

بررسی فعالیت های کواترنری شاخه های گسل خزر در منطقه خلیل شهر به وسیله روش های ژئوفیزیکی رادار

نفوذی به زمین و مقاومت ویژه الکتریکی

میعاد بادپا^{۱*}، ابوالقاسم کامکار روحانی^۲، علیرضا عرب امیری^۳ و مهدی محمدی ویژه^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشجوی دکتری ژئوفیزیک؛ مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: miadbadpa@gmail.com

واژگان کلیدی

شاخه های گسل خزر
کواترنری
مقاومت ویژه الکتریکی
رادار نفوذی به زمین
خلیل شهر
مازندران

چکیده

با وجود توسعه بسیاری از شهرهای استان مازندران (از جمله خلیل شهر و بهشهر در بخش خاوری استان) بر روی شاخه های کواترنری گسل خزر، شناخت کامل ساز و کار گسل و نیز آشکارسازی امتدادهای گسل های فرعی در مناطق حساس شهری حائز اهمیت است. از طرفی به سبب پوشیده شدن برخی مناطق به وسیله رسوبات هولوسن و نبود رخنمون گسل در بسیاری از مناطق، رویکرد اساسی برای بررسی گسلش، استفاده از روش های اکتشافات زیرسطحی به ویژه روش های ژئوفیزیکی است. در این مطالعه نخست با بهره گیری از روش مدل سازی پیشرو مقاومت ویژه الکتریکی و رادار نفوذی به زمین (GPR)، پاسخ پارامترهای فیزیکی (گذردهی، هدایت و مقاومت ویژه الکتریکی) انواع گسل، درزه و ساختارهای زمین شناسی منطقه خلیل شهر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین خطوط برداشت داده های واقعی مقاومت ویژه و GPR در جهت عمود بر امتداد احتمالی گسل خزر در منطقه خلیل شهر طراحی شد و در نهایت داده های مقاومت ویژه پس از انجام تصحیحات، با استفاده از روش های وارون سازی مختلف از جمله بهینه سازی حداقل مربعات غیر خطی لونبرگ-مارکوارت، اکام و ... مورد پردازش قرار گرفت و در نهایت پس از تلفیق نتایج حاصل با پروفیل های پردازش شده GPR و همچنین اطلاعات زمین شناسی منطقه و تفسیر مقاطع، پارامترهای شیب و امتداد شاخه های گسل خزر در نرم افزار Streonet به نمایش درآمد. پس از تلفیق نتایج حاصل از روش های GPR و مقاومت ویژه، سه شاخه جدید کواترنری گسلی در طول مقاطع مقاومت ویژه مشاهده شد. این شاخه ها $F1$ ، Fji و Fnm نامگذاری شدند. شاخه های فرعی، نشان دهنده حرکات تکتونیکی جوان گسل خزر بوده که به سبب کشیده شدن امتداد گسل به داخل رسوبات عهد حاضر این حرکات از دید پنهان مانده است. شاخه های گسل خزر در منطقه خلیل شهر دارای امتداد تقریبی خاوری-باختری ($N80E$) بوده و جهت شیب به سمت جنوب و میزان شیب ۴۵ تا ۸۰ درجه SE برآورد شده است.

۱- مقدمه

حرکت بُرشی در هر طرف گسل که از روی زمین تا ژرفای زیاد (گاهی تا ۳۰ کیلومتر و یا بیشتر) ادامه می‌یابد؛ به سبب انباشتگی تنش‌های ناشی از جنبش قاره‌ها نسبت به یکدیگر روی می‌دهد. بسیاری از گسل‌های شناخته‌شده، در سالیان دور (صدها و یا میلیون‌ها سال پیش) حرکت نموده و ممکن است امروزه جنبه نباشند (بربریان و همکاران، ۱۳۷۱). گسل‌هایی که دارای یک یا چند ویژگی زیر باشند، گسل‌های جنبه یا گسل‌های با توانایی جنبش بر روی زمین محسوب می‌شوند:

۱- رویداد زمین‌لرزه‌های تاریخی (پیش از سده‌ی بیستم) در جایی از درازای گسل.

۲- تعیین کانون سطحی زمین‌لرزه‌های بزرگ با خطای کم در سده بیستم در نقطه‌ای از طول گسل.

۳- گسلش در رسوبات کواترنر پسین: یک حرکت در ۳۵ هزار سال و یا دو حرکت یا بیشتر در ۵۰۰ هزار سال گذشته (USAEC, 1973).

۴- دیواره‌ی گسل‌های جنبه در روی زمین که به وسیله فرسایش از میان نرفته باشند.

۵- رویداد که لرزه‌ای زیاد در ارتباط با صفحه‌ی گسل که به وسیله‌ی شبکه‌ی کامل و بسته‌ی لرزه‌نگاری محلی با خطای کم در کانون روی زمین و زمان‌گیری یکنواخت برداشت می‌شوند.

۶- همبستگی زمین‌ساختی یک گسل با گسل شناخته شده‌ی جنبه: که در اثر جنبش گسل جنبه، جنبشی در گسل دیگر مجاور روی دهد.

انتظار می‌رود چنین گسل‌هایی در آینده نیز دچار جابجایی نسبی شوند و در هرگونه سازه‌ای که بر روی آن‌ها قرار گیرد، بُرش ایجاد نمایند (بربریان و همکاران، ۱۳۷۱).

شناخت دقیق و کامل گسل‌های کواترنر محدوده‌ی مورد مطالعه (خلیل‌شهر و بهشهر)، گام نخستین در راه بررسی لرزه‌زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه در این گستره می‌باشد. از این دیدگاه می‌توان گسل‌های کواترنر گستره مورد مطالعه را به سه گروه زیر تقسیم نمود:

۱- گسل‌های اصلی و لرزه‌زا (با درازای بیش از ۱۰ کیلومتر)

۲- گسل‌های متوسط (با درازای میان ۲ تا ۱۰ کیلومتر)

۳- گسل‌های فرعی (کوتاه‌تر از ۲ کیلومتر)

از جمله گسل‌های اصلی و لرزه‌زای منطقه مورد مطالعه می‌توان به گسل خزر اشاره کرد. در این پژوهش با استفاده از تلفیق روش

مقاومت‌ویژه و GPR در خصوص گسلش در رسوبات کواترنر پسین منطقه خلیل‌شهر و بررسی فعالیت‌های کواترنری شاخه‌های فرعی گسل خزر بحث می‌شود.

در ۵۰ سال اخیر، محققین و صاحب‌نظران مختلف، به بررسی پاسخ مقاومت‌ویژه گسل در شرایط مختلف پرداختند. از جمله روبرت و همکاران، ۱۹۶۶، مونی و همکاران، ۱۹۸۰، دوبرین و ساویت، ۱۹۸۸، همچنین تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰ و رینولدز و همکاران، ۱۹۹۸ و ۲۰۱۱، به شرح پاسخ آرایه‌های الکترودی مختلف در مواجهه با گسل‌های قائم و شیب‌دار پرداخته‌اند.

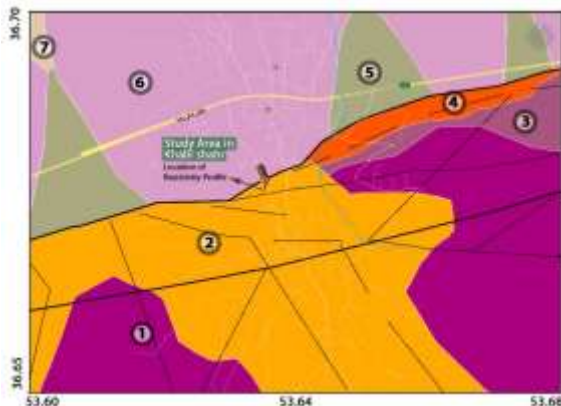
از نخستین پژوهش‌هایی که در ایران در زمینه‌ی بررسی آرایه‌های مختلف الکترودی روش مقاومت‌ویژه در آشکارسازی گسل‌ها منتشر شده می‌توان به مطالعات پیروز و همکاران در دهه ۸۰ خورشیدی اشاره کرد. از آن‌جمله: فردوسی و پیروز، ۱۳۸۲، به تهیه مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای مربوطه برای اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی گسل‌ها و دایک‌های قائم پرداختند. همچنین می‌توان به پایان‌نامه‌های: ترکمنچه و همکاران، ۱۳۸۶، در اکتشاف گسل پنهان شاهرود در محدوده دره کال قرنو با استفاده از روش ژئوالکتریک، مقتدر و همکاران، ۱۳۸۶، مطالعات ژئوالکتریکی به منظور مشخص نمودن وضعیت زمین‌شناسی زیرسطحی و تراز آب زیرزمینی در بخشی از شهر مشهد، جهان‌بین و همکاران، ۱۳۸۶، تعیین موقعیت و شیب گسل پنهان شاهرود، واقع در منطقه کال قرنو با استفاده از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن، احمدزاده و پیروز، ۱۳۸۹، اکتشاف آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی معکوس دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه در آهک‌های کرتاسه واقع در شمال شاهرود، رفعت هراب و همکاران، ۱۳۸۹، اکتشاف آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی معکوس دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه در سازند لار واقع در غرب شاهرود، استکی و کامکار روحانی، ۱۳۹۰، پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و لرزه‌نگاری انکساری و مقایسه و تلفیق نتایج تفسیر به منظور شناسایی دقیق‌تر لایه‌های زیرسطحی ساختگاه سد اشاره کرد.

مقاله‌ای هم در این زمینه به چاپ رسیده از آن جمله، در مقاله ناسوتی و همکاران، در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، با تلفیق نتایج لرزه‌نگاری بازتابی و مقاومت‌ویژه دید عمومی از کمپلکس گسلی مور-تروندلاگ، بدست آورده‌اند. نگوین و همکاران، ۲۰۰۵، در مقاله‌ای، نقش پردازش تصویر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی در به تصویر کشیدن گسل را شرح داده‌اند. در پایان‌نامه

قرار می‌گرفت.

۲- زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، بین طول‌های جغرافیایی ۵۳،۶۰ تا ۵۳،۶۸ شرقی و عرض‌های ۳۶،۶۵ تا ۳۶،۷۰ شمالی، در شهر خلیل‌شهر در فاصله ۱۰ کیلومتری شرق شهرستان بهشهر (شرق استان مازندران) واقع شده است (شکل ۱)



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه خلیل‌شهر (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بهشهر-قاسمی (۱۳۷۱)) به همراه موقعیت برداشت داده‌های مقاومت-ویژه (خطوط سیاه معرف موقعیت شاخه‌های گسل خزر در منطقه است)

با توجه به شکل ۱، زمین‌شناسی عمومی منطقه شامل؛ ۱-مارن، شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون و کنگلومرا سازند شمشک، ۲-لُس، ۳-سنگ‌های ولکانیک حد واسط و بازیگ، دگرگونی، ۴-ساب ولکانیک‌های بازیگ، حد واسط و اسیدی و سنگهای درونگیر، گابرو، دیوریت، مونزینیت، گرانیت و متامورفیک، ۵-تبدیل لُس و آبرفت، ۶-نهشته‌های بادبزی اخیر (پروگزیمال) و ۷-نهشته‌های بادبزی (دیستال) می‌باشد.

۳- روش پژوهش

در پژوهش حاضر از دو روش GPR و مقاومت‌ویژه الکتریکی به منظور بررسی رفتار گسل‌های منطقه استفاده شده است و هر کدام از روش‌ها نیز در دو قسمت ساخت مدل‌های پیشرو (مدل مصنوعی) و برداشت صحرایی اجرا شده است (شکل ۲).

برای مدل‌سازی پیشرو دوبعدی داده‌های GPR از روش تفاضل محدود در نرم‌افزار ReflexW استفاده شد. همچنین مدل‌سازی پیشرو مقاومت‌ویژه نیز نخست در نرم‌افزار Res2dmod انجام شده و سپس در نرم‌افزار Res2dinv با استفاده از روش حداقل مربعات وارون‌سازی شد.

همچنین خطوط برداشت داده‌های واقعی GPR و مقاومت‌ویژه در منطقه خلیل‌شهر پس از بررسی زمین‌شناسی و مدل‌های مصنوعی گسل‌های منطقه، عمود بر امتداد گسل، طراحی شد و در نهایت

موناهان، (۲۰۱۳)، استفاده از روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی در شناسایی و بررسی ساختارهای گسلی مورد بحث قرار داده است.

مطالعات GPR در شناسایی گسل‌های پنهان، از ابتدای سده ۲۱ میلادی در کشورهای مختلف آغاز شده است. از جمله مقالاتی که در این زمینه منتشر شده، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

در مقاله‌ای از چو و همکاران در سال ۲۰۰۱، در مورد کاربرد تلفیقی روش‌های رادار نفوذی و لرزه نگاری بازتابی با قدرت تفکیک بالا در بررسی رخدادهای پالئوسایزیک و گسل‌های فعال شرق تایوان بحث شده است. همچنین در مقاله کریستی و همکاران در سال ۲۰۰۸، در مورد تغییر شکل و جابجایی گسل‌های پنهان با استفاده از برداشت سه بعدی GPR و در مقاله گراسموک و همکاران در ۲۰۰۵، در مورد تصویرسازی سه‌بعدی GPR با قدرت تفکیک بالا و مک کلیمونت و همکاران، ۲۰۰۸، نیز در استفاده از همین روش در اکتشاف گسل آلپین بحث شده است. همچنین راشد و همکاران، ۲۰۰۴، نیز در مقاله‌ای به بررسی سیستم گسلی آماچی اوساکای ژاپن پرداخته‌اند. در کشور ایران نیز مقالاتی در این زمینه به در برخی مجلات و کنفرانس‌ها به چشم می‌خورد، از آن جمله مقاله اویسی مؤخر و همکاران، ۱۳۸۶، در بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش GPR، خادمی و همکاران، ۱۳۹۲، معرفی پهنه گسلی آزادشهر در تهران بر اساس برداشت‌های میدانی و ژئوفیزیکی و همچنین علیان نژاد و همکاران، ۱۳۹۲، ارزیابی کارایی روش‌های مقاومت‌ویژه و GPR در شناخت گسل‌های فرعی تهران.

با توجه به تلاش‌های متعدد پژوهشگران داخلی در دو دهه گذشته، در زمینه اکتشاف گسل‌های پنهان و با در نظر گرفتن نکات قوت بسیاری از این پژوهش‌ها می‌توان گفت که بسیاری از این نتایج در شکل‌گیری پژوهش پیش‌رو، راه‌گشا بوده است. لیکن در بیشتر پژوهش‌های انجام شده داخلی، تنها از یکی از دو روش رادار و یا مقاومت‌ویژه استفاده شده است. از جمله مزیت‌های این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین، تلفیق دو روش در کنار هم و ترکیب با اطلاعات ارتفاعی و تصاویر ماهواره‌ای منطقه است؛ که باعث ایجاد دید دقیق‌تری از اطلاعات پنهان تحت‌الارضی شده است. همچنین با ساخت مدل‌های مصنوعی متعدد، اکثر پاسخ‌های مقاومت‌ویژه و رادار مورد انتظار در منطقه ارزیابی شده است. و نیز از دیگر مزیت‌های این پژوهش، تمرکز ویژه روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف شاخه‌های کواترنری گسل هاست؛ که پیش از این در کشور تنها روش‌های ترانشه زنی و مشاهده مستقیم مورد استفاده

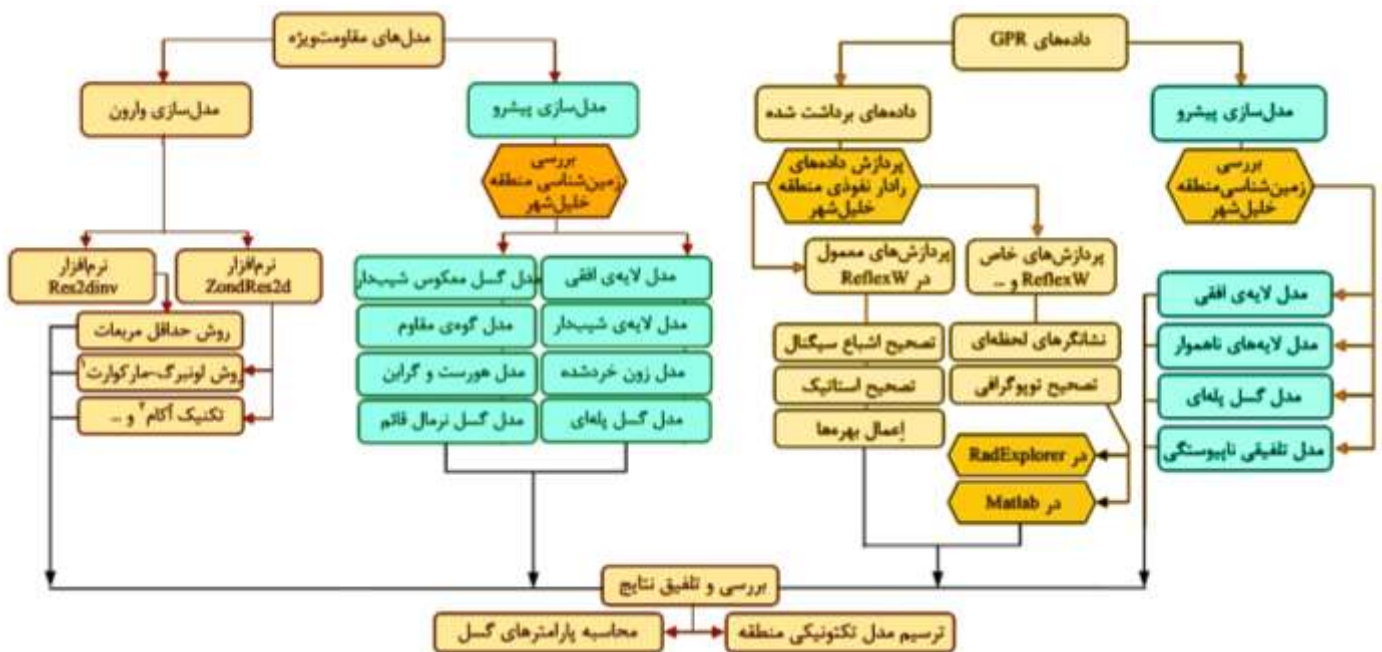
بادپا و همکاران، بررسی فعالیت های کوآترنری شاخه های گسل خزر به وسیله روش های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین و مقاومت ویژه الکتریکی، صفحات ۱-۱۶.

که باید با استفاده از داده های برداشت شده تخمین زده شود. پاسخ مدل، داده هایی ساختگی هستند؛ که از روابط ریاضی تعریف کننده مدل محاسبه می شوند. در همه روش های مدل سازی سعی بر آن است تا مدلی برای زیر سطح تعیین شود؛ که پاسخ هایی نزدیک به داده های برداشت شده داشته باشد. به طور کلی مدل سازی به دو روش مستقیم (پیشرو) و معکوس (وارون) انجام می شود (Loke, 2004).

داده های حاصل در نرم افزارهای ReflexW برای برداشت های GPR و در نرم افزارهای ZondRes2d و Res2dinv برای داده های مقاومت ویژه الکتریکی پردازش و تفسیر شده و نتایج نهایی در نرم افزار Online Streonet به نمایش درآمده و شیب، امتداد، قطب و پارامترهای شاخه های فرعی گسل خزر در منطقه محاسبه شد.

۴- مدل سازی مصنوعی مقاومت ویژه الکتریکی

مدل، بیان ریاضی ایده آلی از مقطعی از زمین است. یک مدل متشکل از پارامترهایی است و این پارامترها کمیت فیزیکی هستند؛



شکل ۲- فلوچارت روش پژوهش شامل دو بخش داده های GPR و مقاومت ویژه الکتریکی - هر کدام شامل دو بخش مدل مصنوعی و برداشت واقعی

سیگنال به نوفه، جفت شدگی الکترومغناطیسی، حساسیت به موقعیت جانبی، قابلیت تفکیک ساختارهای شیب دار، قدرت تفکیک پذیری ساختارهای افقی، عمق نفوذ و همچنین حساسیت به عمق آنومالی ها، شیب، ناهمگنی های سطحی، توپوگرافی سنگ بستر، اثرات جانبی، روباره هادی، توپوگرافی اشاره کرد (Ward, 1990).

فرایندهای زمین شناسی و تکتونیکی بر روی مقدار مقاومت ویژه سنگ ها مؤثرند. گسلش، برش و هوازگی معمولاً باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری سیالات شده و در نتیجه باعث کاهش مقاومت ویژه می گردند. سخت شدگی در اثر تراکم، باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری و در نتیجه افزایش مقاومت ویژه می شود (Ward, 1990). مقادیر مقاومت ویژه مربوط به برخی سنگ ها، کانی ها و مواد مختلف زیر سطح زمین در جدول ۱ ارائه شده است (Loke,

در مدل سازی پیشرو، ورودی فرآیند مدل سازی، یک مدل آزمون (فرضی) از زمین می باشد و در طی فرآیند با توجه به معادلات حاکم بر مساله، داده های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به عنوان خروجی مدل ارائه می شود. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترها) آنقدر ادامه می یابد که پاسخ مدل برازش خوبی با داده های صحرائی پیدا کند (یعنی رسیدن از مدل به داده ها). مدل سازی پیشرو بر مبنای روش آزمون و خطا انجام می شود. در این روش یک توزیع خاص برای اجزاء زیرسطحی در نظر گرفته می شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می شود. سپس پاسخ این مدل با آرایش الکترونی مورد نظر محاسبه می شود. آرایش های الکترونی متنوعی وجود دارد؛ که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. عوامل متعددی در انتخاب آرایش الکترونی تأثیر دارند؛ که از مهم ترین آنها می توان به نسبت

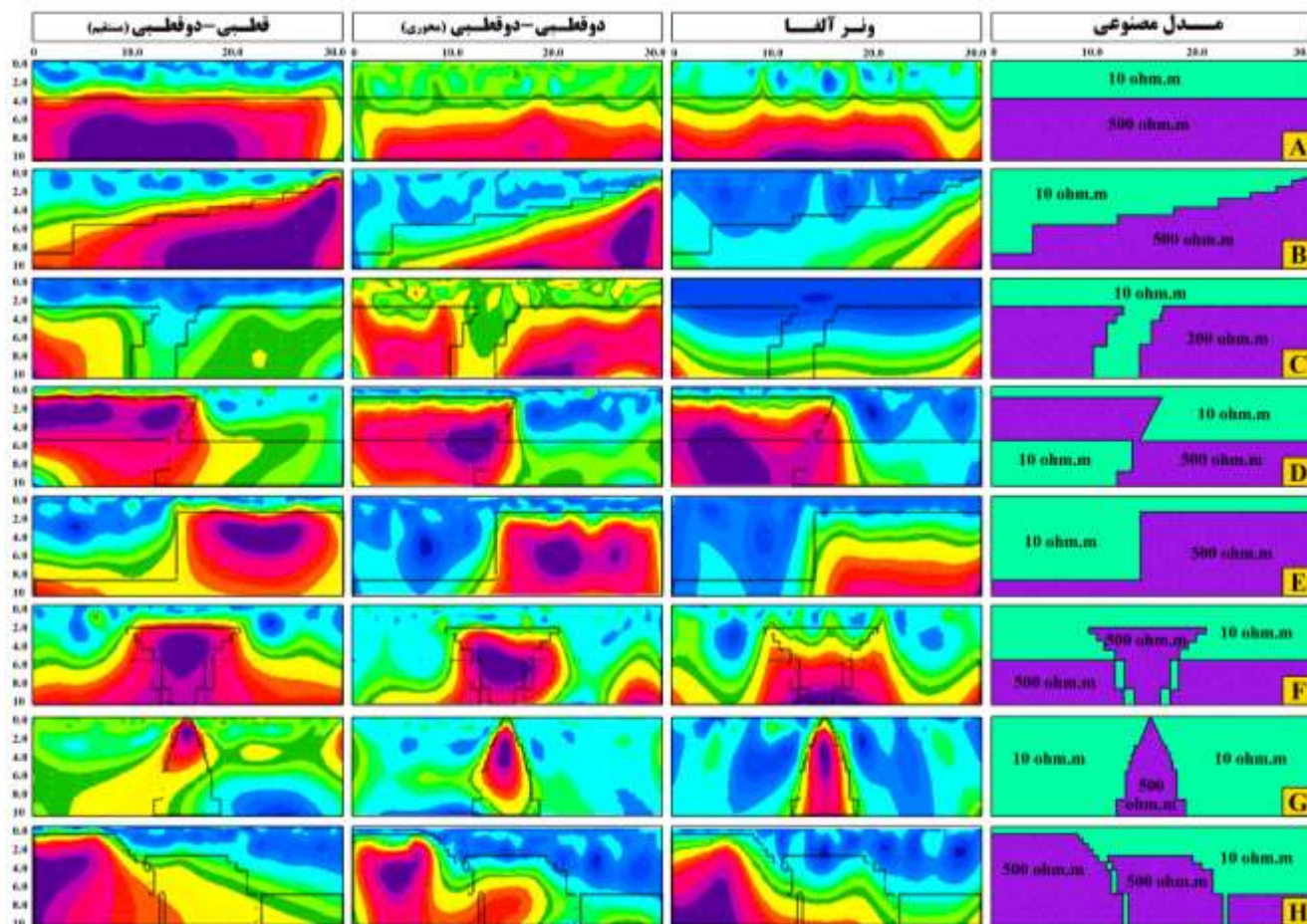
$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	اسلیت	$20 - 2 \times 10^3$	شیل
0.2	آب دریا	10 - 100	آب زیرزمینی
$5 \times 10^3 - 10^6$	گرانیت	$10^2 - 2 \times 10^8$	کوارتزیت
$10^3 - 5 \times 10^5$	گابرو	$10^3 - 10^6$	بازالت

(1999).

جدول ۱: مقاومت ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد معدنی متداول

(Loke, 1999).

ماده موردنظر	مقاومت ویژه (Ωm)	ماده موردنظر	مقاومت ویژه (Ωm)
ماسه سنگ	$8 - 4 \times 10^3$	سنگ آهک	$50 - 4 \times 10^2$
ماسه سست	$500 - 5 \times 10^3$	رس	1 - 100



شکل ۳- مدل های مصنوعی مقاومت ویژه: مدل لایه افقی (A)، لایه شیب دار - گسل تراستی (B)، زون شکسته (C)، گسل شیب لغز (D)، قائم (E)، هورست و گرابن (F)، گوه مقاوم (G) و گسل این اشلان (H) و پاسخ مدل سازی وارون به ازای ۸ مدل و برای ۳ آرایه الکترودی وئر آلفا، دو قطبی-دوقطبی محوری و قطبی-دوقطبی مستقیم

محوری و قطبی-دوقطبی مستقیم محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. در مجموع پس از بررسی شکل ۳، نتایج زیر بدست می‌آید: آرایش قطبی-دوقطبی مستقیم، در تشخیص عمق دقیق لایه افقی (A)، با وجود نوفه محیطی، بهتر از دو آرایش دیگر عمل کرده است. آرایش دوقطبی-دوقطبی، در نمایش لایه شیب دار و یا گسل تراستی (B) در محیط فاقد نوفه بهتر از آرایش وئر عمل کرده است. آرایش قطبی-دوقطبی مستقیم حتی با وجود ۹ درصد نوفه محیطی، مرز بین دو لایه را به صورت نوک‌تیز (ناگهانی) نشان می‌دهد. این در حالی است که آرایه دوقطبی-دوقطبی مرز را کمتر

در بخش نخست پژوهش، ابتدا هشت مدل زمین‌شناسی (مطابق شکل ۳)، شامل مدل لایه افقی (A)، لایه شیب دار یا گسل تراستی (B)، زون شکسته (C)، گسل شیب لغز (D)، گسل قائم (E)، هورست و گرابن (F)، گوه مقاوم (G) و گسل این اشلان یا پله‌ای (H) در نرم‌افزار Res2dmod ساخته شد؛ سپس داده‌های خروجی مدل سازی پیشرو حاصل از این نرم‌افزار با اضافه نمودن ۹ درصد نوفه تصادفی، به عنوان ورودی به نرم‌افزار Res2dinv داده شده و نتایج حاصل از وارون سازی به نمایش در آمد و در نهایت پاسخ مدل سازی وارون به ازای ۸ مدل و برای ۳ آرایه الکترودی وئر آلفا، دو قطبی-دوقطبی

آرایش و نر نیز با وجود سادگی هندسی، در اجرا بسیار وقت گیر است. در این آرایه برای افزایش عمق بررسی باید در هر مرحله تمامی الکترودها جابجا شوند؛ که همین امر موجب کاهش سرعت و بازده برداشت خواهد شد.

در نهایت، آرایش دوقطبی-دوقطبی نیز با وجود مزیت های دیگر آرایش ها، به سبب برداشتی ساده تر و نمایش مناسب ساختارهای زیرسطحی از قبیل شکستگی ها و گسل ها، در این مطالعه برای برداشت داده های مقاومت ویژه در منطقه خلیل شهر، مورد استفاده قرار گرفته است.

۵- مدل سازی مصنوعی داده های GPR

در سال های اخیر روش های عددی برای محاسبه میدان های الکترومغناطیسی از روش های تحلیلی پیشی گرفته اند. راه کارهای تحلیلی تنها در مسائل پایه ای با هندسه های ساده، یک بعدی و متقارن کاربرد داشته اند و در بیشتر مسائل کاربردی با شرایط پیچیده محیطی و مرزی که به مسائل واقعی و طبیعی نزدیک تر هستند، قابل اجرا نیستند. در نتیجه امروزه در حوزه های مختلف علوم و فناوری میدان های الکترومغناطیسی، پرداختن به روش های عددی به عنوان راه حل جدی برای مسائل الکترومغناطیس و طراحی سامانه های الکترونیکی، اجتناب ناپذیر است. با نگرش عددی به حل معادلات ماکسول، میدان ها را در حوزه زمان و همچنین در حوزه فرکانس می توان به صورت عددی تحلیل کرده و مقدار کمی آنها را بدست آورد (Balanis, 1989 و Peterson et. al., 1998). روش تفاضل محدود، اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط تام تحت عنوان "روش مربعات" برای حل معادلات هیدرودینامیکی غیرخطی ارائه شد. سپس این روش در حل مسائل گوناگونی به کار گرفته شد. روش تفاضل محدود مبتنی بر تخمین توابع دیفرانسیلی به وسیله معادلات تفاضلی است. این معادلات به شکل جبری است و مقدار متغیر وابسته در یک نقطه را با استفاده از مقادیر نقاط مجاور، تخمین می زند. اولین بار (Yee, 1966) با معرفی سلول یی توانست روش تفاضل محدود را در حل معادلات ماکسول به کار گیرد.

مشخصات الکترومغناطیس مواد، به مواد تشکیل دهنده و همچنین میزان آب موجود در آن ها بستگی دارد. در جدول ۲ مشخصات برخی از مواد آمده است (Sensors and software, 1999).

برای بررسی پاسخ GPR اهداف مدفون، مرزهای بازتابنده و همچنین عوارض زمین ساختی، نخست اقدام به ساخت مدل پیشرو به روش تفاضل محدود در نرم افزار ReflexW شد. مدل های پیشرو

به صورت نوک تیز و بلکه تدریجی نشان می دهد. در آرایش و نر آلفا نیز این مرز کاملاً تدریجی است.

در نمایش زون خرد شده یا شکسته (C) نیز، آرایش های قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی موفق تر عمل کرده اند و آرایش و نر بسیار ضعیف عمل کرده است.

در نمایش گسل شیب دار (D)، آرایش های قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی، بهتر عمل کرده اند. آرایش و نر تقریباً قابل قبول بوده است. اگر با تأمل بیشتری به فرادیواره گسل یعنی سمت راست مدل بنگریم؛ یعنی درست در جایی که لایه با مقاومت پایین در زیر لایه مقاوم قرار گرفته است؛ باز هم نتیجه این خواهد بود که آرایش قطبی-دوقطبی موفق تر عمل کرده است. پس هم در حالتی که لایه ی مقاوم در زیر لایه رسانا قرار می گیرد و هم در حالت بالعکس آن، این آرایش تفکیک قابل قبولی دارد.

در نمایش گسل نرمال قائم (E)، آرایش دوقطبی-دوقطبی کمی بهتر توانسته تیزی مرز و لبه گسل را نشان دهد و حالت مربعی را بهتر نمایش می دهد؛ اما اگر به سمت چپ مدل یعنی فرادیواره ی گسل دقت شود؛ یعنی همان جایی که لایه مقاوم با ضخامت بسیار کم در زیر لایه ی ضخیم با مقاومت بسیار پایین (۱۰ اهم متر) قرار گرفته است، باز هم آرایش قطبی-دوقطبی موفق تر بوده؛ اما در نمایش گسل نرمال قائم، هر سه آرایش، عملکرد مناسب و قابل قبولی داشته اند.

آرایش قطبی-دوقطبی، هورست و گرابن (F) را بهتر نشان می دهد. با وجود نوفه این توانایی بهتر مشاهده می گردد.

از معدود مناطقی که آرایش و نر برتر از سایر آرایش ها بوده، توانایی در نمایش گوهی مقاوم (G) است. آرایش و نر، به بهترین وجه حالت هندسی گوهی مقاوم را حفظ کرده و به نمایش درآورده است.

در نمایش گسل پله ای (H)، هر سه آرایش به خوبی عمل کرده اند. مطابق مطالعات پیروز و همکاران از اواخر دهه ی ۷۰ تا اواخر دهه ی ۸۰ (برای مثال جهان بین و پیروز، ۱۳۸۶، احمدزاده و پیروز، ۱۳۸۹، فردوسی و پیروز، ۱۳۸۲) و همچنین مطالعات تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰، رینولدز و همکاران، ۱۹۹۸، آرایش قطبی-دوقطبی اگر به صورت کامل یعنی هم از روش پیشرو و هم وارون انجام شود، از جمله موفق ترین آرایش ها در نمایش ساختارهای (قائم) گسلی و زون های شکستگی است. در عمل پیاده سازی این آرایش در صورت برداشت با دستگاه های چند الکترودی ایده آل ترین حالت خواهد بود؛ اما به سبب نبود این سیستم و به دلیل این که یکی از الکترودها به بی نهایت (فاصله ای خیلی دور) انتقال می یابد؛ برداشت با این آرایش با مشکلاتی همراه خواهد بود.

بازتاب یافته به ترتیب عبارتند از: مثبت-منفی-مثبت، پس گزردهی لایه‌ی دوم بیشتر از لایه‌ی سوم است (گزردهی الکتریکی لایه دوم برابر ۲۰ و لایه سوم برابر ۱۳ است). همچنین قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ازای تمامی مرزها و مدل‌ها در شکل محاسبه شده است. در تمامی ۴ مدل، پاسخ‌های بازتابی GPR ناشی از مرزها به ترتیب از مرز بالایی به سمت مرزهای عمیق‌تر، به‌واسطه‌ی پخش هندسی امواج الکترومغناطیس میرا شده و تضعیف گردیده است.

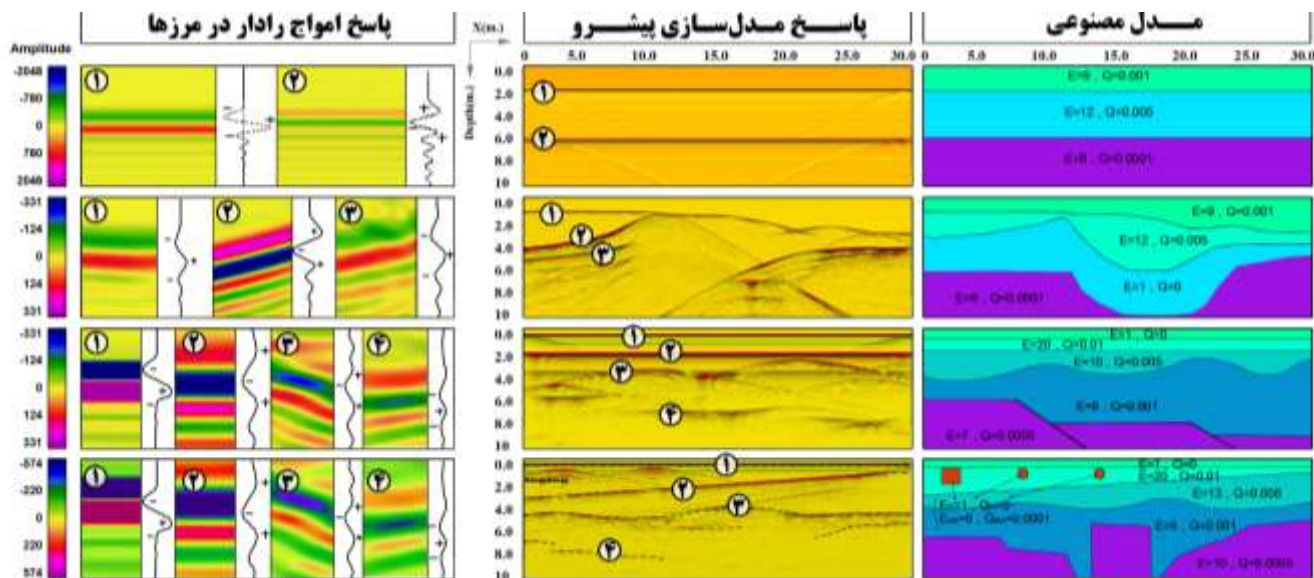
جدول ۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد (Sensors and software, 1999).

اتلاف (db/M)	سرعت (M/nS)	رسانندگی (mS/m)	گذردهی نسبی (ϵ_r)	
۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۳-۵	ماسه خشک
۰/۰۳-۰/۳	۰/۰۶	۰/۱-۱	۲۰-۳۰	ماسه اشباع
۰/۴-۱	۰/۱۲	۰/۵-۲	۴-۸	سنگ آهک
۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰	۵-۱۵	شیل
۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰	۵-۳۰	لای‌ها
۱-۳۰۰	۰/۰۶	۲-۱۰۰۰	۵-۴۰	رس‌ها
۰	۰/۳۰	۰	۱	هوا
2×10^{-3}	۰/۰۳۳	۰/۰۱	۸۰	آب مقطر
۰/۱	۰/۰۳۳	۰/۵	۸۰	آب شیرین
۱۰۳	۰/۰۱	3×10^3	۸۰	آب دریا

ساخته شده (شکل ۴) عبارتند از: مدل لایه‌ی افقی (A)، لایه‌های ناهموار (B)، گسل پله‌ای (C) و در نهایت مدل تلفیقی ناپیوستگی‌های موجود در منطقه (D)، که ذیلاً به ذکر توضیحاتی در مورد هر کدام از این مدل‌ها پرداخته می‌شود. پارامترهای متغیر در شکل ۴ شامل گزردهی الکتریکی نسبی و رسانندگی الکتریکی است؛ که به ترتیب با حروف E و Q در داخل مدل نشان داده شده است و به سبب رعایت اختصار، فقط به ذکر مقادیر در داخل شکل اکتفا شده است.

با توجه به شکل ۴، پس از برخورد امواج الکترومغناطیسی ارسالی از فرستنده ی GPR به سطوح بازتابی (که از لحاظ گزردهی الکتریکی با محیط اطراف خود تباین قابل توجهی دارد). امواج بازتاب می‌شوند و یک موجک با سه قسمت عمده در ردهای GPR ایجاد می‌کنند. با بررسی سه قسمت موجود در موجک می‌توان گزردهی دو طرف مرز بازتابی را مورد بررسی قرار داد. اگر موجک از محیط با گزردهی الکتریکی کمتر وارد محیط با گزردهی الکتریکی بیشتر شود، به ترتیب دارای قسمت‌های منفی-مثبت-منفی است و بالعکس، اگر موجک از محیط با گزردهی الکتریکی بیشتر وارد محیط با گزردهی الکتریکی کمتر شود؛ موجک به ترتیب دارای قسمت‌های مثبت-منفی-مثبت است.

برای مثال با بررسی مدل GPR تلفیقی منطقه (D) در شکل ۴ می‌توان دریافت که: در مرز بازتابی دوم، قسمت‌های مختلف موجک



شکل ۴- مدل‌های مصنوعی GPR منطقه مورد مطالعه: مدل لایه‌ی افقی (A)، لایه‌های ناهموار (B)، گسل پله‌ای (C) و در نهایت مدل تلفیقی ناپیوستگی‌های موجود در منطقه (D) به همراه پاسخ مدل‌سازی پیشرو در نرم‌افزار ReflexW و همچنین پاسخ موجک‌ها در مرزهای بازتابی. مقادیر گزردهی الکتریکی نسبی و رسانندگی الکتریکی مدل به ترتیب با حروف E و Q در داخل مدل نشان داده شده است.

برای تقویت پاسخ موجک‌های بازتاب یافته از مرزهای عمیق‌تر می‌توان از بهره‌هایی مانند AGC، بهره‌ی انتخابی و سایر بهره‌ها

بادپا و همکاران، بررسی فعالیت های کوانترنری شاخه های گسل خزر به وسیله روش های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین و مقاومت ویژه الکتریکی، صفحات ۱-۱۶.

طول ۱۵۰ متر با دستگاه Mala سوند انجام شد. همچنین برداشت داده های مقاومت ویژه با آزمون ۱۷۵ درجه تقریباً عمود بر امتداد گسل، طراحی شد. در نهایت برداشت داده های مقاومت ویژه الکتریکی در ۷۵ نقطه (۱۸ ایستگاه) با فواصل ۱۰ متر از یکدیگر و با آرایش دوقطبی-دوقطبی انجام شد.

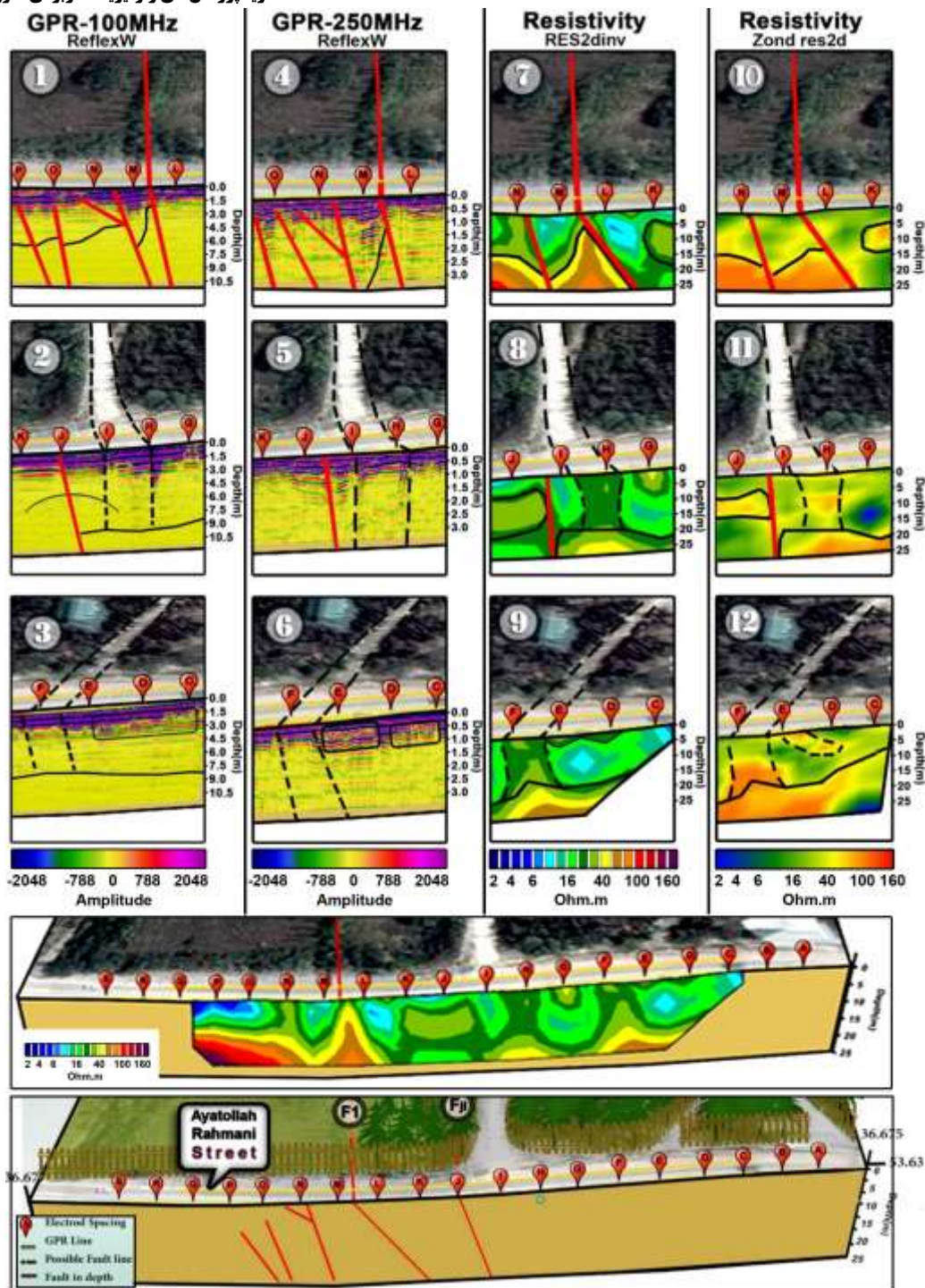
داده های GPR در نرم افزارهای ReflexW، Radexplorer و Matlab و داده های مقاومت ویژه الکتریکی در نرم افزارهای Res2dinv و Zondres2d پردازش شد و پس از ترکیب با تصاویر و مدل توپوگرافی منطقه، در شکل ۵ در مقاطع ۱ تا ۱۲ به نمایش درآمد. پس از تعیین بهترین مقدار فاکتور کنترلی داده های مقاومت ویژه (فاکتور کنترلی ۰,۱۶۰ و کمترین میزان فاکتور ۰,۰۱۵ در نظر گرفته شد)، تصحیح توپوگرافی هم زمان با مدل سازی داده ها انجام شد و در نهایت مقطع دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی تهیه شد. مدل مذکور در تکرار پنجم و با خطای ریشه میانگین مربعات برابر ۴,۲ درصد بدست آمده است.

استفاده کرد. در این پژوهش برای تقویت پاسخ های عمیق داده های واقعی از فیلتر بهره ای انتخابی استفاده شده است.

پاسخ GPR مرز سوم که در آن مرز بین خاک لومی مرطوب و خشک به صورت برآمدگی و فرورفتگی در نظر گرفته شده است، در قسمت های ناوگونی حالت پاپیونی نشان داده و شکل این فرورفتگی ها خیلی کوچک تر از حالت واقعی دیده می شود. همچنین بخش های تاقگون، کمی گردتر و بزرگتر از حالت عادی مدل دیده می شوند؛ که این موارد پس از اعمال فیلتر مهاجرت F-K اصلاح می گردد. همانند امواج لرزه ای در اینجا نیز، مرزهای پرشیب (بالاخص در مرز چهارم بازتابی) پاسخ شدیداً ضعیفی از خود نشان می دهند و مرزهای قائم اصلاً دیده نمی شوند.

۶- برداشت داده های GPR و مقاومت ویژه در منطقه

برداشت داده های GPR در منطقه خلیل شهر پس از بررسی های زمین شناسی و مدل های مصنوعی گسل های منطقه، در ۲ پروفیل با آنتن های ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاهرتز پوششی و در یک خط برداشت به



شکل ۵- مدل تلفیقی از نتایج داده‌های GPR و مقاومت‌ویژه برداشت‌شده در منطقه خلیل شهر (به همراه موقعیت الکترودهای A تا S) پس از تلفیق با تصویر عوارض محیطی و نمایش مدل زمین‌شناسی منطقه و موقعیت شاخه‌های فرعی گسل

مقاومت‌ویژه الکتریکی پس از پردازش در نرم‌افزار Zondres2d می‌باشد. همچنین نقاط علامت گذاری شده A تا S همان موقعیت الکترودها با فواصل ۱۰ متر از یکدیگر است؛ که برداشت مقاومت ویژه با آن انجام شده است. پردازش‌های داده‌های GPR استفاده شده در این پژوهش عبارتند از:

شکل ۵، مقاطع ۱ تا ۳ حاصل برداشت داده‌های GPR با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی پس از پردازش در نرم‌افزار ReflexW، مقاطع ۴ تا ۶ با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی پس از پردازش در نرم‌افزار ReflexW، مقاطع ۷ تا ۹ داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی پس از پردازش در نرم‌افزار Res2dinv و مقاطع ۱۰ تا ۱۲ برداشت شده

تبدیل فوریه دوبعدی با انتقال داده ها از حوزه ی مکان- زمان به حوزه عدد موج- فرکانس برای حذف مناطق حاوی نوفه و همچنین نشانگرهای لحظه ای برای تعیین جزئیات بیشتر، اعمال شد. برای انجام مدل سازی وارون مقاومت ویژه الکتریکی از نرم افزار Res2Dinv و روش حداقل مربعات (شکل ۵ مقاطع ۷ تا ۹) و نرم افزار ZondRes2d روش هایی شامل روش های هموار مقید، اکام، مارکوارت، بلوک، متمرکز و پروفیلر استفاده شده؛ که در شکل ۵ مقاطع ۱۰ تا ۱۲ نتایج روش مارکوارت نشان داده شده است. از تلفیق نتایج مقاطع پردازش شده و تصویر ماهواره ای و مدل ارتفاعی از منطقه خلیل شهر، شکل ۵ حاصل شده است. با توجه به این شکل، شاخه های گسل خزر در طول پروفیل مشخص شده است. شاخه های مذکور نشان دهنده ی حرکات تکتونیکی جوان گسل خزر بوده که به سبب کشیده شدن امتداد گسل به داخل رسوبات عهد حاضر این حرکات از دید پنهان مانده است. همچنین، بی هنجاری های شاخصی در طول مقطع دیده می شود؛ که هر کدام می تواند نمایانگر پدیده ی مربوط به خود باشد که از آن جمله می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱- از سطح تا عمق ۱٫۵ متری (مقاطع ۱ تا ۶ شکل ۵) پاسخ دامنه امواج GPR قویاً به چشم می خورد، با توجه به این که پروفیل ها در مسیر جاده آسفalte برداشت شدند و معمولاً برای ساخت جاده آسفalte نیاز به رعایت الزامات مهندسی خاک همچون تحکیم و تراکم و ... می باشد. لذا ممکن است پاسخ های قوی مذکور مربوط به خاک های تراکم یافته باشد. تفکیک این لایه نسبت به لایه های پایینی در مقطع دامنه لحظه ای مشهودتر است.

همچنین مقاومت ویژه الکتریکی (در طول پروفیل های ۷ تا ۱۲ شکل ۵) از سطح تا عمق تقریبی ۱۰ متر دارای مقادیر پایین (۰ تا ۲۰ اهم متر) بوده و پس از این عمق مقاومت ویژه افزایش می یابد. حدود تغییرات در این محدوده بین ۲۰ تا ۱۳۰ اهم متر است.

۲- در فاصله بین F و E و همچنین I و H، به سبب فشردگی خاک و همچنین بتن ریزی برای ساخت جاده فرعی در محل تلاقی با جاده اصلی، کاهش رسانندگی الکتریکی سبب شده تا بازتاب های زیر سطح جاده متفاوت از طرفین آن و به خصوص ضلع جنوبی جاده باشد. این مرز به صورت خط چین مشخص شده است و در پروفیل ۲۵۰ مگاهرتز از عمق ۱ تا ۳ متری امتداد می یابد. در پروفیل ۱۰۰ sh این اختلاف به طور واضح تری به چشم می خورد و از عمق ۱٫۵ تا کمتر از ۷٫۵ متر ادامه می یابد. (البته در این فواصل افزایش و کاهش های دامنه امواج دیده می شود؛ که ممکن است به دلیل فشردگی و یا عدم فشردگی خاک و یا تغییر اندازه ذرات خاک

تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل های مورد بررسی، تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک یا جابجایی صفر زمانی، بهره ی انتخابی، فیلتر حذف زمینه، فیلتر سرعت، نشانگرهای لحظه ای و در نهایت تصحیح توپوگرافی، که ادامه توضیح مختصری از مزیت و نتایج استفاده از این پردازش ها در این پژوهش، ذکر شده است.

پس تحلیل طیف فرکانس مقاطع رادار، فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل ۱۰۰ sh، ۶۵ مگاهرتز، فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل ۲۵۰ sh، ۱۴۵ مگاهرتز، محاسبه شد. در نتیجه فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل های برداشت شده، به دلیل حذف فرکانس های بالا در محیط های رسانا (نسبت به هوا)، کمتر از فرکانس امواج ارسالی است. با مشخص کردن سطح دامنه نوفه و با استفاده از فرمول $t=2h/v$ (که در آن t زمان، v سرعت و h عمق هدف است)، می توان بیشترین عمق نفوذ را از نمودارهای طیف دامنه تخمین زد. با در نظر گرفتن سطوح دامنه نوفه و سرعت ۰٫۱ متر بر ثانیه (یعنی $h=t/20$)، عمق نفوذ مفید امواج GPR در پروفیل ۱۰۰ sh، کمتر از ۱۰٫۵ متر، ۲۵۰ sh، کمتر از ۳٫۵ متر برآورد شده است. البته با اعمال برخی پردازش ها همانند بهره ها، می توان تضعیف دامنه نسبت به عمق را جبران نمود و حوادث بازتابی عمیق تر را با وضوح بیشتری نشان داد.

معمولاً اولین پردازش بر روی داده های GPR، حذف مؤلفه های فرکانسی خیلی پایین از روی داده ها است. مرحله پردازش Dewow برای حذف این امواج فرکانس پایین ناخواسته است. در حالی که سیگنال های با فرکانس بالا حفظ می شوند. حذف کردن wow، تصحیح اشباع سیگنال نیز نامیده می شود (Sensors and software, 2001). لذا این پردازش، اولین پردازشی است که بر روی تمامی مقاطع مورد استفاده در این پژوهش اعمال شده است.

به منظور جابجایی زمانی اولین رویداد در طول ردهای برداشتی در پروفیل های بازتابی GPR، مجموعه نرم افزارهای GPR معمولاً این به خط شدگی را به صورت خودکار با جابجایی هر رد به صورت جداگانه، انجام می دهند. برای این منظور یک مقدار زمینه برای تشخیص اولین رویداد در این نرم افزارها بکار می رود؛ که به واسطه آن اولین رویداد (موج مستقیم هوا) را تشخیص دهند (اسحاقی، ۱۳۸۹). از این رو در ادامه از تصحیح جابجایی صفر زمانی برای قرارگیری بازتاب ها در مکان واقعی شان استفاده شده است.

در ادامه تصحیحاتی از قبیل استفاده از بهره ها (بهره ی انتخابی) به منظور جبران تضعیف امواج الکترومغناطیس، تصحیح توپوگرافی به منظور قرارگیری بازتاب ها در مکان واقعی خود، فیلتر سرعت، با

نرمال دو بلوک نسبت به هم شده است. این شاخه ی گسلی در این پژوهش، F1 نام گذاری شده است. تغییرات دامنه امواج رادار، در دو طرف مرز گسل کاملاً بارز بوده به طوری که تعداد پیک دامنه بلوک فرادیواره ی گسل (ضلع جنوبی) کمتر از تعداد پیک دامنه در بلوک فرودیواره ی گسل (ضلع شمالی) است. در پروفیل sh250 نیز قسمت غربی مرز گسل F1 (فرودیواره ی گسل) دامنه ی قوی تری نسبت به بخش فرادیواره از خود نشان می دهد. همچنین تغییرات عمقی در لایه بندی تقریباً در عمق ۵ متری در شکل مشاهده می شود.

در فاصله مذکور تغییرات شدید مقاومت ویژه به چشم می خورد؛ که ناشی از گسلش اصلی منطقه می باشد. به طوری که بلوک فرادیواره دارای مقاومت ویژه پایین (۱۰ اهم متر) و بلوک فرودیواره دارای مقاومت ویژه متوسط (۵۵ اهم متر) می باشد.

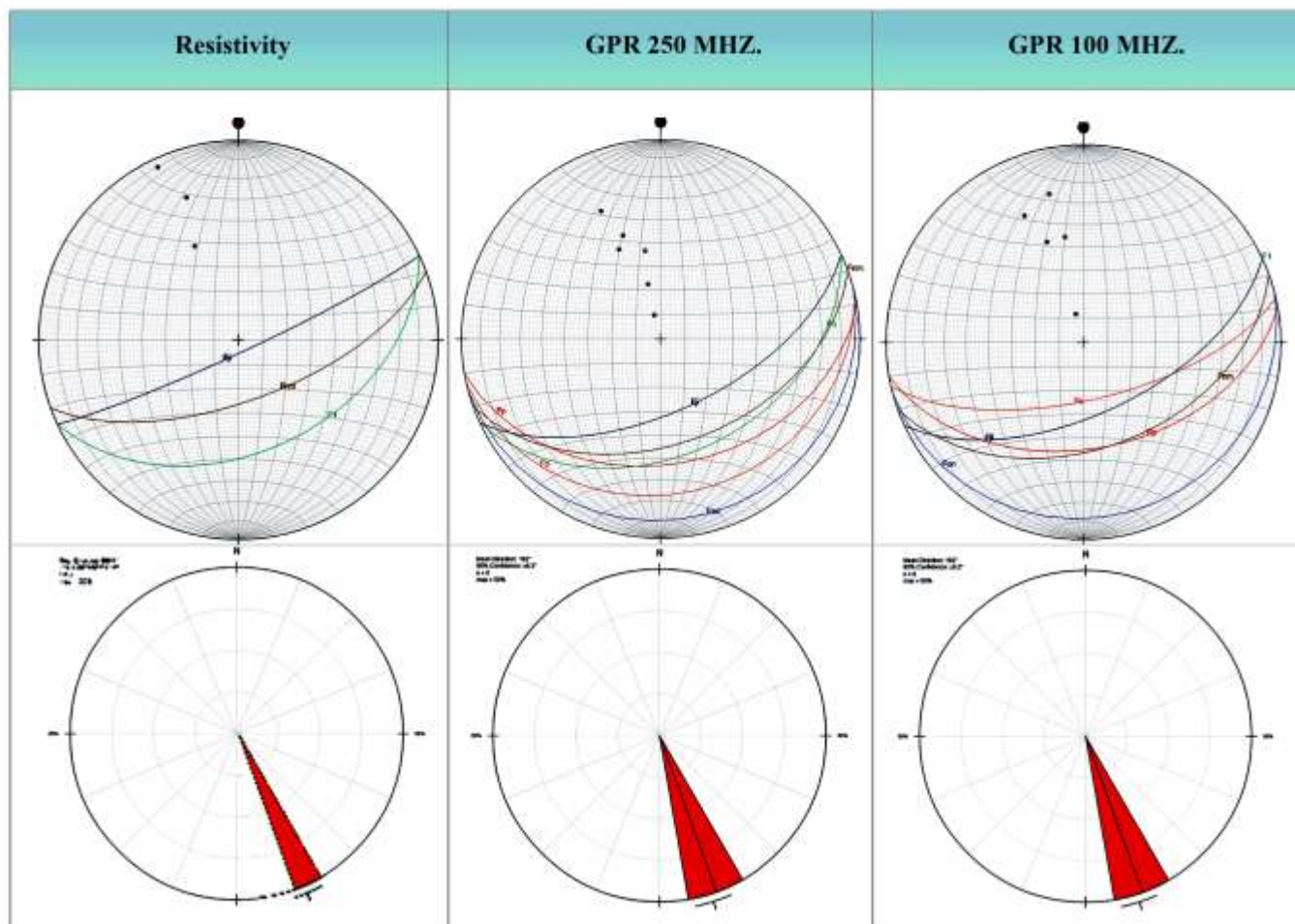
۵- همچنین در فاصله بین M و N، محل N، O و P نیز شاخه های دیگری از گسل دیده می شود که می توان از وجود تغییرات ناگهانی دامنه ی رد به وجود هر کدام پی برد.

۶- در نهایت با تلفیق نتایج مقاطع پردازش شده GPR و مقاومت-ویژه الکتریکی و پیاده سازی نتایج در نرم افزار Streonet روند شیب و امتداد عمومی شاخه های گسلی، قطب شاخه های گسلی و همچنین رُز دیاگرام تکتونیک عمومی شاخه های گسلی در منطقه ی خلیل-شهر ترسیم شد (شکل ۶).

باشد. البته از ذکر این نکته هم نباید غافل بود که در پی ریزی جاده در محل های خاصی از رس به جهت استحکامات استفاده می شود که وجود آن سبب میرایی امواج الکترومغناطیسی می گردد). همچنین در فاصله بین الکترودهای F و E (۴۰ تا ۵۰ متری از قسمت ابتدایی یا جنوبی پروفیل های ۷ تا ۱۲ شکل ۵)، به سبب فشردگی خاک و همچنین بتن ریزی جهت ساخت جاده، افزایش مقاومت ویژه کاملاً مشهود است. در فاصله بین الکترودهای I و H (۷۰ تا ۸۰ متری از ابتدای پروفیل) نیز، به سبب فشردگی خاک و همچنین بتن ریزی برای ساخت جاده، افزایش مقاومت ویژه کاملاً مشهود است. پاسخ مذکور تا عمق ۱۰ متر یعنی حتی بیشتر از عمق بتن ریزی ادامه یافته است.

۳- در فاصله بین J و I گسلش مشهودی سبب جابه جایی نرمال دو بلوک نسبت به هم شده است. این شاخه ی گسلی در این پژوهش، Fji نام گذاری شده است. تغییرات دامنه امواج رادار (مقاطع ۱ تا ۶ شکل ۵)، در دو طرف مرز گسل کاملاً مشهود بوده به طوری که تعداد پیک دامنه بلوک فرادیواره ی گسل (ضلع جنوبی) کمتر از تعداد پیک دامنه در بلوک فرودیواره ی گسل (ضلع شمالی) است. میزان جابجایی با توجه به مقاطع مقاومت ویژه تقریباً ۱۰ متر برآورد شده است.

۴- در فاصله بین L و M (۱۱۰ تا ۱۲۰ متری از ابتدای پروفیل)، نیز همانند مورد قبلی سبب ایجاد گسلش مشهودی با جابه جایی



شکل ۶ - نمایش نتایج مقاطع پردازش شده GPR (با آنتن ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاهرتز پوششی) و مقاومت ویژه الکتریکی پیاده سازی شده در نرم افزار Streonet شامل: شیب و امتداد عمومی شاخه های گسلی، قطب شاخه های گسلی و همچنین رُز دیاگرام از تکتونیک عمومی شاخه های گسلی در منطقه ی خلیل شهر

کشیده شدن امتداد گسل به داخل رسوبات عهد حاضر این حرکات از دید پنهان مانده است. امتداد غالب بیشتر گسل ها در این منطقه N80E و راستای شیب عمومی آنها جنوب شرقی می باشد.

۸- منابع

احمدزاده، غ.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "اکتشاف آبهای زیرزمینی با استفاده از مدل سازی معکوس دوبعدی داده های مقاومت ویژه در آهک- های کرتاسه واقع در شمال شاهرود"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

اسحاقی، ا.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "مقایسه و تلفیق داده های توموگرافی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین در اکتشاف لایه ها و قنات آب زیرزمینی در منطقه درخانیاب مجن شاهرود"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و

۷- نتیجه گیری

روش های مختلف وارون سازی نرم افزارهای ZondRes2D و RES2DINV، نتایجی یکسان به همراه داشته است (البته نرم افزار RES2DINV پاسخ ها را تیزتر نشان داده) و دیواره های پنهان گسلی را به خوبی به نمایش درآورده اند.

پس از تلفیق نتایج حاصل از وارون سازی در نرم افزار ZondRes2D و RES2DINV، سه شاخه ی عمده ی گسلی در طول مقاطع مقاومت- ویژه مشاهده شد. این شاخه ها F1، Fji و Fnm نام گذاری شدند. این نتایج به طور کامل با اطلاعات زمین شناسی منطقه انطباق دارد. همچنین مقاطع GPR در نمایش شاخه های F1، Fji عملکردی مناسب داشتند. با توجه به شکل ۵ و مقایسه ی پروفیل های حاصل از دو روش GPR و مقاومت ویژه منطقه خلیل شهر و تلفیق با نتایج زمین شناسی، شاخه های فرعی گسل خزر در طول پروفیل مشخص شد؛ که نشان دهنده حرکات تکتونیکی جوان گسل خزر به سبب

ژئورادار در شناخت گسل‌های فرعی تهران"، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی، مشهد.

فردوسی، ح.، پیروز، ا.، (۱۳۸۲)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، "تهیه مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای مربوطه برای اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی گسل‌ها و دایک‌های قائم"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

قاسمی، ع.، (۱۳۷۱)، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهشهر"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

محمدی ویژه، م.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین در منطقه‌ی شاهرود و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه‌ی مزبور"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مقتدر، س. م.، پیروز، ا.، حافظی مقدس، ن.، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "مطالعات ژئوالکتریکی بمنظور مشخص نمودن وضعیت زمین‌شناسی زیر سطحی و تراز آب زیرزمینی در بخشی از شهر مشهد"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Annan, A. P., (2001), "Ground penetrating radar workshop note", Sensors and software.

Balanis CA. (1989), "Advanced engineering electromagnetics", Wiley, New York.

Chow, J., Angelier, J., Hua, J., Lee, J.C., Sun, R., (2001), "Paleoseismic event and active faulting: from ground penetrating radar and high-resolution seismic reflection profiles across the Chihshang Fault", eastern Taiwan, Tectonophysics, 241-259.

Christie, M., Tsoflias, G.P., Stockli, D.F., and Black, R., (2008), "Assessing fault displacement and off-fault deformation in an extensional tectonic setting using 3-D ground-penetrating radar imaging", Journal of Applied Geophysics, doi:10.1016/j.jappgeo.2008.10.013.

Dobrin, M.B., Savit C.H., (1988), "Introduction to geophysical prospecting", McGraw-Hill 867.

Grasmueck, M., Weger, R., Horstmeyer, H., (2005), "Full-resolution 3D GPR imaging", Society of Exploration Geophysicists, doi 10.1190/1.1852780 v. 70 no. 1 p. K12-K19.

Loke, M. H., (2004), "Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys".

ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

استکی، م.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و لرزه‌نگاری انکساری و مقایسه و تلفیق نتایج تفسیر به منظور شناسایی دقیق‌تر لایه‌های زیرسطحی ساختمانگاه سد"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ‌روش، ب.، مهاجر اشجعی، ا.، (۱۳۷۱)، "پژوهش و بررسی ژرف نوزمین‌ساخت، لرزه‌زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه در گستره‌ی تهران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

پیروز، ا.، (۱۳۹۳)، جزوه آموزشی، "تحلیل سیگنال‌های ژئوفیزیکی و کاربرد آن در ژئوفیزیک"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

ترکمنچه، ح.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "اکتشاف گسل پنهان شاهرود در محدوده دره کال قرنو با استفاده از روش ژئوالکتریک"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

جهان‌بین، م.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "تعیین موقعیت و شیب گسل پنهان شاهرود، واقع در منطقه کال قرنو با استفاده از دو آرایش قطبی- دوقطبی متقارن"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

خادمی، س.، مرادی هرسینی، ک.، هاشمی، ن.، علیان نژاد، ع.، (۱۳۹۲)، "معرفی پهنه گسلی آزادشهر در شهر تهران بر اساس برداشت‌های میدانی و ژئوفیزیکی"، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی، مشهد.

رفعت هراب، ع.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۹)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "اکتشاف آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی معکوس دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه در سازند لار واقع در غرب شاهرود"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

علیان‌نژاد، ع.، مرادی هرسینی، ک.، قرشی، م.، خادمی، س.، علیان-نژادی، ع.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی کارایی روش‌های ژئوالکتریک و

- Peterson A.F., Ray S.L. and Mittra R. (1998), "Computational Methods for Electromagnetics" IEEE Press: New York.
- Rashed, M., Kawamura, D., Nemoto, H., Nakagawa, K., (2004), "Ground penetrating radar investigations across the Uemachi Fault, Osaka, Japan", *Journal of Applied Geophysics*, 53(2-3):63-75, DOI: 10.1016/S0926-9851(03)00028-4.
- Reynolds, J. M., (2011), "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics", 2nd Edition, ISBN: 978-0-471-48535-3.
- Reynolds, J.M., (1997), "An introduction to applied and environmental geophysics" John Wiley.
- Roberts R.L. and Daniels J.J. (1997) "Modelling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method" *J. of Geophysics*, Vol. 62, No. 4, pp. 1114-1126.
- Sensors and software, (1999), Ground penetrating radar survey design .
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., (1990), "Applied Geophysics", Second Edition. Cambridge University Press, pp 558-559.
- U.S.A.E.C. (1973), "Seismic Design and Seismic Hazard Assessment", Issue 07.
- Ward, S. H., (1990), "Resistivity and Induced Polarization Methods in Geotechnical and Environmental Geophysics", SEG, vol.1, pp. 147-189.
- Yee K.S. and Chen J.S. (1997) "The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 3, pp354-363.
- ZondRes2d software manual, (2012), "Program for two-dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods", pp19-22.
- Loke, M. H., and Barker, R. D., (1996), "Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections using quasi-Newton method", *Geophysical Prospecting*, 48, 181-152.
- Loke, M. H., and Barker, R. D., (1996), "Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion", *Geophysical prospecting*, 44, 499-523.
- Lrvine-Fynn, T.D.L., Moorman, B.J., Williams, J.L.M. and Walter, F.S.A. (2006) "Seasonal changes in ground-penetrating radar signature observed at a polythermal glacier, Bylot Island", Canada. DOI: 10.1002/esp.1299.
- McClymont, A. F., Green, A.G., Villamor, P., Horstmeyer, H., Grass, C., and Nobes, D.C., (2008), "Characterization of the shallow structures of active fault zones using 3-D ground-penetrating radar data", *Journal of Geophysical Research*, v. 113, p. 14-29.
- Michelle Monahan, S., (2013), " Investigating Fault Structure Using Electrical Resistivity Tomography", A Senior Project presented to the Faculty of the Physics Department California Polytechnic State University, San Luis Obispo, Bachelor of Science Thesis.
- Mooney, H. M. (1980), "Hand book of engineering geophysics", Vol. 2, Bison Instruments, Minneapolis.
- Nasuti, A., Beiki, M., Ebbing, J., (2010), "Gravity and magnetic data acquisition over a segment of the Møre-Trøndelag Fault Complex", NGU report 2010.049, 42pp.
- Nasuti, A., Chawshin, K., Dalsegg, E., Tønnesen, J.F., Ebbing, J. and Gellein, J., (2009), "Electrical resistivity and refraction seismics over a segment of the Møre-Trøndelag Fault Complex", NGU report 2009.037, 37pp.
- Nguyen, F., Garambois, S., Jongmans, D., Pirard, E., Loke, M.H., (2005), "Image processing of 2D resistivity data for imaging faults", *Journal of Applied Geophysics*, 57, 260-277, doi:10.1016/j.jappgeo.