



## بررسی فعالیت‌های کواترنری شاخه‌های گسل خزر در منطقه خلیل شهر به وسیله روش‌های ژئوفیزیکی رادار

### نفوذی به زمین و مقاومت ویژه الکتریکی

میعاد بادپا<sup>۱\*</sup>، ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۲</sup>، علیرضا عرب‌امیری<sup>۳</sup> و مهدی محمدی ویژه<sup>۲</sup>

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](mailto:miadbadpa@gmail.com)

#### واژگان کلیدی

شاخه‌های 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 شاخه‌های کواترنری گسل خزر، شناخت کامل ساز و کار گسل و نیز آشکارسازی امتدادهای گسل‌های 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 روش‌های اکتشافات زیرسطحی به ویژه روش‌های ژئوفیزیکی است. در این مطالعه نخست با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی پیشرو مقاومت ویژه الکتریکی و رادار نفوذی به زمین (*GPR*)، پاسخ پارامترهای فیزیکی (گذردهی، هدایت و مقاومت ویژه الکتریکی) انواع گسل، درزه و ساختارهای زمین‌شناسی منطقه خلیل شهر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین خطوط برداشت داده‌های واقعی مقاومت ویژه و *GPR* در جهت عمود بر امتداد احتمالی گسل خزر در منطقه خلیل شهر طراحی شد و در نهایت داده‌های مقاومت ویژه پس از انجام تصحیحات، با استفاده از روش‌های وارون‌سازی مختلف از جمله بهینه‌سازی حداقل مربعات غیر خطی لونبرگ-مارکوارت، اکام و ... مورد پردازش قرار گرفت و در نهایت پس از تلفیق نتایج حاصل با پروفیل‌های پردازش شده *GPR* و همچنین اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و تفسیر مقاطع، پارامترهای شیب و امتداد شاخه‌های گسل خزر در نرم‌افزار *Streonet* به نمایش درآمد. پس از تلفیق نتایج حاصل از روش‌های *GPR* و مقاومت ویژه، سه شاخه‌ی جدید کواترنری گسلی در طول مقاطع مقاومت ویژه مشاهده شد. این شاخه‌ها *F1*، *Fji* و *Fnm* نامگذاری شدند. شاخه‌های فرعی، نشان‌دهنده 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. شاخه‌های 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 سده 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 گسل‌های 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.

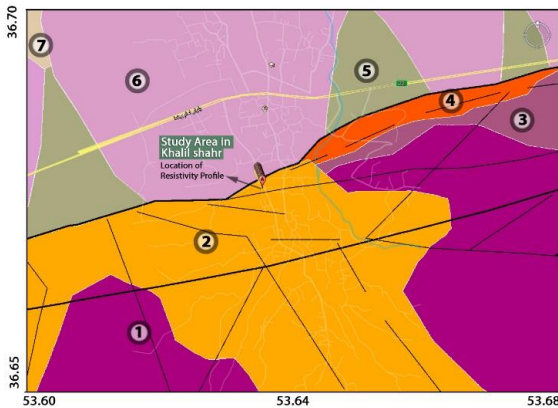
در ۵۰ سال اخیر، محققین و صاحب‌نظران مختلف، به بررسی پاسخ مقاومت‌ویژه گسل در شرایط مختلف پرداختند. از جمله روبرت و همکاران، ۱۹۶۶، مونی و همکاران، ۱۹۸۰، دوبرین و ساویت ، ۱۹۸۸، همچنین تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰ و رینولدز و همکاران، ۱۹۹۸ و ۲۰۱۱، به شرح پاسخ آرایه‌های الکترودی مختلف در مواجهه با گسل‌های قائم 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 آن جمله: 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 قرونو با استفاده از روش ژئوالکتریکی، مقتدر و همکاران، ۱۳۸۶، مطالعات ژئوالکتریکی به‌منظور 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 قرونو با استفاده از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن، احمدزاده و پیروز، 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.

مقالاتی 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 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

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 بازیک، دگرگونی، ۴- ساب ولکانیک‌های بازیک، 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 صحرائی 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 داده‌های حاصل در نرم‌افزارهای ReflexW برای برداشت‌های GPR و در نرم‌افزارهای Res2dinv و ZondRes2d برای داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی پردازش و تفسیر شده و نتایج نهایی در نرم‌افزار Online Streonet به نمایش درآمده و شیب، امتداد، قطب و پارامترهای

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 پالتوسایزیمیک 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 سه بعدی 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 مقاله ای به بررسی سیستم گسلی آماچی اوساکای ژاپن پرداخته اند. در کشور ایران نیز مقالاتی در این زمینه به در برخی مجلات و کنفرانس ها 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 شکل گیری پژوهش پیش رو، راه گشا 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 قرار می‌گرفت.

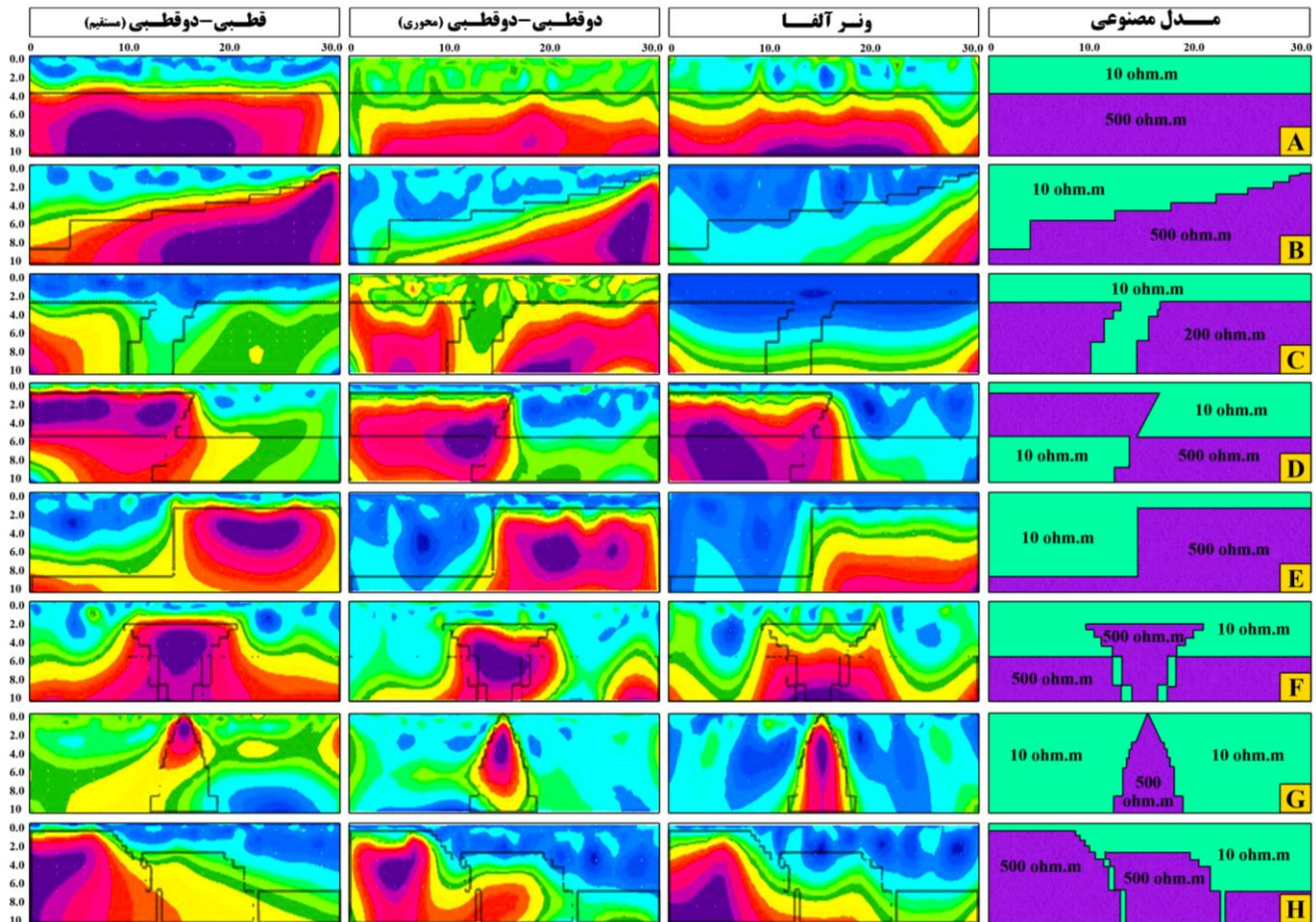
### ۲- زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، بین طول‌های جغرافیایی ۵۳،۶۰ تا ۵۳،۶۸ شرقی و عرض‌های ۳۶،۶۵ تا ۳۶،۷۰ شمالی، در



$5 \times 10^3 - 10^6$	گرانیت	$10^2 - 2 \times 10^8$	کوارتزیت
$10^3 - 5 \times 10^5$	گابرو	$10^3 - 10^6$	بازالت

$50 - 4 \times 10^2$	سنگ آهک	$8 - 4 \times 10^3$	ماسه سنگ
1- 100	رس	$500 - 5 \times 10^3$	ماسه سست
$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	اسلیت	$20 - 2 \times 10^3$	شیل
0.2	آب دریا	10 - 100	آب زیرزمینی



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 اِشلان (H) و پاسخ مدل سازی وارون به ازای ۸ مدل و برای ۳ آرایه الکترودی ونر آلفا، دو قطبی-دوقطبی محوری و قطبی-دوقطبی مستقیم

(A)، با وجود نوفه محیطی، بهتر از دو آرایش دیگر عمل کرده است. آرایش دو قطبی-دوقطبی، در نمایش لایه شیب دار و یا گسل تراستی (B) در محیط فاقد نوفه بهتر از آرایش ونر عمل کرده است. آرایش قطبی-دوقطبی مستقیم حتی با وجود ۹ درصد نوفه محیطی، مرز بین دو لایه را به صورت نوک تیز (ناگهانی) نشان می دهد. این در حالی است که آرایه دو قطبی-دوقطبی مرز را کمتر به صورت نوک تیز و بلکه تدریجی نشان می دهد. در آرایش ونر آلفا نیز این مرز کاملاً تدریجی است.

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

در نمایش گسل شیب دار (D)، آرایش های قطبی-دوقطبی و

در بخش نخست پژوهش، ابتدا هشت مدل زمین شناسی (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 اِشلان یا پله ای (H) در نرم افزار Res2dmod ساخته شد؛ سپس داده های خروجی مدل سازی پیشرو حاصل از این نرم افزار با اضافه نمودن ۹ درصد نوفه تصادفی، به عنوان ورودی به نرم افزار 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 ونر آلفا، دو قطبی-دوقطبی محوری و قطبی-دوقطبی مستقیم محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. در مجموع پس از بررسی شکل ۳، نتایج زیر بدست می آید:

آرایش قطبی-دوقطبی مستقیم، در تشخیص عمق دقیق لایه افقی

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 آنها 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 ساخته شده (شکل ۴) عبارتند از: مدل لایه ای افقی (A)، لایه های ناهموار (B)، گسل پله ای (C) و در نهایت مدل تلفیقی ناپیوستگی- های موجود در منطقه (D)، که ذیلاً به ذکر توضیحاتی در مورد هر کدام از این مدل ها پرداخته می شود. پارامترهای متغیر در شکل ۴ شامل گذردهی الکتریکی نسبی و رسانندگی الکتریکی است؛ که به ترتیب با حروف E و Q در داخل مدل نشان داده شده است و به

دوقطبی-دوقطبی، بهتر عمل کرده اند. آرایش ونر 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 ونر برتر از سایر آرایش ها بوده، توانایی در نمایش گوهی مقاوم (G) است. آرایش ونر، 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 الکترونی 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.

آرایش ونر 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

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.

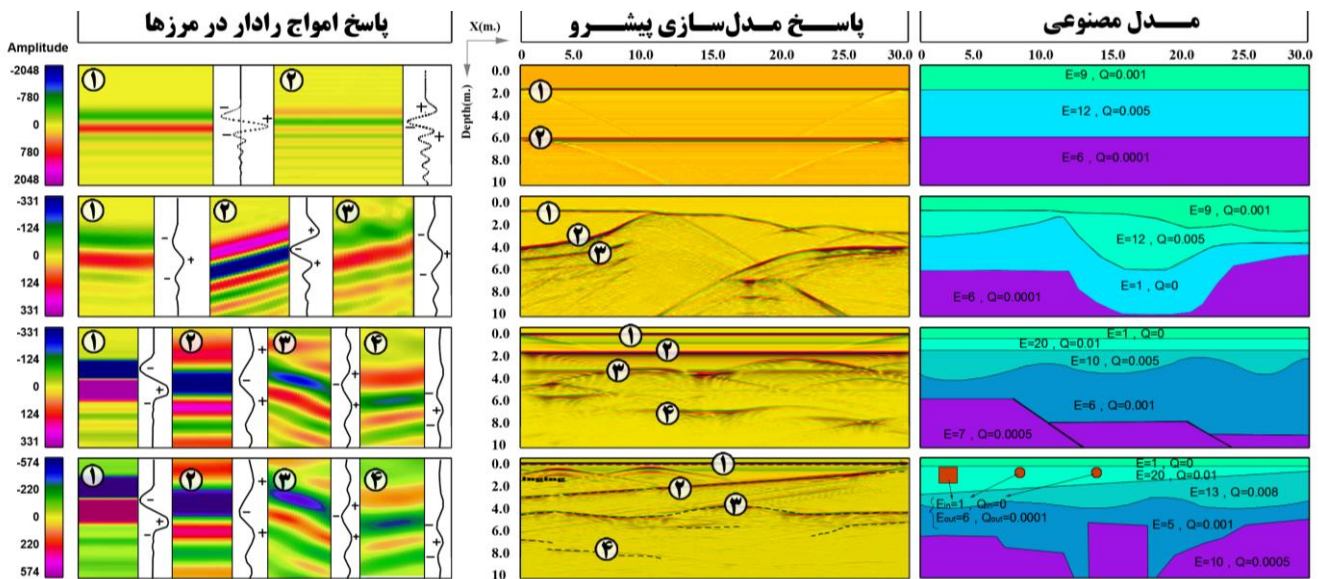
جدول ۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد (Sensors and software, 1999).

اتلاف (db/M)	سرعت (M/nS)	رسانندگی (mS/m)	گذردهی نسبی ( $\epsilon_r$ )	
۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۳-۵	ماسه خشک
۰/۰۳-۰/۰۳	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
$2 \times 10^{-2}$	۰/۰۳۳	۰/۰۱	۸۰	آب مقطر
۰/۱	۰/۰۳۳	۰/۵	۸۰	آب شیرین
$10^2$	۰/۰۱	$3 \times 10^2$	۸۰	آب دریا

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 گذردهی 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 گذردهی دو طرف مرز بازتابی را مورد بررسی قرار داد. اگر موجک از محیط با گذردهی الکتریکی کمتر وارد محیط با گذردهی الکتریکی بیشتر شود، به ترتیب دارای قسمت‌های منفی-مثبت-منفی است و بالعکس، اگر موجک از محیط با گذردهی الکتریکی بیشتر وارد محیط با گذردهی 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 بازتاب یافته به‌ترتیب عبارتند از: مثبت-منفی-مثبت، پس گذردهی لایه‌ی دوم بیشتر از لایه‌ی سوم است (گذردهی الکتریکی لایه دوم برابر ۲۰ و لایه سوم برابر ۱۳ است). همچنین قسمت‌های مختلف



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 مدل سازی پیشرو در نرم‌افزار ReflexW و همچنین پاسخ موجک‌ها در مرزهای بازتابی. مقادیر گذردهی الکتریکی نسبی و رسانندگی الکتریکی مدل به ترتیب با حروف E و Q در داخل مدل نشان داده شده است.

پاسخ GPR مرز سوم که در آن مرز بین خاک لومی مرطوب و خشک به‌صورت برآمدگی و فرورفتگی در نظر گرفته شده است، در قسمت‌های ناگهانی حالت پایبونی نشان داده و شکل این فرورفتگی‌ها خیلی کوچک‌تر از حالت واقعی دیده می‌شود. همچنین

برای تقویت پاسخ موجک‌های بازتاب یافته از مرزهای عمیق‌تر می‌توان از بهره‌هایی مانند AGC، بهره‌ی انتخابی و سایر بهره‌ها استفاده کرد. در این پژوهش برای تقویت پاسخ‌های عمیق داده‌های واقعی از فیلتر بهره‌ی انتخابی استفاده شده است.

بادپا و همکاران، بررسی فعالیت های کواترنری شاخه های گسل خزر به وسیله روش های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین و مقاومت ویژه الکتریکی، صفحات ۱۴۳-۱۵۸.

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.

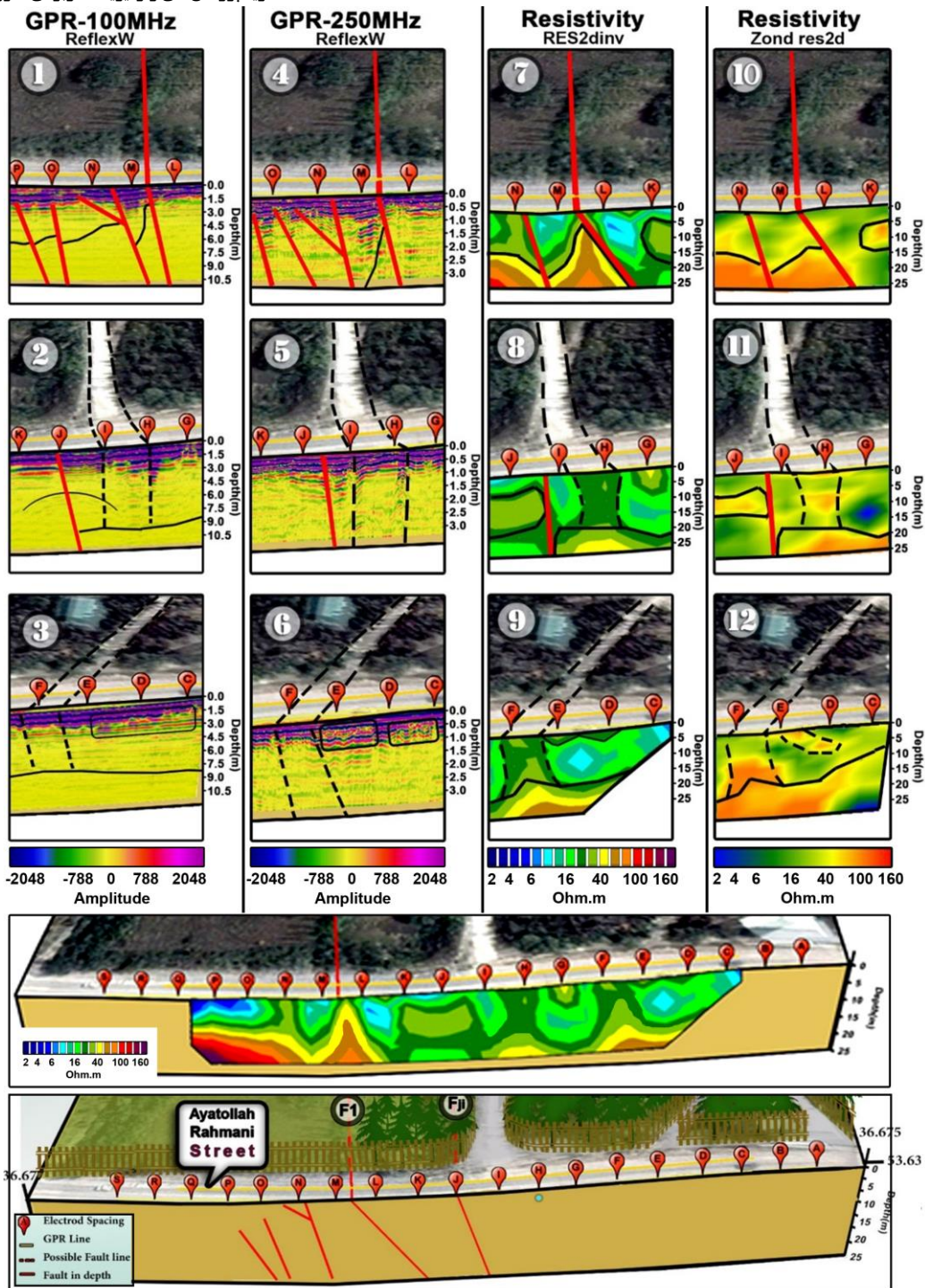
داده های GPR در نرم افزارهای ReflexW، Radexplorer و Matlab و داده های مقاومت ویژه الکتریکی در نرم افزارهای Res2dinv و Zondres2d پردازش شد و پس از ترکیب با تصاویر و مدل توپوگرافی منطقه، در شکل ۵ در مقاطع ۱ تا ۱۲ به نمایش درآمد.

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.

#### 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 طول ۱۵۰ متر با دستگاه Mala سوئد انجام شد. همچنین برداشت داده های مقاومت ویژه با آزیموت ۱۷۵ درجه تقریباً عمود بر امتداد گسل، طراحی شد. در نهایت برداشت داده های مقاومت ویژه





شکل ۵- مدل تلفیقی از نتایج داده‌های GPR و مقاومت ویژه 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

مقاومت ویژه 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 مقاومت ویژه الکتریکی پس از پردازش در نرم‌افزار Res2dinv و مقاطع ۱۰ تا ۱۲ برداشت شده

تبدیل فوریه دوبعدی با انتقال داده‌ها از حوزه‌ی مکان- زمان به حوزه عدد موج- فرکانس برای حذف مناطق حاوی نوفه و همچنین نشانگرهای لحظه‌ای برای تعیین جزئیات بیشتر، اعمال شد. برای انجام مدل‌سازی وارون مقاومت‌ویژه الکتریکی از نرم‌افزار Res2Dinv و روش حداقل مربعات (شکل ۵ مقاطع ۷ تا ۹) و نرم‌افزار ZondRes2d روش‌هایی شامل روش‌های 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 ماهواره‌ای و مدل ارتفاعی از منطقه خلیل شهر، شکل ۵ حاصل شده است. با توجه به این شکل، شاخه‌های گسل خزر در طول پروفیل مشخص شده است. شاخه‌های مذکور نشان دهنده‌ی 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، بی‌هنجاری‌های شاخصی در طول مقطع دیده می‌شود؛ که هرکدام می‌تواند نمایانگر پدیده‌ی مربوط به خود باشد که از آن جمله می‌توان 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 می‌خورد، با توجه به این‌که پروفیل‌ها در مسیر جاده آسفالت‌ه برداشت شدند و معمولاً برای ساخت جاده آسفالت‌ه نیاز به رعایت الزامات مهندسی خاک همچون تحکیم و تراکم و ... می‌باشد. لذا ممکن است پاسخ‌های قوی مذکور مربوط به خاک‌های تراکم یافته باشد. تفکیک این لایه نسبت به لایه‌های پایینی در مقطع دامنه لحظه‌ای مشهودتر است.

همچنین مقاومت‌ویژه الکتریکی (در طول پروفیل‌های ۷ تا ۱۲ شکل ۵) از سطح تا عمق تقریبی ۱۰ متر دارای مقادیر پایین (۰ تا ۲۰ اهم‌متر) بوده و پس از این عمق مقاومت‌ویژه افزایش می‌یابد. حدود تغییرات در این محدوده بین ۲۰ تا ۱۳۰ اهم‌متر است.

۲- در فاصله بین F و E و همچنین I و H، به سبب فشردگی خاک و همچنین بتن‌ریزی برای ساخت جاده فرعی در محل تلاقی با جاده اصلی، کاهش رسانندگی الکتریکی سبب شده تا بازتاب‌های 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 می‌یابد. در پروفیل ۱۰۰ sh این اختلاف به طور واضح تری به چشم می‌خورد و از عمق ۱٫۵ تا کمتر از ۷٫۵ متر ادامه می‌یابد. (البته در این فواصل افزایش و کاهش‌های دامنه امواج دیده می‌شود؛ که ممکن است به دلیل فشردگی و یا عدم فشردگی خاک و یا تغییر اندازه ذرات خاک

تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌های مورد بررسی، تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک یا جابجایی صفر زمانی، بهره‌ی 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 پردازش‌ها 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 پروفیل‌های برداشت شده، به دلیل حذف فرکانس‌های بالا در محیط‌های 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)، می‌توان 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 پردازش‌ها همانند بهره‌ها، می‌توان تضعیف دامنه نسبت به عمق را جبران نمود و حوادث بازتابی عمیق تر را با وضوح بیشتری نشان داد.

معمولاً اولین پردازش بر روی داده‌های GPR، حذف مؤلفه‌های فرکانسی خیلی پایین از روی داده‌ها است. مرحله پردازش Dewow برای حذف این امواج فرکانس پایین ناخواسته است. در حالی که سیگنال‌های با فرکانس بالا حفظ می‌شوند. حذف کردن wow، تصحیح اشباع سیگنال نیز نامیده می‌شود (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 پروفیل‌های بازتابی GPR، مجموعه نرم‌افزارهای GPR معمولاً این به خط شدگی را به صورت خودکار با جابجایی هر رد به صورت جداگانه، انجام می‌دهند. برای این منظور یک مقدار زمینه برای تشخیص اولین رویداد در این نرم‌افزارها بکار می‌رود؛ که به واسطه آن اولین رویداد (موج مستقیم هوا) را تشخیص دهند (اسحاقی، ۱۳۸۹). از این‌رو در ادامه از تصحیح جابجایی صفر زمانی برای قرارگیری بازتاب‌ها در مکان واقعی‌شان استفاده شده است.

در ادامه تصحیحاتی از قبیل استفاده از بهره‌ها (بهره‌ی انتخابی) به منظور جبران تضعیف امواج الکترومغناطیس، تصحیح توپوگرافی به منظور قرارگیری بازتاب‌ها 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.

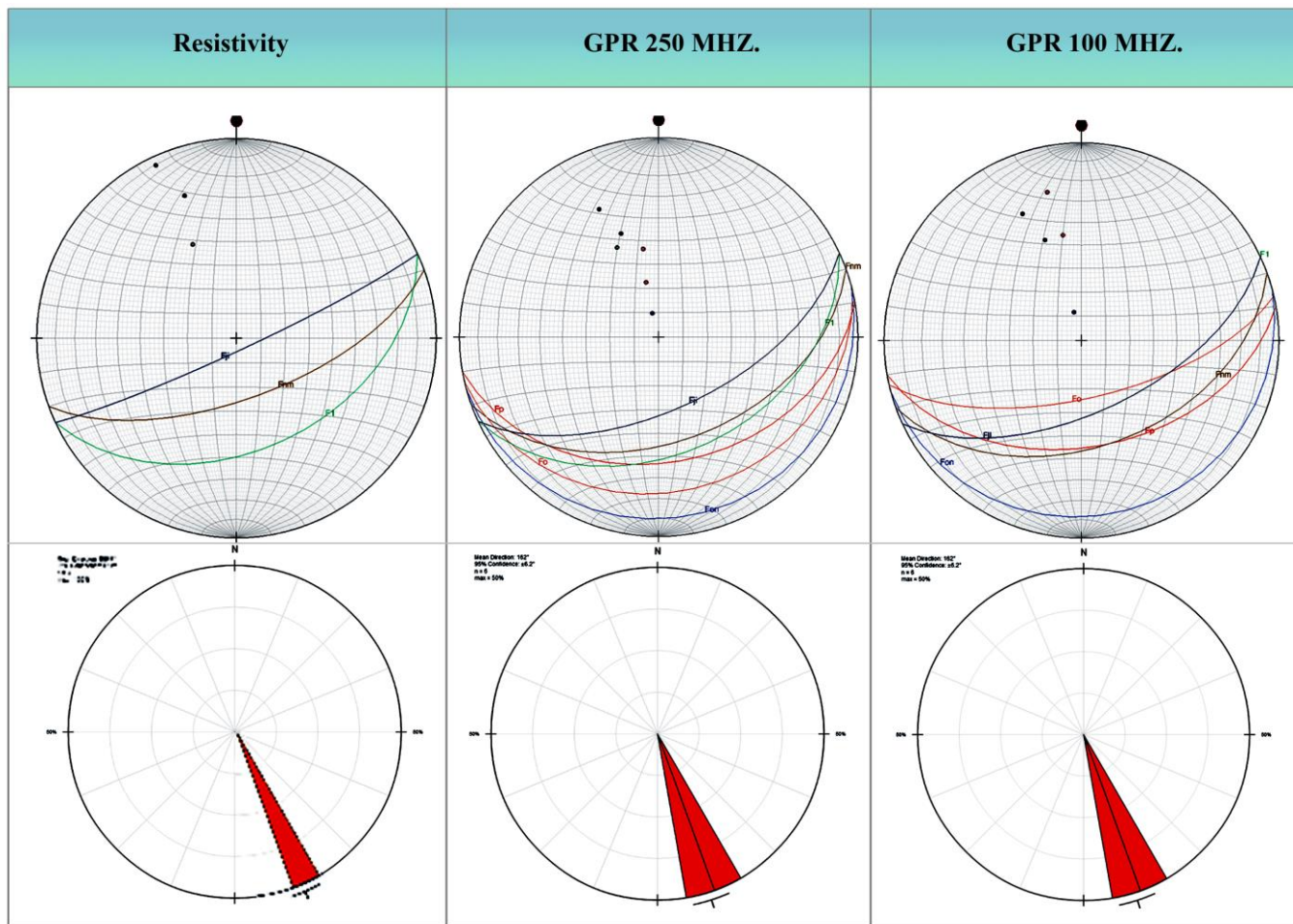
۵- همچنین در فاصله بین M و N، محل N، O و P نیز شاخه های دیگری از گسل دیده می شود که می توان از وجود تغییرات ناگهانی دامنه ی رد به وجود هر کدام پی برد.

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 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 پاسخها 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 عمده 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 تکتونیک جوان گسل خزر به سبب

ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۷، شماره ۲، ۱۴۰۰.

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

فردوسی، ح.، پیروز، ا.، (۱۳۸۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "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".

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 ساختگاه 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 قرونو 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 قرونو 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.



## Investigation of activity of Quaternary Khazar fault branches in Khalilshahr area using GPR and electrical resistivity methods

Miad Badpa\*<sup>1</sup>, Abolghasem, Abolghasem Kamkar-Rouhani<sup>2</sup>, Alireza Arab- Amiri<sup>2</sup>, and Mehdi Mohammadi Vijhe<sup>3</sup>

1- M.Sc. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

4- Ph.D candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 12 September 2018; Accepted: 9 December 2018

Corresponding author: miadbadpa@gmail.com

### Keywords

Geometric parameters  
Khazar fault  
RES2DINV  
GPR  
resistivity  
inverse modeling  
Khalilshahr

### Extended Abstract

Basic approach for investigation of Khazar fault, due to covered areas by quaternary deposits and absence of the fault outcrop in some of areas in the region, is to use the subsurface exploration methods, and especially, high resolution geophysical methods. In this study, we calculated the subsurface geometric parameters of Khazar fault, geological model, and especially, the Khazar fault borders in Khalilshahr region by comparison of GPR and resistivity profiles, and combining the results with geological results, and then, we made forward and inverse modeling of the resistivity and GPR data.

### Introduction

Iran is currently deforming as a result of the northward collision of Arabia with Eurasia. Despite a relatively good understanding of how the broad-scale deformation is currently accommodated throughout this wide (>1000 km) region the detailed tectonics of many earthquake-prone regions throughout the country still remain poorly understood. The Khazar fault is the boundary between the Caspian plain and Alborz Mountain. As a major tectonic feature, this fault may be considered as the northern mountain front fault of the Alborz Range. Subsidence of the Caspian Sea in north, uplift of the Alborz Mountain, and its over thrusting on southern part of South Caspian basin has occurred along the Caspian fault. In this paper, a segment of the fault, which is located between longitudes 53.60 and 53.68 and latitudes 36.65 and 36.70- in the southern part of geological map of Behshahr is investigated. This segment of the fault does not outcrop on the ground surface. This paper introduces the general structural and morphotectonic characteristics of this zone and morphotectonic effects in this zone.

### Methodology and Approaches

In this study, we managed to detect the fault boundaries below the ground surface using the electrical resistivity and GPR methods. Then, forward and inverse modeling of the resistivity and GPR data was made. For this purpose, we initially designed the resistivity and GPR survey lines perpendicular to the imaginary fault strike, and then, the obtained resistivity data were modeled and inverted using the nonlinear least squares optimization method with the help of RES2DINV software. The obtained GPR data were also modeled using ReflexW software. Furthermore, synthetic resistivity model of the Khazar fault was built in Res2dmod software using forward modeling method. The synthetic GPR model of the fault was also built using ReflexW software.

There is generally a large range of models that can give rise to the same calculated apparent resistivity values. The RES2DINV software uses a range of user-selectable starting models, and then, iteratively refines the model until a user-selected value for convergence is achieved that is defined as a small change between successive models. A percent error between the observed apparent resistivity and calculated apparent resistivity is then reported. Root mean square (RMS) error gives a measure of the difference between iterations. It is essential to our interpretation of the data to find the model for which the difference between the calculated and measured values is minimized. The purpose of RES2DINV software is to determine the resistivity of the discrete regions within the model that will best reproduce the measured apparent resistivity values. To do this, RES2DINV program implements a smoothness-constrained least-squares inversion method<sup>1</sup>. The least-squares method is useful as a measure of misfit since it leads to simple analytical forms for

## ARTICLE IN PRESS

the equations in the minimization problem. It will tend to give the right answer if the misfit is caused by stochastic Gaussian noise in the observed data.

### **Results and Conclusions**

The geological model, and especially, the Khazar fault borders in Khalilshahr region have been determined from comparison of GPR and resistivity profiles, and combining the results with geological information, and also, interpretation of the resistivity cross-sections obtained from the inversion process.

---