلی تبریز و گسترش توسعه شهری بر روی زون‌های گسلی و نهشته‌های حساس، در معرض ریسک بالای زلزله و زمین‌لغزش قرار دارد. روش اصلی مورد استفاده در این تحقیق، مطالعات ژئوفیزیک با به‌کارگیری روش مقاومت ویژه الکتریکی بوده است. بدین منظور، شش پروفیل در نواحی مختلف شهر با استفاده از دستگاه ARES و آرایش دوقطبی-دوقطبی برداشت شد. داده‌های جمع‌آوری شده با نرم‌افزار Res2Dinv و آرون‌سازی دوبعدی شده و با در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه، مدل‌هایی از تغییرات مقاومت ویژه زیرسطحی تهیه گردید. نتایج نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه مقاومت ویژه در عمق‌های مختلف است که عمدتاً ناشی از تغییر در جنس و اندازه دانه‌های رسوبی، ضخامت نهشته‌های آبرفتی و حضور واحدهای سنگی در زیرسطح می‌باشد. در مدل‌های حاصل، ناپیوستگی‌های متعددی در ساختار مقاومت ویژه شناسایی شد که با موقعیت‌های شناخته‌شده گسل‌ها از مطالعات تکتونیک قبلی و خطواره‌های مغناطیسی تطابق دارند. این ناپیوستگی‌ها به‌عنوان شواهدی از عملکرد سامانه‌های گسلی فعال در منطقه تفسیر می‌شوند. اگرچه مقاومت ویژه پایین نهشته‌های آبرفتی تفسیر دقیق برخی ناهنجاری‌ها را دشوار می‌سازد، ولی پوشش مناسب داده‌ها امکان ارتباط این ناپیوستگی‌ها با فعالیت‌های تکتونیک را فراهم می‌آورد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به اصلاح نقشه‌های گسلی منطقه و ارائه مبنای علمی برای ارزیابی دقیق‌تر مخاطرات زمین‌لرزه و برنامه‌ریزی‌های کاهش ریسک در کلان‌شهر تبریز کمک شایانی نماید.

واژه‌های کلیدی: گسل مدفون، مقاومت ویژه الکتریکی، مخاطرات زلزله، ژئوفیزیک، مورفوتکتونیک، تبریز

مقدمه

در سراسر جهان، زلزله‌ها و بلایای مرتبط با آن، پیوسته تأثیرات منفی شدیدی بر معیشت انسان‌ها داشته و خسارات گسترده‌ای در زمینه‌های اجتماعی- اقتصادی و محیط‌زیستی به بار آورده‌اند (Nyimbili et al., 2018). زلزله نیروی مخرب قدرتمندی دارد که می‌تواند خسارات گسترده‌ای ایجاد کند و جان و مال مردم را به خطر بیندازد (Chen et al., 1998). بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷، بیش از ۷۵۰۰۰۰ نفر بر اثر زمین‌لرزه جان خود را از دست داده‌اند و بیش از ۱۲۵ میلیون نفر در این دوره تحت تأثیر قرار گرفته‌اند (WHO, 2017). علاوه بر این، زمین‌لرزه‌ها صدها میلیارد دلار خسارت اقتصادی مستقیم به بار آورده‌اند. بر اساس این سازمان، زمین‌لرزه در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷، سومین حادثه از نظر تعداد وقوع، اولین حادثه از نظر تعداد تلفات و دومین حادثه از نظر ایجاد بیشترین خسارات اقتصادی بوده است. زلزله‌های فاجعه‌بار می‌توانند مناطق وسیعی را تحت تأثیر قرار دهند و اثرات اقتصادی، اجتماعی و سیاسی طولانی‌مدتی برجای گذارند (Subedi and Chhetri, 2019). این اثر در مراکز شهری به دلیل شهرسازی بی‌برنامه و توسعه در مناطق پرخطر تشدید می‌شود (Ashraf, 2020). این چالش را می‌توان از طریق اقدامات مناسب مدیریت ریسک مهار کرد که اثربخشی آن در زمین‌لرزه‌های تاریخی کشورهای مختلف به اثبات رسیده است (Bapat, 2010). در میان رویکردهای مختلف برای دستیابی به تاب‌آوری در برابر زمین‌لرزه، برنامه‌ریزی کاربری اراضی حساس به ریسک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این رویکردی مؤثر برای تضمین کاهش پایدار خطر و در نتیجه دستیابی به تاب‌آوری از طریق کاهش خسارات ناشی از بلایا (جان انسان‌ها و دارایی‌های فیزیکی، محیط زیستی و نهادی) محسوب می‌شود (Becker et al., 2013; Hada and Shaw, 2022). به گفته ساندرز و بکر (۲۰۱۵)، برای دستیابی به پایداری بلندمدت و تاب‌آوری بیشتر، راه‌حل‌های مبتکرانه در برنامه‌ریزی کاربری اراضی ضروری است. چنین برنامه‌ریزی‌ای در سطح محلی اثربخشی بسیار بیشتری دارد؛ زیرا مدیریت ریسک در سطح خرد را تضمین می‌کند (Bendimerad and von Einsiedel, 2010).

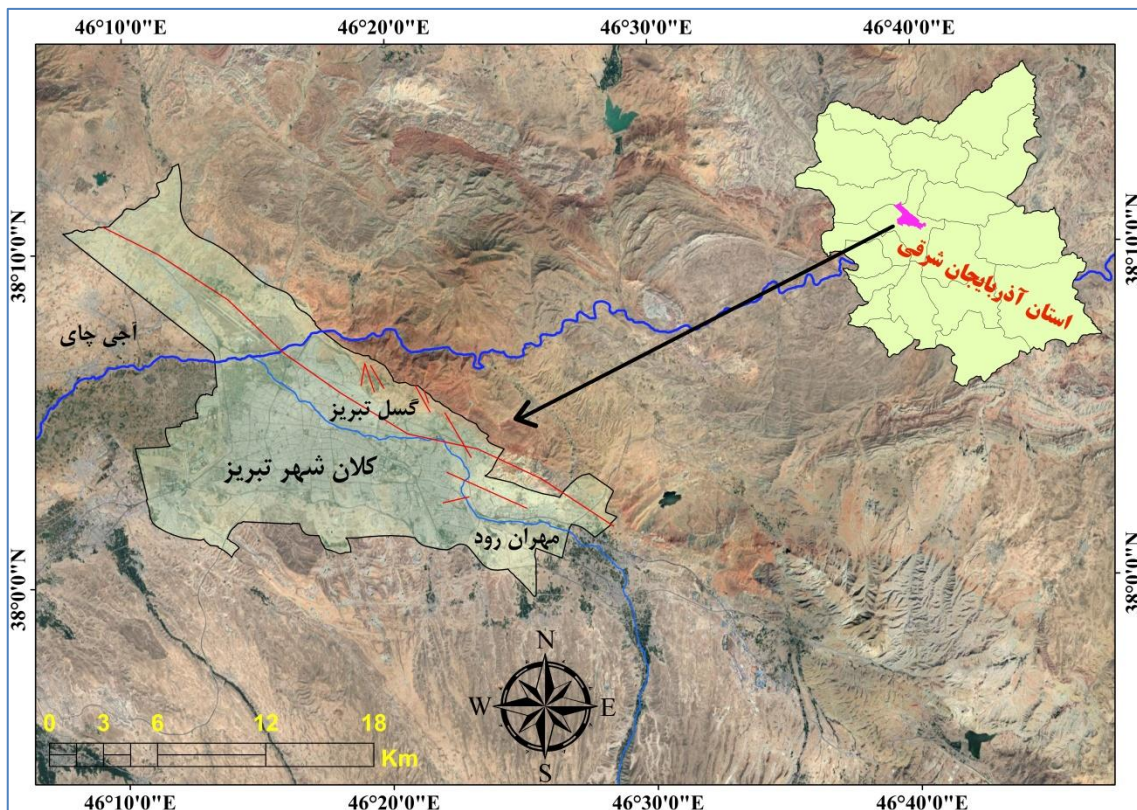
پژوهش‌های متعددی در ارتباط با موضوع تحقیق توسط محققان داخلی و خارجی صورت گرفته که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. ولدی و همکاران (۱۳۹۴)، در پژوهشی به تحلیل و پهنه‌بندی مخاطرات مورفوتکتونیک شهرستان کامیاران پرداختند. به همین منظور جهت ارزیابی کمی تأثیر تکتونیک فعال در تحول لندفرم‌ها از شاخص‌های مورفوتکتونیکي همچون شاخص شیب طولی رودخانه، سینوزیتة جبهه کوهستان، شاخص پهنای کف دره نسبت به ارتفاع و شاخص عدم تقارن حوضه استفاده گردید. در ادامه جهت پهنه‌بندی خطر آسیب‌های تکتونیکي از متغیرهای طبیعی همچون شیب، سطح ایستایی آب، مقاومت لیتولوژی، فاصله از گسل و ترکیب نقشه‌های حاصل از آن‌ها استفاده شد. جهت وزن دهی لایه‌ها مدل وزن‌دهی سلسله‌مراتبی (AHP) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد این شهرستان به دلیل قرار گرفتن در دو زون ساختاری سنندج - سیرجان و زاگرس مرتفع، تنوع سنگ‌شناسی و وجود گسل‌ها دارای وضعیت ژئومورفیک ویژه‌ای است. همچنین نقشه آسیب‌پذیری تکتونیکي حاصل از تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که بیشترین خطر نسبی منطقه در محدوده شمال، جنوب غرب و قسمتهایی از شمال شرق واقع است. سرهنگی و همکاران (۱۴۰۰)، به تحلیل مورفومتري و مخاطرات تکتونیکي گسل زندان در منطقه جاسک به منظور توسعه پایدار پرداختند. در این تحقیق شاخص‌هایی همچون شاخص طول - شیب رودخانه (SL)، نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf)، شاخص نبود تقارن حوضه زهکشی (Af)، پیچ‌وخم پیشانی کوهستان (Smf)، شاخص سینوسی رودخانه (BS)، فاکتور توپوگرافی عرضی (T) و شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که منطقه در شرایط تکتونیکي متوسطی به سر می‌برد. عوامل تهدیدکننده منطقه، از جمله تأثیر گسل زندان بر بالآمدگی منطقه سبب افزایش شیب منطقه در قسمت‌های شمالی و در نتیجه افزایش سرعت جریان آب و طغیان رودخانه‌ها در مناطق پایین‌دست و ایجاد ناپایداری دامنه‌ای و رانش زمین در منطقه شده‌اند. مصدق زاده و خلج (۱۴۰۱)، در پژوهشی اقدام به پهنه‌بندی مخاطرات لرزه‌ای شهرهای مرزن‌آباد و طالقان

بر اساس ارزیابی شاخص‌های مورفوتکتونیک کردند. بر همین اساس پنج شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، شاخص انشعابات (R)، شکل حوضه (Ff)، تراکم زهکشی (Dd) و ضریب ناهمواری (Bh) در ۱۹ حوضه زهکشی محاسبه شد. نتایج تحقیق نشان داد حوضه‌هایی گسل‌های خزر، شمال البرز، دزدبن و راندگی‌های کندوان و شمال طالقان در گروه‌های بسیار بالا و بالا قرار گرفته‌اند که بیانگر تأثیر این گسل‌ها بر تکتونیک فعال منطقه است. در اثر بالا بودن این مقادیر، انتظار می‌رود که ریسک لرزه‌خیزی منطقه نیز در اثر گسیختگی گسل‌ها افزایش یابد. بیلاقی عنصرودی و روستایی (۱۴۰۲)، در پژوهشی اقدام به ریز پهنه‌بندی خطر زلزله در مناطق اطراف گسل تبریز - از مرند تا تبریز نمودند. در این تحقیق از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جهت وزن دهی معیارها استفاده شد. از معیارها فاصله از خطوط گسل، فاصله از کانون‌های تاریخی زلزله، واحدهای سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میزان شیب زمین، فاصله از مراکز شهری، فاصله از مراکز روستایی، فاصله از خطوط ارتباطی، فاصله از آب‌های سطحی، فاصله از نقاط زمین‌لغزش استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که ۹/۹۳ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با خطرپذیری بسیار بالا، ۱۱ درصد در خطرپذیری بالا، ۲۷ درصد در خطرپذیری متوسط، ۳۹ درصد در خطرپذیری نسبتاً پایین و ۱۳/۷ درصد منطقه نیز در گروه خطرپذیری بسیار پایین واقع شده است. علمدار (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر اساس روش PROMETHEE (روش سازمان‌دهی رتبه‌بندی ترجیحی برای ارزیابی‌های غنی‌سازی) و رویکرد VIKOR (بهینه‌سازی و حل سازشی چندمعیاره) که با استفاده فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و مقادیر عملکردی شبکه‌های ارتباطی با ریسک زلزله بالا در استانبول، در یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ادغام شده‌اند، به ارزیابی ریسک زلزله شبکه‌های ارتباطی در استانبول پرداخت. برای تعیین ریسک زلزله در شبکه‌های ارتباطی، ۱۵ معیار آسیب‌پذیری و ۹ معیار سناریوی زلزله در این مطالعه گنجانده شده است. بر اساس کاربردهای GIS مبتنی بر AHP، این مطالعه نشان داد که جنوب شرق بخش اروپایی و شرق بخش آسیایی، مناطقی با بالاترین ریسک زلزله هستند. نه درصد از مساحت سطحی استانبول را مناطق دارای ریسک بالای زلزله تشکیل می‌دهند و یک‌پنجم از راه‌های استانبول دارای سطح ریسک بالا هستند.

گسترش شتابان شهرسازی در امتداد مسیر اتوبان پاسداران و هم‌پوشانی و انطباق این توسعه با روند گسل تبریز که در امتداد همین محور قرار دارد، به همراه پدیده برخاستگی کوه عون‌بن‌علی (عینالی)؛ که خود محصول مستقیم فرآیندهای گسلش و پویایی‌های زمین‌ساختی این گسل است، بر پیچیدگی و حساسیت شرایط افزوده است. فعالیت لرزه‌ای دیرینه و تاریخی گسل تبریز در طول ادوار مختلف زمین‌شناسی و تاریخ مکتوب، حوادث غم‌باری را در منطقه رقم زده است و از این‌رو، مطالعه و تحلیل همه‌جانبه ساختاری و ژئومورفولوژیکی منطقه می‌تواند به درک درست و صحیحی از شرایط موجود منجر شده و مبنای علمی لازم را برای مقابله مؤثر و کنترل مخاطرات عینی و بالفعل منطقه فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

کلان‌شهر تبریز به‌عنوان مرکز استان آذربایجان شرقی در مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 02'$ تا $38^{\circ} 10'$ عرض شمالی و $46^{\circ} 11'$ تا $46^{\circ} 23'$ طول شرقی واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۳۶۶ متر می‌باشد (شکل ۱). استقرار شهر تبریز در مجاورت گسل بزرگ تبریز که از شمال آن می‌گذرد نمونه‌ای از استقرار اجباری است. وجود مخروط افکنه‌ی بزرگ مهران‌رود و آجی‌چای در جلگه‌ی تبریز و به‌تبع آن غنی بودن آب‌های زیرزمینی و حاصلخیز بودن خاک‌های جلگه و مسیر ترانزیتی اروپا سبب استقرار و توسعه‌ی شهر تبریز در کنار گسل خطرناک شده است. گسل شمال تبریز که به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین و فعال‌ترین گسل‌های ایران شناخته می‌شود دارای یک شاخه اصلی در شمال و شاخه‌های فرعی در شرق و شمال شرقی است. شاخه شمالی آن تقریباً منطبق با اتوبان پاسداران است (رضائی‌مقدم و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین توسعه و گسترش ساخت‌وساز بر روی تپه‌های رسی و مارنی در شرق تبریز موسوم به ساری داغ و ولیعصر به دلیل کیفیت و ویژگی‌های نامطلوب خاک و خاصیت روانگرایی آن در هنگام زلزله و به علت ژئومورفولوژی خاص منطقه علاوه بر خطر زمین‌لرزه این منطقه در معرض خطر زمین‌لغزش هم قرار دارد (روستایی، ۱۳۹۰).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی کلان شهر تبریز

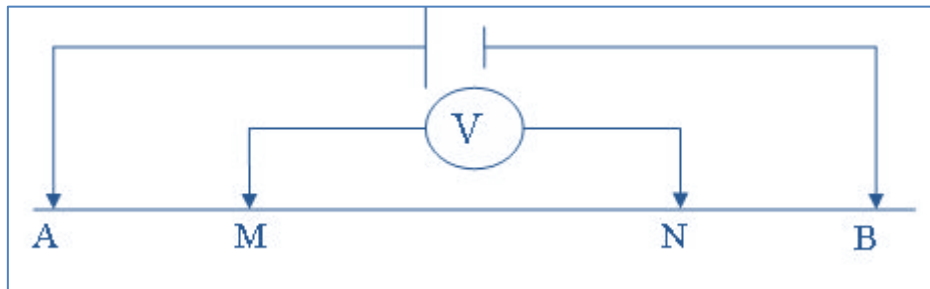
روش تحقیق

مقاومت ویژه الکتریکی

در کاوش‌های الکتریکی اثرهای سطحی حاصل از عبور جریان در داخل زمین آشکارسازی می‌شوند. در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیک نظیر ثقل سنجی، مغناطیس و رادیواکتیویته که در آن‌ها تنها یک میدان نیرو یا ویژگی بی‌هنجار مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های الکتریکی از تنوع بیشتری نسبت به دیگر روش‌های ژئوفیزیک برخوردارند. روش مقاومت ویژه الکتریکی که از جمله روش‌های شناخته‌شده ژئوالکتریک است، به‌طور مؤثری برای اکتشاف منابع آب زیرزمینی، بررسی انواع آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی، آشکارسازی محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها و مناطق خردشده و کاربردهای متنوع دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف از برداشت‌های مقاومت ویژه، تعیین توزیع زیرزمینی مقاومت ویژه با استفاده از اندازه‌گیری‌های سطحی می‌باشد. از این اندازه‌گیری‌ها، مقاومت ویژه واقعی توده‌های زیرسطحی قابل تخمین است. در اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه با تزریق جریان به درون زمین از طریق دو الکتروود جریان و اندازه‌گیری اختلاف ولتاژ حاصل میان دو الکتروود پتانسیل، مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی قابل تخمین است. در شکل ۲ که یک آرایش چهار الکتروودی را نشان می‌دهد؛ الکتروودهای A و B الکتروودهای جریان و الکتروودهای M و N الکتروودهای پتانسیل می‌باشند. رابطه (۱) معادله اساسی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری برای هر نوع آرایش الکتروودی است.

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}} \frac{\Delta V}{I} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، I شدت جریان ارسالی (برحسب آمپر)، ΔV اختلاف پتانسیل قرائت شده (برحسب ولت) و ρ_a مقدار مقاومت ویژه ظاهری (برحسب اهم‌متر) می‌باشد. در صورتی که اگر زمین غیرهمگن باشد و فواصل الکترودی تغییر کنند و یا فواصل ثابت بوده در حالی که مجموعه آرایش تغییر مکان یابد، مقاومت ویژه کلاً تغییر خواهد یافت. نتیجه این است که در هر اندازه‌گیری مقدار متفاوتی از مقاومت ویژه ظاهری حاصل می‌شود. واضح است که بزرگی این مقدار با آرایش الکترودها ارتباط نزدیک دارد. اگر چه این مقاومت ویژه ظاهری تا حدودی مشخص کننده مقاومت ویژه واقعی منطقه‌ای در نزدیکی مجموعه الکترودها است، ولی قطعاً یک مقدار مطلق نخواهد بود.



شکل ۲: آرایش چهار الکترودی

رابطه بین مقاومت ویژه حقیقی و ظاهری رابطه‌ای پیچیده است. برای تعیین مقاومت ویژه حقیقی ساختارهای زیرسطحی از روی مقادیر ظاهری آن، از روش‌های معکوس سازی توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده می‌شود (محمدی و ایرانشاهی، ۱۴۰۲).

مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی

برداشت‌های مقاومت ویژه، تصاویری از تغییرات مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی در اختیار قرار می‌دهند. برای تبدیل این تصاویر به تصاویر زمین‌شناسی، اطلاعاتی در خصوص مقادیر مقاومت ویژه انواع ساختارهای زیرسطحی و همچنین زمین‌شناسی محیط تحت بررسی حائز اهمیت است. مقاومت ویژه برخی از مواد، سنگ‌ها، کانی‌ها و محیط‌های معمول زمین‌شناسی در جدول ۱ آورده شده است. دامنه تغییرات مقاومت ویژه در مقایسه با کمیت‌های فیزیکی که در دیگر روش‌های ژئوفیزیک محاسبه می‌شوند بسیار بیشتر است. سنگ‌های دگرگون و آذرین نوعاً دارای مقادیر با مقاومت ویژه بالا هستند. مقاومت ویژه این سنگ‌ها اساساً وابسته به درجه شکستگی و درصد پرشدگی آن‌ها از آب‌های زیرسطحی است. سنگ‌های رسوبی به علت تخلخل و به واسطه آن محتوی آب بیشتر، معمولاً دارای مقاومت ویژه پایین می‌باشند. خاک‌های مرطوب و آب‌های زیرزمینی شیرین، دارای مقاومت ویژه پایینی هستند. خاک‌های رسی از انواع ماسه‌ای آن دارای مقاومت ویژه پایین تری می‌باشند. بنابراین مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک لایه بستگی به وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه دارد. به عبارت دیگر تفکیک لایه‌ها برحسب جنس آن‌ها از نظر زمین‌شناسی تنها با به دست آوردن مقاومت ویژه الکتریکی آن‌ها میسر نمی‌باشد و مقاومت ویژه الکتریکی رسوبات، سازندها و واحدهای زمین‌شناسی موجود در هر منطقه باید به طور جداگانه تعیین شود (محمدی و ایرانشاهی، ۱۴۰۲).

جدول ۱: مقاومت ویژه برخی از انواع آب، سنگ و رسوبات

مقاومت ویژه (اهم متر)	مواد معمول زمین‌شناسی
۵۰۰ - > ۱۰۰۰	آهک‌های آسماری
۲۰۰ - ۵۰۰	آهک‌های کرتاسه
۳۰۰ - ۱۰۰۰۰	ماسه سنگ کوارتزیت
۲۰ - ۱۰۰	خاکستر (برش) آتشفشانی
۱۰ - ۱۰۰	آب زیرزمینی
۰/۲	آب دریا
۵۰ - ۵۰۰۰	سنگ آهک
۲۰ - ۲۰۰۰	شیل
۱ - ۱۰۰	رس
۳۰۰ - ۱۰۰۰۰	آبرفت‌های دانه درشت و کنگلومرا
۱۰۰ - ۳۰۰	آبرفت‌های دانه متوسط
۵۰ - ۱۰۰	آبرفت‌های دانه ریز
۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰	شن و ماسه خشک
۵۰ - ۵۰۰	شن و ماسه اشباع از آب شیرین
۰/۵ - ۵	شن و ماسه اشباع از آب شور

روش‌های اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه

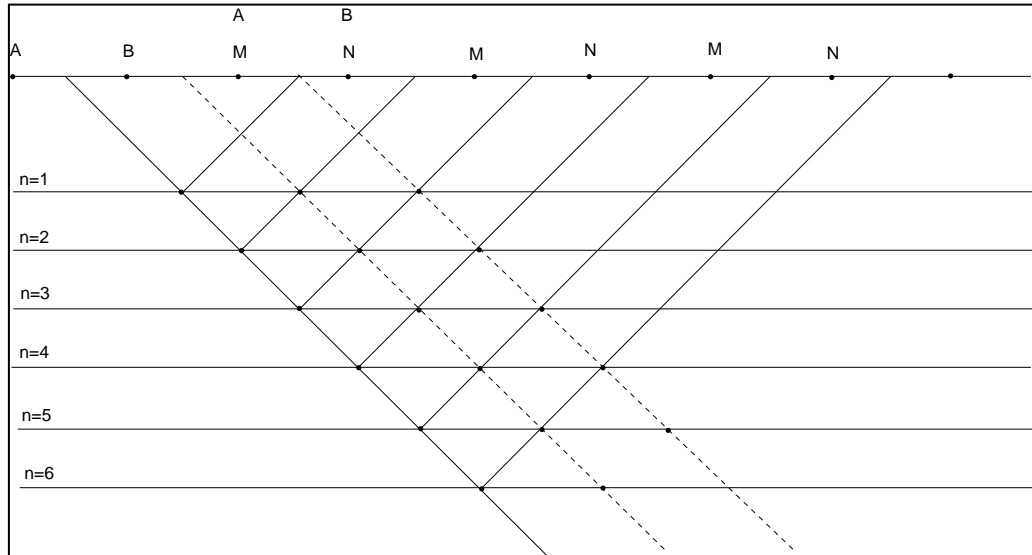
داده‌های مقاومت ویژه به صورت یک بعدی، دوبعدی و همچنین سه بعدی اکتساب می‌شوند. یک عملیات یا برداشت ژئوالکتریک به یکی از دو روش سونداژزنی قائم الکتریکی (VES)^۱ و یا پروفیل‌زنی^۲ انجام می‌شود. در روش سونداژزنی، تغییرات عمقی یا قائم مقاومت ویژه مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما در روش پروفیل‌زنی، تغییرات جانبی مقاومت ویژه مواد زیرسطحی در طول یک خط پروفیل بررسی می‌شود. در روش پروفیل‌زنی، آرایش مورد استفاده و پارامترهای آن، ثابت باقی می‌مانند و الکترودها در طول خط پروفیل جابه‌جا می‌شوند. در مواقعی که تغییرات مقاومت ویژه در طول پروفیل مورد بررسی هم به صورت جانبی و هم به صورت عمقی وجود دارد، داده‌ها به صورت دو یا سه بعدی (تلفیقی از سونداژزنی و پروفیل‌زنی) برداشت می‌شوند (محمدی ویژه و ایرانشاهی، ۱۴۰۲).

آرایش‌های الکترودی مورد استفاده

برای اندازه‌گیری‌های داده‌های مقاومت ویژه آرایش‌های الکترودی مختلفی پیشنهاد شده است. از مهم‌ترین آرایش‌هایی که در روش مقاومت ویژه بکار برده می‌شوند، می‌توان به آرایش‌های ونر^۳، شلومبرگر^۴، دوقطبی-دوقطبی^۵، قطبی-دوقطبی^۶ و گرادینان^۷ اشاره کرد. در این مطالعه از آرایش دوقطبی-دوقطبی استفاده شده است. در این نوع آرایش هر چهار الکترودها A, B, M, N در امتداد یک پروفیل قرار داشته و عملاً فاصله الکترودهای فرستنده مساوی فاصله الکترودهای گیرنده و برابر مقدار ثابت a می‌باشد (AB=MN=a). در هر اندازه‌گیری الکترودهای AB ثابت بوده و الکترودهای MN در امتداد پروفیل حرکت می‌کنند. فاصله بین نزدیک‌ترین الکترودهای جریان و پتانسیل برابر na می‌باشد (n=1,2,3,...) و عمق هر اندازه

- 1 Vertical electric sounding
- 2 Profiling
- 3 Wenner
- 4 Schlumberger
- 5 Dipole-dipole
- 6 Pole-dipole
- 7 Gradient

گیری برابر $(n+1)a/2$ خواهد بود. عدد اندازه‌گیری شده به نقطه‌ای در محل تلاقی دو خط با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح زمین که از وسط AB, MN رسم شده، نسبت داده می‌شود. به این ترتیب از مجموع نقاط اندازه‌گیری شده با این روش شبه مقطعی از مقاومت ویژه ظاهری در امتداد یک پروفیل به دست خواهد آمد (شکل ۳).



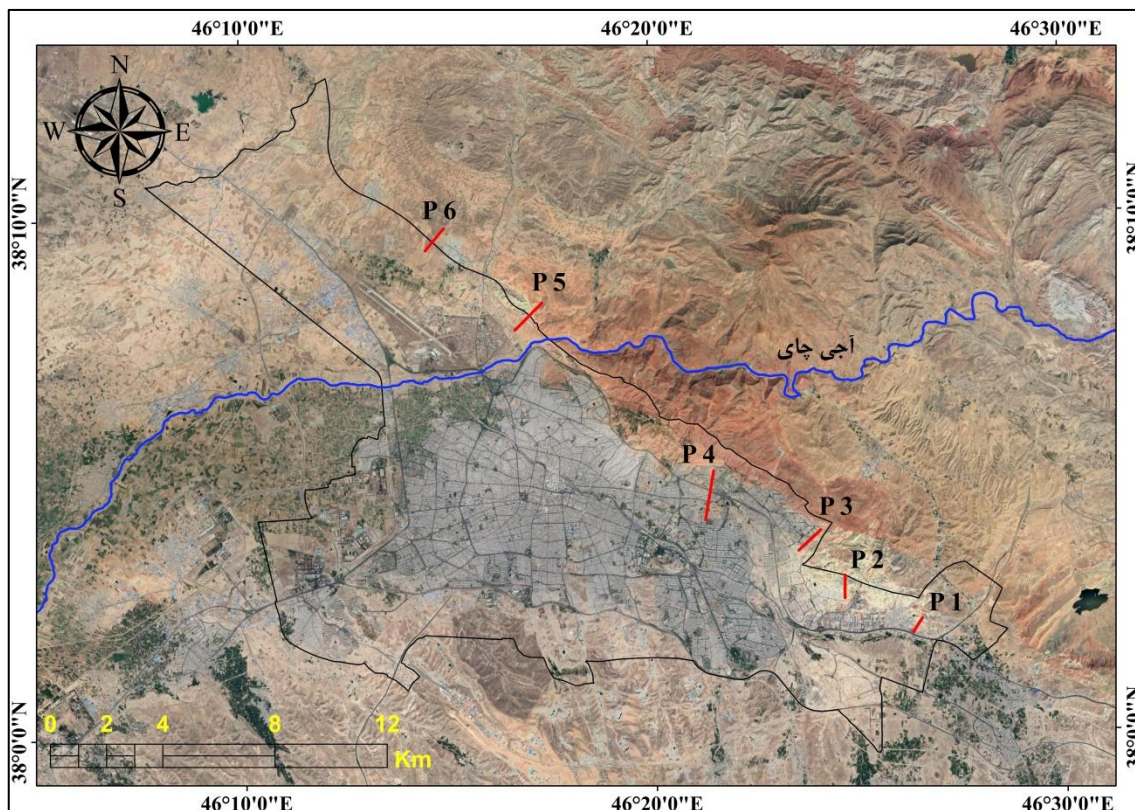
شکل شماره ۳: آرایش دوقطبی-دوقطبی

جهت انجام برداشت‌های مقاومت ویژه از دستگاه ARES ساخت شرکت GF Instruments کشور جمهوری چک استفاده شده است. بیشینه جریان و ولتاژ قابل تأمین توسط این دستگاه به ترتیب ۵ آمپر و ۲۰۰۰ ولت بوده و توان فرستنده آن حداکثر تا ۸۵۰ وات می‌باشد. نرم‌افزار پشتیبانی‌کننده این دستگاه نیز قابلیت ارسال داده‌های اندازه‌گیری شده با فرمت ورودی نرم‌افزارهای JPI2win, Res2Dinv, Res3Dinv و Surfer و دیگر نرم‌افزارهای کاربردی ژئوفیزیک را دارا می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴: دستگاه ARES (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

موقعیت مکانی پروفیل‌های مقاومت ویژه در شکل ۵ ارائه شده است.



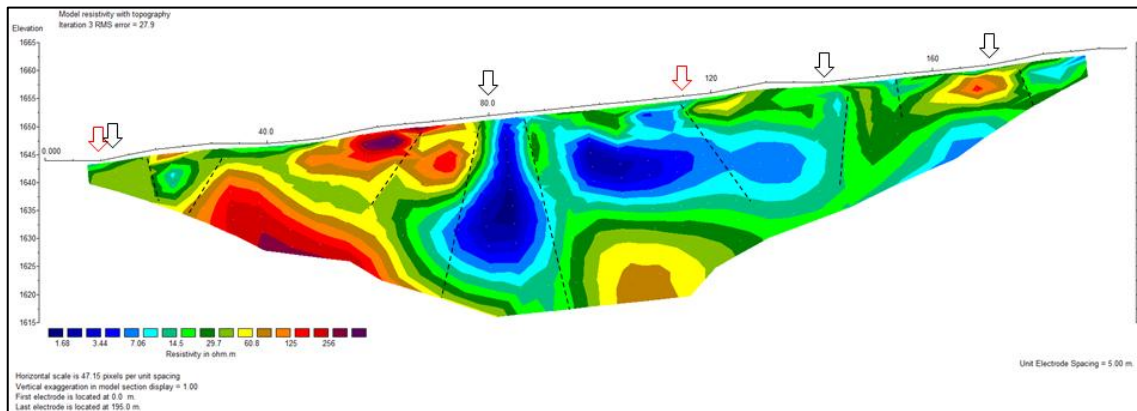
شکل ۵: موقعیت پروفیل‌های مقاومت ویژه در کلان‌شهر تبریز

یکی از متداول‌ترین و پیشرفته‌ترین روش‌ها در مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیک، مدل‌سازی وارون است که با روش‌ها و الگوریتم‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد. همان‌طور که از نام این مدل‌سازی برمی‌آید، در برابر مدل‌سازی مستقیم قرار دارد. در این نوع مدل‌سازی فرایند محاسبات با شروع از یک مدل ساده و یا استفاده از نتایج مطالعاتی مانند زمین‌شناسی و ژئوتکنیک یک مدل اولیه فرضی به دست می‌آید. سپس با تغییر پارامترهای مدل در هر مرحله از فرایند وارون‌سازی، سعی بر این است که اختلاف مابین پاسخ مدل حاصل با داده‌های مشاهده‌ای کمینه شود. در مدل‌سازی وارون بعد از تعیین پارامترهای مدل تمامی مراحل مدل‌سازی به صورت خودکار انجام می‌شود (محمدی ویژه و ایرانشاهی، ۱۴۰۲). در وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه در این مطالعه به ترتیب از نرم‌افزار Res2Dinv از محبوب‌ترین و شناخته‌شده‌ترین نرم‌افزارها در این زمینه، استفاده شده است. در نهایت برای تفسیر ترکیبی اطلاعات و نمایش مطلوب نقشه‌ها، مدل‌ها و مقاطع از نرم‌افزارهای Global mapper و Google earth نیز استفاده شده است.

یافته‌های پژوهش

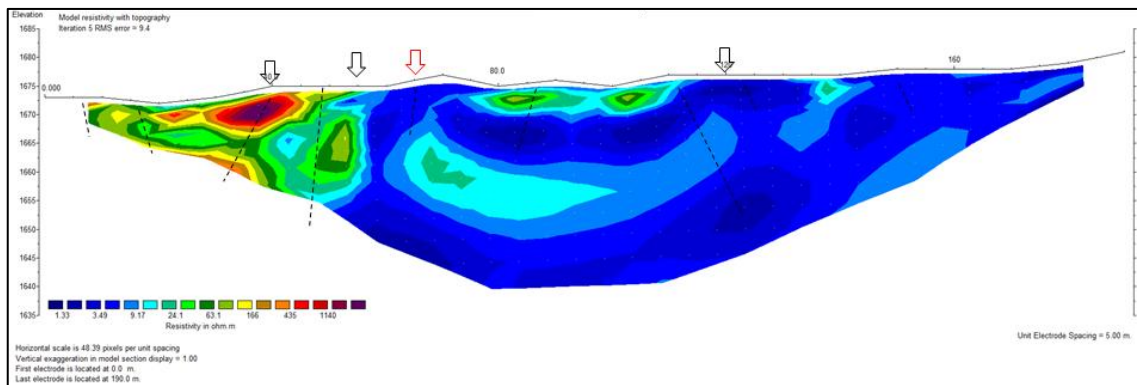
در شکل ۶ مدل حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه با اعمال توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل ۱ آورده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در طول این پروفیل به ترتیب $0/315-$ و $493/6$ اهم متر می‌باشد. این مسئله ناشی از تغییر ضخامت نهشته‌های رسوبی و حضور واحدهای سنگی در عمق می‌باشد. لذا تغییرات مقاومت ویژه در طول پروفیل نیز در ارتباط با تغییر در اندازه دانه‌های رسوبی و حضور واحد سنگی رسوبی در زیر نهشته‌های رسوبی تفسیر می‌شود. ناحیه با مقاومت ویژه نسبی بالا (طیف رنگی قرمز تا بنفش) در عمق در ارتباط با واحد سنگی رسوبی تفسیر می‌شود. ناپیوستگی‌ها که با خط‌چین‌های سیاه‌رنگ در شکل ۵ مشخص شده‌اند، می‌توانند ناشی از

عملکرد سامانه گسلی در این ناحیه باشند. موقعیت گسل‌ها از مطالعات تکتونیک و خطواره‌های حاصل از نقشه‌های مغناطیس‌سنجی به ترتیب با پیکان‌های قرمز و سیاه‌رنگ در مدل وارون مقاومت ویژه مشخص شده‌اند.



شکل ۶: مدل وارون دویبعدی مقاومت ویژه پروفیل ۱، با اعمال توپوگرافی سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

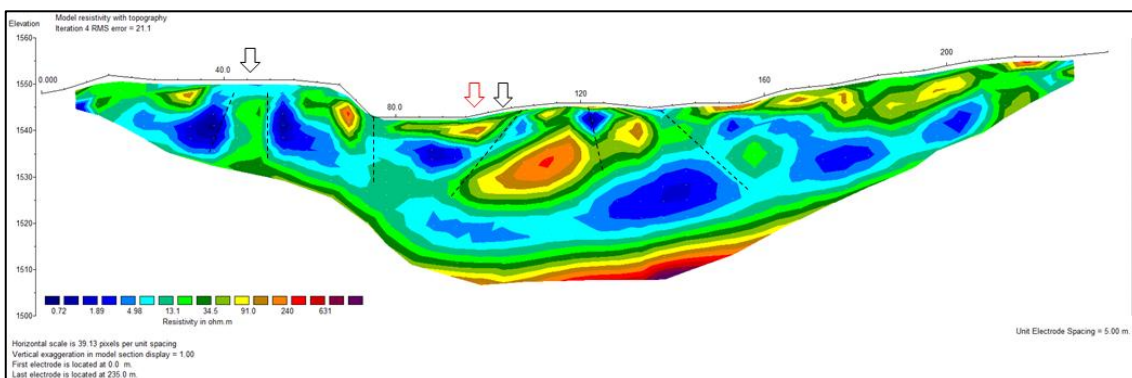
در شکل ۷ مدل حاصل از وارون سازی دویبعدی داده‌های مقاومت ویژه با اعمال توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل ۲ آورده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در طول این پروفیل به ترتیب ۱/۴ و ۳۹۸ اهم متر می‌باشد. همان‌طور که از داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل وارون مشاهده می‌شود، بیشینه مقاومت ویژه فراتر از ۱۵۰۰ اهم متر می‌باشد. تغییرات مقاومت ویژه این پروفیل در ارتباط با گسترش نهشته‌های آبرفتی و خردشدگی واحدهای رسوبی تفسیر می‌شود. تغییرات مقاومت ویژه، وجود همبری مابین واحدهای رسوبی در این ناحیه را تأیید می‌کند. علاوه بر این، چند ناپیوستگی در مدل مقاومت ویژه قابل تشخیص است که می‌توانند ناشی از عملکرد سامانه گسلی در این ناحیه باشند. ناپیوستگی‌های مزبور با خطچین‌های سیاه‌رنگ در شکل ۶ مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط گسل (از مطالعات تکتونیک) با فاصله حدود ۲۰ متری از همبری مقاومت ویژه مشاهده می‌شود. علاوه بر گسل مزبور چند ناپیوستگی دیگر در این پهنه گسلی قابل تشخیص می‌باشند.



شکل ۷: مدل وارون دویبعدی مقاومت ویژه پروفیل ۲، با اعمال توپوگرافی سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

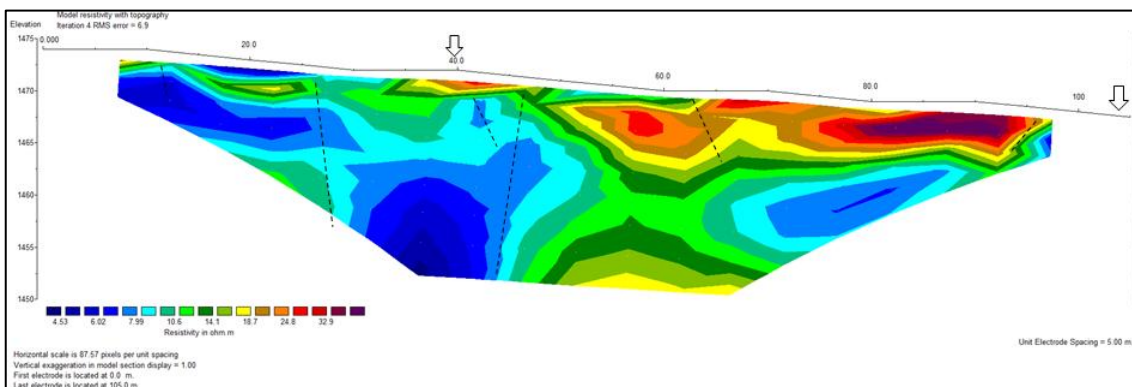
در شکل ۸ مدل حاصل از وارون سازی دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه با اعمال توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل ۳ آورده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در طول این پروفیل به ترتیب ۳/۰۵ و ۶۸۹/۵ اهم متر می‌باشد. در محل این پروفیل چند ناپیوستگی در مدل مقاومت ویژه قابل تشخیص است که می‌توانند ناشی از

عملکرد گسل‌ها در این ناحیه باشند. ناپیوستگی‌های مزبور با خط چین‌های سیاه رنگ در شکل ۸ مشخص شده‌اند. موقعیت گسل‌ها از مطالعات تکتونیک و خطواره‌های حاصل از نقشه‌های مغناطیس‌سنجی به ترتیب با پیکان‌های قرمز و سیاه رنگ در مدل وارون مقاومت ویژه مشخص شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، گسلی که در مطالعات تکتونیک (فلش قرمز رنگ) مشاهده شد، با اندکی جابه‌جایی توسط داده‌های مقاومت ویژه و مغناطیس‌سنجی نیز تأیید می‌شود.



شکل ۸: مدل وارون دوبعدی مقاومت ویژه پروفیل ۳، با اعمال توپوگرافی سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

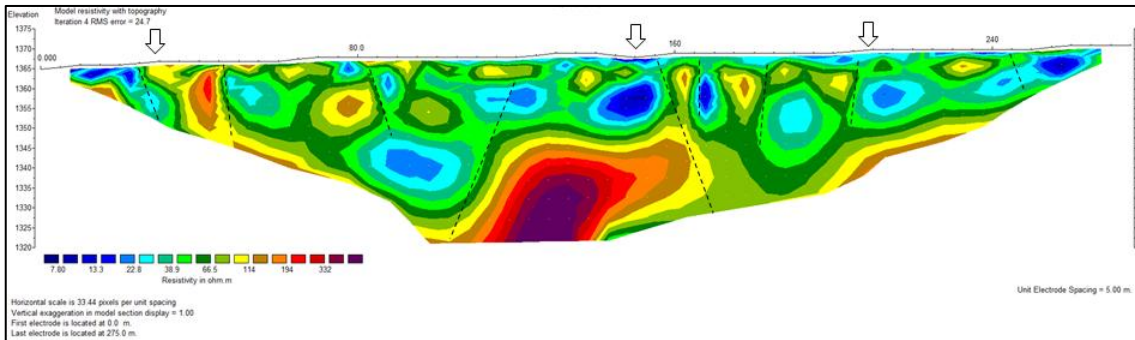
در شکل ۹ مدل حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه با اعمال توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل ۴ آورده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در طول این پروفیل به ترتیب $36/9$ و $3/9$ اهم متر می‌باشد. تغییرات مقاومت ویژه در طول این پروفیل در ارتباط با تغییر اندازه‌های رسوبی به واسطه فرایند رسوب‌گذاری و همچنین شکستگی‌های احتمالی در نهشته‌های رسوبی تفسیر می‌شود. ناپیوستگی‌هایی که با خط‌چین‌های سیاه رنگ در شکل ۹ مشخص شده‌اند، می‌توانند ناشی از عملکرد سامانه گسلی در این ناحیه باشند. موقعیت خطواره‌های حاصل از نقشه‌های مغناطیس‌سنجی با پیکان‌های سیاه رنگ در مدل وارون مقاومت ویژه مشخص شده‌اند. در محل این پروفیل، گسلی در مطالعات تکتونیک مشاهده نشده است.



شکل ۹: مدل وارون دوبعدی مقاومت ویژه پروفیل ۴، با اعمال توپوگرافی سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

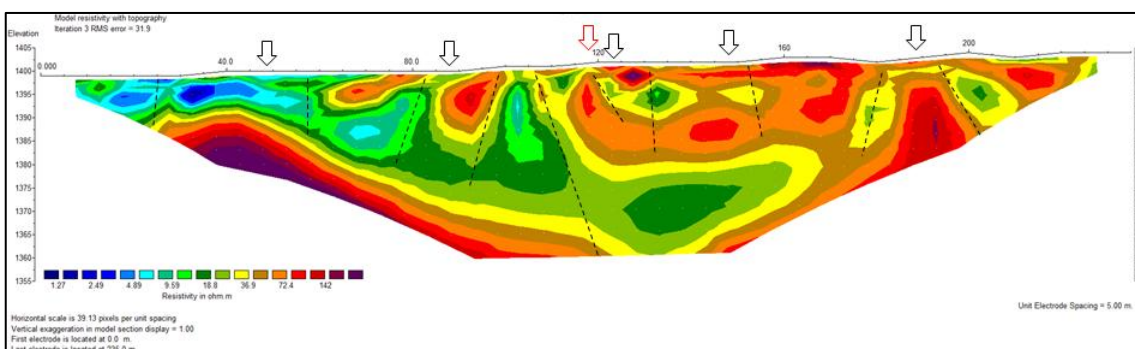
در شکل ۱۰ مدل حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه با اعمال توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل ۵ آورده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در طول این پروفیل به ترتیب $415/5$ و $-0/52$ اهم متر می‌باشد. بیشینه مقاومت ویژه از 500 اهم متر فراتر است. این مسئله ناشی از حضور واحدهای سنگی رسوبی (با

هوازگی کمتر) در زیر نهشته‌های رسوبی است. لذا تغییرات مقاومت ویژه در طول این پروفیل نیز در ارتباط با تغییر در اندازه دانه‌های رسوبی در نزدیک سطح و حضور واحد سنگی رسوبی در زیر نهشته‌های رسوبی تفسیر می‌شود. ناحیه با مقاومت ویژه نسبی بالا (طیف رنگی قرمز تا بنفش) در عمق در ارتباط با واحد سنگی رسوبی تفسیر می‌شود. ناپیوستگی‌هایی که با خطچین‌های سیاه‌رنگ در شکل ۱۰ مشخص شده‌اند، می‌توانند ناشی از عملکرد سامانه گسلی در این ناحیه باشند.



شکل ۱۰: مدل وارون دوبعدی مقاومت ویژه پروفیل ۵، با اعمال توپوگرافی سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

در شکل ۱۱ مدل حاصل از وارون سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه با اعمال توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل ۶ آورده شده است. کمینه و بیشینه مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در طول این پروفیل به ترتیب ۰/۳۷- و ۲۲۵ اهم متر می‌باشد. تغییرات مقاومت ویژه در طول این پروفیل نیز در ارتباط با تغییر در اندازه دانه‌های رسوبی و حضور واحد سنگی رسوبی در عمق تفسیر می‌شود. ناحیه با مقاومت ویژه نسبی بالا (طیف رنگی بنفش) در ابتدای پروفیل، منطبق بر ناحیه با خواص مغناطیس نسبی بالا می‌باشد. این ناحیه در ارتباط با واحد سنگی رسوبی تفسیر می‌شود که در مقایسه با نهشته‌های آبرفتی از خواص مغناطیس و مقاومت ویژه بالاتری برخوردار می‌باشد. ناپیوستگی و گسلس‌های احتمالی که با خطچین‌های سیاه‌رنگ در شکل ۱۱ مشخص شده‌اند، می‌توانند ناشی از عملکرد سامانه گسلی در این ناحیه باشند. موقعیت گسل‌ها از مطالعات تکتونیک و خطواره‌های حاصل از نقشه‌های مغناطیس‌سنجی به ترتیب با پیکان‌های قرمز و سیاه‌رنگ در مدل وارون مقاومت ویژه مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط گسل (از مطالعات تکتونیک) با فاصله حدودی ۱۵ متری از همبندی اصلی مقاومت ویژه مشاهده می‌شود. علاوه بر گسل مزبور چند ناپیوستگی دیگر در این پهنه گسلی قابل تشخیص می‌باشند.



شکل ۱۱: مدل وارون دوبعدی مقاومت ویژه پروفیل ۶، با اعمال توپوگرافی سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعات ژئوفیزیکی با هدف شناسایی و آشکارسازی گسل‌های پنهان و مدفون در محدوده شهر تبریز و مناطق حومه‌ای آن در استان آذربایجان شرقی انجام پذیرفت. برای دستیابی به این هدف، با تلفیق و در نظرگیری یافته‌های حاصل از بررسی‌های تکتونیکی قبلی (شامل تفسیر عکس‌های هوایی، بازدیدهای سیستماتیک میدانی و سایر منابع اطلاعاتی)، شش پروفیل مطالعاتی برای اجرای روش مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه مورد نظر طراحی و اجرا گردید. نتایج به‌دست‌آمده از برداشت‌های ژئوفیزیکی حاکی از تغییرات نسبتاً محدود و پایین مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در اغلب بخش‌های تحت بررسی بود. این الگوی مشاهده‌شده عمدتاً ناشی از گسترش عمقی و ضخامت قابل توجه نهشته‌های آبرفتی (که عموماً از مقادیر مقاومت ویژه پایینی برخوردارند) همراه با فرسایش شدید و گسترده واحدهای سنگی رسوبی در اعماق مورد مطالعه توسط روش ژئوفیزیک است. با این وجود، در برخی از نواحی محدود، به دلیل وجود رخنمون‌های سنگی یا کاهش قابل ملاحظه ضخامت پوشش خاکی و رسوبی، همبری‌ها و تغییرات شاخص و واضحی در مقادیر مقاومت ویژه قابل تشخیص بود. با استناد به شواهد استخراج‌شده از این مطالعات ژئوفیزیکی، می‌توان مسیر احتمالی گسل‌های اصلی و فرعی را در نقشه‌های زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه مورد بازبینی و اصلاح قرار داد. نکته قابل تأمل این است که در مدل‌های وارون‌سازی شده داده‌های مقاومت ویژه، علاوه بر سازوکارهای مرتبط با گسلش، ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های دیگری نیز مشاهده شد. اگرچه به دلیل ماهیت الگوریتم وارون‌سازی مورد استفاده و همچنین پایین بودن ذاتی مقادیر مقاومت ویژه در نهشته‌های آبرفتی، تشخیص دقیق و تفکیک این ناپیوستگی‌ها در مدل‌های مقاومت ویژه با چالش‌هایی همراه است، اما با توجه به پوشش گسترده و چگالی مناسب داده‌های برداشت‌شده، می‌توان این ناپیوستگی‌ها را نیز به نحوی به فعالیت‌ها و رویدادهای تکتونیکی گذشته و حال در منطقه مرتبط دانست.

منابع

- رضائی مقدم، محمدحسین؛ سمندر، نسرین؛ رحیمپور، توحید (۱۴۰۴)، پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری SWARA و CRITIC در محدوده شهر تبریز. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۷(۲)، ۳۹-۵۵.
- روستایی، شهرام (۱۳۹۰)، پهنه‌بندی خطر گسل تبریز برای کاربری‌های مختلف اراضی شهری، فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۲۱، صص ۲۷-۴۱.
- زارع، مهدی؛ شاه پسندزاده، حسن (۱۳۷۴)، بررسی مقدماتی لرزه‌خیزی، زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه گسلش در پهنه آذربایجان شرقی، تهران، موسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- سرهنگی، مهرداد؛ سلگی، علی؛ طالبیان، مرتضی؛ ملکی، زهرا (۱۴۰۰)، تحلیل مورفومتری و مخاطرات تکتونیکی گسل زندان در منطقه جاسک به منظور توسعه پایدار، مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۸، شماره ۴، ۳۳۷-۳۵۴.
- محمدی ویژه، مهدی؛ ایرانشاهی، حسین (۱۴۰۲)، مطالعات ژئوالکترونیک و مغناطیس‌سنجی برای تدقیق شاخه‌های مدفون گسل‌های شهر تبریز (استان آذربایجان شرقی)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، معاونت اکتشاف - مدیریت اکتشافات ناحیه‌ای - گروه ژئوفیزیک، ۱۲۸ صفحه.
- مصدق زاده، المیرا؛ خلج، محمد (۱۴۰۱)، پهنه‌بندی مخاطرات لرزه‌ای شهرهای مرزن آباد و طالقان بر اساس ارزیابی شاخص‌های مورفوتکتونیک، برنامه‌ریزی توسعه کالبدی، دوره ۹، شماره ۱، ۱۰۷-۱۱۶.
- ولدی، بختیار؛ خضری، سعید؛ قربانی، محمدصدیق (۱۳۹۴)، تحلیل و پهنه‌بندی مخاطرات مورفوتکتونیک شهرستان کامیاران، مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۲، شماره ۲، ۲۵۱-۲۶۸.
- بیلاقی عنصرودی، سامره؛ روستایی، شهرام (۱۴۰۲)، ریز پهنه‌بندی خطر زلزله در مناطق اطراف گسل تبریز - از مرند تا تبریز، هفتمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی، آخن - آلمان، ۱۳-۱.
- Alemdar, K.D. (2025). Seismic risk assessment of transportation networks for the impending Istanbul earthquake with GIS-based MCDM approach. *Natural Hazards*, 121(9), 10085-10123.
- Bapat, A. (2010). Re-orientation of disaster management plans in Asian countries in view of recent earthquakes in China, Haiti and Chile. *Asian Disaster Manag. News*, 16, 20-21.
- Becker, J. S., Beban, J., Saunders, W. S. A., Van Dissen, R., & King, A. (2013). Land use planning and policy for earthquakes in the wellington region, New Zealand (2001-2011). *Australasian Journal of Disaster and Trauma Studies*, 2013(1), 3-17.
- Bendimerad, F., & von Einsiedel, N. (2010). Disaster risk reduction of highly vulnerable urban areas through urban Re-development case study of barangay rizal, makati, Philippines. In *Proceedings of the 9th Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*, Kobe International Conference Center (pp. 6-9).
- Chen, Y., Li, G. P., Chen, Q. F., Chen, L., & Li, M. F. (1998). Earthquake damage and loss estimation with geographic information system. *Acta Seismologica Sinica*, 11(6), 751-758.
- Hada, C., & Shaw, R. (2022). Integrating disaster and climate change in risk sensitive land use planning. In *Handbook on Climate Change and Disasters* (pp. 462-469). Edward Elgar Publishing.
- Nyimbili, P. H., Erden, T., & Karaman, H. (2018). Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis. *Natural hazards*, 92(3), 1523-1546.
- Rezaei Moghaddam, M. H., Samandar, N. and Rahimpour, T. (2025). Zoning of Slope Instability Using SWARA and CRITIC Decision-Making Methods in the Tabriz City Region. *Physical Geography Research*, 57(2), 39-55. doi: 10.22059/jphgr.2025.399814.1007899
- Saunders, W. S. A., & Becker, J. S. (2015). A discussion of resilience and sustainability: Land use planning recovery from the Canterbury earthquake sequence, New Zealand. *International journal of disaster risk reduction*, 14, 73-81.

Subedi, S., & Chhetri, M. B. P. (2019). Impacts of the 2015 Gorkha Earthquake: Lessons Learnt from. Earthquakes: Impact, Community Vulnerability and Resilience, 55.