

## ارزیابی روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی گسل‌های پنهان کواترنری واقع در رسوبات آبرفتی (مطالعه موردی: بوستان چیتگر)

عباس علیان‌نژادی؛ دکترای ژئوفیزیک، الکترومغناطیس، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

سید رضا مهرنیا\*؛ دانشیار زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور تهران

سلیمه کیمیاگر؛ دانشیار فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

حبیب رحیمی؛ دانشیار مهندسی زلزله‌شناسی، دانشگاه تهران

نسرین صدرمحمدی؛ دانشجوی کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی، رسوب‌شناسی، و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشگاه خوارزمی تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۸

### چکیده

در این تحقیق، برای تشخیص گسل‌های پنهان کواترنری در رسوبات آبرفتی واقع در جنوب غربی بوستان چیتگر (منطقه ۲۲ تهران)، از روش‌های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR) و ژئوالکتریک استفاده شده است. با مطالعه پروفیل (GPR) مناطق دارای گسل شناسایی شدند. نتایج به‌دست‌آمده از دو پروفیل ژئوالکتریک حاکی از وجود دو زون با مقاومت الکتریکی پایین و مقاومت الکتریکی بالا در کنار یکدیگر است. افت مقاومت الکتریکی در رسوبات منطقه می‌تواند در ارتباط با عواملی مانند وجود سنگ‌های هوازده‌نشده، هوا در داخل رسوبات، دانه‌ریز بودن رسوبات، و جنگلی بودن منطقه مورد مطالعه به علت آبیاری درختان و نفوذ آب باران در زیر زمین باشد. مقاومت الکتریکی بالا نشان‌دهنده خردشدگی سنگ‌ها در اثر فعالیت گسل‌ها و رسوبات دانه‌درشت و خشک است. نتایج حاصل از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق نشان‌دهنده وجود یک زون گسلی با طول تقریبی ۱۴۰ متر است. با توجه به روندهای ساختاری اغلب گسل‌های شناسایی شده، ادامه داشتن امتداد گسل‌ها به سمت قسمت‌های بالایی بوستان چیتگر بسیار محتمل است. با توجه به پتانسیل لرزه‌خیزی و احتمال آسیب‌پذیری سازه‌های مسکونی، به‌ویژه در شمال و شمال غربی منطقه مورد مطالعه، نتایج این تحقیق حائز اهمیت است. استفاده از آن برای تحلیل مخاطرات زمین‌ساختی و ارتقای کیفی نقشه‌های موضوعی توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌گان: رادار نفوذی به زمین، زون گسلی، لندفرم، مخاطرات زمین‌ساختی، مقاومت الکتریکی.

### مقدمه

کشور ایران تا کنون چندین زلزله فاجعه‌بار و مخرب را پشت سر گذاشته است؛ نظیر زلزله طبرس در سال ۱۳۵۶ (Mohajer-Ashjai & Nowroozi 1979)، زلزله بم در سال ۱۳۸۱ (ابوالقاسمی و همکاران ۲۰۰۶)، و زلزله منطقه ازگله کرمانشاه در سال ۱۳۹۵ (بابایی ماهانی و کاظمیان ۲۰۱۸). شهر تهران در مرز دو حوضه رسوبی قاره‌ای البرز جنوبی و مرکزی قرار دارد با آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک، توپوگرافی ناهموار، رسوبات کواترنری با ضخامت چندین متر، و

گسل‌های با توان لرزه‌خیزی بالا که از عوامل مؤثر تکتونیک فعال در این منطقه است (جابری و همکاران ۲۰۱۷). از دیدگاه خطرهای لرزه‌ای، شهر تهران توسط چندین گسل اصلی و فرعی فعال، مانند گسل‌های مشاء - فشم و شمال تهران، احاطه شده است (آلن و همکاران ۲۰۰۳؛ حسامی و همکاران ۲۰۰۳؛ ریتز و همکاران ۲۰۰۶ و ۲۰۱۲؛ قلی‌پور و همکاران ۲۰۰۸). و گفتنی است تا کنون مطالعات بسیاری برای تجزیه و تحلیل خطرهای لرزه‌ای ایران در سطح کشور انجام شده است (کریمی‌پریداری و همکاران ۲۰۱۳؛ گلارا ۲۰۱۴؛ زارع و همکاران ۲۰۱۴؛ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ۲۰۱۵؛ خداوردیان و همکاران ۲۰۱۶؛ زعفرانی و همکاران ۲۰۱۷؛ زارع ۲۰۱۷؛ کوه‌رنگی و همکاران ۲۰۱۸؛ جلال‌حسینی و همکاران ۲۰۱۸؛ رحیمی و محصولی ۲۰۱۸).

آگاهی از خصوصیات و شرایط زمین‌شناسی یک منطقه و شناسایی نقاط ضعف آن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مراحل مختلف طراحی و اجرای طرح‌های عمرانی بگذارد. بدین ترتیب امکان پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی احتمالی و ارائه راه کارهای مناسب جهت بهبود شرایط زمین فراهم می‌شود. با مطالعات ژئوفیزیکی می‌توان الگوهای برای بیان شکل محیط‌های رسوبی و در نهایت اطلاعات مفیدی جهت طراحی یک سازه ارائه داد. برای شناسایی گسل‌ها از روش‌هایی نظیر عکس‌های هوایی، نقشه‌برداری میدانی، اطلاعات گمانه‌های زیرسطحی، و ترانسه‌های حفر شده استفاده می‌شود. اما گاه گسل‌های فعال توسط ساخت و سازهای شهری و رسوبات کواترنری با ضخامت‌های مختلف در حوضه یا دشت پوشیده می‌شوند و به سهولت قابل مشاهده و بررسی نخواهند بود. از گذشته تا کنون مفهوم گسل فعال توسط محققان بی‌شماری از کشورهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است (جیا و گو ۲۰۰۷؛ هی و همکاران ۲۰۱۳؛ ژائو و همکاران ۲۰۱۵؛ آکیوز و همکاران ۲۰۱۹؛ استمبرک و همکاران ۲۰۱۹؛ لیانگ و همکاران ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران ۲۰۱۹). به غیر از رخداد زلزله، گسل‌های فعال به پیاده‌روها، صنایع، مسکن‌ها، کسب و کار، کارخانه‌ها، و دیگر سازه‌های ساخت بشر خسارت‌های سنگین وارد می‌آورند (ساریبودک ۲۰۰۶).

رسوبات کواترنری به علت داشتن سیمان ضعیف بین ذرات تشکیل دهنده آن، دارای عدم مقاومت در برابر زلزله هستند. آبرفت‌های سطحی مشابه یک فیلتر سبب تغییر مشخصات حرکتی زمین در طی زمین‌لرزه و ایجاد تغییرات در پارامترهای امواج شامل ارتفاع و محتوی فرکانسی آن‌ها خواهند شد. رسوبات نرم سبب تقویت موج در محدوده فرکانسی معینی می‌شود که به افزایش میزان خرابی زلزله می‌انجامد (ترکان و همکاران ۲۰۰۲).

در گذشته، برای بررسی تداوم جانبی و تغییرپذیری رسوبات، باید همبستگی بین گمانه‌ها، تونل‌ها یا ترانسه‌ها با نرم‌افزارهای گوناگون و با تجربه‌ی بسیاری انجام می‌شد. امروزه، با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR)، این امکان فراهم شده است که مطالعات زیرسطحی توالی‌های رسوبی به صورت دوبعدی و سه‌بعدی، با تطابق بیشتر داده‌ها و از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر، در منطقه‌ای وسیع صورت گیرد (کورینو و همکاران ۲۰۰۱).

ایده استفاده از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیرسطحی به اختراعات ثبت‌شده در کشور آلمان، به سال ۱۹۰۴، توسط هولسمیر<sup>۱</sup>، بازمی‌گردد (پاراسنیس ۱۹۹۷). «رادار نفوذی به زمین»<sup>۲</sup> (GPR) قدرتمندترین

1. Hulsmeier  
2. Ground Penetrating Radar

روش و به عبارت دیگر دارای بالاترین قدرت تفکیک بین روش‌های ژئوفیزیکی است. از ویژگی‌های مثبت این روش، علاوه بر قدرت تفکیک بالای آن، می‌توان به نیاز به زمان کمتر در برداشت داده‌ها و غیرمخرب بودن آن اشاره کرد. استفاده از روش رادار نفوذی به زمین، به علت تصویربرداری یکپارچه و پیوسته از هندسه عوارض زیرسطح زمین، مورد توجه بسیاری از محققان در زمینه مطالعات زمین‌شناسی، مانند رسوب‌شناسی (نیل ۲۰۰۴؛ لیژراوچ و همکاران ۲۰۱۴؛ گو و همکاران ۲۰۱۸) و ژئومورفولوژی (بريستو و همکاران ۲۰۱۰؛ راموس و همکاران ۲۰۱۱) و معادن (فرانکی ۲۰۱۰؛ لوما و همکاران ۲۰۱۶)، است. همچنین روش رادار نفوذی به زمین در استخراج ویژگی‌های کیفی و کمی گسل‌ها، مانند شناسایی موقعیت دقیق و جهت و زاویه شیب و تشخیص گسل‌های پنهان، حائز اهمیت است (مگراوئی و همکاران ۲۰۰۰؛ دمانت و همکاران ۲۰۰۱؛ اسلاتر و نیمی ۲۰۰۳؛ ریس و همکاران ۲۰۰۳؛ مالیک و همکاران ۲۰۰۷؛ موریبا و همکاران ۲۰۱۳؛ بوبک و همکاران ۲۰۱۵؛ لونینا و همکاران ۲۰۱۸؛ ناکانیشی و همکاران ۲۰۱۷؛ گافارو و همکاران ۲۰۱۸؛ براندس و همکاران ۲۰۱۸؛ رضایی و همکاران ۲۰۱۹).

علاوه بر روش رادار نفوذی به زمین، استفاده از روش ژئوالکتریک می‌تواند در تحلیل وضعیت زیرسطحی منطقه مفید واقع شود. در این روش جریان الکتریکی به صورت مستقیم یا متناوب با فرکانس پایین (ایجادشده توسط باتری یا دستگاه مولد) از طریق دو الکترود نصب‌شده در سطح زمین به داخل زمین فرستاده می‌شود. ولتاژ حاصل از این جریان در داخل زمین به وسیله دو الکترود اندازه‌گیری می‌شود. پارامتر ژئوفیزیکی مورد استفاده در تفسیر داده‌های مقاومت‌سنجی مقاومت ظاهری است که در مورد زمین‌های همگن با مقاومت حقیقی مصالح برابر است. در واقع بررسی الکتریکی مقاومت می‌تواند با استفاده از آرایه‌های مختلف مانند ونر، دوقطبی- دوقطبی، قطبی- دوقطبی، قطبی، و ونر- شلومبرژه انجام شود (دالین و ژو ۲۰۰۴).

انتخاب بهترین آرایه برای یک برداشت صحرائی به نوع ساختار زیرسطحی، حساسیت اندازه‌گیرنده مقاومت، و سطح نوفه (نویز) زمینه بستگی دارد. ویژگی‌های یک آرایه که می‌تواند مهم باشد شامل عمق بررسی، حساسیت آرایه به تغییرات جانبی و قائم در مقاومت زیرسطحی، پوشش داده‌های افقی، و شدت (قدرت) سیگنال است (لوک ۲۰۰۴). به منظور بررسی ساختارهای زیرزمینی و جایگاه رسوبی آن‌ها می‌توان از روش مقاومت الکتریکی استفاده کرد (دیافریا و همکاران ۲۰۰۶؛ بزاک و همکاران ۲۰۱۴؛ گارسیا و دیاز ۲۰۱۶). از کاربردهای دیگر استفاده از این روش می‌توان به مطالعات مهندسی، معادن (کولیالی و همکاران ۲۰۱۶)، گسل‌های فعال (پلیسر و گیسن ۲۰۱۱)، کارست و شناسایی حفره‌های زیرزمینی (قدی و همکاران ۲۰۰۵؛ لوچی ۲۰۰۵) مانند غارها (ابدیل آل ۲۰۱۷) اشاره کرد (آنوموهرن ۲۰۱۳).

در این تحقیق با توجه به فاکتورهایی مانند پوشیده شدن برخی از گسل‌ها توسط رسوبات آبرفتی جوان (کواترنری) یا پیش‌روی شهرها در استان تهران، قرار گرفتن بسیاری از ابنیه‌های فنی روی نهشته‌های آبرفتی، وجود گسل‌ها و خطواره‌هایی از گسل‌های فعال لرزه‌ای که در پروژه‌های متعدد حین عملیات حفاری مشاهده شده‌اند (مختاری ۱۳۸۳)، رشد و توسعه منطقه ۲۲ شهرداری تهران، سهولت دسترسی به منطقه مورد مطالعه، رخنمون قسمتی از گسل‌های فرعی در رسوبات آبرفتی پهنه گسلی آزادشهر در حاشیه بوستان جنگلی چیتگر (شکل‌های ۱ تا ۴) تصمیم گرفته شد برای

جست‌وجوی روند گسل‌های پنهان در منطقه مورد مطالعه از روش‌های ژئوفیزیکی، مانند رادار نفوذی به زمین و ژئوالکتریک، استفاده شود.

### موقعیت جغرافیایی

محدوده مورد مطالعه در منطقه ۲۲ شهرداری تهران در ضلع جنوب غربی بوستان جنگلی چیتگر، محل تلاقی قسمت شرقی جاده ایران خودرو با منطقه مسکونی آزادشهر، در مختصات جغرافیایی UTM ( / Easting: 517658.75 Northing: 3955301.99)، واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از شمال به ارتفاعات البرز، از جنوب به جاده ساوه، از شرق به رودخانه کن، و از غرب به رودخانه وردآورد محدود است. بلندترین منطقه ارتفاعی در خط مستقیم حوزه آبریز شمالی در ارتفاعات البرز و در شرق روستای کیگا با ارتفاع ۳۸۴۰ متر و پست‌ترین منطقه در تقاطع امتداد اصلاح شده رودخانه وردآورد با جاده ساوه دارای ارتفاع ۱۰۴۰ متر است. فاصله غرب محدوده مورد مطالعه تا ابتدای کرج در حدود ۱۱ کیلومتر است.

### جایگاه زمین‌شناسی

نهشته‌های آبرفتی کواترنری در اطراف تهران نهشته‌های رودخانه‌ای-سیلابی هستند که به دنبال چرخه‌های فرسایشی پلیوسن-پلیستوسن (سازند هزاردره) انباشته شده‌اند و به همین دلیل از نظر خاستگاه ویژگی‌های یکسان دارند. طبق مطالعات انجام‌شده رسوبات آبرفتی کواترنری تهران به چهار واحد سنگی سری A (پلیوسن) و سری‌های B و C و D (کواترنری) تقسیم می‌شوند (ربین ۱۹۵۵ و ۱۹۶۶؛ آگالنس ۱۹۶۸). منطقه مورد مطالعه در رسوبات آبرفتی سری B ناحیه دشت تهران و در قسمت منطقه چیتگر قرار دارد. از لحاظ زمین‌شناسی دارای رسوبات غیرمتراکم، شامل تخته‌سنگ و قلوه‌سنگ و گراول و ماسه، است که از دامنه جنوبی کوه‌های البرز حمل و ته‌نشین شده‌اند. بر اساس مطالعه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر تهران، واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه شامل Qt2: Low level و Qplc: Fluvial conglomerate, Piedmont conglomerate and piedment fan and vally terrace deposits sandstone است (شکل ۲).

همچنین در قسمتی از رسوبات منطقه لایه‌هایی از خاک قدیمی و شبه‌لاتریتی دیده می‌شود. این لایه‌ها ممکن است نشان‌دهنده تغییرات شرایط آب‌وهوا و اثر هوای گرم‌تر در این منطقه باشد (بربریان و همکاران ۱۳۶۴) (شکل ۴). سری B روی سازند کهربیزک و سازند آبرفتی ناهمگن شمال تهران قرار دارد. آبرفت‌های سری B دارای ذرات بسیار درشت و ناهمگن اند. شکل دانه‌ها، منحنی توزیع اندازه ذرات، سن رسوبات، سیمانی شدن، نحوه اتصال دانه‌ها به یک‌دیگر، شکستگی، و هوازدگی از عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر خواص ژئوتکنیکی آبرفت منطقه مورد مطالعه است.

گسل‌های فرعی (کوتاه‌تر از ۲ کیلومتر) اطراف گسل اصلی راندگی شمال تهران به خودی خود لرزه‌زا نیستند. اما به علت آزاد شدن انرژی الاستیکی در راستای گسل‌های مجاور خود موجب ایجاد لغزش و جابه‌جایی در لایه‌ها می‌شوند (پورکرمانی و آربین ۱۳۸۳). نام گسل‌های فرعی از نام محلی که در آنجا رخ داده‌اند اقتباس شده است (حفیظی و ولی

۱۳۷۸). در اطراف منطقه بوستان جنگلی چیتگر گسل‌های متعددی در معرض دید قرار دارند. گسل‌های قدیمی‌تر سبب پایین افتادن منطقه بین بوستان و ارتفاعات شمالی آن شده است.

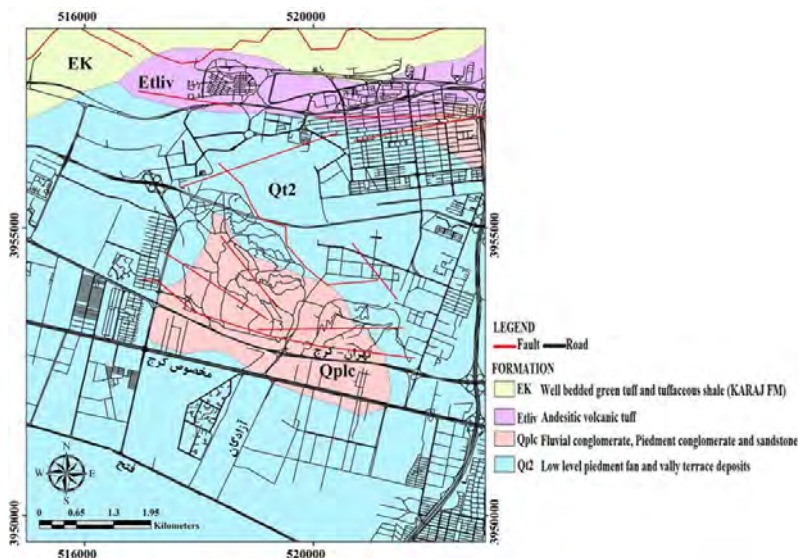
البته گسل‌های جوان‌تر، بدون تغییر در ژئومورفولوژی و شکل ناهمواری‌های منطقه مورد مطالعه، باعث جابه‌جایی رسوبات و نهشته‌های کواترنری شده‌اند. جهت امتداد گسل‌های قابل تشخیص در محدوده بوستان جنگلی چیتگر به موازات گسل شمال تهران و دارای جهت تقریباً شرقی-غربی‌اند. گسل‌های متعدد دیگری با طول‌های کم نیز در این منطقه وجود دارند که جهت آن‌ها شمال شرق-جنوب غرب و شمالی-جنوبی است. گفتنی است تپه چیتگر در غرب تهران (شمال بزرگراه تهران-کرج) به وسیله دو گسل بریده شده است. این گسل مرز میان تپه‌های چیتگر (رسوبات آبرفتی A و B) را تشکیل می‌دهد. گسل چیتگر از شاخه‌های جوان و پیش‌رونده گسل شمال تهران به سمت جنوب است (نظری و همکاران ۲۰۰۷).



شکل ۱. نمایشی از موقعیت منطقه مورد مطالعه (دایره قرمز رنگ) در محدوده غرب تهران، واقع در منطقه ۲۲ شهرداری تهران

## روش کار

به منظور بررسی روند گسل‌های فرعی دارای رخنمون در نهشته‌های آبرفتی ترانشه گسلی آزادشهر در منطقه مورد مطالعه شهری با استفاده از روش‌های رادار نفوذی به زمین و ژئوالکترونیک اقدام شد. پهنه گسلی آزادشهر در منطقه ۲۲ شهرداری تهران و حاشیه پارک جنگلی چیتگر (مرز شهرک آزادشهر- جاده ارتباطی متروی ایران خودرو به دریاچه مصنوعی شهدای خلیج فارس چیتگر) قرار دارد. در ابتدای این تحقیق، با توجه به اینکه اثری از گسل‌ها در قسمت جنوب غرب دریاچه و در ترانشه جاده ایران خودرو نمایان است، به بررسی وضعیت تکنیکی گسل‌های قابل مشاهده طی مطالعات میدانی اقدام شد. در ادامه با مشخص شدن امتداد و مسیر گسل‌ها، ۱ پروفیل در بالای ترانشه با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین و ۲ پروفیل با روش ژئوالکترونیک در امتداد ترانشه طراحی و اقدام به برداشت داده شد.



شکل ۲. واحدهای لیتولوژی منطقه مورد مطالعه، اقتباس از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر تهران

گفتنی است در مطالعات قبلی نیز با روش رادار نفوذی به زمین در این منطقه (علیان نژادی و همکاران ۲۰۱۸) یک پروفیل در این ترانسه مورد مطالعه قرار گرفت. با پردازش داده‌های حاصل از روش‌های مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار Reflex W و ۲ پروفیل ژئوالکترونیک در نرم‌افزار RES2DINV، پردازش هر یک از پروفیل‌های مورد نظر برداشت شده، مقایسه نتایج داده‌های حاصل و بررسی وضعیت ساختاری گسل‌های فرعی قابل مشاهده در منطقه مورد مطالعه، اقدام به نتیجه‌گیری و بررسی کلی وضعیت گسل‌های مورد نظر در منطقه شهری چیتگر شد.

## مطالعات میدانی

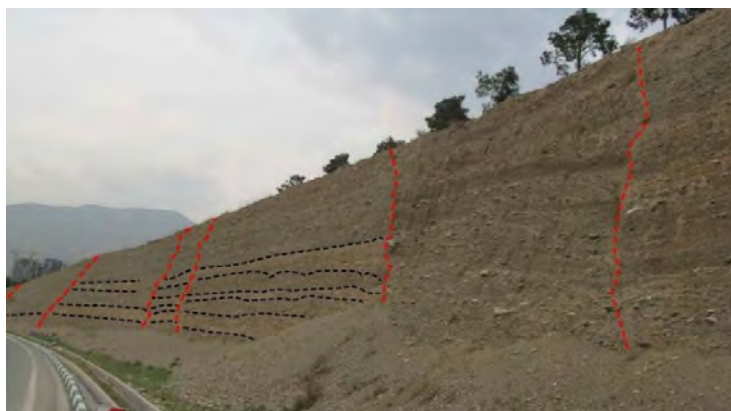
به علت احداث ادامه خیابان شمالی- جنوبی جاده ایران خودرو با هدف اتصال مسیر جاده مخصوص کرج به بوستان جنگلی چیتگر و همچنین به دریاچه شهدای خلیج فارس ترانسه‌هایی ایجاد شده است. نکته قابل توجه درباره این حفاری‌ها رخنمون پیدا کردن آثار گسل‌هایی است که روی ترانسه‌ها به راحتی قابل مشاهده‌اند. یکی از ترانسه‌ها در حاشیه شهرک مسکونی آزادشهر قرار گرفته است که روی آن جابه‌جایی لایه‌ها بدون هیچ ابزار پیشرفته‌ای به آسانی قابل اندازه‌گیری و مطالعه است (جدول ۱).

ضخامت زیاد رسوبات آبرفتی این منطقه، که توانسته است سبب پوشاندن آثار این گسل‌های پنهان- اما فعال- موجود در منطقه شود، و همچنین ساخت و سازهای فراوان اخیر، شامل ساخت شهرک مسکونی و توسعه روزافزون پارک جنگلی چیتگر و حتی ساخت دریاچه مصنوعی شهدای خلیج فارس و بیمارستان و ساختمان‌هایی با ارتفاع بسیار بلند در امتداد بالای ترانسه، از دلایل بررسی این منطقه به عنوان یک تحقیق است. با الهام گرفتن از نام شهرک آزادشهر این پهنه گسلی نیز به همین نام خوانده می‌شود. پهنه گسلی آزادشهر دارای طول حدوداً ۴۱۵ متر است. ارتفاع ترانسه مورد نظر از ۱ متر تا ۱۲ متر متغیر است. روی این زون آثار گسل‌های متعدد دارای رخنمون است. واحدهای سنگ‌شناسی، که همگی

ارزیابی روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی گسل‌های پنهان کواترنری...  
 متعلق به رسوبات آبرفتی‌اند، در اثر فعالیت گسل‌های فعال موجود در منطقه جابه‌جا شده‌اند و این میزان تغییر در وضعیت لایه‌ها به راحتی قابل اندازه‌گیری و مشاهده است (شکل‌های ۳ و ۴).

جدول ۱. پارامترهای گسل‌های مختلف در پهنه گسلی آزادشهر

گسل	جابه‌جایی روی سطح گسل (M)	جابه‌جایی قائم گسل (M)	سازوکار گسل	شیب و امتداد گسل	Coordinate (UTM)
1	0.7	1.65	نرمال و امتدادلغز چپگرد	N20E, 60 NW	X=517615 Y=3955022
2	2	2	نرمال	N80E, 50 SE	X=517616 Y=3954991
3	2.5	1.09	نرمال و امتدادلغز چپگرد	N50E, 85 NW	X=517618 Y=3954976
4	0.2	1	نرمال و امتدادلغز چپگرد	N70E, 87 NW	X=517618 Y=3954964



شکل ۳. نمایی از ترانشه زون گسلی آزادشهر (دید تصویر به سمت شرق منطقه)

(Easting: 517620.42 / Northing: 3954980.22)



شکل ۴. جابه‌جایی لایه‌ها در اثر فعالیت گسل‌ها در قسمت میانی پهنه گسلی آزادشهر. شش لایه در رسوبات آبرفتی این ترانشه قابل تفکیک است (دید تصویر به سمت شرق منطقه مورد مطالعه است) (Easting: 517612.19 / Northing: 3954909.00)

## رادار نفوذی به زمین

در این تحقیق اکتساب داده GPR با استفاده از دستگاه<sup>۱</sup> RTA با آنتن ۵۰ مگاهرتز، ساخت شرکت سوئد MALA، انجام گرفت (شکل ۵الف) (جدول ۲). بیشترین عمق نفوذ برای دستگاه RTA-50 حدود ۳۰ متر است. قبل از شروع برداشت داده لازم است تنظیمات دستگاه انجام شود. بدین منظور تنظیمات برای آنتن ۵۰ مگاهرتز با سیستم ثبت رکورد زمان و با (Trig interval=0.2s) و Autostack انجام شد (شکل ۶). با توجه به اینکه در این ترانسه گسل‌های پهنه آزادشهر دارای رخنمون هستند، می‌توانیم رفتار لایه‌های دارای گسل را در مواجهه با امواج الکترومغناطیس مشاهده کنیم. به منظور پردازش داده‌ها از نرم‌افزار ReflexW استفاده شد. سرعت میانگین طی برداشت داده‌ها 0.075m/ns است و این سرعت میانگین را می‌توان با استفاده از شکل هذلولی‌های پراش به دست آورد. به طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیکی غلبه بر محدودیت‌های نویزهای موجود در داده‌های خام راداری است. روش رادار نفوذی به زمین نیز از این قاعده مستثنا نیست و حتی در بخش‌هایی از مطالعات، بدون اعمال پردازش‌های مناسب، دستیابی به هدف مورد نظر غیرممکن به نظر می‌رسد. آگاهی از شرایط زمین‌شناسی منطقه و استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی سطحی و زیرسطحی مانند مشاهدات سطحی، ترانسه‌ها، گمانه‌ها، مقاطع زمین‌شناسی می‌تواند در انتخاب فیلترها و روش‌های مناسب برای پردازش دیتاها بسیار سودمند باشد.

پردازش دیتاها در نرم‌افزارهای مرتبط با روش GPR توسط پارامترهای مختلف کنترل می‌شود. زیرا دیتاهای خام به دلیل وجود نوفه‌های فراوان و ضعیف بودن سیگنال‌های دریافتی، به‌خصوص در عمق‌های پایین، قابل استفاده نیستند. پردازش اطلاعات شامل فیلترهای مختلف در حوزه زمان و مکان است که باعث حذف نوفه‌ها و تقویت سیگنال‌های مورد نظر می‌شود. همچنین، در فرایند پردازش، سرعت انتشار متوسط امواج الکترومغناطیسی برآورد می‌شود و با استفاده از آن مقیاس قائم مقطع برداشت‌شده از زمان به عمق تبدیل می‌شود.

در رادارگرام‌های پردازش‌شده، مرزهایی آشکار می‌شوند که به تغییر در ثابت دی‌الکتریک محیط مربوطاند و موجب بازتاب امواج می‌شوند. این مرزها می‌توانند نمایانگر تغییر جنس، تغییر محتوای آب، خردشدگی، و عوامل دیگر باشند. در مرحله اولیه تفسیر داده‌ها، این مرزهای بازتابی، که کنتراست آشکار در هدایت الکتریکی را نشان می‌دهند، مشخص می‌شوند و با توجه به حدسیات و تجارب مفسر به عوارضی نظیر لایه‌بندی، سطح آب زیرزمینی، گسل، و سایر عوارض زمین‌شناسی نسبت داده می‌شوند.

## مقاومت الکتریکی

در این تحقیق برای بررسی مقاومت الکتریکی منطقه مورد مطالعه از آرایه قطبی- دو قطبی استفاده شد. برداشت‌ها شامل چهار پروفیل، هر یک به طول ۹۰ متر با فاصله الکترودی ۱۰ متر، بود. در ادامه هر دو پروفیل که در یک مسیر قرار داشتند و دارای هم‌پوشانی ۲ الکترودی بودند با یک‌دیگر ادغام شدند و یک پروفیل ۱۶۰ متری به وجود آمد. بنابراین برداشت‌ها شامل دو پروفیل ۱۶۰ متری با فاصله حدود ۶۰ متر از یک‌دیگر بود (شکل ۵ب) (شکل ۷). مختصات ابتدا و

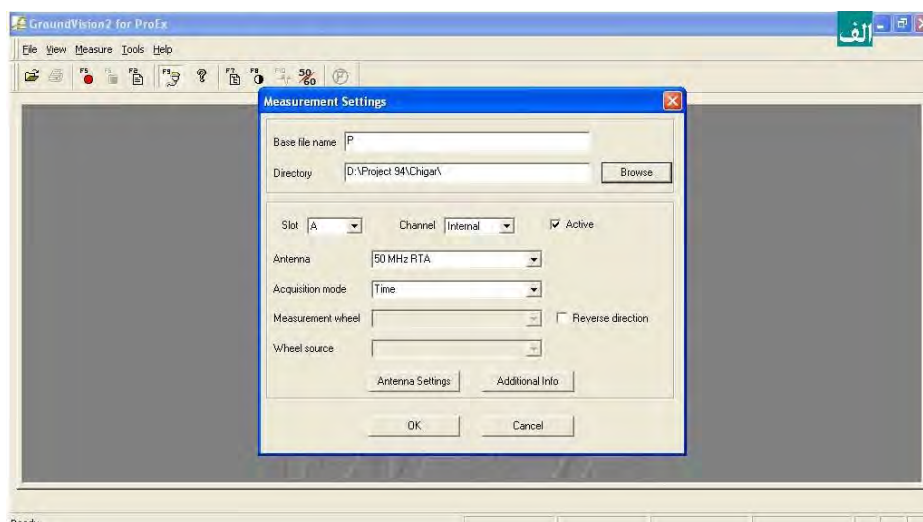
1. Rough Terrain Antenna



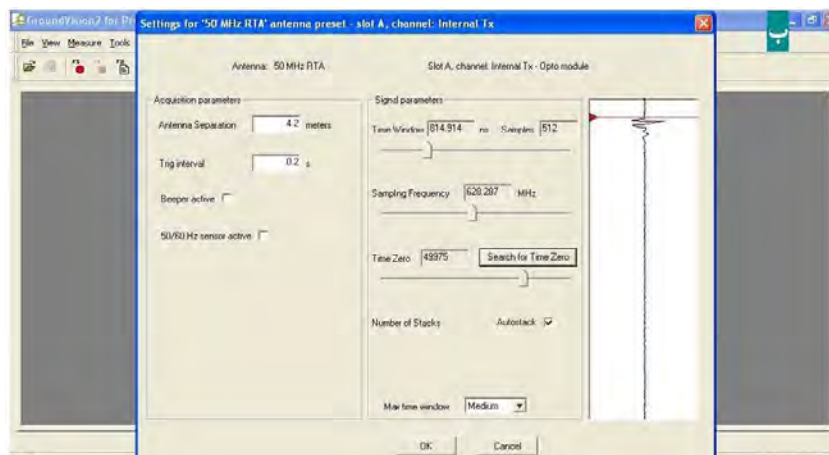
انتهای پروفیل‌ها در جدول ۳ آمده است. از تجهیزات مورد استفاده می‌توان به دستگاه مقاومت‌سنجی ABEM SAS1000، الکترودهای برنجی و فولادی، قرقره، کابل، و سیم‌های رابط اشاره کرد (شکل ۷). جهت برداشت دیتاها شمالی- جنوبی و شمال غربی- جنوب شرقی بود. داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرائی نیز شامل ولتاژ و شدت جریان بود و در ادامه مقاومت ظاهری محاسبه شد. تفسیر داده‌های مقاومت‌سنجی به روش دستی نیز بر اساس ترسیم تغییرات مقاومت ظاهری در برابر فاصله نقطه مرکزی تا الکترودها فرستنده جریان و مقایسه با منحنی‌های استاندارد امکان‌پذیر است. اما با استفاده از مدل‌های تحلیل برگشتی<sup>۱</sup> در نرم‌افزار RES2DINV مقاومت ظاهری لایه‌ها معکوس می‌شود و در نتیجه پروفیل‌های حقیقی ترسیم و تفسیر می‌شوند (ژوتومو ۲۰۰۷).



شکل ۵. الف) نمایی از پروفیل رادار نفوذی به زمین؛ ب) دو پروفیل مقاومت الکتریکی برداشت‌شده در این تحقیق (تصاویر از Google Earth اقتباس شده‌اند).



شکل ۶. الف) تنظیمات حوزه زمان؛



ادامه شکل ۶. ب) تنظیمات Trig interval و Autostack

جدول ۲. موقعیت نقاط ابتدا و انتهای پروفیل رادار نفوذی به زمین (GPR)

Profile	X-First	Y-First	X-End	Y-End
1	517578	3955156	517564	3954771

جدول ۳. موقعیت نقاط ابتدا و انتهای پروفیل‌های ژئوالکتریک

Profile	X-First	Y-First	X-End	Y-End
1	517643	3954935	517615	3955105
2	517709	3954999	517642	3955152



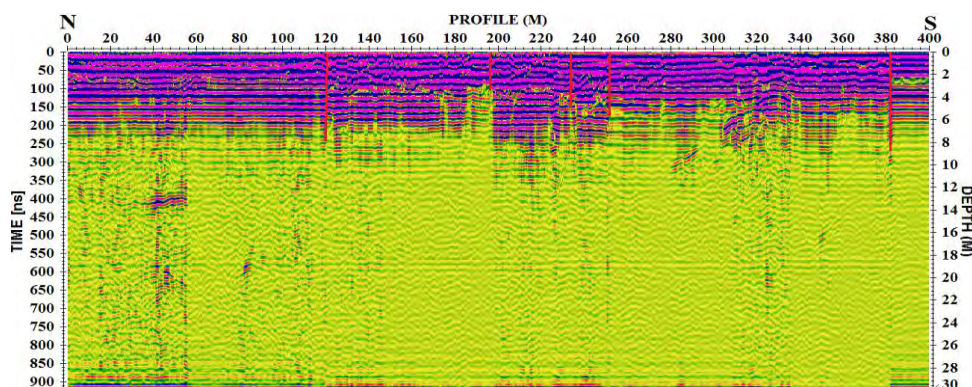
شکل ۷. نمایی از دستگاه مورد استفاده و پروفیل برداشت مقاومت ویژه الکتریکی زمین به روش آرایه قطبی-دوقطبی (Easting: 517652.36 / Northing: 3955028.56).

### نتایج پردازش پروفیل‌ها

#### نتایج تجزیه و تحلیل پروفیل رادار نفوذی به زمین

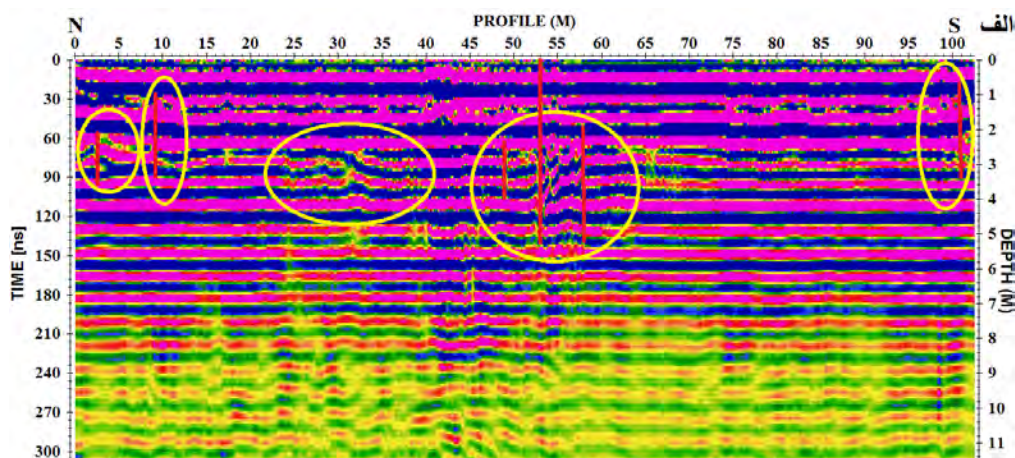
در نتایج حاصل از پردازش پروفیل ۱ با طول ۴۰۰ متر می‌توان تغییرات وجود یک زون گسلی را در فواصل تقریبی ۱۲۰ تا ۳۸۰ متری از طول پروفیل مشاهده کرد (شکل ۸). نتایج کلی از همه مقاطع به دست آمده از این پروفیل نشان‌دهنده

وجود گسل‌هایی با روندهای شرقی-غربی و شمال شرقی-جنوب غربی در منطقه مورد مطالعه است. در فواصل ۱۲۰ تا ۲۷۷ متری تغییرات شدیدتری در وضعیت لایه‌ها به صورت خردشدگی و جابه‌جایی واحدهای سنگ‌شناسی رخ داده است. در نتیجه مقطع شکل ۸ الف چندین شکستگی و جابه‌جایی لایه‌ها در فواصل ۳ متری، ۱۰ تا ۱۳ متری، ۲۵ تا ۳۸ متری، ۴۹ تا ۵۹ متری، ۶۵ متری، و ۹۹ متری در طول پروفیل قابل تشخیص و مشاهده است. وضعیت روند ساختاری اکثر گسل‌ها در این مقطع شرقی-غربی است. در نتیجه مقطع شکل ۸ ب اکثر گسل‌ها دارای امتداد ساختاری شرقی-غربی هستند. شکستگی‌ها و جابه‌جایی لایه‌ها در فواصل ۱۲۰ تا ۱۶۴ متری پروفیل قابل مشاهده است. در نتیجه مقطع شکل ۸ ج گسل‌ها دارای روند ساختاری شرقی-غربی و شمال شرقی-جنوب غربی هستند. در فواصل ۲۳۴ تا ۲۵۱ متری فعالیت گسل‌ها منجر به ایجاد شکستگی و جابه‌جایی لایه‌ها با مقیاس بیش از ۱ متر شده‌اند. از فواصل ۲۷۸ تا انتهای پروفیل وضعیتی عادی در لایه‌بندی لایه‌ها قابل تفکیک و مشاهده است. در این پروفیل جابه‌جایی‌های رخ داده در فواصل ۲۰۰ تا ۲۰۸ متری در عمق ۴ متری سبب تشکیل فرازمین و فروزمین‌هایی در مقیاس‌های کوچک با میزان جابه‌جایی‌های متغیر شده است. آثار این ساختارها روی ترانسه قابل مشاهده است. در نتیجه مقطع شکل ۸ د از فواصل ۳۱۰ تا ۳۸۲ متری در برخی قسمت‌ها جابه‌جایی لایه‌ها بر اثر فعالیت گسل‌ها قابل تشخیص است. البته در فواصل ۳۰۹ متری، ۳۲۳ متری، و ۳۳۱ متری سه گسل با جهت شمال شرقی-جنوب غربی قابل ردیابی هستند. در فاصله ۳۱۷ متری پروفیل گسل موجود تا عمق ۴ متری دارای امتداد تقریبی شرقی-غربی است. اما بعد از آن دارای تغییر جهت در روند ساختاری خود است (دایره سبز رنگ). بقیه گسل‌ها تقریباً دارای جهت شرقی-غربی هستند. از فاصله ۳۸۲ متری تا انتهای پروفیل وضعیتی عادی در لایه‌بندی لایه‌ها مشاهده می‌شود. این پروفیل بر روی ترانسه دارای رخنمون آثار گسلی اکتساب شده است و نتایج به‌دست‌آمده از این پروفیل قابل توجیه و تطبیق با مطالعات میدانی (شکل‌های ۳ و ۴) است. رسوبات نرم و سست آبرفتی منطقه مورد مطالعه در اثر فعالیت گسل‌ها به‌شدت دچار تغییراتی از قبیل خردشدگی و جابه‌جایی شده‌اند. همچنین وجود درختان فراوان و جنگلی بودن منطقه باعث نفوذ آب بیشتر بین حفره‌های ایجادشده در سنگ‌ها در نتیجه فعالیت گسل‌ها و افزایش تخلخل در واحدهای سنگ‌شناسی تشکیل‌دهنده منطقه شده است.

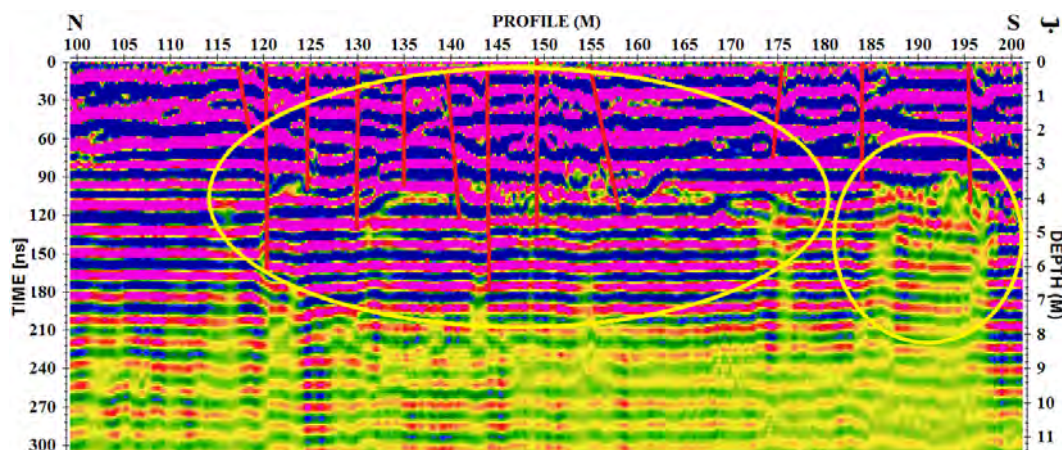


شکل ۸. نمایی از دیتای پردازش‌شده مربوط به پروفیل رادار نفوذی به زمین با طول ۴۰۰ متر. در این مقطع شکستگی و جابه‌جایی لایه‌ها از فواصل ۱۲۰ تا ۲۷۸ متری و ۳۱۰ تا ۳۸۲ متری کاملاً مشهود است. این منطقه نشان‌دهنده وجود یک زون گسلی است.

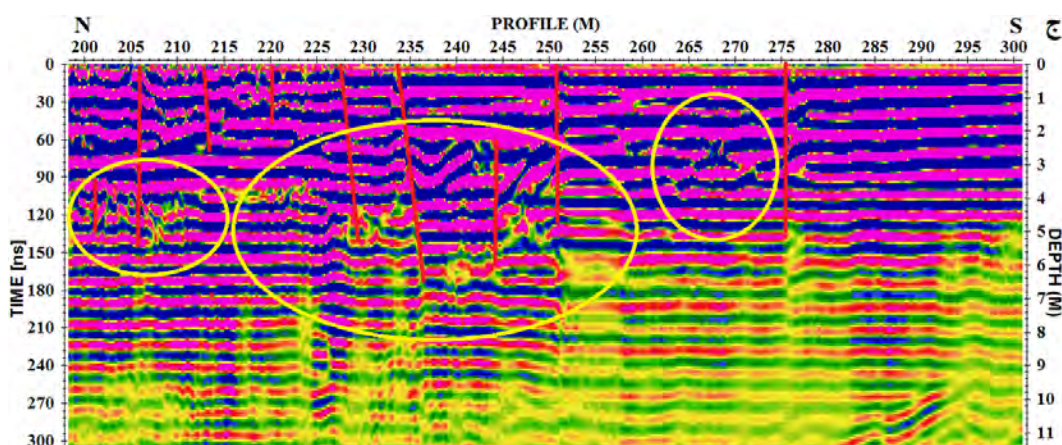




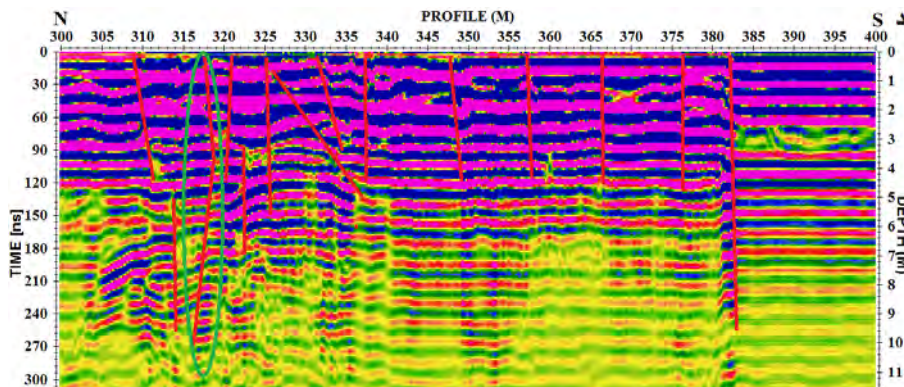
شکل ۸. الف) آثار برش لایه‌ها و وجود گسل‌های احتمالی منطقه قابل مشاهده است.



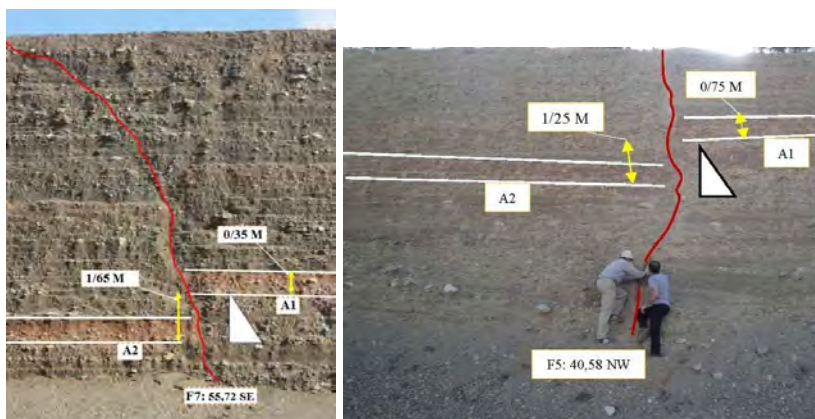
شکل ۸. ب) به هم ریختگی در وضعیت لایه‌بندی رسوبات در فواصل ۱۸۵ متری و ۱۹۵ متری پروفیل در اثر فعالیت گسل‌های منطقه



شکل ۸. ج) جابه‌جایی و تغییرات در وضعیت لایه‌ها در عمق ۳ تا ۷ متری



شکل ۸. د) بررسی و تشخیص روند گسل‌های احتمالی منطقه. بسیاری از این گسل‌ها با گسل‌های دارای رخنمون روی ترانشه مطابقت دارند.



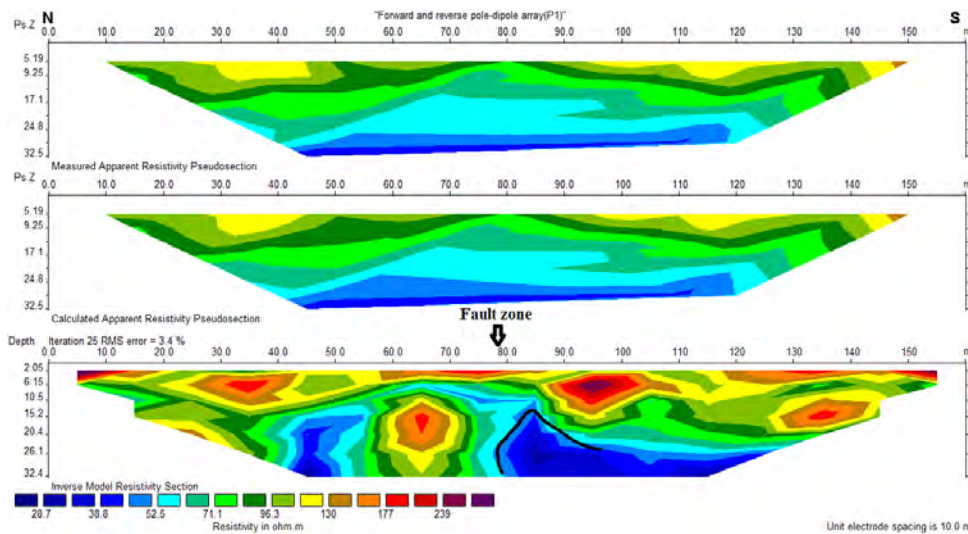
شکل ۹. بررسی و اعتبارسنجی مناطق دارای جابه‌جایی لایه‌ها در اثر فعالیت گسل‌ها در رادارگرام‌ها روی ترانشهٔ گسلی آزادشهر. (نام‌گذاری گسل‌های ترانشه به صورت قرارداد کارگروهی در منطقهٔ مورد مطالعه است). در این شکل جابه‌جایی لایه‌ها در اثر فعالیت گسل‌ها مشهود است.

## نتایج تجزیه و تحلیل پروفیل‌های ژئوالکتریک

### پروفیل P1

با ادغام پروفیل‌های ۱ و ۲، یک پروفیل جهت بررسی به طول ۱۶۰ متر به دست آمد. پردازش داده‌ها در نرم‌افزار RES2DINV انجام شد. با توجه به مختصات نقطهٔ شروع برداشت در فاصلهٔ تقریبی ۷۵ متری از طول پروفیل، یک زون با مقاومت الکتریکی پایین در کنار یک زون دیگر با مقاومت الکتریکی بالا مشاهده می‌شود که تا متر ۸۵ تقریبی متری طول پروفیل ادامه دارد. نتایج و مقاومت حقیقی به دست آمده در این پروفیل نشان‌دهندهٔ یک منطقهٔ کم‌مقاومت (حدوداً ۲۸ تا ۳۸ اهم) به علت دانه‌ریز بودن رسوبات زیرسطحی است. منطقهٔ دارای مقاومت الکتریکی بالا (۱۳۷ تا ۲۳۹ اهم) نشان‌دهندهٔ وجود یک زون گسلی است. در شرایط حقیقی و روی زمین نیز فواصل ذکر شده با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و مترکشی به اثبات رسیده است (شکل ۹).

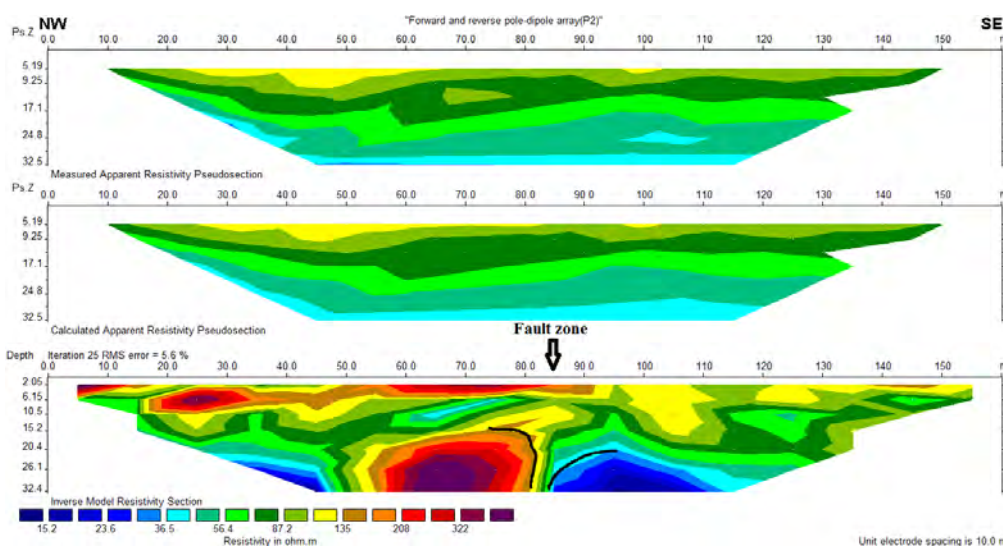




شکل ۹. نمایی از نتایج اولین پروفیل به دست آمده به روش مقاومت الکتریکی

### پروفیل P2

در پروفیل ۲، که از تلفیق پروفیل‌های ۳ و ۴ حاصل شده است، با توجه به مختصات نقطه شروع برداشت در فاصله تقریبی ۸۰ متری طول پروفیل یک زون با مقاومت الکتریکی پایین (۱۵,۲ تا ۲۳,۶ اهم) در کنار یک زون با مقاومت الکتریکی بالا (۲۰۸ تا ۳۲۲ اهم) مشاهده می‌شود که تا مترای تقریبی ۹۰ متری از طول پروفیل برداشت شده ادامه دارد و همانند پروفیل قبلی نشان‌دهنده اثر گسل در این منطقه است. دانه‌درشت و خشک بودن رسوبات می‌تواند از علل دیگر مقاومت الکتریکی بالا در این قسمت از منطقه باشد. در شرایط حقیقی و در روی زمین نیز این نتایج با مترکشی بر رخنمون پهنه گسلی در ترانشه جاده ایران خودرو به اثبات رسیده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. نمایی از خروجی دومین پروفیل مربوط به روش مقاومت الکتریکی و تشخیص منطقه دارای زون گسلی

## بحث و نتیجه

در شهر تهران گسل‌های بزرگ و کوچکی وجود دارند که به طور عمده توالی‌های رسوبی ترشیری و کواترنری را بریده و جابه‌جا کرده‌اند. یکی از این گسل‌ها گسل شمال تهران است که پرخطرترین و بحث‌برانگیزترین گسل لرزه‌ای شهر تهران، با راستای شرقی-غربی، است که در شمال تهران بین کوه و کوهپایه قرار دارد. گسل شمال تهران از چند قطعه هم‌پوشان تشکیل شده است که حرکت امتدادلغز چپ‌گرد دارند. زمان آخرین حرکت گسل شمال تهران به علت نداشتن سن دقیق نهشته‌های آبرفتی کواترنر مشخص نیست (آقائباتی ۱۳۸۹). پهنه گسلی آزادشهر در منطقه ۲۲ تهران و حاشیه بوستان جنگلی چیتگر (حاشیه شهرک آزادشهر) واقع شده است.

با توجه به رخنمون پیدا کردن آثار گسل‌های کواترنری بر رسوبات آبرفتی ترانشه موجود، که طی حفاری‌های اخیر در معرض دید قرار گرفته است، این سؤال پیش آمد که آیا منطقه دارای پتانسیل لرزه‌ای و تکتونیکی بالایی است؟ و آیا ساخت و سازهای بی‌شمار اخیر که در این منطقه رخ داده است، به دنبال فعالیت این گسل‌ها، در آینده نه چندان دور، می‌تواند منجر به ایجاد خسارات سنگین در منطقه مورد مطالعه شود؟ با توجه به ویژگی‌هایی مانند برش و شکستگی‌های ایجادشده در لایه‌ها و همچنین جابه‌جایی آن‌ها در طول گسل‌ها با مقیاس حدود چندین سانتی‌متر تا متر، می‌توان این گسل‌های پنهان را گسل‌های فعال کواترنری قلمداد کرد. با توجه به پوشیده شدن منطقه توسط رسوبات ضخیم آبرفتی، آثار این گسل‌ها در دیگر مناطق همچنان پنهان خواهد ماند.

الله‌وردی میگوینی و همکارانش توانستند با بررسی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و برداشت‌های GPR به نتایج مهمی در شناسایی گسل‌های فعال در منطقه گهرتپه-بهبهر دست یابند. آن‌ها، با تلفیق اطلاعات برداشت صحرائی و روش‌های مختلف ژئوفیزیکی، ناپیوستگی‌های زیرسطحی حاصل از فعالیت‌های زمین‌ساختی را شناسایی کردند و با تحلیل ناپیوستگی‌های به‌دست‌آمده به چند ساختار خطی با ویژگی‌های گسل‌های مدفون با راستای شرقی - غربی پی بردند (فرخ‌نیا و همکاران ۱۳۹۸).

در این پژوهش نتایج پردازش پروفیل برداشت‌شده با روش رادار نفوذی به زمین نشان‌دهنده وجود یک زون گسلی در فواصل ۱۱۰ تا ۳۸۰ متری منطقه مورد مطالعه است. گسل‌هایی با روندهای ساختاری شرقی - غربی و شمال شرقی - جنوب غربی سبب شکستگی و جابه‌جایی لایه‌ها شده‌اند. وجود بسیاری از این گسل‌ها که در نتایج رادار نفوذی به زمین مشخص شدند در مطالعات میدانی انجام‌شده بر ترانشه آزادشهر نیز کاملاً به اثبات رسیدند و با رخنمون داشتن گسل‌ها اندازه‌گیری شدند (شکل ۹). با توجه به برداشت این پروفیل بر ترانشه و گسل‌های دارای رخنمون، نتایج این پروفیل به منزله یک پروفیل راهنما برای تفسیر وضعیت تکتونیکی منطقه و صحت مطالعات ژئوالکتریک مورد استفاده قرار گرفت. روند گسل‌های احتمالی شناسایی‌شده در رادارگرام‌ها با روند گسل‌های دارای رخنمون بر ترانشه آزادشهر مطابقت دارند.

نتایج حاصل از مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی نشان‌دهنده وجود یک منطقه با مقاومت الکتریکی کم (۲۸ تا ۳۸ اهم) و مقاومت الکتریکی بالا (۱۳۷ تا ۲۳۹ اهم) در کنار یک‌دیگر در فاصله ۷۵ تا ۸۵ متری پروفیل ۱ و منطقه دارای مقاومت الکتریکی کم (۱۵,۲ تا ۲۳,۶ اهم) و مقاومت الکتریکی بالا (۲۰۸ تا ۳۲۲ اهم) در فاصله ۸۰ تا ۹۰ متری پروفیل ۲ است. مقاومت الکتریکی بالا نشان‌دهنده دانه‌درشت و خشک بودن رسوبات زیرسطحی منطقه مورد مطالعه است. البته وجود

زون گسلی به طور حتم می‌تواند از علل اصلی دیگر مقاومت الکتریکی بالا باشد. مقاومت الکتریکی کم نشان‌دهنده دانه‌ریز بودن رسوبات یا حاکی از آبیاری درختان و نزولات جوئی محدوده بوستان است.

در شکل ۸ (الف) پروفیل رادار نفوذی به زمین (GPR)، وجود گسل‌ها و تغییرات جانبی در وضعیت لایه‌بندی لایه‌ها در عمق بیش از ۱ متری کاملاً مشهود است و با نتایج حاصل از روش مقاومت ویژه الکتریکی مطابقت دارد. نتایج کلی نشان‌دهنده وجود یک زون گسلی در منطقه است. تغییرات و عملکرد گسل‌های فعال، اما پنهان، در منطقه مورد مطالعه می‌تواند در ارتباط نزدیک با قرار گرفتن این نواحی در مجاورت گسل اصلی شمال تهران و تأثیر این گسل بزرگ باشد. می‌توان گسل‌های ترانشه آزادشهر را انشعاباتی از گسل اصلی شمال تهران در نظر گرفت. این احتمال به تحقیقات و بررسی‌های بسیار در منطقه مورد مطالعه نیاز دارد.

## منابع

- آقائباتی، سید علی (۱۳۸۹). زمین‌شناسی ایران، چ ۳، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، صنوبر.
- بربریان، مانوئل و منوچهر قرشی، بهرام ارژنگ‌روش، ارسالان مهاجر اشجعی (۱۳۶۴). «پژوهش و بررسی ژرف نوزمین‌ساخت، لرزه‌زمین‌ساخت؛ و خطر زمین‌لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون»، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شماره ۵۶.
- پورکرمانی، محسن و مهران آرین (۱۳۸۳). «مروری بر مطالعات لرزه‌خیزی گستره تهران»، رشد آموزش زمین‌شناسی، ش ۳۸، صص ۲۱-۲۷.
- حفیظی، محمدکاظم و جعفر ولی (۱۳۷۸). «بررسی منابع آب زیرزمینی در درز و شکاف‌ها به روش مقاومت ویژه و قطبش القایی با آرایه مربعی»، فیزیک زمین و فضا، ج ۲۵، ش ۱ و ۲، صص ۲۳-۲۹.
- مختاری، داود (۱۳۸۳). «ارزیابی ژئومورفولوژی بخشی از مسیر راه تبریز- مرند در گردنه پیام در شمال غرب ایران»، مدرس علوم انسانی، د ۹، ش ۴، صص ۸۷-۱۱۱.
- الله‌وردی میگونی، فرامرز و مهدی محمدی‌ویژه، علی‌رضا فرخ‌نیا، الهام بوستان، حمید نظری (۱۳۹۸). «بررسی تکنیک فعال و شناسایی گسل‌های جنبا به وسیله روش‌های ژئوفیزیکی (مطالعه موردی: گوهرتپه- بهشهر)»، علوم زمین، ش ۲۷، صص ۲۲۷-۲۳۶.
- نبوی، محمدحسن (۱۳۵۵). دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- Abd El Aal, A. (2017). Identification and characterization of near surface cavities in Tuwaiq Mountain Limestone, Riyadh, KSA, "detection and treatment", Egyptian Journal of Petroleum, Vol. 26, No. 1, pp. 215-223, DOI: 10.1016/j.ejpe.2016.04.004.
- Abolghasemi, H., Radfar, M. H., Khatami, M., Saghafi Nia, M., Amid, A. M., & Brigg, S. (2006). International medical response to a natural disaster: lessons learned from the Bam earthquake experience. Prehosp Disaster Med Vol. 21, No. 3, pp. 141-147, DOI: 10.1017/S1049023X00003599.
- Aghanbati, S. A. (2011). Geology of Iran, Third Edition, Geological Survey & Mineral



- Explorations of Iran (GSI), Sanobar Press, Tehran, 586 pp.
- Akyüz, H. S., Kırcan, E., Basmenji, M., Akyüz, A. D., Uçarkuş, G., Yazıcı, M., Yakupoğlu, N., & Zabcı, C. (2019). Paleoseismological and Morphotectonical Characteristics of Active Faults in the Vicinity of Muğla Area (SW Turkey), 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences, Volume: On Significant Applications of Geophysical Methods, Advances in Science, Technology & Innovation. DOI: 10.1007/978-3-030-01656-2\_57.
- Alahverdi Maygooni, F., Mohamadi Vizheh, M., Farrokhnia, A. R., Boostan, E., & Nazari, H. (2019). Investigation of active tectonics and identification of active faults by geophysical methods case study: Gohartapeh- Behshahr, Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, Vol. 28, No.111, pp. 227-236.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., & Qorashi, M. (2003). Accomodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran, Journal of Structural Geology, Vol. 25, No. 5, pp. 659–672, DOI: 10.1016/S0191-8141(02)00064-0.
- Aliannezhadi, A., Mehrnia, S. R., Kimiagar, S., & Rahimi, H. (2018). INVESTIGATING THE EFFECT OF GROUND-PENETRATING RADAR (GPR) IN DETECTING FAULT ZONE, An - Noor in London Peer reviewed journal Vol. 22, No. 2, pp. 161-166.
- Anomohanran, O. (2013). Evaluation of aquifer characteristics in Echi, Delta State, Nigeria using well logging and pumping test method, American Journal of Applied Sciences, Vol. 10, No. 10, pp. 1263-1269, DOI: 10.3844/ajassp.2013.1263.1269.
- Babaie Mahani, A. & Kazemian, J. (2018). Strong ground motion from the November 12, 2017, M 7.3 Kermanshah earthquake in western Iran. Journal of Seismology, Vol. 22, No.6, pp. 1339-1358, DOI: 10.1007/s10950-018-9761-x.
- Berberian, M., Ghorashi, M., Arjang rush, B., & Mohajer-Ashjai, A. (1985). Investigation of Tectonic- New deep, Tectonic Seismicity and Earthquake risk- Faulting in Tehran area and Surroundings, Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI), No. 56, 315 pp.
- Bezák, V., Pek, J., Vozár, J., & Bielik, M. (2014). Geoelectrical and geological structure of the crust in Western Slovakia. Studia Geophysica et Geodaetica, Vol. 58, No. 3, pp. 473-488, DOI: 10.1007/s11200-013-0491-9.
- Building and Housing Research Center (2015). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, 4th edn, Tehran.
- Brandes, Ch., Igel, J., Loewer, M., Tanner, D. C., Lang, J., Müller, K., & Winsemann, J. (2018). Visualisation and analysis of shear-deformation bands in unconsolidated Pleistocene sand using ground-penetrating radar: Implications for paleoseismological studies, Sedimentary Geology, Vol. 367, pp. 135-145, DOI: 10.1016/j.sedgeo.2018.02.005.
- Bristow, C. S., Jol, V., Augustinus, V., & Wallis, V. (2010). Slipfaceless 'whaleback' dunes in a polar desert, Victoria Valley, Antarctica: Insights from ground penetrating radar, Geomorphology, Vol. 114, No. 3, pp. 361-372, DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.08.001.
- Bubeck, A., Wilkinson, M., Roberts, G. P., Cowie, PA., Mccaffrey, K. J. W., Phillips, R., & Sammonds, P. (2015). The tectonic geomorphology of bedrock scarps on active normal faults in the Italian Apennines mapped using combined ground penetrating radar and terrestrial laser scanning. Geomorphology, Vol. 237, pp. 38–51. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.011.
- Corbeanu, R. M., Soegaard, k., Szerbiak, R. B., Thurmond, J. B., McMechan, G. A., Wang, D., Snelgrove, S., Forste, C. B., & Menitove, A. (2001). Detailed internal architecture of a fluvial

- channel sandstone determined from outcrop cores, and 3-D ground-penetrating radar. Examples from the Middle Cretaceous Ferron Sandstone, east-central Utah. American Association of petroleum Geologists Bulletin, Vol. 85, No. 9, pp. 1583-1608.
- Coulibaly, Y., Cheng, L. Z., Belem, T., & Lortie, S. (2016). Auscultation of a Dam for Mining Restoration in Quebec, Canada. Journal of Civil & Environmental Engineering, Vol. 6, No. 8, DOI: 10.4172/2165-784X.1000259.
- Dahlin, T. & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays, Geophysical Prospecting, Vol. 52, No. 5, pp. 379-398, DOI: 10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x.
- Demant, D., Renardy, F., Vanneste, K., Jongmans, D., Camelbeeck, T., & Meghraoui, M. (2001). The use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graben, Belgium. Geophysics, Vol. 66, No. 1, pp. 78– 89. DOI: 10.1190/1.1444925.
- Diaferia, I., Barchi, M., Loddo, M., Schiavone, D., & Siniscalchi, A. (2006). Detailed imaging of tectonic structures by multiscale earth resistivity tomographies: the Colfiorito normal faults (central Italy). Geophysical Research Letters, Vol. 33, No. 9, DOI: 10.1029/2006GL025828.
- Englance, M. (1968). Geologie, Geomorphologie, hydrology de la Re'gion de Tehran (Iran). Monpellier (France), 139 pp.
- Francke, J. (2010). Applications of GPR in mineral resource evaluations, Publisher: IEEE, Conference Location: Lecce, Italy, DOI: 10.1109/ICGPR.2010.5550188.
- Gafarov, K., Ercol, M., Cirillo, D., Pauselli, C., & Brozzetti, F. (2018). Extending surface geology data through GPR prospections: Quaternary faulting signature from the Campotese area (Calabria-Italy), 18-21 June 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Conference Location: Rapperswil, Switzerland, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ICGPR.2018.8441611.
- Garcia, K. & Díaz, D. (2016). Three-dimensional geo-electrical structure in Juncalito geothermal prospect, northern Chile. Geothermics, Vol. 64, pp. 527-537, DOI: 10.1016/j.geothermics.2016.08.001.
- Geotomo Software (2007). RES2DINV. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares methods. User's manual, p 138.
- Gholipour, Y., Bozorgnia, Y., Rahnema, M., Berberian, M., & Shojataheri, J. (2008). Probabilistic seismic hazard analysis, phase I-greater Tehran regions. Final report 1.
- Golara, A. (2014). Probabilistic seismic hazard analysis of interconnected infrastructure: a case of Iranian high-pressure gas supply system. Nat Hazards 73: pp. 567–577. DOI: 10.1007/s11069-014-1131-6.
- Gu, Z., Shi, C., Yang, H., & Yao, H. (2018). Analysis of dynamic sedimentary environments in alluvial fans of some tributaries of the upper Yellow River of China based on ground penetrating radar (GPR) and sediment cores, Quaternary International, (Accepted Manuscript) DOI: 10.1016/j.quaint.2018.05.001.
- Hafizi, M. K. & Vali, J. (1999). Investigating Groundwater Resources in diacalse by Special Resistance and Induction Polarization with Square Arrays, Earth and Space Physics, Volume 25, Nos 1 and 2, pp. 29-23.
- Hessami, K., Jamali, F., & Tabassi, H. (2003). Major active faults of Iran. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran.

- He, F. B., Bai, L. Y., & Wang, J. M. (2013). Deep structure and Quaternary activities of the Xiadian fault zone, *Seismology and Geology*, Vol. 35, No. 3, pp. 490-505 (in Chinese with English Abstract). DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2013.03.004.
- Jaberi, M., Ghassemi, M. R., Shayan, S., Yamani, M., & Zamanzadeh, S. M. (2017). Interaction between active tectonics, erosion and diapirism, a case study from Hubble-Rud in Southern Central Alborz (Northern Iran) Accepted date: 23 January 2017 *Geomorphology*, DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.01.031.
- Jalalalhosseini, S. M., Zafarani, H., & Zare, M. (2018). Time-dependent seismic hazard analysis for the greater Tehran and surrounding areas. *Journal of Seismology*, Vol. 22, No. 1, pp. 187–215, DOI: 10.1007/s10950-017-9699-4.
- Jia, S. M. & Guo, M. (2007). The relationship between Huangzhuang-Gaoliying fault and by Gaoliying trench and earth fissure, *Urban Geology*, Vol. 2, No. 7, pp. 24-28 (in Chinese with English Abstract).
- Karimiparidari, S., Zaré, M., Memarian, H., & Kijko, A. (2013). Iranian earthquakes, a uniform catalog with moment magnitudes, *Journal of Seismology*, Vol. 17, No. 3, pp. 897–911, DOI: 10.1007/s10950-013-9360-9.
- Khodaverdian, A., Zafarani, H., Rahimian, M., & Dehnamaki, V. (2016). Seismicity parameters and spatially smoothed seismicity model for Iran, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 3, pp. 1133–1150. DOI: 10.1785/0120150178.
- Kohrangi, M., Danciu, L., & Bazzurro, P. (2018). Comparison between outcomes of the 2014 Earthquake Hazard Model of the Middle East (EMME14) and national seismic design codes: the case of Iran, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 114, pp. 348–361. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.07.022.
- Lejzerowicz, A., Kowalczyk, S., & Wysocka, A. (2014). The usefulness of ground-penetrating radar images for the research of a large sand-bed braided river: case study from the Vistula River (central Poland), *Geologos* Vol. 20, No. 1, pp. 35–47. DOI: 10.2478/logos-2014-0003.
- Liang, K., Ma, B., & Li, D. (2019). Quaternary activity of the Zhuozishan West Piedmont Fault provides insight into the structural development of the Wuhai Basin and Northwestern Ordos Block, China, *Tectonophysics*, Vol. 754, pp. 56- 72. DOI: 10.1016/j.tecto.2019.02.004.
- Loke, M. H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. Geotomo Software, Res2dinv 3.5 Software.
- Leucci, G. (2005). Contribution of Ground Penetrating radar and Electrical Resistivity Tomography to identify the cavity and fractures under the main Church in Botrugno (Lecce, Italy), *Journal of Archaeological Science*, Vol. 33, No. 9, pp. 1194-1204, DOI: 10.1016/j.jas.2005.12.009.
- Lunina, O. V., Gladkov, A. S., & Gladkov A. A. (2018). Surface and shallow subsurface structure of the Middle Kedrovaya paleoseismic rupture zone in the Baikal Mountains from geomorphological and ground-penetrating radar investigations. *Geomorphology*, Vol. 326, pp. 54-67, DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.03.009.
- Luoma, S., Majaniemi, J., Nurminen, T., & Pasanen, A. (2016). GPR survey and field work summary in Siilinjärvi Mine during July 2014, Geological Survey of Finland. Archive report, Vol. 66.
- Malik, J. N., Sahoo, A. K., & Shah, A. A. (2007). Ground-penetrating radar investigation along Pinjore Garden Fault: implication toward identification of shallow subsurface deformation

- along active fault, NW Himalaya. RESEARCH COMMUNICATIONS CURRENT SCIENCE, Vol. 93, pp. 1422–1427.
- Maurya, D. M., Chouksey, V., Joshi, P. N., & Chamyal, L. S. (2013). Application of GPR for delineating the neotectonic setting and shallow subsurface nature of the seismically active Gedi fault, Kachchh, western India. *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol. 10, No. 3, 12 p, DOI: 10.1088/1742-2132/10/3/034006.
- Meghraoui, M., Camelbeeck, T., Vanneste, K., Brondeel, M., & Jongmans, D. (2000). Active faulting and paleoseismology along the Bree fault, lower Rhine graben, Belgium. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 105, No. B6, pp. 13809–13842. DOI: 10.1029/1999JB900236.
- Mohajer-Ashjai, A. & Nowroozi, A. A. (1979). The Tabas earthquake of September 16, 1978 in east-central Iran: a preliminary field report. *Geophys Res Lett*, Vol. 6, pp. 689–692, DOI: 10.1029/GL006 i009p 00689.
- Mokhtari, D. (2004). Geomorphological Evaluation of a Tabriz-Marand Road Part of the passageway in Northwest Iran, *Journal of Humanities*, Vol. 9, No. 4, pp. 87-111.
- Nabavi, M. H. (1976). *An Introduction to Iranian Geology*, Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI), Tehran, 109 p.
- Nakanishi, T., Takemura, K., Matsuyama, H., Shimoyama, S., Hong, W., & Okuno, M. (2017). Activity of the Funai fault and radiocarbon age offsets between shell and plant pairs from the latest Pleistocene to Holocene sediments under the Oita Plain, western Japan. *Radiocarbon*, Vol. 59, No. 6, pp. 1737–1748, DOI: <https://doi.org/10.1017/RDC.2017.119>.
- Nazari, H., Ritz, J. F., & Oghbaei, SH. (2007). New Insight to Paleogeography and Structural Evolution of the Alborz in Tethyside, *Geosciences*, Vol. 16, No. 64, pp. 38- 53.
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-Science Reviews*, Vol. 66, No. 3, pp. 261–330. DOI: 10.1016/j.earscirev.2004.01.004.
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of applied geophysics*: Chapman and Hall. 429 p.
- Pellicer, X. M. & Gibson, P. (2011). Electrical resistivity and Ground Penetrating Radar for the characterisation of the internal architecture of Quaternary sediments in the Midlands of Ireland. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 75, No. 4, pp. 638–647, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.019.
- Pourkermani, M. & Arian, M. (2004). An Overview of Seismic Studies in Tehran Area, *Geological Education Growth*, No. 38, pp. 27-21.
- Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M. A., & Ushijima, K. (2005). Imaging subsurface cavities using geoelectrical tomography and ground penetrating radar, *Journal of cave and karst studies the National Speleological Society bulletin*, Vol. 67, No. 3, pp. 174–181.
- Rahimi, H. & Mahsuli, M. (2018). Structural reliability approach to analysis of probabilistic seismic hazard and its sensitivities, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 1331-1359, DOI: 10.1007/s10518-018-0497-3.
- Ramos, R., Freitas, M. C., Bristow, C. S., Andrade, C., Hermozilha, H., Grangeia, C., & Senos Matias, M. (2011). Sedimentary architecture of the Santo André transverse dunes (Portugal) interpreted from ground penetrating radar, *Journal of Coastal Research*, Vol. 57, No. 64, pp. 303-307.

- Reiss, S., Reicherter, K. R., & Reuther, C. D. (2003). Visualization and characterization of active normal faults and associated sediments by high-resolution GPR, Ground Penetrating Radar in Sediments. Geological Society London Special Publications, Vol. 211, No. 1, pp. 247-255, DOI: 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.20.
- Rezaei, A., Hassani, H., Moarefvand, P., & Golmohammadi, A. (2019). Determination of unstable tectonic zones in C–North deposit, Sangan, NE Iran using GPR method: importance of structural geology, Journal of Mining and Environment (JME), Shahrood University of Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 177-195, DOI: 10.22044/jme.2019.7378.1590.
- Rieben, E. H. (1966). Geological observation on alluvial deposits in northern Iran (p. 9). Tehran: Geological Survey of Iran.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., & Vernant, P. (2006). Active transtension inside Central Alborz: a new insight into the northern Iran-southern Caspian geodynamics, Geology, Vol. 34, No. 6, pp. 477–480, DOI: 10.1130/G22319.1.
- Ritz, JF., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., Salamati, R., Ghassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M., & Saidi, A. (2012). Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the north Tehran fault (Iran). Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 117, No. B6, pp. 1–15, DOI: 10.1029/2012JB009147.
- Saribudak, M. (2006). Integrated geophysical studies over an active growth fault in Houston, The Leading Edge, Vol. 25, No. 3, pp. 332-334, DOI: 10.1190/1.2184101.
- Slater, L. & Niemi, T. M. (2003). Ground-penetrating radar investigation of active faults along the Dead Sea Transform and implications for seismic hazards within the city of Aqaba, Jordan, Vol. 368, Issues 1–4, pp. 33-50, DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00149-5.
- Stemberk, J., Dal Moro, G. C., Stemberka, J., Blahůta, J., Coubala, M., Košťáka, B., Zambranob, M., & Tondib, E. (2019). Strain monitoring of active faults in the central Apennines (Italy) during the period 2002–2017, Tectonophysics, Vol. 750, pp. 22–35. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.10.033.
- Tezcan, S. S., Kaya, E., Bal, I. E., & Ozdemir, Z. (2002). Seismic amplification at Avcilar Istanbul. Engineering Structure, Vol. 24, pp. 661- 667. DOI: 10.1016/S0141-0296(02)00002-0.
- Wong, I., Thomas, P., Koehler, R., & Lewandowski, N. (2019). Assessing the Seismic Hazards in Jamaica Incorporating Geodetic and Quaternary Fault Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 109, No. 2, pp. 716-731, DOI: 10.1785/0120180205.
- Zafarani, H., Hajimohammadi, B., & Jalalalhosseini, S. M. (2017). Earthquake hazard in the Tehran region based on the characteristic earthquake model. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 17, pp. 449–467, DOI: 10.1080/13632469.2017.1387189.
- Zare, M., Amini, H., Yazdi, P., & Sesetyan, K. (2014). Recent developments of the Middle East catalog. Journal of Seismology, Vol. 18, No. 4, pp. 749–772, DOI: 10.1007/s10950-014-9444-1.
- Zare, M. (2017). Seismic hazard zoning in Iran: a state-of-the-art on the studies during four decades. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 71–101.
- Zhao, Y., Cai, X. M., & Wang, J. M. (2015). The division of ‘small blocks’ of structure in Beijing plain and a discussion on the activity of micro block in Quaternary period, Geology in China, Vol. 42, No. 6, pp. 1876-1884.