

دانشگاه صنعتی شهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

# به کارگیری روش‌های مغناطیس هوابرد، مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین در بررسی گسل‌ها و ناپیوستگی‌های خلیل شهر

میعاد بادپا

اساتید راهنما:

ابوالقاسم کامکار روحانی

علیرضا عرب امیری

مشاور:

مهدى محمدی ویژه

۱۳۹۴ اسفند



### فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای میعاد بادپا به شماره دانشجویی ۹۰۲۹۷۴ رشته زمین‌فیزیک گرایش ژئوکتریک تحت عنوان به کارگیری روش‌های مغناطیسی هوابرد، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین در بررسی گسل‌ها و ناپیوستگی‌های خلیل شهر که در تاریخ ۱۳۹۴/۱۲/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شهرورد برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

مردود

دفاع مجدد

امتیاز ۱۹,۵

قبول (با درجه: عالی)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

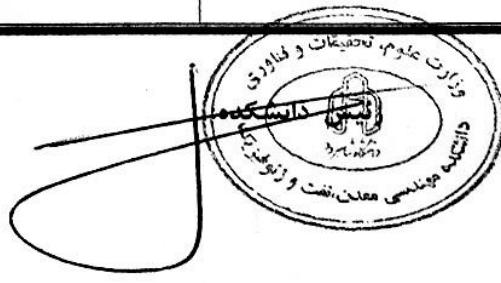
۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۷)

۳- خوب (۱۷ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۳- استاد مشاور	مهدي محمدی ویژه	دانشجوی دکتری	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	سوسن ابراهیمی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	امین روشنل کاهو	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	ایرج پیروز	استادیار	



# اين كمترین امر تعد یغم به:

اروح طيه و قدسي شد اي جامده قرآنی حادثه منا:



**شہید حسن دانش، شہید محسن حاجی حسین کارکر**

**شہید امین باوی، شہید فؤاد مشعل، شہید سعید سعیدی زاده**

و تقدیم ب شہید ان عزیزو برادران اعیانی ام:

**شہید مجید قادری فر، شہید بخت اللہ حیدری، شہید حسین علی بن پی**

**شہید ناصر صادقی، شہید سید حسین حسینی نیا**

**شہید سید منصور حمدوی نیاکی، شہید سید حسن فاطمی**

و سایر شهداء که جانشان را در طبق اخلاص کذاشتند و برای حفظ اسلام ناب محمدی (صلی الله علیہ و آله و سلم) و آرمانهای اتحاب  
اسلامی تپایی جان ایستادند، و شهادتی کنام آن لاله های زهرایی که بی نام و نشان پرواز کردند.

# مشکر و قدردانی

"خدای را سپاس که گویندگان، به عرصه ستایشش نیرسند، و شماره‌گران، از عهده‌ی شمردن نعمت‌ایش بزنیایند، و کوشندگان، حقش را ادا نکنند، خدایی که اندیشه‌های بلند او را درک نمایند، و هوش‌های ژرف به حقیقتش دست نیابند، خدایی که اوصافش در چهارچوب حدود نگنجد، و به ظرف وصف درنیاید، و در مدار وقت محدود، و مدت محدود قرار نگیرد."

اکنون که به یاری خداوند موفق به دفاع از پایان نامه‌ی خویش شدم بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌منت و خالصانه استاد گرانقدر جناب دکتر کامکار روحانی و دکتر عرب امیری که راهنمایی اینجانب را بر عهده داشته‌اند و استاد مشاورم جناب مهندس محمدی ویژه، کمال تشکر را بنایم. از گروه اکتشاف و ژئوفیزیک سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ خصوصاً جناب مهندس شاهین و جناب مهندس عامری جهت فراهم‌سازی اطلاعات برداشت در منطقه خلیل‌شهر، بسیار سپاس‌گزارم. همچنین از پدر و مادر و تمامی استادی و دوستانی که با الطاف صمیمانه خود طی این مسیر را بر من هموار کردند تشکر می‌نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب میعاد باد پا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک دانشکده معدن، نفت، ژئوفیزیک

دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه به کارگیری روش های مغناطیسی هوابرد، مقاومت ویژه‌ی

الکتریکی و رادار نفوذی به زمین در بررسی گسله‌ها و ناپیوستگی‌های خلیل شهر تحت راهنمایی

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عرب‌امیری متعهد می‌شون.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا باقته‌های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.
- تاریخ

### امضای دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد.
- این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

# مقالات مسح از بیان نامه:

- ۱- M. Badpa, A. Kamkar Rohani, A.R. Arab Amiri, M. Mohammadi Vijeh, "Application of resistivity data Inversion and Forward modeling in survey of hidden fault (case study: Khazar fault)", The Second International Applied Geological Congress, Mashhad, Iran, May 2015.
- ۲- م. بادپا، ا. کامکار روحانی، ع.ر. عرب امیری، م. محمدی ویژه، "تحلیل سازوکار گسلهای شرق مازندران با استفاده از پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد"، دومین کنفرانس زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استان البرز، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران، مهر ۱۳۹۴.
- ۳- م. بادپا، ا. کامکار روحانی، ع.ر. عرب امیری، م. محمدی ویژه، "بکارگیری روش‌های مدل‌سازی پیشرو و معکوس مقاومت ویژه در مطالعه‌ی شاخه‌های پنهان گسل خزر (منطقه‌ی خلیل شهر)"، دومین کنفرانس زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استان البرز، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران، مهر ۱۳۹۴.
- ۴- م. بادپا، ا. کامکار روحانی، ع.ر. عرب امیری، م. محمدی ویژه، "بررسی شاخه‌های پنهان گسل خزر به روش مقاومت ویژه الکتریکی و بررسی پاسخ مدل‌های مستقیم گسل (مطالعه موردي: خلیل شهر)"، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، اسفند ۱۳۹۴.
- ۵- م. بادپا، ا. کامکار روحانی، ع.ر. عرب امیری، م. محمدی ویژه، "محاسبه‌ی پارامترهای هندسی تحت الارضی شاخه‌های گسل خزر با تلفیق نتایج داده‌های رadar نفوذی به زمین و مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی منطقه‌ی خلیل شهر"، نشریه ISI علوم زمین، ارسال شده.

# چکیده

فعالیت‌های تکتونیکی شدید البرز سبب شده بسیاری از مناطق جمعیتی شهری و روستایی استان مازندران بر روی گسله و یا در حاشیه گسله‌ها قرار گیرد. باوجود دو گسله‌ی اصلی و فعال البرز و خزر و چندین گسله‌ی فرعی فعال، آگاهی از مناطق خردشده و گسل خورده در حوالی ساختگاه‌ها و سازه‌های مهندسی حائز اهمیت است. در این میان گسل خزر، به‌سبب فعالیت‌های جوان کواترنری، از جمله پرخطرترین گسل‌های منطقه شناخته می‌شود. باوجود توسعه شهرهای استان مازندران بر روی شاخه‌های این گسل، شناخت کامل از سازوکار و آشکارسازی امتدادهای گسل مذبور در مناطق حساس شهرهای استان حائز اهمیت است.

در این پایان‌نامه برای بررسی ناحیه‌ای، ابتدا داده‌های مغناطیسی هوابرد شرق استان مازندران مورد پردازش اولیه قرار گرفته و نتیجتاً سازندهای مختلف از یکدیگر تمیز و تفکیک داده شده است و سپس با إعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو بر روی داده‌های مذکور حدود سازندها به ازای سطوح ارتفاعی مختلف تعیین شدند. با محاسبه‌ی خط مرزی گسل به‌ازای سطوح ارتفاعی مختلف، شب گسله‌های موجود در منطقه (از جمله گسله‌های خزر، شمال البرز، آستانه، بادله، لِله بند و ...) از روی داده‌های مغناطیسی منطقه تعیین و محاسبه شد. نتایج بدست‌آمده به‌خوبی با نتایج موجود روی نقشه‌ها و مطالعات زمین‌شناسی منطقه مطابقت دارد و اهمیت روش مورداستفاده را با توجه به وسعت زیاد منطقه برداشت مغناطیسی هوابرد نشان می‌دهد.

سپس با توجه به اهمیت گسل خزر، تمرکز مطالعات بر روی شاخه‌های آن قرار گرفت. در این مرحله مقیاس موردنبررسی محلی بوده و حرکات جوان تکتونیکی مدنظر بوده است. همچنین به سبب پوشیده بودن منطقه‌ی خلیل شهر از آبرفت‌ها و رسوبات کواترنری و رخنمون نداشتن گسل در سطح، جهت بررسی گسلش، از روش‌های ژئوفیزیکی با تفکیک‌پذیری بالا استفاده شد. بدین صورت که پس از مطالعات اولیه زمین‌شناسی منطقه خلیل شهر و بررسی امتداد گسل‌های موجود در منطقه، پروفیل‌های رadar نفوذی به زمین<sup>۱</sup> و مقاومت‌ویژه در مناسب‌ترین محل طراحی و توسط تیمی از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به سرپرستی مهندس محمدی ویژه برداشت شدند. سپس داده‌های برداشت‌شده GPR و مقاومت ویژه، تصحیح و مورد پردازش قرار گرفتند.

برای ساخت مدل مستقیم، پاسخ مقاومت ویژه آرایه‌های مختلف برای مدل‌های زمین‌شناسی و

<sup>۱</sup> GPR

تکتونیکی رایج که احتمال وجود آن‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌رفت با استفاده از مدل‌سازی پیشرو در نرم‌افزار Res2dmod محاسبه شد و سپس داده‌های خروجی مدل‌سازی پیشرو حاصل از این نرم-افزار به عنوان ورودی به نرم‌افزار Res2dinv داده شد و نتایج حاصل از وارون‌سازی به نمایش درآمد. مدل‌سازی مستقیم GPR نیز در ادامه در نرم‌افزار ReflexW پیگیری و اجرا شد. در ادامه، داده‌های حاصل از برداشت مقاومت ویژه، در نرم‌افزار Res2dinv به شیوه وارون‌سازی از روش حداقل مربعات غیرخطی و همچنین در نرم‌افزار ZondRes2d با روش‌های مختلف مدل‌سازی شدند. پس از تلفیق نتایج حاصل از دو مدل‌سازی و اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، پارامترهای شیب و امتداد شاخه‌های گسل خزر در نرم‌افزار Streonet به نمایش درآمد.

همچنین پس از بازبینی و ویرایش اولیه داده‌های GPR، به منظور پردازش نخست تصحیح اشباع سیگنال برای حذف مؤلفه‌های فرکانسی خیلی پایین بر روی داده‌ها صورت پذیرفت. در مراحل بعد، پردازش و تصحیحاتی از قبیل استفاده از بهره‌ها (بهره‌ی انتخابی<sup>2</sup>) به منظور جبران تضعیف امواج الکترومغناطیس، تصحیح استاتیک و تصحیح توپوگرافی به منظور قرارگیری بازتاب‌ها در مکان واقعی خود و همچنین نشانگرهای لحظه‌ای برای تعیین برخی جزئیات دیگر، اعمال شد. درنهایت پس از پردازش نهایی، مقاطع رسم شده مورد تفسیر قرار گرفته و محل قرارگیری شاخه‌های گسلی مشخص شد. نتایج مدل‌سازی و تفسیر دو روش GPR و مقاومت‌ویژه با یکدیگر مقایسه شده و سپس با تلفیق داده‌های این دو روش، تفسیر روش‌تری از ساختارهای زیرسطحی به خصوص گسلش و ناپیوستگی در منطقه مورد مطالعه به دست آمد. نتایج نشان‌دهنده‌ی وجود انطباق چشمگیر روش‌های مذکور می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** اکتشاف گسل‌های پنهان، سازوکار گسل، گسل خزر، خلیل شهر، مغناطیس هوابرد، مقاومت ویژه الکتریکی، رadar نفوذی به زمین (GPR)،

---

<sup>2</sup> Manual Gain (Y)

# فهرست

## فصل اول: کلیات

۱	..... ۱-۱- مقدمه
۲	..... ۲-۱- تکتونیک عمومی منطقه مورد مطالعه
۳	..... ۳-۱- مروری بر مطالعات انجام شده
۵	..... ۴-۱- اهداف و ضرورت انجام پایان نامه
۷	..... ۵-۱- ساختار پایان نامه
۸	

## فصل دوم: مبانی و معایم پردازشی

۹	..... ۱-۲- روش مغناطیسی هوابرد
۱۰	..... ۱-۱-۱- پردازش داده های مغناطیسی
۱۰	..... ۱-۱-۱-۱- تصحیح IGRF
۱۰	..... ۱-۱-۱-۲- روش برگردان به فقط
۱۱	..... ۱-۱-۱-۳- ادامه فراسو و فروسو
۱۱	..... ۱-۱-۱-۴- فیلتر های لبه یابی
۱۲	..... ۲-۱-۱- تفسیر داده های مغناطیسی
۱۳	..... ۲-۱-۲- روش مقاومت ویژه الکتریکی
۱۴	..... ۲-۲-۱- تقسیم بندی مواد مختلف از نظر مقاومت ویژه
۱۵	..... ۲-۲-۲- روش های اندازه گیری مقاومت ویژه
۱۶	..... ۲-۲-۳- انتخاب آرایش الکترودی مناسب
۱۷	..... ۲-۲-۴- مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه الکتریکی
۱۸	..... ۲-۳-۱-۱- مدل سازی فیزیکی
۱۸	..... ۲-۳-۲- مدل سازی عددی
۱۸	..... ۲-۴-۱- مدل سازی وارون
۱۹	..... ۲-۴-۲-۱- مدل سازی وارون

۲۰	.....	۳-۲- روش GPR
۲۱	.....	۱-۳-۲- امواج GPR در زمین
۲۲	.....	۲-۳-۲- بازتاب و عبور
۲۳	.....	۳-۳-۲- شیوه‌های برداشت داده
۲۴	.....	۴-۳-۲- پردازش داده‌های GPR

## فصل سوم: پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هولبرد

۲۷	.....	۱-۳- مقدمه
۲۸	.....	۲-۳- دید کلی فصل
۲۹	.....	۳-۳- بررسی زمین‌شناسی عمومی منطقه
۳۰	.....	۴-۳- استخراج اطلاعات از نقشه هم‌تراز مغناطیس
۳۲	.....	۴-۴-۱- رقومی کردن نقشه مغناطیس هولبرد
۳۳	.....	۴-۴-۲- ساخت ماتریس مریع بندی شده با اعمال کد شبکه‌بندی (کد a)
۳۷	.....	۴-۴-۳- حذف نقاط صفر با اعمال کد درون‌یابی (کد b)
۴۰	.....	۴-۴-۴- بررسی کیفیت داده‌ها پس از اعمال مجموعه کدهای مریع بندی
۴۲	.....	۵-۳- پردازش و بررسی شدت میدان مغناطیس منطقه
۴۴	.....	۵-۴-۱- فیلتر میانگین‌گیری پی‌درپی (کد c)
۴۶	.....	۵-۴-۲- فیلتر ادامه‌ی فراسو
۴۹	.....	۵-۵-۱- اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو پس از تصحیح IGRF
۵۵	.....	۵-۵-۲- بررسی ارتباط میان مقادیر شدت میدان مغناطیسی و توپوگرافی منطقه
۵۹	.....	۵-۵-۳- فیلترهای لبه‌یابی
۶۱	.....	۶-۳- نتیجه‌گیری فصل

## فصل چارم: مدل‌سازی پیشرو، پردازش و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه

۶۳	.....	۱-۴- مقدمه
۶۴	.....	۲-۴- زمین‌شناسی عمومی منطقه خلیل شهر
۶۵	.....	۳-۴- مدل‌سازی پیشرو مقاومت ویژه الکتریکی

۶۷	..... ۱-۳-۴ مدل لایه افقی
۶۸	..... ۲-۳-۴ لایه شیبدار (و یا گسل تراستی)
۶۹	..... ۳-۳-۴ دایک رسانای شیبدار (و یا زون خرد شده و شکسته)
۷۰	..... ۴-۳-۴ گسل نرمال قائم
۷۱	..... ۴-۳-۴ گسل شیبدغز (فسارشی یا معکوس)
۷۱	..... ۶-۳-۴ گسل پله‌ای (إن إشلان)
۷۲	..... ۷-۳-۴ گوه مقاوم
۷۳	..... ۸-۳-۴ هورست و گرابن
۷۳	..... ۴-۴ بررسی مدل‌های مستقیم
۷۵	..... ۴-۴ برداشت و مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده منطقه
۷۶	..... ۴-۶ پردازش داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی
۷۹	..... ۴-۷ تفسیر مدل حاصله و ترسیم مدل زمین‌شناسی
۸۴	..... ۴-۸ جمع‌بندی و نتیجه گیری فصل

## فصل پنجم: مل سازی پیشرو، پروازش و تفسیر داده‌های GPR

۸۷	..... ۱-۵ دید کلی فصل
۸۸	..... ۲-۵ مدل‌سازی مستقیم GPR
۸۹	..... ۱-۲-۵ مدل لایه‌ی افقی
۹۲	..... ۲-۲-۵ لایه‌های ناهموار
۹۵	..... ۳-۲-۵ گسل پله‌ای (إن إشلان)
۱۰۱	..... ۴-۲-۵ مدل تلفیقی ناپیوستگی‌های منطقه
۱۰۵	..... ۳-۵ برداشت داده‌های رادار نفوذی در منطقه خلیل شهر
۱۰۶	..... ۱-۳-۵ ماهیّت داده‌های برداشت شده رادار نفوذی و تبدیلات مقدماتی
۱۱۰	..... ۲-۳-۵ پردازش داده‌های GPR
۱۱۰	الف- تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌های مورد بررسی
۱۱۴	ب- تصحیح اشباع سیگنال
۱۱۸	ج- تصحیح استانیک یا جابه‌جایی صفر زمانی

۱۱۹	.....	د- بهره‌ها
۱۲۰	.....	ه- حذف زمینه
۱۲۱	.....	و- فیلتر سرعت
۱۲۲	.....	ز- نشانگرهای لحظه‌ای
۱۲۳	.....	ح- تصحیح توپوگرافی
۱۳۰	.....	۳-۳-۵- تفسیر مقاطع GPR

## **فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

۱۴۰	.....	۱-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۴۳	.....	۲-۶- پیشنهادات

### **پوست‌الف: تغییر مشبکه‌ی مغناطیسی در نرم افزار ژئوسافت**

### **پوست‌ب: بررسی ارتباط توپوگرافی باشدت میدان مغناطیسی کل منطقه**

### **پوست‌ج: اعمال تصحیح IGRF و فیلترادامه‌ی فراصوبه روی مجموعه داده‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه**

### **پوست‌د: کیفیت مقلع GPR**

### **منابع**

# فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۳: دید عمومی از مطالعات مغناطیس هوایی منطقه شرق مازندران ..... ۲۹
شکل ۲-۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ..... ۳۱
شکل ۳-۳: مختصات نقاط رقومی شده نمایش داده شده در نرم‌افزار MATLAB ..... ۳۳
شکل ۴-۳: شبکه‌بندی مغناطیس پس از نمایش اطلاعات رقومی در نرم‌افزار oasis montaj ..... ۳۴
شکل ۵-۳: مختصات نقاط رقومی شده در محور مختصات جغرافیایی پس از اعمال کد شبکه‌بندی ..... ۳۷
شکل ۶-۳: بخشی از ماتریس مقادیر مغناطیس شرق مازندران حاصل از اعمال کدهای شبکه‌بندی ..... ۳۹
شکل ۷-۳: شبکه‌بندی مغناطیس شرق مازندران حاصل از اعمال مجموعه کدهای شبکه‌بندی و درونیابی ..... ۴۱
شکل ۸-۳: نمایش دو پروفیل از شدت میدان مغناطیسی منطقه به همراه اطلاعات تکتونیکی ..... ۴۳
شکل ۹-۳: نقشه مغناطیس شرق مازندران حاصل از اعمال کد میانگین‌گیری ..... ۴۵
شکل ۱۰-۳: نقشه نهایی مغناطیس هوایرد پس از تلفیق با اطلاعات نقشه زمین‌شناسی ..... ۴۸
شکل ۱۱-۳: شبکه‌بندی‌های مغناطیسی پس از اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو به ازای سطوح ارتفاعی ..... ۴۹
شکل ۱۲-۳: تانسور حاصل از اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو، به ازای سطوح ارتفاعی ..... ۵۰
شکل ۱۳-۳: تانسور حاصل از اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو، به ازای سطوح ارتفاعی ..... ۵۱
شکل ۱۴-۳: نمایش Pole و Plane گسلهای اصلی و لرزه زای ..... ۵۵
شکل ۱۵-۳: مقایسه رابطه توپوگرافی با مغناطیس منطقه ..... ۵۷
شکل ۱۶-۳: شبکه‌بندی مغناطیسی به همراه فیلترهای مختلف پردازش تصویر ..... ۵۹
شکل ۱۷-۳: نمایش RGB از مرز مغناطیسی گسلهای خزر و آستانه ..... ۶۰
شکل ۱۸-۳: نمایش RGB از مرز مغناطیسی گسل خزر در منطقه‌ی خلیل‌شهر پس از اعمال فیلتر تمبر ..... ۶۱
شکل ۱-۴: دید کلی تحقیق انجام‌شده در زمینه روش مقاومت ویژه ..... ۶۵
شکل ۲-۴: نقشه زمین‌شناسی خلیل‌شهر به همراه موقعیت برداشت داده‌های مقاومت ویژه ..... ۶۶
شکل ۳-۴: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه لایه‌ی افقی ..... ۶۸
شکل ۴-۴: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه گسل تراستی ..... ۶۹
شکل ۴-۵: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه زون خرد شده ..... ۷۰
شکل ۴-۶: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه گسل قائم ..... ۷۰
شکل ۴-۷: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه گسل شبیل لغز ..... ۷۱
شکل ۴-۸: مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه گسل پله‌ای ..... ۷۲

شکل ۹-۴: مقطع حاصل از مدل سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه گوه مقاوم	۷۲
شکل ۱۰-۴: مقطع حاصل از مدل سازی معکوس و ..... و مدل مقاومت ویژه هورست و گرابن	۷۳
شکل ۱۱-۴: شبه مقاطع اندازه گیری شده، محاسبه شده مقاومت ویژه ظاهری	۷۷
شکل ۱۲-۴: مقاطع حاصل از وارون سازی با تکنیک های مختلف نرم افزار Zondres2d	۷۸
شکل ۱۳-۴: شبه مقاطع ..... وارون سازی با تکنیک مارکوارت	۷۹
شکل ۱۴-۴: مدل مقاومت ویژه الکتریکی نهایی (Res2dinv (خروجی نرم افزار	۸۰
شکل ۱۵-۴: مدل مقاومت ویژه الکتریکی نهایی (Zond-res2d (خروجی نرم افزار	۸۰
شکل ۱۶-۴: مقطع مقاومت ویژه و پروفیل عمقی معرف شیب و جهت شیب	۸۳
شکل ۱۷-۴: شیب و امتداد عمومی و قطب شاخه های گسله خزر	۸۴
شکل ۱-۵: فلوچارت تحقیق انجام شده در زمینه GPR	۸۸
شکل ۲-۵: الف. مدل مصنوعی لایه های افقی و ب. پاسخ حاصل از مدل سازی مستقیم	۹۰
شکل ۳-۵: الف. مدل مصنوعی لایه های افقی و ب. پاسخ حاصل از مدل سازی مستقیم	۹۱
شکل ۴-۵: الف. مدل مصنوعی لایه های ناهموار و ب. پاسخ حاصل از مدل سازی	۹۴
شکل ۵-۵: الف. مدل مصنوعی گسل پله ای و ب. پاسخ حاصل از مدل سازی مستقیم	۹۷
شکل ۶-۵: الف. مدل مصنوعی اصلاح شده گسل پله ای	۹۹
شکل ۷-۵: الف. مدل مصنوعی تلفیقی ناپیوستگی های منطقه و ب. پاسخ حاصل از مدل سازی مستقیم	۱۰۲
شکل ۸-۵: موقعیت شاخه های متعدد گسل خزر در منطقه خلیل شهر	۱۰۶
شکل ۹-۵: مقطع پروفیل اندازه گیری شده با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی - نمایش jet-plot	۱۰۷
شکل ۱۰-۵: مقطع پروفیل اندازه گیری شده با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی - نمایش jet-plot	۱۰۷
شکل ۱۱-۵: رده های ستون ۵۰۰ تا ۵۲۰ و نمونه های سطر ۲۹ تا ۸۶ پس از نمایش به فرمت xls	۱۰۸
شکل ۱۲-۵: مقطع Wiggle پروفیل P1b-100sh بر اساس تعداد نمونه و رده های برداشتی	۱۰۹
شکل ۱۳-۵: میانگین طیف فرکانسی پروفیل های رادار به همراه هیستوگرام دامنه	۱۱۲
شکل ۱۴-۵: میانگین طیف دامنه بر حسب زمان پروفیل های رادار	۱۱۳
شکل ۱۵-۵: الف. میانگین طیف دامنه بر حسب زمان پروفیل	۱۱۵
شکل ۱۶-۵: میانگین طیف فرکانسی پروفیل P1-100sh به همراه هیستوگرام دامنه	۱۱۶
شکل ۱۷-۵: مقطع پروفیل P1-100sh الف. بدون اعمال پردازش، ب. پس از اعمال پردازش Dewow	۱۱۷
شکل ۱۸-۵: مقطع پروفیل P1-250sh الف. بدون اعمال پردازش، ب. پس از اعمال پردازش Dewow	۱۱۷
شکل ۱۹-۵: قسمتی از مقطع پروفیل P1-250sh الف. پس از اعمال پردازش	۱۱۹
شکل ۲۰-۵: قسمتی از مقطع پروفیل P1-250sh الف. پس از اعمال بهره هی AGC	۱۲۰

شکل ۱-۵: الف. میانگین طیف فرکانسی پروفیل P1-250sh پس از اعمال پردازش	۱۲۱
شکل ۲-۵: مقطع انتقال یافته پروفیل P1-250sh به حوزه‌ی عدد موج-فرکانس	۱۲۲
شکل ۳-۵: مقطع پروفیل P1-250sh پس از اعمال تصحیحات مذکور و سپس تصحیح توپوگرافی	۱۲۳
شکل ۴-۵: مقطع پروفیل P1-250sh پس از اعمال تصحیحات مذکور و سپس تصحیح توپوگرافی	۱۲۴
شکل ۵-۵: مقطع پروفیل P1-100sh پس از اعمال تصحیحات مذکور و سپس تصحیح توپوگرافی	۱۲۵
شکل ۶-۵: الف. مقطع تصحیح توپوگرافی پس از اعمال کد در نرم‌افزار MATLAB	۱۲۸
شکل ۷-۵: بخش کوچکی از ماتریس ..... بعد از تصحیح توپوگرافی در نرم‌افزار MATLAB	۱۲۹
شکل ۸-۵: مدل تلفیقی از نتایج پروفیل رادار P1-250sh و عکس ماهواره‌ای سه‌بعدی	۱۳۳
شکل ۹-۵: مدل تلفیقی .... نشانگر دامنه لحظه‌ای، فاز لحظه‌ای و مقطع اصلی رادار	۱۳۴
شکل ۱۰-۵: نمایش دامنه ردهای طرفین گسل Fji	۱۳۵
شکل ۱۱-۵: نمایش دامنه ردهای طرفین گسل F1	۱۳۶
شکل ۱۲-۵: نمایش هذلولی نشان‌دهنده‌ی لوله‌ی آب جهت مصارف کشاورزی	۱۳۷
شکل ۱۳-۵: سازوکار شاخه‌های گسله خزر در منطقه خلیل شهر ... آتن ۱۰۰ مگاهرتر پوششی	۱۳۸
شکل ۱۴-۵: سازوکار شاخه‌های گسله خزر در منطقه خلیل شهر ... آتن ۲۵۰ مگاهرتر پوششی	۱۳۸
شکل ۱-۶: مقایسه پروفیل مقاومت ویژه و پروفیل رادار نفوذی در منطقه خلیل شهر	۱۴۲
شکل پ-الف-۱: نمایش سه‌بعدی مغناطیس منطقه موردمطالعه پس از تغییر شبکه‌بندی در زئوسافت	۱۴۴
شکل پ-۱-۲: آ. شبکه‌بندی مغناطیس هوایی شرق مازندران نمایش داده شده در نرم‌افزار اوسمیس مونتاژ	۱۴۵
شکل پ-ب-۱: نقشه توپوگرافی شرق مازندران نمایش داده شده در نرم افزار MATLAB	۱۴۶
شکل پ-ب-۲: نمایش شدت میدان مغناطیسی منطقه موردمطالعه در نرم‌افزار Surfer	۱۴۷
شکل پ-ج-۱: نمایش سه‌بعدی مغناطیس محلی شرق مازندران	۱۴۸
شکل پ-د-۱: بررسی کیفیت پروفیل‌های GPR	۱۴۹

# فهرست جداول

جدول ۱-۲ : مقاومت ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد معدنی متداول ..... ۱۶
جدول ۲-۲ : ارزیابی آرایش‌های متداول با توجه به مهمترین عوامل مؤثر ..... ۱۸
جدول ۳-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد ..... ۲۲
جدول ۳-۱: سازندهای زمین‌شناسی به همراه مقادیر شدت میدان مغناطیسی ..... ۳۰
جدول ۴-۱: سازندهای زمین‌شناسی به همراه بازه‌ی احتمالی مقاومت ویژه منطقه ..... ۶۶
جدول ۴-۲: شبیب و امتداد عمومی شاخه‌های گسله خزر ..... ۸۳
جدول ۵-۱: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل مستقیم لایه‌ی افقی ..... ۸۹
جدول ۵-۲: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل مستقیم لایه‌های افقی ..... ۹۱
جدول ۵-۳: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل مستقیم لایه‌های ناهموار ..... ۹۲
جدول ۵-۴: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل مستقیم گسل پله‌ای ..... ۹۶
جدول ۵-۵: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل مستقیم تلفیقی ناپیوستگی‌های منطقه ..... ۱۰۱
جدول ۵-۶: مشخصات عوارض کروی و مربعی در مدل مستقیم تلفیقی ناپیوستگی‌های منطقه ..... ۱۰۱
جدول ۵-۷: مشخصات پروفیل‌های برداشت داده‌های GPR در منطقه خلیل شهر ..... ۱۰۵
جدول ۵-۸: مشخصات ارتفاع، شبیب خطوط و میزان جابه‌جایی سطرها ..... ۱۲۶
جدول ۵-۹: مثال‌هایی از محاسبه مقادیر نمونه‌ها با در دست داشتن شبیب خط ..... ۱۲۷

# فصل اول: کلیات

## ۱-۱ مقدمه

روش‌های شناسایی گسل را به‌طور کلی می‌توان به دو دسته‌ی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم نمود. روشهای مستقیم، برخی چون بررسی‌های صحرایی زمین‌شناسی و تکتونیک، نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است. برخی دیگر از این روش‌ها همچون سنجش‌از دور، فتوژئولوژی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای، با وجود سرعت و وسعت بالای بررسی مناطق حاوی گسل، در اکتشاف گسل‌های پنهان دچار محدودیت می‌باشند. در واقع اطلاعاتی که از روش‌های فوق به دست می‌آید عمدتاً سطحی است؛ بنابراین رویکرد اساسی در شناسایی گسل‌های پنهان استفاده از روش‌های غیرمستقیم از جمله روشهای ژئوفیزیکی است.

روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی در زمینه‌ی شناسایی گسل‌ها وجود دارد که بسته به نوع تباین فیزیکی موجود در منطقه، هدف از مطالعه، عمق بررسی، هزینه و خیلی پارامترهای دیگر می‌توان از روش‌های خاصی بهره جست. مثلاً اگر هدف شناسایی گسل در عمق‌های بالا باشد، بهتر است ابتدا برای بررسی در مقیاس وسیع از روش مغناطیس هوابرد و سپس در مقیاس کوچک‌تر از روش‌های گرانی‌سنجدی، مگنتوتلوریک و لرزه‌ای استفاده کرد. اما اگر هدف بررسی زون‌های خردشده سطحی باشد، روش‌های بررسی متفاوت از مثال قبل خواهد بود. در این مورد بسته به نوع تباین فیزیکی می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی همچون رادار نفوذی به زمین (GPR)، مقاومت‌ویژه الکتریکی و مغناطیس‌سنجدی بهره جست.

مطالعه‌ی گسل‌های منطقه‌ی خلیل شهر در دو مقیاس وسیع و کوچک صورت گرفته است. در بررسی‌های با مقیاس وسیع، از روش مغناطیس هوابرد و در بررسی‌های با مقیاس کوچک‌تر، از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و GPR استفاده شده است.

## ۲-۱ تکتونیک عمومی منطقه مورد مطالعه

شکستگی‌های پوسته جامد زمین که در راستای آن‌ها جابجایی نسبی روی می‌دهد، گسل<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. 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 تنش<sup>۲</sup>‌های ناشی از جنبش قاره‌ها نسبت به یکدیگر روی می‌دهد. بسیاری از گسل‌های شناخته شده، در سالیان دور (صدها و یا میلیون‌ها سال پیش) حرکت نموده و ممکن است امروزه جنبا<sup>۳</sup> نباشند [بربریان، م، ۱۳۷۱]. گسل‌هایی که دارای یک یا چند ویژگی زیر باشند، گسل‌های جنبا یا گسل‌های با توانایی جنبش بر روی زمین<sup>۴</sup> به حساب می‌آیند:

- 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 ۵۰۰ هزار سال گذشته [USAEC, 1973].
- ۳- گسلش در رسوبات کواترنر پسین: یک حرکت در ۳۵ هزار سال و یا دو حرکت یا بیشتر در ۵۰۰ هزار سال گذشته.
- ۴- دیواره‌ی گسل<sup>۵</sup>‌های جنبا در روی زمین که به وسیله فرسایش از میان نرفته باشند.
- ۵- رویداد که لرزه‌ای<sup>۶</sup> زیاد در ارتباط با صفحه‌ی گسل که به وسیله 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 جنبا: که در اثر جنبش گسل جنبا، جنبشی در گسل دیگر مجاور روی دهد.

<sup>1</sup> Fault

<sup>2</sup> Stress

<sup>3</sup> Active

<sup>4</sup> Capable Fault

<sup>5</sup> fault scarp

<sup>6</sup> micro earthquake

انتظار می‌رود چنین گسل‌هایی در آینده نیز دچار جابجایی نسبی شوند و در هرگونه سازه‌ای که بر روی آن‌ها قرار گیرد، بُرش<sup>۱</sup> ایجاد نماید [بربریان، م.، ۱۳۷۱].

شناخت دقیق و کامل گسل‌های کواترنر محدوده‌ی مورد مطالعه (خلیل شهر و بهشهر)، گام نخستین در راه بررسی لرزه‌زمین‌ساخت و خطر<sup>۲</sup> زمین‌لرزه در این گستره می‌باشد. از این دیدگاه گسل‌های کواترنر گستره‌ی مورد مطالعه را به سه گروه زیر می‌توان تقسیم نمود:

۱ - گسل‌های اصلی و لرزه زا<sup>۳</sup> (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 گسل‌های خزر، شمال البرز، لِله بند و بادله اشاره کرد. در این پایان‌نامه ابتدا با استفاده از روش مغناطیسی هوابرد نشان داده می‌شود که ساز و کار گسل‌های مذکور چیست، آیا ادامه در ژرفنا و عمقی بودن برخی از این گسل‌ها صحت دارد؟ ارتباط این گسل‌ها در عمق با یکدیگر چگونه است؟ آیا همبستگی زمین‌ساختی گسل با گسل شناخته‌شده‌ی جنبا وجود جود دارد (این مسئله در خصوص گسل بادله شرح داده می‌شود). همچنین آیا فرضیات زمین‌شناسی با نتایج این مطالعه همخوانی دارد؟ و نیز به بسیاری از سوالات در خصوص گسل‌های شرق مازندران پاسخ داده خواهد شد و نیز در ادامه با استفاده از تلفیق روش مقاومت‌ویژه و GPR در خصوص گسل‌ش در رسوبات کواترنر پسین منطقه خلیل شهر و بررسی دیواره<sup>۴</sup> گسل خزر بحث می‌گردد.

---

<sup>1</sup> Shear

<sup>2</sup> Risk

<sup>3</sup> Seismogenic

<sup>4</sup> Scarp

### ۱-۳ مروری بر مطالعات انجام شده

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 کرد:

در مقاله‌ای از چو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۱، در مورد کاربرد تلفیقی روش‌های رادار نفوذی و لرزه-نگاری بازتابی با قدرت تفکیک بالا<sup>۲</sup> در بررسی رخدادهای پالئوسایزیمیک و گسل‌های فعال شرق تایوان بحث شده است. همچنین در مقاله کریستی<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸، در مورد تغییر شکل و جابجایی گسل‌های پنهان با استفاده از برداشت ۳ بعدی GPR و در مقاله گراسموک<sup>۴</sup> و همکاران ۲۰۰۵، در مورد تصویرسازی سه‌بعدی GPR با قدرت تفکیک بالا و مک کلیمونت<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸، نیز در استفاده از همین روش در اکتشاف گسل آلپین<sup>۶</sup> بحث شده است. همچنین راشد و همکاران، ۲۰۰۴، نیز در مقاله‌ای به بررسی سیستم گسلی آماچی<sup>۷</sup> اوساکای ژاپن پرداخته‌اند. در کشور ما 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، خدمی و همکاران، ۱۳۹۲، معرفی پنهانه 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.

حقیقین و صاحب‌نظران مختلف، به بررسی پاسخ مقاومت‌ویژه گسل در شرایط مختلف پرداختند. از جمله روبرت<sup>۸</sup> و همکاران، ۱۹۶۶، مونی<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۸۰، دوبرین و ساویت<sup>۲</sup>، ۱۹۸۸، رینولدز<sup>۳</sup> و

<sup>1</sup> Chow

<sup>2</sup> high-resolution

<sup>3</sup> Christie

<sup>4</sup> Grasmueck

<sup>5</sup> McClymont

<sup>6</sup> Alpine

<sup>7</sup> Uemachi

<sup>8</sup> Robert

همکاران، ۱۹۹۸ و همچنین تلفورد<sup>۴</sup> و همکاران، ۱۹۹۰، به شرح پاسخ آرایه‌های الکتروودی مختلف در مواجهه با گسل‌های قائم و شیب‌دار پرداخته‌اند.

از اولین پژوهش‌هایی که در ایران در زمینه‌ی بررسی آرایه‌های مختلف الکتروودی روش مقاومت‌ویژه در آشکارسازی گسل‌ها منتشر شده می‌توان به مطالعات پیروز و همکاران در اواخر دهه ۷۰ 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 شاهروド 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 دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه در آهک‌های کرتاسه واقع در شمال شاهرود، رفعت هراب و همکاران، ۱۳۸۹، اکتشاف آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی معکوس دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه در سازند لار واقع در غرب شاهرود، استکی و کامکار، 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<sup>۵</sup> و همکاران، در سال ۲۰۱۰، با تلفیق نتایج لرزه‌نگاری بازتابی و مقاومت‌ویژه دید عمومی از کمپلکس گسلی مور-تروندلاگ<sup>۶</sup>، به-

<sup>1</sup> mooney

<sup>2</sup> Sawit & Dobrin

<sup>3</sup> reynolds

<sup>4</sup> telford

<sup>5</sup> Nasuti

<sup>6</sup> Møre-Trøndelag

دست آورده‌اند. نگوین<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۵، در مقاله‌ای، نقش پردازش تصویر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی دو بعدی 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. راضی و همکاران، در سال ۱۳۹۳، در مقاله‌ای به استفاده از روش مقاومت‌ویژه در شناسایی گسترش زون‌های گسل و آهن‌دار در منطقه موشکیه اشاره کرده‌اند.

منابعی نیز درز مینه‌ی کاربرد روش مغناطیس هوابرد در شناسایی ساختارهای گسلی منتشر شده که به ذکر چند نمونه بسنده می‌کنیم. هادسون<sup>۲</sup> و گراچ<sup>۳</sup>، (۲۰۰۷)، در مقاله‌ای به بررسی ریفت ریوگراند<sup>۴</sup> نیومکزیکو با این روش پرداخته‌اند. این مقاله راهنمایی برای درک بیان مغناطیس هوابرد گسل در حوضه رسوی ارائه می‌دهد که دید کلی ما را در نوشتمن فصل سوم پایان‌نامه شکل داده است. گزارشی هم توسط گراچ و همکاران، ۲۰۰۹، توسط USGS به چاپ رسیده که شرح کاملی است از مطالعات زمین‌شناسی و مغناطیس هوابرد در اکتشاف سیستم‌های گسلی ریفت ریوگراند نیومکزیکو. این دو منبع از جمله منابع غنی درز مینه‌ی اکتشافات گسلی با روش مغناطیس هوابرد است. از جمله مقالات داخلی در این خصوص می‌توان به مقاله کامکار روحانی و همکاران، ۱۳۹۱ اشاره کرد، این مقاله به تعیین شیب و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی از روی داده‌های مغناطیس هوابرد پرداخته است. آن‌ها توانسته‌اند با به کارگیری فیلتر ادامه‌ی فراسو با ارتفاع مختلف بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد، واحدهای زمین‌شناسی در عمق را تفکیک نموده و شیب تقریبی آن‌ها در عمق را تعیین نمایند.

## ۱-۴ اهداف و ضرورت انجام پایان‌نامه

قرارگیری حدود ۷۰ درصد از مساحت استان مازندران از جمله مناطق جمعیتی شهری و روستایی

<sup>1</sup> Nguyen

<sup>2</sup> Hudson

<sup>3</sup> Grauch

<sup>4</sup> Rio-grand Rift

بر روی گسل‌ها و یا در حاشیه گسل‌های لرزه‌زا و همچنین لزوم آگاهی از مناطق خردشده و گسل-خوردۀ در حوالی ساختگاه‌ها و سازه‌های مهندسی و همچنین پوشیده ماندن گسل اصلی و لرزه‌زای خزر (که بیشتر مناطق شهری را تحت تأثیر قرار داده است) توسط رسوبات کواترنری، باعث شده تا شناخت کامل از ساز و کار گسل و نیز آشکارسازی امتدادهای گسل در مناطق حساس شهری مورد نیاز باشد؛ بنابراین به سبب عدم آگاهی از برخی اطلاعات از این گسل‌ها همچون امتداد و ادامه‌ی این گسل‌ها در عمق، جهت شبیب و برخی دیگر از خصوصیات، لزوم استفاده از روش‌های اکتشافات زیرسطحی بیش از پیش احساس می‌گردد. به همین سبب در این پایان‌نامه سعی شده تا ابتدا دید عمومی از ساختارهای گسلی منطقه شرق مازندران به مخاطب داده شود و در ادامه سعی شده تا با دیدی محلی به بررسی شاخه‌های گسل حساس خزر پرداخته شود.

## ۱-۵ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه به سبب گستردگی مطالب، در ۶ فصل تنظیم شده است. در فصل حاضر، مقدمه‌ای در مورد روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده در شناسایی و بررسی گسل‌ها آورده شده و همچنین تکتونیک عمومی منطقه و نیز اهداف و ضرورت انجام پایان‌نامه شرح داده شده است. در فصل دوم مبانی سه روش مغناطیس هوابرد، مقاومت‌ویژه الکتریکی و GPR و مفاهیم پردازشی این روش‌ها شرح داده شده است. در فصل سوم، به پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. در فصل چهارم، مدل‌سازی پیشرو داده‌های مقاومت‌ویژه تشریح شده است، این مدل‌ها بر اساس واقعیت‌های زمین‌شناسی مشاهده شده منطقه خلیل شهر می‌باشد، همچنین در ادامه، مدل‌سازی و تفسیر پروفیل واقعی مقاومت‌ویژه برداشت شده در این منطقه آورده شده است. در فصل پنجم، ابتدا به تشریح پیشرو داده‌های GPR پرداخته شده و در ادامه، پردازش و تفسیر پروفیل GPR برداشت شده آورده شده است؛ و در نهایت در فصل ششم، با تلفیق نتایج حاصل از روش‌های مختلف، ساز و کار گسل‌های لرزه‌زای منطقه مشخص شده و پایان‌نامه با ذکر پیشنهاداتی پایان یافته است.

## فصل دوم- مبانی و معانی هم پردازشی

روش های مغناطیسی هولبروک، مقاومت ویژه و GPR

## ۱-۲ روش مغناطیسیس هوابرد

به طور کلی این روش شامل سه مرحله‌ی برداشت، پردازش و تفسیر داده‌ها است. برداشت داده‌ها خود شامل روش‌های گوناگونی از قبیل برداشت با استفاده از بالگرد، هواپیما و یا وسیله‌ی هوایی دیگر است. در بخش پردازش داده‌ها، در مورد تصحیحات مورد نیاز و همچنین استفاده از برخی فیلترهای پردازشی بحث خواهد شد. همچنین در ادامه به شرح مختصری از اصول تفسیر داده‌های مغناطیسی پرداخته می‌شود.

### ۱-۱ پردازش داده‌های مغناطیسی

داده‌های مغناطیسیس هوابرد همانند داده‌های برداشت شده توسط روش مغناطیسی زمینی جهت تفسیر نیازمند اعمال پردازش‌هایی است؛ که در مرحله‌ی اول شامل تصحیحاتی می‌گردد که می‌توان به تصحیح IGRF اشاره کرد. بعد از انجام این تصحیحات، پردازش داده‌ها ممکن است با اعمال فیلترهایی مانند برگردان به قطب، ادامه فراسو، روند سطحی و مشتقّات و همچنین فیلترهای لبه‌یابی ادامه یابد. البته تصحیحات و پردازش‌های خاص دیگری نیز بر روی داده‌های مغناطیسیس هوابرد صورت می‌گیرد که آن را از روش زمینی متمایز می‌نماید. در این مطالعه، به سبب استفاده از نقشه‌ی منحنی تراز مغناطیسیس هوابرد نیازی به تصحیحات و پردازش‌های ویژه نبود (بعضی از تصحیحات و یا فیلترها بر روی نقشه قبلًا اعمال شده بود) و تنها به اعمال تصحیحات و پردازش‌های اساسی دیگر که در بالا گفته شد، اکتفا شد. ذیلًا به شرح مختصری از این پردازش‌ها پرداخته می‌شود.

#### ۱-۱-۱ تصحیح<sup>۱</sup> IGRF

در مطالعات ناحیه‌ای مغناطیسیس سنجی، به منظور واضح‌تر شدن بی‌هنجری حاصل از اشکال بزرگ-مقیاس (ناحیه‌ای)، باید بی‌هنجری‌های باقی‌مانده (حاصل از منابع زیرسطحی با گسترش جانبی

<sup>1</sup> International Geomagnetic Reference Field

محدود) را از روی بی‌هنچاری‌های مشاهده شده حذف نمود؛ و بالعکس، برای مشاهده بی‌هنچاری باقی‌مانده، باید تأثیر میزان ناحیه‌ای را از میزان کل حذف نمود. در واقع کار این تصحیح جداسازی این دو آنومالی از هم است.

### ۲-۱-۲- روش برگردان به قطب

روش برگردان به قطب، جهت تحلیل داده‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [حسینی، ۱۳۸۸]. یک توده‌ی متقارن در قطب‌های مغناطیسی که جهت میدان ناحیه‌ای و پلاریزاسیون در آن‌ها عمودی است یک بی‌هنچاری متقارن تولید می‌کند و شکل یک بی‌هنچاری مغناطیسی فقط به ابعاد فیزیکی و خود پذیری مغناطیسی توده بستگی ندارد بلکه به جهت پلاریزاسیون توده و جهت میدان ناحیه‌ای نیز وابسته است [Hinz, 1982]؛ بنابراین روش برگردان به قطب، روشی برای حذف نامتقارنی‌های ایجادشده به وسیله میدان ناحیه‌ای و پلاریزاسیون غیر عمودی می‌باشد، به عبارت دیگر این روش برای رفع اثرات تغییر شکل ناشی از تغییرات زاویه میل و زاویه انحراف پلاریزاسیون مغناطیسی با فرض این‌که پلاریزاسیون به وسیله‌ی میدان زمین هدایت می‌شود، به کار می‌رود. رفع این انحراف به وسیله‌ی روش برگردان به قطب با تعديل داده‌ها به حالت تصویر پلاریزاسیون عمودی در قطب‌ها انجام می‌شود و با این روش بی‌هنچاری‌ها به مرکز توده‌های مولّد بی‌هنچار بر می‌گردند [Dobrin & Savit, 1988].

### ۲-۱-۳- ادامه فراسو و فروسو

روش ادامه فراسو و فروسو فرآیندی است که توسط آن داده‌های میدان مغناطیسی از یک سطح مبنا به طریق ریاضی بر روی سطوح ترازی در بالا یا در زیر مبنای اصلی تصویر می‌شوند. در تصویر کردن بر روی سطح بالاتر، عملأً هموارسازی می‌شود. زمانی که مطالعه بر روی بی‌هنچاری‌های عمیق مورد نیاز است، جهت از بین بردن اثر بی‌هنچاری‌های کم‌عمق از روش ادامه فراسو استفاده می‌شود.

از نظر فیزیکی همان طور که ارتفاع در این روش افزایش می‌یابد؛ اثر اجسام مغناطیسی کوچک‌تر، باریک‌تر و ریزتر نسبت به اثر اجسام مغناطیسی بزرگ‌تر که به‌طور عمقی امتداد زیادی یافته‌اند از بین می‌رود. نقشه‌های ادامه فراسو نمایشی از بلوک‌های تکتونیکی و پوسته‌ای اصلی را در یک ناحیه نشان داده و دیدگاه‌های جدیدی از ساختارهای پوسته‌ای ارائه می‌دهد [Tarlowski, et.al, 1997].

روش ادامه فرسو بی‌هنجری‌های به‌دست آمده را با انتقال آن‌ها به نزدیک سطح مشاهده به صورت تیز درمی‌آورد. (فرکانس‌های بالا را افزایش می‌دهد). در این روش اختلالات<sup>۱</sup> با فرکانس بالا به همراه بی‌هنجری‌های زمین‌شناسی افزایش می‌یابد. تجربه نشان می‌دهد که ادامه فرسو با مسافت زیاد معمولاً با اشکالاتی توأم است و مسافت قابل استفاده به فاصله نمونه و کیفیت داده‌ها بستگی دارد. این روش برای تخمین ضخامت سازنده‌های رسوبی در بررسی‌های نفتی جالب توجه است.

#### ۴-۱-۲- فیلترهای لبه‌یابی

برای تعیین مرز بین واحدهای زمین‌شناسی منطبق بر منابع بی‌هنجر مغناطیسی، از یک مجموعه از فیلترهای لبه‌ای استفاده می‌شود؛ که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به فیلترهای مشتق افقی شدت میدان کل مغناطیسی برگردان شده به قطب<sup>۲</sup>، سیگنال تحلیلی و فیلترهای ZS [Shi & Butt, 2004; ZS] و همچنین فیلترهای لبه‌یابی مورد استفاده در نرم‌افزارهای پردازش Cooper & Cowan, 2008 تصویر اشاره کرد.

در این مطالعه نیز با اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو و فیلترهای لبه‌یابی نرم‌افزارهای پردازش تصویر همچون فیلتر تمبر<sup>۳</sup>، لبه‌بریده<sup>۴</sup> و لبه‌درخشان<sup>۵</sup>، بر روی داده‌های مغناطیسی هوابرد شرق مازندران، تفکیک واحدهای زمین‌شناسی با خواص مغناطیسی متفاوت صورت گرفته و مرز نسبتاً دقیق بین

<sup>1</sup> Noise

<sup>2</sup> Horizontal derivative of the total magnetic intensity reduced to the pole

<sup>3</sup> Stamp

<sup>4</sup> TornEdges

<sup>5</sup> Glowing Edges

آن‌ها مشخص شده و علاوه بر این شبیه واحدهای زمین‌شناسی منطقه مزبور از روی داده‌های مغناطیسی پردازش شده تعیین شده است.

آشکارسازی لبه یا لبه‌یابی<sup>۱</sup>، معمولاً برای تشخیص لبه‌های یک شیء از بین چند شیء دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای این کار از تابعی به نام edge استفاده می‌شود.

تغییرات فیزیکی به صورت تغییر رنگ و تغییر شدت روشنایی به صورت لبه در تصویر نمایان می‌شوند. در محیط با مقادیر پیوسته، مشتق، تغییرات ناگهانی و شدت آن را مشخص می‌کند و در محیط گسسته محاسبه‌ی تغییرات نسبت به پیکسل‌های مجاور، تقریبی از مشتق را نمایان می‌سازد.

در عملیات لبه برداری ورودی یک تصویر به فرمت intensity می‌باشد و در خروجی تصویر binary داده می‌شود، که در تصویر حاصل مرزهای بیرونی تصویر به صورت ۱ و مرزهای داخل به صورت ۰ نشان داده می‌شود.

لبه‌ها را در تصاویر pیدا می‌کند، این تابع یک تصویر باینری یا Edge عنوان ورودی می‌گیرد و یک تصویر باینری bw به همان اندازه‌ی تصویر اولی بر می‌گرداند، که جاهایی که تابع لبه‌ها را در تصویر پیدا می‌کند، در تصویر خروجی ۱ می‌کند و جاهایی دیگر را ۰ قرار می‌دهد.

## ۲-۱-۲- تفسیر داده‌های مغناطیسی

شکل بی‌هنجری‌های مربوط به منابعی که دارای هندسه‌ی متفاوت می‌باشند، می‌تواند پایه‌ای جهت تخمین مرز واحدهای مغناطیسی باشد. در بیشتر موارد این واحدهای مغناطیسی با یک واحد زمین‌شناسی نظیر یک لیتلولژی خاص متناسب است. ولی اگر فاصله خطوط پرواز زیاد بوده و یا جهت آن‌ها نسبت به امتدادهای زمین‌شناسی مایل باشد، تصاویر و کنتورهای نتیجه شده، به طور صحیح جزئیات مغناطیسی را به نقشه در نمی‌آورد و بی‌هنجری‌های غیرواقعی ظاهر می‌شوند. در چنین شرایطی به نقشه درآوردن جزئیات مفید در واحدهای مغناطیسی مشکل خواهد بود.

---

<sup>۱</sup> edge detection

گسلش و جابجایی ساختارها در منطقه توسط عوامل از روی داده‌های مغناطیسی زیر شناسایی می‌شود [Gunn et.al, 1997]

- ۱- جابجایی ظاهری واحدهای مغناطیسی مشابه
- ۲- قطع ناگهانی واحدهای مغناطیسی
- ۳- تغییر ناگهانی در عمق منابع مغناطیسی
- ۴- یک مغناطیس باریک خطی با شدت پایین که بهدلیل هوازدگی در طول سطح گسل به وجود آمده و کانی‌های مغناطیسی در اثر اکسیداسیون به کانی غیرمغناطیسی تبدیل گشته‌اند (دو طرف این باریکه خطی می‌تواند مغناطیس مشابهی داشته باشد).
- ۵- یک مغناطیس خطی با شدت بالا که ممکن است در اثر وجود یک عامل خارجی قطع شده باشد و مربوط به کانی‌های مغناطیسی رسوب کرده در سطح گسل باشد.

## ۲-۲ روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

این روش بر مبنای اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه در سطح زمین پایه‌ریزی شده و اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیرسطح زمین ارائه می‌دهد [Zonge Engineering and Research Organization, 1994]

درروش مقاومت‌ویژه الکتریکی، از یک چشمی الکتریکی مصنوعی برای اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی زمین استفاده می‌شود. برای این‌کار، معمولاً از چهارالکترود استفاده می‌شود؛ که دو تا برای فرستادن جریان الکتریکی و دو تای دیگر، برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی استفاده می‌شود. در صورت غیرهمگن<sup>۱</sup> و غیرهمسان‌گرد<sup>۲</sup> بودن زمین، داده‌های حاصل از این روش

<sup>1</sup>.inhomogeneous  
<sup>2</sup> anisotropy

نیشان دهنده‌ی مقادیر مقاومت‌ویژه‌های واقعی زمین نیستند؛ بلکه این مقادیر مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری<sup>۱</sup> زیر سطح زمین را نیشان می‌دهند [Loke, 2004]

بعد از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل، می‌توان اندازه‌ی مقاومت‌ویژه ظاهری زمین را با استفاده از رابطه‌ی (۱-۲) محاسبه نمود [Loke, 2004].

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1-2)$$

که در آن  $K$  از رابطه (۲-۲) به دست می‌آید.

$$K = \left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right) \quad (2-2)$$

در این روابط  $\rho_a$ ، مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی ظاهری زمین و  $K$  ضریب هندسی<sup>۲</sup> برای آرایش مورد استفاده است. ضریب هندسی، به نحوه قرارگیری الکترودها در هر آرایش بستگی دارد. در زمین‌های همگن، مقاومت‌ویژه به دست آمده از این معادله ثابت و مستقل از فاصله الکترودی و موقعیت الکترودها در سطح زمین است. دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه معمولاً مقدار مقاومت زمین ( $R$ ) را اندازه‌گیری می‌کنند. رابطه‌ی بین مقاومت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی ظاهری به صورت رابطه‌ی (۳-۲) تعریف می‌شود [Loke, 2004; Reynolds, 1997].

$$\rho_a = KR \quad (3-2)$$

لازم به یاد آوری است که  $R = \frac{\Delta V}{I}$  (قانون/هم).

## ۱-۲-۲ تقسیم‌بندی مواد مختلف از نظر مقاومت‌ویژه

مقاومت‌ویژه زمین می‌تواند به عامل یا مجموعه عواملی همچون عنصر تشکیل دهنده، آب محتوی،

<sup>1</sup> Apparent resistivity

<sup>2</sup> Geometrical factor

<sup>2</sup> Water content

تخلخل<sup>۱</sup> و درجه اشباع آب<sup>۲</sup> در خاک یا سنگ، درزهای و شکستگی‌های موجود در سنگ و برخی عوامل دیگر بستگی دارد [Loke, 2004]. سن سازندها مستقیماً با مقاومت‌ویژه در ارتباط نیست. شاید به سبب فشردگی لایه‌هایی قدیمی زیرین مقاومت‌ویژه متفاوتی نسبت به سایر لایه‌های سازنده مشاهده گردد.

فرآیندهای زمین‌شناسی و تکتونیکی بر روی مقدار مقاومت‌ویژه سنگ‌ها مؤثرند. گسلش، برش و هوازدگی معمولاً باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری سیالات شده و در نتیجه باعث کاهش مقاومت‌ویژه می‌گردند. سخت‌شدگی در اثر تراکم، باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری و در نتیجه افزایش مقاومت‌ویژه می‌شود [Ward, 1990]. مقادیر مقاومت‌ویژه مربوط به برخی سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد مختلف زیر سطح زمین در جدول ۱-۲ ارائه شده است [Loke, 1999].

جدول ۱-۲: مقاومت‌ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد معدنی متداول [Loke, 1999].

مقاطومت ویژه ( $\Omega_m$ )	ماده موردنظر	مقاطومت ویژه ( $\Omega_m$ )	ماده موردنظر
$50 - 4 \times 10^2$	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
$5 \times 10^3 - 10^6$	گرانیت	$10^2 - 2 \times 10^8$	کوارتزیت
$10^3 - 5 \times 10^5$	گابرو	$10^3 - 10^6$	بازالت

در سنگ‌های با ترکیب متغیر مثل سنگ‌های رسوبی با رخساره‌های دانه‌بندی شده، مقادیر مقاومت‌ویژه منعکس کننده نسبت‌های مختلفی از مواد تشکیل دهنده می‌باشند [Reynolds, 1997].

<sup>3</sup> Porosity

<sup>4</sup> Water saturation

## ۲-۲-۲ روش‌های اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه

در حالت کلی داده‌های مقاومت‌ویژه با اهداف مدل‌سازی به صورت یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی برداشت می‌شوند [Loke, 1999]. این برداشت‌ها به دو شکل عمدۀ انجام می‌گیرد. یکی از این روش‌ها، روش گمانه‌زنی یا سوندازنی الکتریکی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. روش دوم، روش ترانشه‌زنی یا پروفیل‌زنی<sup>۲</sup> می‌باشد؛ که برای تشخیص تغییرات جانبی مقادیر مقاومت‌ویژه زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد .[Loke, 2004]

## ۳-۲-۲ انتخاب آرایش الکتروودی مناسب

آرایش‌های الکتروودی متنوعی وجود دارد؛ که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. عوامل متعددی در انتخاب آرایش الکتروودی تأثیر دارند؛ که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :[Ward, 1990]

- ۱- نسبت سیگنال به نویه، -۲- جفت شدگی الکترومغناطیسی، -۳- حساسیت به موقعیت جانبی، -۴- قابلیت تفکیک ساختارهای شبیدار، -۵- قدرت تفکیک‌پذیری ساختارهای افقی، -۶- عمق نفوذ، -۷- حساسیت به عمق آنومالی‌ها (عمق هدف)، -۸- حساسیت نسبت به شبید، -۹- حساسیت به ناهمگنی-های سطحی در عملیات سوندازنی، -۱۰- حساسیت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات پروفیل‌زنی، -۱۱- حساسیت به توپوگرافی سنگبستر، -۱۲- حساسیت به اثرات جانبی، -۱۳- حساسیت به روباره هادی، -۱۴- حساسیت به توپوگرافی.

در جدول ۲-۲ ارزیابی مختصّی از اولویت آرایش‌های مورد استفاده با توجه به تأثیر عوامل مذکور، ارائه شده است [Ward, 1990]. در این جدول، عدد ۱ نشان‌دهنده این است که آرایش مربوطه مناسب‌ترین آرایش است؛ عدد ۵ نشان می‌دهد که آرایش مذکور مناسب نیست. اعداد ۲، ۳ و ۴ نیز به

<sup>1</sup> Electrical sounding

<sup>2</sup> Profiling

ترتیب اولویت‌های بعدی را نشان می‌دهند. در مواردی که ارزیابی دقیقی صورت نگرفته و هیچ قطعیت و مطالعات مستندی در دسترس نیست، با علامت  $\times$  یا + مشخص شده‌اند. برای تکمیل این جدول، نیاز به مطالعات دقیق و گستردۀ می‌باشد [Ward, 1990].

جدول ۲-۲: ارزیابی آرایش‌های الکترودی متداول با توجه به مهمترین عوامل مؤثر [Ward, 1990].

آرایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
دوقطبی-دوقطبی	۵	۱	۲	۴	۲	۲	۲	۴	۴	۲	۱	۱	+	+
قطبی-دوقطبی	۴	۲	۳	۵	۳	۲	۵	۵	۳	۱	۲	۲	+	+
شلومبرژه	۲	۴	۴	۴	۱	۱	۲ <sup>x</sup>	۲ <sup>x</sup>	۳	۱	۲	۳ <sup>x</sup>	۱	۱
ونر	۱	۵	۵	۵	۱	۱	۱	۱	۳ <sup>x</sup>	۲	۲	۳ <sup>x</sup>	۱	۱

## ۴-۲-۲ مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی

داده‌های برداشت شده در عملیات صحرایی، یک سری اعداد خام می‌باشند؛ که توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی این داده‌ها (به‌طور مستقیم) غیرممکن است؛ بنابراین تعیین رابطه‌ی بین داده‌های صحرایی به‌دست‌آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به‌عبارت دیگر، مدل‌سازی داده‌های برداشت شده جهت توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری است. مدل‌سازی ژئوفیزیکی به دو دسته کلی مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی تقسیم‌بندی می‌شود [موسوی، ۱۳۹۳].

### ۱-۴-۲-۲ مدل‌سازی فیزیکی

مدل‌سازی فیزیکی شبیه‌سازی ساختار زمین در مقیاس آزمایشگاهی است. این روش مدل‌سازی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. همچنین شرایط کنترل شده آزمایشگاهی به خوبی شرایط غیرقابل پیش‌بینی زمین را فراهم نمی‌کند.

## ۲-۴-۲-۲ مدل‌سازی عددی

با پیشرفت علوم کامپیوتر، مدل‌سازی فیزیکی جای خود را به مدل‌سازی عددی توسط برنامه‌های کامپیوتری داده است. مدل‌سازی عددی را می‌توان به دو نوع پیشرو و وارون (شامل روش هموار و پارامتری) تقسیم‌بندی نمود. ذیل‌اً به شرح مدل‌سازی وارون پرداخته شده است.

### الف- مدل‌سازی وارون

بی‌هنگاری‌های قرار گرفته در زیر سطح زمین گاه‌اً ساختاری پیچیده دارند، بنابراین مدلی باید ارائه شود که با تعداد محدودی پارامتر، قابل کنترل باشد؛ تا بتوان با تغییر این پارامترها بهترین مدلی را که با داده‌های صحرایی و خصوصیات زمین‌شناسی و دیگر اطلاعات منطقه هم‌خوانی داشته باشد، به دست آورد. یکی از روش‌های رسیدن به این مدل، مدل‌سازی وارون می‌باشد. در روش مدل‌سازی وارون بر خلاف روش مدل‌سازی پیشرو، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری (مشاهده) شده، مدل زمین تخمین زده می‌شود [Iroke and Barker, 1996]. فرآیند مدل‌سازی وارون، عکس مدل‌سازی پیشرو است؛ بدین ترتیب که در هر مرحله تکرار، با اعمال یک سری عملیات ریاضی روی داده‌های مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری، پارامترهای فیزیکی مدل به دست می‌آید. در واقع فرآیند وارون‌سازی شامل قرائت اولیه داده‌های مقاومت‌ویژه، تصحیح پارامترهای وارون‌سازی (در صورت لزوم) و انجام وارون‌سازی می‌باشد. روش‌های مدل‌سازی وارون معمولاً از یک روش بهینه‌سازی غیر خطی برای بهبود بخشیدن به یک مدل ساده اولیه استفاده می‌کنند [Meju, 1994; Samouelian, et al., 2005].

## ۳-۲ روش GPR

این روش با استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا ناپیوستگی‌های الکتریکی را در اعمق کم با قدرت تفکیک بالایی آشکارسازی می‌کند [Neal, 2004]. زمانی که پالس الکترومغناطیس ساطع شده از آنتن فرستنده به یک ناپیوستگی الکتریکی برخورد می‌کند، بخشی از آن از فصل مشترک عبور کرده و بخشی بازتاب می‌شود. این امر ناشی از تغییر امپدانس<sup>۱</sup> امواج الکترومغناطیس در فصل مشترک دو محیط می‌باشد [Parasnis, 1997]. پالس الکترومغناطیسی بعد از بازتاب از اهداف زیرسطحی به آنتن گیرنده باز می‌گردد در صورتی که زمان رفت این پالس الکترومغناطیسی از فرستنده تا بازتاب از یک هدف زیرسطحی و سپس زمان برگشت آن تا گیرنده را اندازه‌گیری کنیم، می‌توان عمق هدف مورد نظر را تعیین کرد. این امر در صورتی امکان‌پذیر است که سرعت پالس (موج الکترومغناطیس) در محیط مشخص باشد. بیشتر سیستم‌های GPR از دو آنتن برای ارسال و دریافت امواج استفاده می‌کنند. طول آنتن به مشخصات پالس فرستنده و از همه مهم‌تر به پهنه‌ای پالس<sup>۲</sup> وابسته است. هرچه پالس دارای پهنه‌ای بیشتری باشد بایستی طول آنتن به کار رفته بزرگ‌تر باشد.

در فاصله زمانی بین دو پالس متوالی، گیرنده، میدان الکتریکی پالس‌های ورودی را به صورت آنالوگ یا قیاسی<sup>۳</sup> (پیوسته) اندازه‌گیری می‌کند. این سیگنال در گیرنده تقویت شده و سپس به صورت رقومی در حافظه کامپیوتر ذخیره می‌شود؛ تا پردازش‌های بعدی روی آن‌ها صورت گیرد. برای این منظور سیگنال دریافتی در گیرنده نمونه‌گیری می‌شود. فواصل زمانی که سیگنال در آن نمونه‌گیری می‌شود را فاصله نمونه‌گیری<sup>۴</sup> و معکوس این فاصله زمانی را فرکانس نمونه‌گیری می‌نامند.

مدت زمانی که رویدادها بین دو پالس متوالی ارسالی ثبت می‌شوند، پنجره زمانی<sup>۵</sup> نام دارد

<sup>1</sup> Impedance

<sup>2</sup> Pulse width

<sup>3</sup> Analog

<sup>4</sup> Sampling interval

<sup>5</sup> Time window

[Annan, 2001; Parasnus, 1997]. طول پنجره زمانی برابر زمان رفت و برگشت سیگنال تا عمق

حداکثر بوده و در تمامی دستگاه‌های تجاری موجود، قابل تنظیم می‌باشد [Annan, 2001]

### ۱-۳-۲ امواج GPR در زمین

پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیس در یک محیط را تعیین می‌کنند عبارتند از [Neal, 2004]: گذردهی دیالکتریک<sup>۱</sup> ( $\epsilon$ ), رسانندگی الکتریکی<sup>۲</sup> ( $\sigma$ ) و تراوایی مغناطیس<sup>۳</sup> ( $\mu$ ).

موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه‌بعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر گذارند. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی توسط رابطه ۴-۲ محاسبه می‌شود [Neal, 2004]

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma / \omega\eta)}}{2}}} \quad (4-2)$$

در رابطه (۴-۲)،  $C_0$  سرعت موج الکترومغناطیس در هوا،  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی محیط،  $\mu_r$  نشان‌دهنده تراوایی مغناطیس نسبی و  $\epsilon_r$  گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا و  $\eta$  فرکانس زاویه‌ای موج GPR می‌باشند. عبارت  $\sigma/\omega\eta$ <sup>۴</sup> که به فاکتور اتلاف<sup>۵</sup> معروف است، در محیط‌های کم‌اتلاف مانند شن و ماسه‌های خالص نزدیک به صفر بوده و قابل صرف نظر می‌باشد (جدول ۲-۳). همچنین اثر  $\mu_r$  در محیط‌های غیرمغناطیس و در محدوده فرکانس‌های GPR کوچک بوده و می‌توان آن را مطابق با محیط‌های غیر مغناطیس برابر ۱ در نظر گرفت. به این ترتیب رابطه (۴-۲) به صورت آتی خلاصه می‌شود [Van Overmeeren, 1994, Reynolds, 1997, Parasnus, 1997]

<sup>1</sup> Dielectric permittivity

<sup>2</sup> Electric conductivity

<sup>3</sup> Magnetic permeability

<sup>4</sup> Loss factor

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5-2)$$

مشخصات الکترومغناطیس مواد، به مواد تشکیل دهنده و همچنین میزان آب موجود در آن‌ها بستگی دارد. در جدول ۳-۲ مشخصات برخی از مواد آورده شده است.

جدول ۳-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد [Sensors and software, 1999]

اتلاف (db/M) (دسیبل بر متر)	سرعت (M/nS) (متر بر نانوثانیه)	رسانندگی (mS/m) (میلی زیمنس بر متر)	گذردهی نسبی ( $\epsilon_r$ )	
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	۲-۱۰۰	۵-۴۰	رس‌ها
۰	۰/۳۰	۰	۱	هوای
$2 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۳	۰/۰۱	۸۰	آب مقطر
۰/۱	۰/۰۳۳	۰/۵	۸۰	آب شیرین
$10^{-3}$	۰/۰۱	$3 \times 10^{-3}$	۸۰	آب دریا

## ۲-۳-۲ بازتاب و عبور

همان‌طور که ذکر شد قسمتی از موج الکترومغناطیس در برخورد با فصل مشترک دو محیط با امپدانس‌های الکترومغناطیس متفاوت، عبور کرده و قسمت دیگر بازتاب می‌یابد. انرژی عبوری ممکن است توسط فصل مشترک‌های دیگر در زیر این لایه بازتاب شود [Parasnis, 1997].

اگر برخورد موج به فصل مشترک دو محیط به صورت عمودی باشد، ضرایب بازتاب ( $R$ ) و عبور ( $T$ ) به ترتیب توسط رابطه زیر بیان می‌شوند [Parasniss, 1997]

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (6-2)$$

$$T = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad (7-2)$$

اگر محیط غیر مغناطیسی باشد با فرض اینکه:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ ، ضریب بازتاب توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$R = \frac{(\omega\epsilon_1 + i\sigma_1)^{1/2} - (\omega\epsilon_2 + i\sigma_2)^{1/2}}{(\omega\epsilon_1 + i\sigma_1)^{1/2} + (\omega\epsilon_2 + i\sigma_2)^{1/2}} \quad (8-2)$$

که در این رابطه  $\epsilon$  گذردهی مطلق محیط می‌باشد. برای ساده کردن رابطه بالا شرایط را محدودتر می‌کنیم و با در نظر گرفتن  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  یعنی دو محیط غیر رسانا و با قرار دادن  $\epsilon_i = \epsilon_{ir}\epsilon_0$  خواهیم داشت [Parasniss, 1997, Annan, 2001]

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{1r}} - \sqrt{\epsilon_{2r}}}{\sqrt{\epsilon_{1r}} + \sqrt{\epsilon_{2r}}} \quad (9-2)$$

در این رابطه  $\epsilon_{1r}$  و  $\epsilon_{2r}$  به ترتیب گذردهی نسبی محیط‌های ۱ و ۲ نسبت به گذردهی مطلق هوا می‌باشند.

### ۳-۳-۲ **GPR** شیوه‌های برداشت داده‌های

برداشت داده‌های GPR را می‌توان به ۳ شیوه عمده تقسیم‌بندی کرد: ۱-پروفیل‌زنی بازتابی<sup>۱</sup>، ۲-برداشت‌های GPR، ۳-توموگرافی CMP<sup>۱</sup>/WARR. از سه مورد اخیر، به سبب این که فقط مورد اول

<sup>1</sup> Reflection profiling

<sup>2</sup> Wide Angle Reflection

در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته است؛ لذا تنها به شرح این مورد بسنده نمودیم.

درروش پروفیل زنی بازتابی یا دورافت مشترک<sup>۲</sup>، آنتن های فرستنده و گیرنده با فواصل ثابت روی سطح زمین جابه جا می شوند. زمان انتشار امواج GPR تا بازتاب کننده و بازگشت تا گیرنده اندازه گیری شده و درروی محور قائم و فواصل جابه جایی آنتن ها از مبدأ پروفیل روی محور افقی نشان داده می - شوند [محمدی ویژه، ۱۳۸۷]. اگر سرعت امواج GPR مستقل اندازه گیری شود و یا این که از داده های چاهنگاری به دست آید، عمق بازتاب کننده ها (اهداف زیر سطحی) قابل محاسبه می باشد. مرسوم ترین آرایش آنتن ها، آرایش با آنتن های موازی و عمود بر خطوط برداشت<sup>۳</sup> داده ها است [Annan, 2001].

این روش پروفیل زنی که معمول ترین روش برداشت داده ها است، هم به صورت پروفیل زنی پیوسته و هم گسسته صورت می پذیرد. در پایان نامه حاضر از هر دو روش پیوسته و گسسته بهره جستیم. درروش پروفیل زنی گسسته، آنتن ها در موقعیت ثابت روی زمین قرار گرفته و بعد از انجام برداشت به ایستگاه بعدی منتقل می شوند. در این حالت چون آنتن های فرستنده و گیرنده ثابت بوده و جفت - شدگی<sup>۴</sup> بین آنتن ها و زمین مداوم است، بازتاب ها به صورت واضح و با دامنه بیشتری دیده می شوند [Neal, 2004]

### ۴-۳-۲ پردازش داده های GPR

نوع و دامنه پردازش هایی که بر روی داده های GPR به کار می رود به مشخصات منطقه مورد مطالعه، دستگاه GPR، نرم افزار های به کار رفته و همچنین اهداف کلی برداشت وابسته است [Neal, 2004]. از این رو نیازی به استفاده از تمام روش های پردازش ذکر شده بر روی تمامی داده ها نمی باشد. چه بسا در شرایطی اعمال برخی از پردازش ها منجر به ایجاد مشکلات ناخواسته بر روی داده ها می شود.

<sup>1</sup> Common Mide Point

<sup>2</sup> Common offset

<sup>3</sup> Perpendicular-broadside

<sup>4</sup> Coupling

در این پایان‌نامه برخی پردازش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به تصحیح اشباع سیگنال، استاتیک، بهره‌ها، حذف اثر زمینه<sup>۱</sup>، فیلتر سرعت، نشانگرهای لحظه‌ای و تصحیح توپوگرافی اشاره کرد. تمامی تصحیحات مذکور در فصل پنجم این پایان‌نامه با اعمال بر روی داده‌ی واقعی شرح داده شده است. لیکن در ادامه به صورت مختصر در مورد نشانگرهای لحظه‌ای توضیحاتی ذکر شده است.

نشانگرهای لحظه‌ای به طور وسیعی در ژئوفیزیک به کار برده می‌شوند. اگرچه ابداع و استفاده از نشانگرهای لحظه‌ای ابتدا در لرزه‌نگاری بوده است، ولی امروزه با توجه به شباهت نسبتاً زیاد بین روش‌های لرزه‌نگاری بازتابی و GPR، از نشانگرهای لحظه‌ای برای تفسیر ساختارها، لایه‌بندی و رسوب‌شناسی در روش GPR هم استفاده می‌شود. نشانگرهای لحظه‌ای، مانند دامنه لحظه‌ای، فاز لحظه‌ای و فرکانس لحظه‌ای از سیگنال مختلط استخراج می‌شوند. یک سیگنال ژئوفیزیکی (رده‌ای GPR یا لرزه‌ای) از دو قسمت موهومند و حقیقی تشکیل شده است قسمت موهومند تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی است (Liu and Oristaglio, 1998)

$$z(t) = s(t) + i s^*(t) = a(t) e^{j v(t)} \quad (10-2)$$

در این رابطه  $s(t)$  قسمت حقیقی و  $s^*(t)$  قسمت موهومند سیگنال است. قسمت موهومند تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی سیگنال است که در این صورت نشانگر دامنه و فاز به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند (Liu and Oristaglio, 1998)

$$a(t) = [s(t)^2 + s^*(t)^2]^{1/2} \quad (11-2)$$

و

$$v(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{s^*(t)}{s(t)} \right] \quad (12-2)$$

---

<sup>1</sup> background removal

نیشانگر دامنه لحظه‌ای، یک موجک با قسمت‌های مثبت و منفی بر روی رد را به صورت یک تک پالس با مؤلفه مثبت تبدیل می‌کند. این فرآیند ماهیت نوسانی امواج GPR را از بین برده و داده‌ها را در تفکیک واقعی خود نمایش می‌دهد. همچنین نیشانگر دامنه لحظه‌ای، سبب سادگی در نمایش داده‌های رادار، قدرت سیگنال، لایه‌بندی و تفسیر راحت‌تر می‌گردد. نیشانگر فاز لحظه‌ای برای تأکید بر پیوستگی رویدادها به کار برده می‌شود. با توجه به این‌که نیشانگر فاز از دامنه سیگنال مستقل است، می‌تواند رویدادهای ضعیف مربوط به فصل مشترک‌های نزدیک و حتی درهم را بر روی سیگنال بهتر نمایش دهد. مقدار این نیشانگر همیشه بین  $\pi^-$  تا  $\pi^+$  قرار دارد، بنابراین داده‌ها به صورت دندانه نمایش داده می‌شوند (Sensor and Software, 1999). نیشانگر فرکانس لحظه‌ای از مشتق زمانی نیشانگر فاز لحظه‌ای به دست می‌آید (Liu and Oristaglio, 1998):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{dv(t)}{dt} \quad (13-2)$$

از نیشانگر فرکانس لحظه‌ای به عنوان یک ابزار همبستگی استفاده می‌شود. خصوصیات فرکانس یک سیگنال با تغییر جنس لایه‌ها، تغییرات ضخامت یا در فصل مشترک‌ها (برای مثال در سطح ایستابی) تغییر خواهد کرد (Sensor and Software, 1999).

# **فصل سوم-پردازش و تفسیر داده های مغناطیس هوا برد**

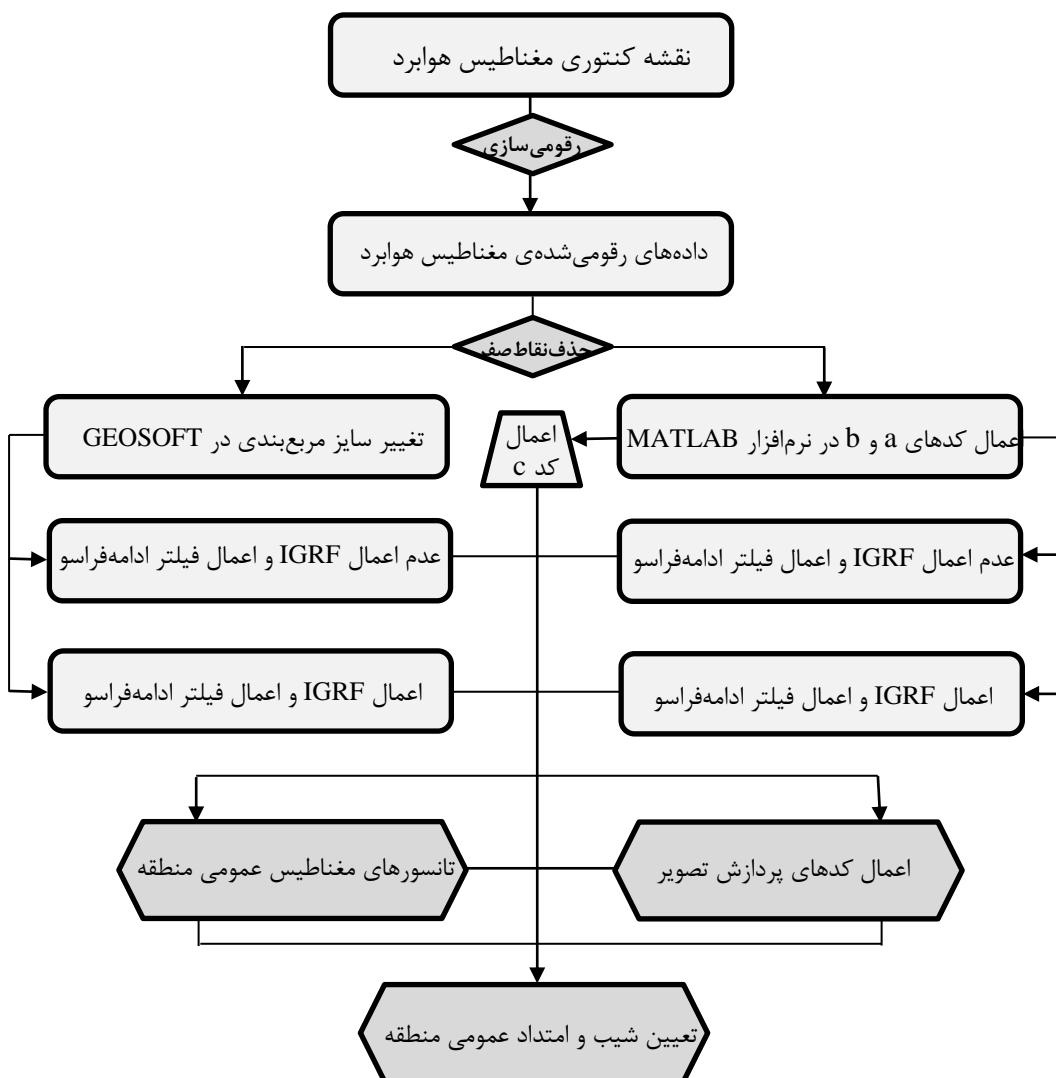
## ۱-۳ مقدمه

استان مازندران که همواره در طول تاریخ خود دچار تغییرات زمین‌شناسی و تکتونیکی فراوانی شده، باوجود دو گسل اصلی و فعال لرزه‌خیز البرز (در محدوده ارتفاعات البرز) و خزر (تقریباً در مرز کوه و دشت) و چندین گسل فرعی و فعال (مثل گسل‌های بادله، فریم، لِله بند، اوریم، بایجان و...) و سایر شکستگی‌های کوچک و بزرگی که گاه‌ها پنهان و نهفته‌اند، هر از چند گاهی باعث بروز زلزله‌های کم‌وبیش بزرگی در استان می‌گردد و اثرات مخرب آن‌ها، همواره مشکلات فراوانی به همراه داشته است.

ذکر این مقدمات، نشان از لزوم بررسی‌های گسترده و سریع گسل‌های موجود در سطح استان دارد. در نگاه اول شاید تنها بررسی‌های زمین‌شناسی و دورسنجی از جمله روش‌هایی است که در شناخت ساز و کار گسل‌های منطقه به کار برده می‌شود. اما روش‌های مذکور به تنهایی دید کلی از تغییرات عمقی به ما نخواهد داد. ناگزیر به استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مقیاس وسیع خواهیم بود. روش مغناطیسی هوابرد همچون ابزار ارزان و قدرتمند برای به نقشه درآوردن ساختارهای زمین‌شناسی و برآورد ضخامت، عمق و گسترش حوضه‌های رسوبی به کار می‌رود [Neawsuparpa, et.al, 2005]. به‌طور کلی الگوهای مغناطیسی از تمایز خواص مغناطیسی بین واحدهای زمین‌شناسی ناشی می‌شوند و در نتیجه، اغلب می‌توان یک انطباق یا ارتباط مستقیم بین واحدهای زمین‌شناسی و بی‌هنجری‌ها یا الگوهای مغناطیسی برقرار ساخت [Parsons, et.al, 2006]. امروزه برآورد سریع، خودکار و ارزان و نسبتاً دقیق عمق سنگ‌بستر مغناطیسی از روی داده‌های مغناطیسی هوابرد با کیفیت مطلوب که در ارتفاع پرواز نسبتاً پایین و با فواصل اندازه‌گیری نسبتاً کم یا مناسب برداشت شده‌اند، با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای مبتنی بر روش‌های جدید برآورد عمق اهداف مغناطیسی، به سادگی می‌سر شده است [Shi and Boyd, 1993 & 2004, Encom, 2007, Davis and Li, 2009].

## ۲-۳ دید کلی فصل

پس از تشریح زمین‌شناسی منطقه، جهت ایجاد یک دید جامع از مطالعات مغناطیس منطقه که در این فصل به ذکر آن پرداخته‌ایم، شاید فلوچارت نشان‌داده شده در شکل ۱-۳ بتواند راه‌گشا باشد. مطابق این ش مجموعه کارهایی که صورت گرفته تا از نقشه‌ی منحنی تراز مغناطیس هوابرد بابل به محاسبه شیب، امتداد و سایر پارامترهای مرتبط با گسل‌ها و تکتونیک منطقه دست یابیم، آورده شده است. در ادامه سعی نمودیم تا سرتیفیکات مذکور انتخاب و تشریح گردد.



شکل ۱-۳: دید عمومی از مطالعات مغناطیس هوابرد منطقه شرق مازندران

### ۳-۳ بررسی زمین‌شناسی عمومی منطقه

در این مطالعه، نقشه‌ی ۱:۲۵۰۰۰۰ ساری مورد بررسی قرار گرفته است. در این نقشه سازندهای پرکامبرین تا عصر حاضر دارای رخنمون می‌باشند. زمین‌شناسی عمومی منطقه و محدوده‌ی تغییرات شدت میدان مغناطیسی هر سازند (برحسب نانوتسلا) به شرح جدول ۱-۳ می‌باشد:

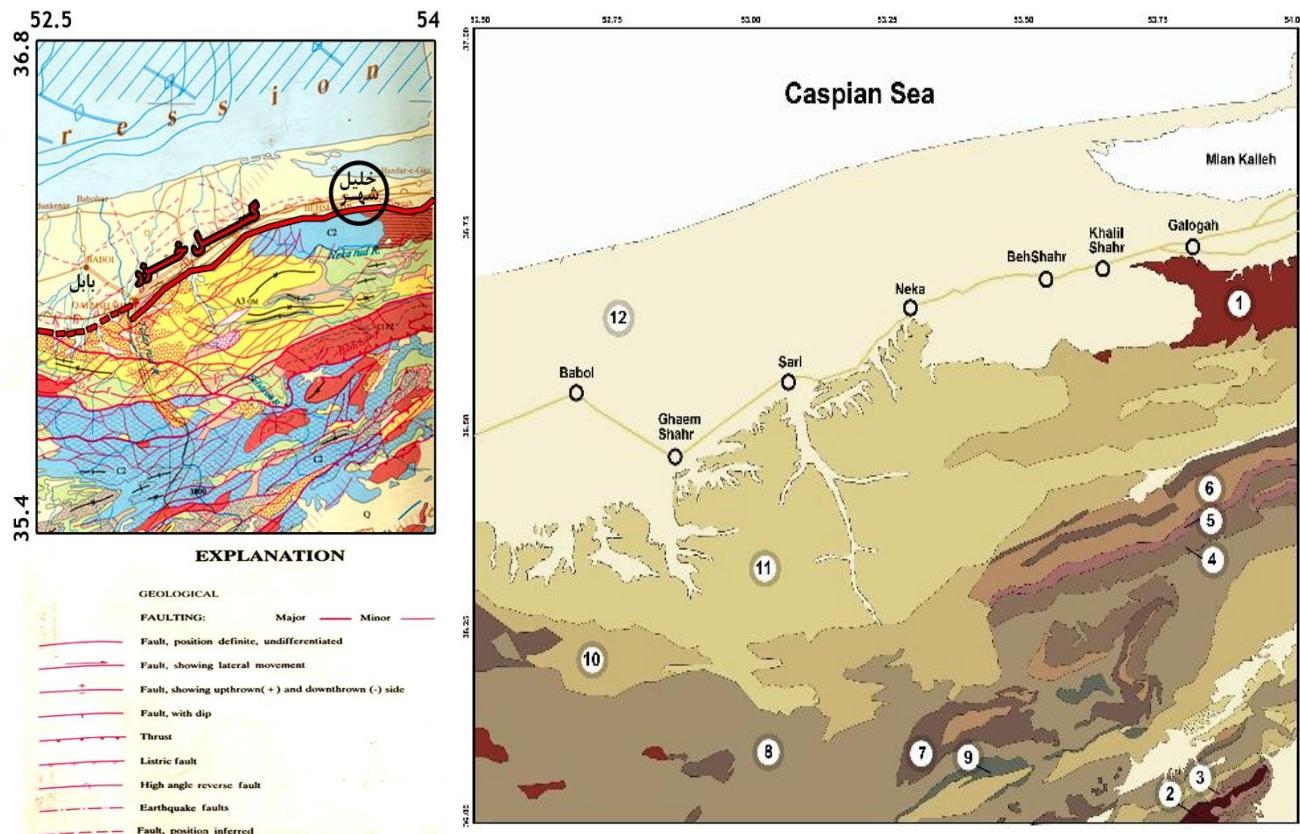
**جدول (۱-۳): سازندهای زمین‌شناسی به همراه مقادیر شدت میدان مغناطیسی**

ردیف	نام سازند (ها)	شدت میدان مغناطیسی (نانوتسلا)
۱	شیست گرگان و سازند کهر	۳۹۶۷۵ تا ۳۹۴۵۰
۲	دولومیت سلطانیه، سازندهای باروت، زاگون، لالون	۳۹۵۱۰ تا ۳۹۴۸۵
۳	سازند میلا	۳۹۵۰۵ تا ۳۹۴۸۵
۴	سازند خوش بیلاق و جیرود	۳۹۶۸۵ تا ۳۹۵۶۰
۵	سازند مبارک	۳۹۶۲۵ تا ۳۹۵۶۰
۶	سازندهای درود و روته	۳۹۶۴۵ تا ۳۹۵۷۵
۷	سازند الیکا	۳۹۶۵۰ تا ۳۹۶۰۰
۸	سازند شمشک	۳۹۶۸۵ تا ۳۹۶۰۰
۹	سنگ‌های آهکی دولومیتی، گچ، بازالت، دیاباز و بر روی آن‌ها سازند تیز کوه به طور دگرشیب	۳۹۶۵۰ تا ۳۹۶۴۰
۱۰	سازند ماسه‌سنگی و کنگلومراپی فجن و آهک و آهک مارنی سازند زیارت و سازند کرج	۳۹۷۰۰ تا ۳۹۵۷۵
۱۱	رسوبات جوان‌تر از اوسن	۳۹۶۲۵ تا ۳۹۵۵۰
۱۲	رسوبات کواترنری	۳۹۵۲۵ تا ۳۹۴۵۰

به سبب محدودیت صفحات پایان‌نامه به ذکر مختصر از زمین‌شناسی منطقه اکتفا شده است. با این حال باید به نکات ذیل نیز اشاره شود:

- شماره ردیف‌های سازند موجود در جدول (۱-۳) همان شماره‌ی سازند موجود در نقشه زمین‌شناسی منطقه یعنی شکل (۱-۳) می‌باشد.
- جهت تسهیل در امر تفسیر نقشه زمین‌شناسی منطقه، همچنین فهم آسان‌تر نقشه، برخی

سازندها که خصوصیت مشترکی داشتند، در یک گروه قرار داده شده‌اند. برای مثال رسوبات کواترنری خود شامل: نهشته‌های بادبزنی آبرفتی و دیستال، رسوبات ماسه‌ای اخیر و ... می‌گردند؛ که همه در یک گروه قرار داده شده‌اند.



شکل ۲-۳: (الف) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تهیه شده توسط وحدتی دانشمند و سعیدی (۱۳۶۹) با اندکی تغییر)، (ب) نقشه تکتونیکی شرق مازندران برگرفته از نقشه تکتونیکی ایران، نوگل سادات و الماسیان، ۱۹۹۳.

۳- شدت میدان مغناطیسی ذکر شده در جدول (۱-۳)، پس از آنالیز نقشه میدان مغناطیسی کل

منطقه به صورت جزء به جزء برای گروه‌های سازنده ۱ تا ۱۲ محاسبه شد.

۴- اطلاعات تکتونیکی موجود در نقشه زمین‌شناسی، بر روی نقشه مغناطیس منطقه آمده است

و از ذکر دوباره آن (جهت فهم آسان‌تر نقشه‌ی زمین‌شناسی) در شکل (۲-۳) خودداری شده است.

۵- نقشه زمین‌شناسی ارائه شده، برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ساری (وحدتی

دانشمند و سعیدی، ۱۳۶۹) بوده که پس از رعایت نکات فوق، دوباره در نرم‌افزارهای زمین-شناسی بازسازی شده است. (این دوباره کاری به این سبب بوده که جهت تلفیق دو نقشه زمین-شناسی و مغناطیس‌هوابرد نیاز به فایل لایه باز نقشه‌ها وجود دارد).

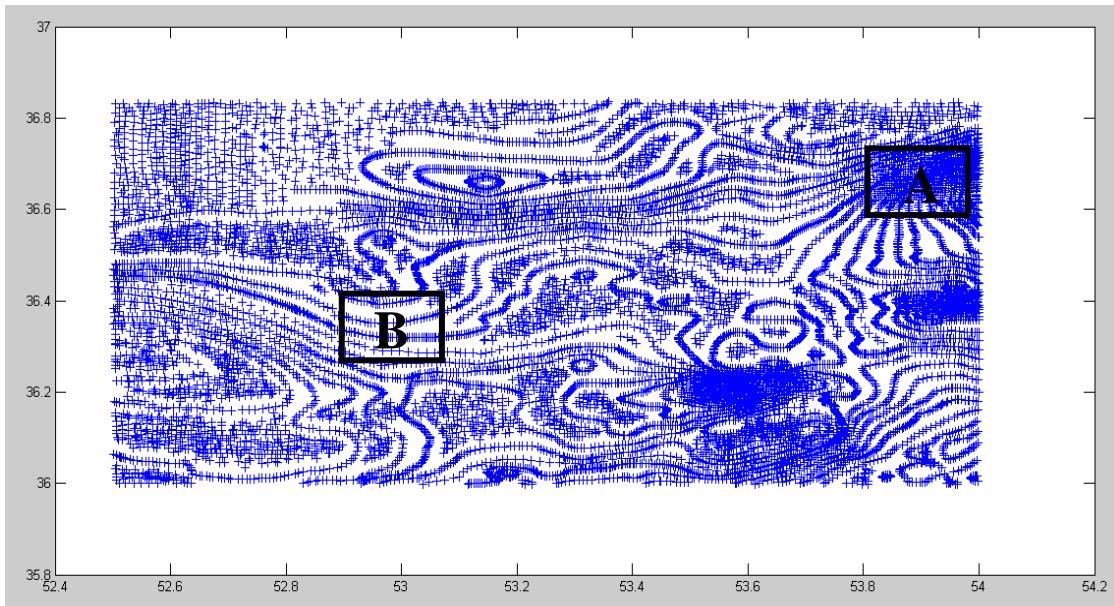
### ۴-۳ استخراج اطلاعات از نقشه‌ی منحنی تراز مغناطیس

نقشه‌های معمولی دارای محدودیت‌هایی از قبیل ثابت بودن مقیاس، سرعت پایین به هنگام سازی و پرهزینه بودن بازیابی اطلاعات جهت افروden عوارض جدید می‌باشند. همچنین به دلیل نیاز روز افزون به انجام تحلیل روی نقشه‌ها، انتخاب عوارض و استخراج ویژگی جدید از اطلاعات موجود، بهترین رویکرد، رقومی‌سازی آن‌هاست.

### ۱-۴-۳ رقومی‌سازی نقشه مغناطیس هوابرد

با تبدیل اطلاعات نقشه‌های موجود به شکل رقومی و سازگار، از انجام دوباره کاری‌ها و صرف هزینه‌های گزار جلوگیری خواهد شد. حتی اگر اطلاعات نقشه‌ها به هنگام نباشند، تکنیک رقومی‌سازی به مرتب اقتصادی‌تر است. زیرا به هنگام‌سازی نقشه‌های رقومی که در محیط کامپیوترا ذخیره شده‌اند، نسبت به بهنگام‌سازی نقشه‌های سنتی کاغذی کارآمدتر بوده و زمان به هنگام‌سازی و همچنین هزینه‌ها را کاهش خواهد داد. مثلاً بسیاری از نقشه‌های خطی موجود که در سیستم غیرمتريک تهيه شده‌اند برای استفاده از اين نقشه‌ها در سیستم متريک لازم است سیستم اندازه‌گيری غيرمتريک به سیستم متريک تبدیل شود. در مرحله‌ی رقومی‌سازی این تبدیل را می‌توان به سادگی انجام داد.

در این مطالعه بهدلیل در دسترس نبودن اطلاعات رقومی مغناطیسی هوابرد شرق مازندران، جهت انجام مطالعات آماری، ابتدا نسبت به رقومی‌سازی نقشه‌ی منحنی تراز مغناطیسی هوابرد منطقه در نرم‌افزار Surfer12 اقدام لازم صورت گرفت. درمجموع نقشه منحنی تراز مغناطیسی هوابرد شرق مازندران توسط تعداد ۱۱۴۳۶ نقطه رقومی‌سازی شد. نتایج رقومی‌سازی پس از نمایش در نرم‌افزار MATLAB در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



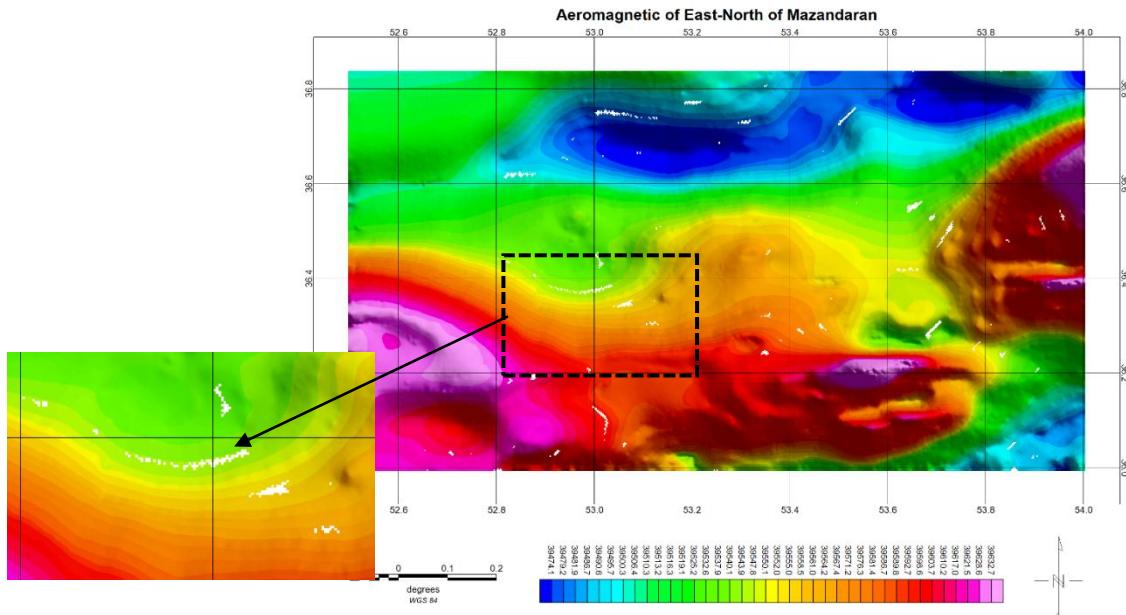
شکل ۳-۳: مختصات نقاط رقومی شده در مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه اعشاری<sup>۱</sup>)، نمایش داده شده در نرم‌افزار MATLAB؛ A: محدوده با تراکم نقاط بالا و B: محدوده با تراکم نقاط پایین

### ۲-۴-۳ ساخت ماتریس مربع بندی شده با اعمال کد شبکه‌بندی (کد (a))

اولین مشکلی که پس از رقومی‌سازی داده‌های مغناطیسی وجود داشت، تفاوت در نرخ تجمع داده‌ها بود. این مسئله در برخی از نرم‌افزارها ممکن است سبب بروز اشکال شود. این بدین سبب است که نرم‌افزارها با یکسری فرمول‌های ریاضی همچون مشتق، انتگرال، واریانس و ... سروکار دارند. تراکم و یا عدم آن در بخش‌های مختلف شبکه‌بندی مغناطیسی در نرم‌افزار Oasis montaje به شکل سفید

<sup>1</sup> decimal degree

شدگی یا خالی ماندن بخش‌های با تراکم پایین دیده می‌شود (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳: نقشه مغناطیس هوابرد شرق مازندران پس از نمایش اطلاعات رقومی در نرم‌افزار اوسیس مونتاژ<sup>۱</sup> شرکت ژئوسافت<sup>۲</sup> (نقاط سفید مناطق دارای تراکم نقاط کم هستند).

به دلیل اینکه رقومی‌سازی در این مطالعه بسیار دقیق و با تعداد نقاط بالا انجام شده است، سفید شدگی و یا خالی ماندن بخش‌های با تراکم پایین نقاط آنچنان به چشم نمی‌آید بنابراین می‌توان با افزایش ابعاد شبکه مدل‌سازی در این نرم‌افزار اوسیس مونتاژ بر این مشکل تا حدودی فائق آمد؛ که روش مناسب و قابل اعتمادی نیز است. لیکن در صورت اختلاف فاحش در تراکم نقاط رقومی شده، سفید شدگی و خالی ماندن بخش‌های کم تراکم به‌طور محسوسی مشاهده می‌گردد.

از آن جایی که در تمامی این نرم‌افزارها با مجموعه کدهای بسته سروکار داریم؛ یعنی فیلتر بر روی داده‌ها اعمال می‌گردد، اما از چگونگی اعمال آن آگاهی نداریم؛ در این تحقیق بر آن شدیدم تا ابتدا داده‌های مغناطیسی رقومی شده را به شکل ماتریس درآورده و سپس کدهای شبکه‌بندی و درون‌بایی را در نرم‌افزار MATLAB بر روی ماتریس داده‌های مغناطیس هوابرد اعمال کنیم.

<sup>1</sup> oasis montaj

<sup>2</sup> geosoft

برای ساخت ماتریس از روی داده‌های رقومی شده به ترتیب مراحل زیر صورت پذیرفت:

۱- ابتدا تعداد سطر و ستون‌های ماتریس مشخص گردد. برای نیل به این هدف ابتدا محدوده‌ی نقشه به مربع‌هایی تقسیم شده و بدین منظور مربع‌هایی به ابعاد  $2 \times 0.2 \times 0.2$  درجه انتخاب می‌شوند. در نهایت ۷۸ مربع در راستای افقی نقشه (طول‌های جغرافیایی) و ۴۵ مربع در راستای عمودی نقشه (عرض‌های جغرافیایی) ایجاد شد.

```
Mat = zeros( 45 , 78 );
MatIndex = zeros( 45 , 78 );
load mazan.mat
Mazan = mazan11000point;
for i = 1 : 11436
    x = Mazan( i , 1 );
    y = Mazan( i , 2 );
    z = Mazan( i , 3 );
    p = 1;
    q = 1;
```

۲- در این مرحله، مقادیر  $x$  (طول‌های جغرافیایی) و سپس  $y$ ‌ها (عرض‌های جغرافیایی) را به ترتیب بین طول‌های ۵۴ تا ۵۲.۴۸ درجه شرقی و ۳۶ تا ۳۶.۸ درجه شمالی به مقدار  $0.2^{\circ}$  درجه جداسازی شد.

```
while 1
    if ( x >= 52.5 + ( p - 1 ) * 0.02 ) && ( x <= 52.5 + ( p ) * 0.02 )
        z1 = p;
        break
    end
    p = p + 1;
end
while 1
    if ( y >= 36 - 0.02 + ( q - 1 ) * 0.02 ) && ( y <= 36 - 0.02 + ( q ) * 0.02 )
        z2 = q;
```

```

break
end
q = q + 1;
end

```

۳- سپس تعداد نقاط رقومی موجود در هر مربع و نیز جمع مقادیر میدان مغناطیسی به دست آمد.

```

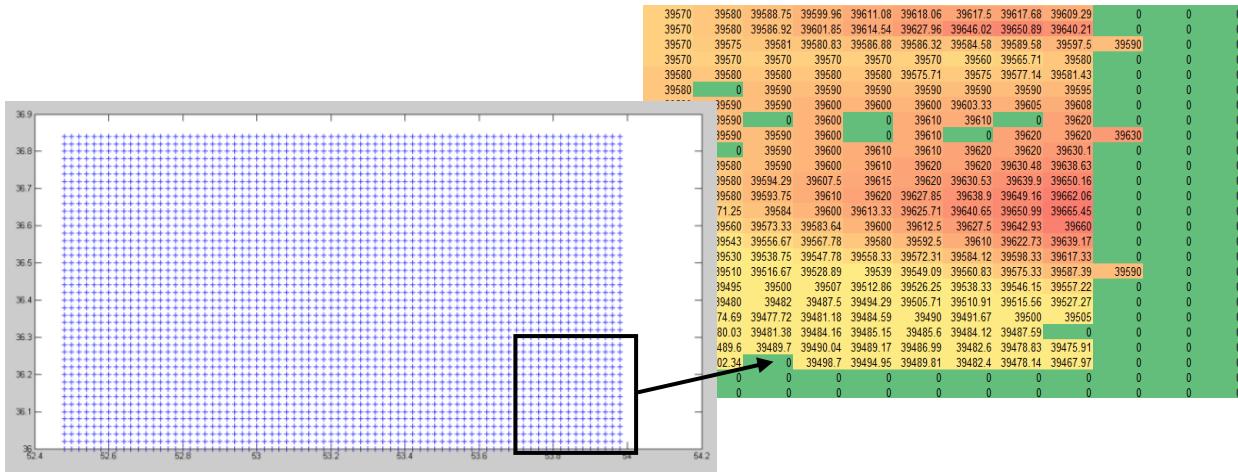
Mat( z2 , z1 ) = Mat( z2 , z1 ) + z;
MatIndex( z2 , z1 ) = MatIndex( z2 , z1 ) + 1;
end

```

۴- در نهایت، از تقسیم مجموع مقادیر میدان مغناطیسی موجود در هر مربع بر تعدادشان، مقدار میدان مغناطیسی میانگین معرف مرکز مربع استخراج شد.

```
MazanFinal = Mat ./ ( MatIndex + eps );
```

مختصات نقاط رقومی شده، پس از اعمال کد شبکه‌بندی در نرم‌افزار MATLAB به همراه مقادیر عددی نمایش داده شده از چند سطر و ستون انتهایی ماتریس در شکل ۳-۵ آمده است. به علت بزرگ‌تر در نظر گرفتن محدوده ماتریس و نبود داده در مربع‌های ۲ سطر و دو ستون انتهایی ماتریس، مقادیر صفر به طور آشکاری مشاهده می‌شوند. مقادیر دو سطر و دو ستون انتهایی در مراحل بعدی پردازش حذف شده است.



شکل ۳-۵: مختصات نقاط رقومی شده در محور مختصات جغرافیایی، پس از اعمال کد شبکه‌بندی نمایش داده شده در نرم‌افزار MATLAB به همراه مقادیر عددی نمایش داده شده از چند سطر و ستون انتهایی ماتریس

### ۳-۴-۳ حذف نقاط صفر با اعمال کد درون‌یابی (کد b)

به دلیل نبود داده در برخی از قسمت‌های نقشه مغناطیسی یعنی خالی بودن برخی محدوده‌ها، درایه‌ی ماتریس در آن محدوده برابر صفر خواهد شد. لذا بر آن شدیدم با اعمال کد درون‌یابی اثر مقادیر صفر از شبکه مغناطیسی خنثی و مدل نهایی بهبود داده شد. بدین منظور به ترتیب مراحل زیر انجام شد:

۱- ابتدا درایه‌های صفر ماتریس (سطر، ستون و مقدار) خارج شد.

```
[ Row , Col , a ] = find( Data == 0 );
```

۲- یک سطر و ستون صفر به ابتدا و انتهای ماتریس اضافه گردید. این سطرها و ستون‌ها تا انتهای فرآیند درون‌یابی تغییر نخواهند کرد و تنها در تسهیل روند درون‌یابی کمک خواهد کرد. به همین سبب داده‌ها از سطر و ستون دوم لحاظ می‌گردد؛ یعنی سطر و ستون اول به حساب نمی‌آید.

```
DataN = zeros( 43 + 2 , 76 + 2 );
```

```
DataN( 2 : 44 , 2 : 77 ) = Data;
```

۳- مقادیر صفر مستخرج، در مرکز ماتریس  $3 \times 3$  (که در اطرافش می‌باشد) قرار می‌گیرد. در زیر مثالی از مقادیر ماتریس شکل (۵-۳) آورده شده است.

39603	39605	39608
39610	0	39620
0	39620	39620

۴- سپس مقادیر غیر صفر در هر ماتریس با هم جمع می‌شود. در مثال فوق مجموع ۷ درایه غیر صفر محاسبه شد.

۵- در نهایت از تقسیم مجموع مقادیر غیر صفر بر تعداد درایه‌های غیر صفر ماتریس  $3 \times 3$ ، مقدار میانگینی به دست می‌آید؛ که این مقدار جایگزین درایه مرکزی ماتریس  $3 \times 3$  خواهد شد.

```

Win = zeros( 3 , 3 );
for i = 1 : 413
    for j = 1 : 413
        a = Row( j ) + 1;
        b = Col( i ) + 1;
        Win = DataN( a - 1 : a + 1 , b - 1 : b + 1 );
        %
        aa = find( Win > 0 );
        %
        cc = zeros(1,length(aa));
        cc = 0;
        jj = 1;
        for k = 1 : 9
            if Win(k) ~= 0
                cc(jj) = Win(k);
                jj = jj + 1;
            end
        end
        Data( a - 1 , b - 1 ) = mean( cc );
    end
end

```

با ادامه فرآیند گفته شده در بالا، مقادیر صفر از سراسر ماتریس حذف شده و مقادیر میانگین حاصل

از درون یابی ماتریس های  $3 \times 3$  جایگزین خواهد شد. در شکل (۳-۶) بخشی از ماتریس پس از اعمال

فرآیند درون یابی نشان داده شده است. در شکل زیر سطرهای ابتدایی نشان دهنده جهت جنوب و

سطرهای انتهایی نشان دهنده جهت شمال نقشه مغناطیسی منطقه می باشد.

AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX
1	39545	39544	39544	39548	39545	39555	39554	39553	39552	39553	39552	39552	39551	39550	39549	39548	39547	39549	39549	39549	39549	39549	39549	39549	39549	39549	39549	39549	
2	39547	39548	39560	39554	39558	39561	39561	39568	39550	39547	39542	39538	39531	39525	39517	39511	39503	39499	39497	39497	39498	39495	39493	39490	39489	39488	39487	39485	
3	39552	39553	39563	39565	39565	39569	39569	39567	39567	39563	39560	39554	39553	39550	39549	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	
4	39564	39562	39564	39570	39576	39582	39585	39584	39581	39578	39572	39567	39568	39558	39550	39540	39524	39517	39510	39505	39504	39498	39492	39489	39487	39487	39488	39488	
5	39574	39573	39573	39579	39578	39562	39569	39568	39569	39569	39560	39565	39567	39568	39568	39569	39569	39569	39569	39569	39569	39569	39569	39569	39569	39569	39569	39569	
6	39585	39583	39583	39586	39588	39593	39598	39600	39601	39601	39602	39599	39593	39598	39592	39588	39585	39576	39565	39565	39562	39519	39507	39501	39496	39492	39489	39487	39486
7	39593	39591	39590	39590	39590	39591	39591	39592	39593	39593	39598	39592	39588	39583	39576	39565	39561	39562	39518	39512	39508	39502	39498	39493	39487	39487	39486	39486	
8	39600	39600	39600	39599	39595	39591	39588	39585	39583	39581	39581	39581	39581	39581	39576	39567	39561	39560	39540	39530	39523	39518	39508	39502	39495	39494	39492	39491	
9	39606	39607	39608	39609	39608	39604	39604	39599	39583	39571	39571	39571	39571	39571	39570	39564	39554	39552	39530	39524	39518	39514	39510	39507	39502	39500	39497	39499	
10	39611	39613	39615	39622	39624	39641	39658	39662	39661	39649	39630	39614	39602	39593	39576	39569	39569	39561	39544	39533	39521	39516	39515	39514	39514	39514	39513		
11	39612	39614	39619	39624	39641	39658	39662	39661	39649	39630	39614	39602	39593	39576	39569	39569	39561	39544	39533	39521	39516	39515	39514	39514	39514	39513			
12	39608	39610	39615	39622	39636	39651	39660	39660	39651	39623	39623	39619	39611	39606	39598	39581	39571	39561	39564	39564	39562	39524	39523	39521	39520	39520	39521		
13	39600	39600	39602	39607	39613	39619	39622	39623	39619	39611	39606	39598	39591	39583	39570	39570	39567	39562	39558	39553	39547	39543	39537	39531	39528	39527	39529	39530	
14	39588	39587	39586	39586	39586	39583	39581	39579	39577	39577	39576	39570	39566	39563	39554	39554	39553	39555	39553	39552	39548	39544	39542	39542	39543	39543	39544		
15	39580	39578	39574	39571	39571	39567	39566	39564	39564	39549	39549	39549	39549	39549	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545		
16	39573	39570	39566	39562	39562	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39565	39565	39565	39565	39565	39565	39565	39565		
17	39570	39567	39563	39568	39568	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39564	39565	39565	39566	39568	39569	39569	39569	39569	39567		
18	39569	39566	39563	39563	39568	39564	39562	39562	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560	39560		
19	39566	39564	39562	39560	39558	39556	39553	39551	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550		
20	39563	39561	39559	39558	39556	39553	39551	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550		
21	39560	39558	39556	39556	39556	39553	39551	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550		
22	39558	39556	39554	39554	39554	39552	39552	39551	39551	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550		
23	39557	39556	39554	39554	39553	39551	39551	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550	39550		
24	39557	39556	39553	39552	39552	39550	39548	39547	39547	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548	39548		
25	39556	39554	39552	39552	39552	39550	39549	39547	39547	39547	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546	39546		
26	39554	39552	39550	39550	39549	39547	39547	39547	39547	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545	39545		
27	39552	39549	39547	39547	39546	39544	39544	39543	39543	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542	39542		
28	39546	39543	39544	39544	39544	39542	39540	39540	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539	39539		
29	39537	39536	39537	39537	39537	39537	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536	39536		
30	39529	39529	39530	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531	39531		
31	39516	39518	39520	39521	39524	39525	39525	39518	39518	39517	39517	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516		
32	39504	39507	39510	39511	39519	39522	39522	39521	39518	39517	39517	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516	39516		
33	39495	39499	39500	39503	39506	39511	39513	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515	39515		
34	39486	39490	39492	39495	39496	39498	39498	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497	39497		
35	39481	39483	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481	39481		
36	39479	39480	39482	39483	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484	39484		
37	39479	39479	39481	39483	394																								

#### ۴-۴-۳ بررسی کیفیت داده‌ها پس از اعمال مجموعه کدهای مربع‌بندی

اِشکال عمدہای که بر مجموعه کدهای مربع‌بندی نوشته شده و مورد استفاده در این پایان‌نامه وارد است، پایین آمدن کیفیت مجموعه داده‌ها است. به سبب این که این کدها، در محدوده‌ی تعیین‌شده تعداد داده‌ها را با یکدیگر جمع نموده و از آن‌ها میانگین گرفته و آن را به مرکز اجزاء مربعی اختصاص می‌دهند. این فرآیند میانگین‌گیری، با کاهش تعداد داده‌ها همراه بوده و این امر شاید کاهش کیفیت داده‌ها را سبب گردد؛ اما باید دید که آیا این کاهش کیفیت در پایان‌نامه حاضر چشم‌گیر بوده است؟، به چه میزان بر روی کیفیت داده‌ها تأثیر گذاشته است؟

برای درک صحیح از میزان تأثیرگذاری این کدها ذکر آمار و نکات ذیل، می‌تواند مفید واقع شود:

۱- تعداد نقاط برداشت شده میدان مغناطیسی در محدوده‌ی نقشه مغناطیسی هوابرد بابل ۲۳۱ نقطه است.

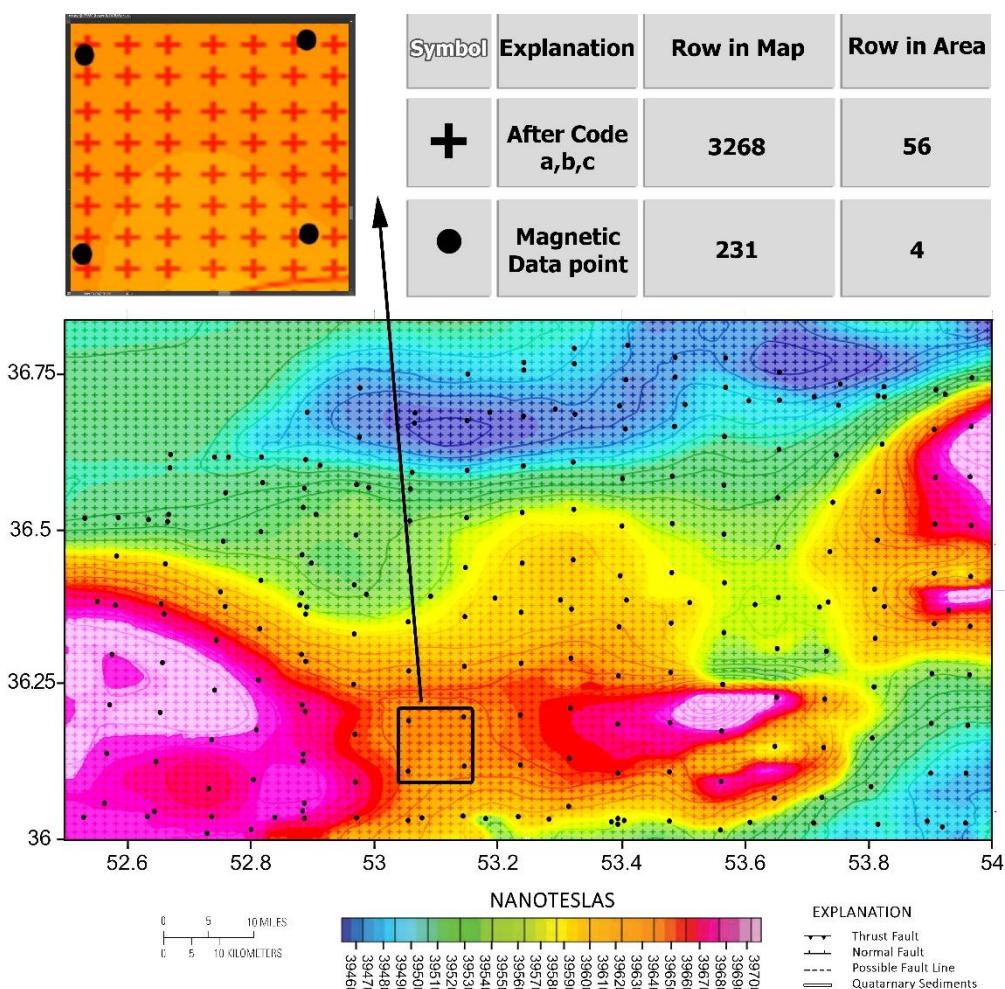
۲- (درصورتی که) تعداد نقاط داده‌ای استخراج شده از روی نقشه‌ی منحنی تراز ۱۱۴۳۶ نقطه است (قریباً ۵۰ برابر تعداد نقاط برداشت واقعی).

۳- تعداد داده‌ها پس از اعمال مجموعه کدهای مربع‌بندی به ۳۲۶۸ داده تقلیل یافته است (بیش از ۱۴ برابر تعداد نقاط برداشت واقعی).

در شکل (۳-۷) نیز محدوده‌ی تقریباً مربعی به ابعاد  $13 \times 15$  کیلومتر مربع در نظر گرفته شد؛ که مطابق آن مشاهده می‌گردد در ازای ۴ نقطه برداشت واقعی داده موجود در مربع، ۵۶ داده پس از اعمال مجموعه کدهای مربع‌بندی وجود دارد و آمار این محدوده نیز میزان ۱۴ برابری داده‌های ذکر شده فوق را تأیید می‌نماید. ۱۴ برابر بودن تعداد داده‌های موجود در اجزاء مربعی پس از اعمال مجموعه کدهای مربع‌بندی نسبت به داده‌های واقعی برداشت شده در هر مربع یعنی این که داده‌ها از کیفیت مطلوب و قابل قبولی برخوردارند، حتی شاید اگر تعداد داده‌ها کمتر از این مقدار هم بود باز هم

داده‌ها به حد بحرانی نمی‌رسید. در نتیجه با توجه به این مسئله و نیز این‌که مرز گسل‌های منطقه با وضوح قابل قبولی مشخص شدند، به این مقدار کیفیت بسنده شد. لیکن پیشنهاد می‌گردد در مطالعات بعدی ابتدا درون‌بابی انجام گیرد و سپس مرحله مربع بندی صورت پذیرد. زیرا این امر نه تنها تعداد داده‌های رقومی شده را محفوظ می‌دارد، بلکه با تغییر مطلوب ابعاد مربع‌بندی می‌توان به بالاترین میزان کیفیت داده‌ها دست یافت.

کل فرآیندهای فوق جهت حذف سفیدشدگی توسط تغییر ابعاد مربع‌بندی در نرم‌افزار اوسیس مونتاژ شرکت ژئوسافت پیگیری شد؛ که جهت رعایت اختصار در پیوست (الف) آورده شده است.



شکل ۷-۳: نقشه مغناطیسی شرق مازندران حاصل از اعمال مجموعه کدهای شبکه‌بندی و درون‌بابی به همراه ذکر موردی از مقادیر داده‌های واقعی مغناطیسی و مقادیر داده‌ها پس از اعمال کد در محدوده‌ی جزء (شکل بالایی) و کل (پایینی)

## ۳-۵ پردازش و بررسی شدت میدان مغناطیس منطقه

از مقایسه داده‌های خام شدت میدان مغناطیس کل منطقه مورد مطالعه و داده‌های تکتونیکی شرق مازندران می‌توان به یکسری نتایج اولیه رسید که مهمترین آن به شرح ذیل می‌باشد:

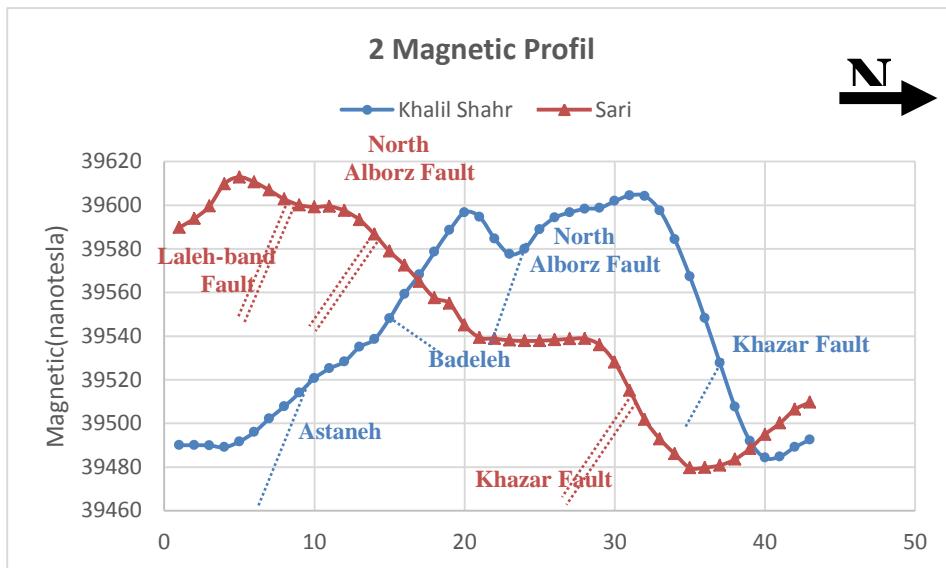
۱- مغناطیس کل منطقه، رابطه تنگاتنگی با توپوگرافی منطقه دارد، شاید در نگاه اول موضوع مهمی فرض نگردد؛ اما زمانی این موضوع دارای ارزش می‌گردد که بدانیم حرکات تکتونیکی (گسل‌های منطقه) سازنده‌ی ریخت‌شناسی عمومی این منطقه می‌باشند. یعنی توپوگرافی منطقه، از تنش‌ها، کشش‌ها و برش‌های تحت تأثیر حرکات بلوک‌ها نسبت به یکدیگر ایجاد شده است. برای مثال ساز و کار گسل خزر به‌گونه‌ای بوده که با افزای آشکار سبب شکل‌گیری بلندی البرز در لبه حوضه کاسپین شده است و نیز سازنده‌ای قدیمی‌تر را بر روی نهشته‌های کواترنری آورده است.

۲- در پیوست ب، پروفیل‌های توپوگرافی شهرهای مختلف استان مازندران به همراه مقادیر شدت میدان مغناطیس کل آن‌ها آورده شده است. همچنین در شکل (۳-۱۴)، رابطه توپوگرافی و شدت میدان مغناطیسی نشان داده شده است.

۳- شکل (۳-۸) که در آن فقط به ذکر دو پروفیل مغناطیسی منطقه اکتفا شد، تغییرات میدان مغناطیسی را در دو شهر ساری و خلیل‌شهر به ازای عرض‌های جغرافیایی مختلف نشان می‌دهد، تطابق بسیار خوبی با اطلاعات تکتونیکی منطقه دارد. به‌طوری‌که تغییر ناگهانی لیتولوژی در قسمت‌های جنوبی گسل خزر با افزایش مقادیر شدت میدان مغناطیس کل همراه است و سایر گسل‌ها نیز از رابطه خاصی تبعیت می‌کنند.

با توجه به شکل (۳-۸)، مشاهده می‌شود که هرچه از طول‌های جغرافیایی بالاتر (خلیل‌شهر) به سمت طول‌های جغرافیایی پایین‌تر (ساری) بروید، مرز گسل خزر و شمال البرز نیز از عرض‌های جغرافیایی بالاتر به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر تغییر مکان می‌یابد. از این مطلب استنباط می‌شود

که امتداد این گسل‌ها شمال شرقی-جنوب‌غربی است (محور x در نمودار همان عرض جغرافیایی است که هر ۱ شماره در آن  $20^{\circ}$  درجه جغرافیایی است).



شکل ۳: نمایش ۲ پروفیل از شدت میدان مغناطیس منطقه به همراه پیاده‌سازی اطلاعات تکتونیکی منطقه بر روی آن

همانند داده‌های برداشت شده توسط روش مغناطیس زمینی، داده‌های مغناطیس هوابرد نیز جهت تفسیر نیازمند اعمال فیلترها و تصحیحاتی می‌باشند. بعلاوه پردازش‌های خاصی نیز بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد صورت می‌گیرد؛ که آن را از روش مغناطیس زمینی متمایز می‌نماید. در این مطالعه به سبب در دسترس نبودن اطلاعات خام برداشت مغناطیس هوابرد از روش رقومی‌سازی نقشه‌ی مغناطیس هوابرد شرق مازندران استفاده شده است؛ که همین امر موجب شده تا نیازی به تصحیحات ویژه نباشد و تنها فیلترهای مرسوم (از قبیل تصحیح IGRF، فیلتر ادامه فراسو، میانگین‌گیری پی‌در-پی<sup>۱</sup> و فیلترهای لبه‌یابی) بر روی داده‌های مغناطیس هوابرد اعمال گردد. با این حال همین فیلترهای عادی نیز نتایج قابل قبول و ارزشمندی را در اختیار قرار داده است؛ که در ادامه به شرح نتایج حاصل

<sup>۱</sup> Running Average

از اعمال فیلترهای مذکور پرداخته شده است.

### ۳-۵-۱ فیلتر میانگین‌گیری پی‌درپی (کد c)

از جمله ساده‌ترین فیلترها جهت پردازش داده‌های ژئوفیزیکی (اعم از مغناطیس، گرانی و لرزه و ...)، فیلتر میانگین‌گیری پی‌درپی است. در واقع اساس این روش یک جمع و تقسیم ساده است، لیکن با اعمال آن بر روی مجموعه‌ی داده‌های مغناطیس هوابرد تا حدودی می‌توان اثر بی‌هنجری‌های محلی را حذف نموده و بی‌هنجری‌های منطقه‌ای را بهتر درک نمود. برای دست یافتن به این مقصود، کد ساده‌ای در نرم‌افزار MATLAB نوشته شد که این کد در زیر آورده شده و به‌طور مختصر توضیح داده شده است.

#### **Running Average:**

```
>> for j=1:78
for i=1:43
c=data(2×i-1:2×i,2×j-1:2×j);
d=find(c);
y(i,j)=sum(sum(c(d)))/length(d);
end
end
```

ماتریس زیر قسمتی از داده‌های مغناطیس هوابرد شرق مازندران است؛ که پس از اعمال کد میانگین‌گیری در نرم‌افزار MATLAB پاسخ آن به نمایش درآمده است.

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 39606.67 & 39600 & \dots & 39488.63 & 39500 \\ 39613.33 & 39610 & \ddots & 39489.18 & 39495 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 39515.14 & 39514.96 & \dots & 39477.69 & 39471.94 \\ 39515.21 & 39515.72 & \dots & 39477.64 & 39471.94 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{after running average}} Z_2 = \begin{bmatrix} 39624.39 & \dots & 39493.2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 39509.52 & \dots & 39482.39 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{then}} Z_3 = \dots$$

فیلتر میانگین‌گیری دارای محدودیت‌های زیر است:

- ۱ - تکرار روند میانگین‌گیری به تعداد محدود؛ یعنی یک یا دو بار قابل قبول است و بیش از آن معمول نبوده و توصیه نمی‌گردد (هرچند در این مطالعه حتی تا چهار بار این کار انجام شد، با

این حال تعدد فرآیند بیش از دو بار هیچ معنایی ندارد).

۲- نمی‌توان داده‌ها را به سطوح عمقی خاصی نسبت داد

۳- شاید بتوان تفسیر کیفی از جهت شیب برخی گسل‌ها و ساختارهای منطقه داشت؛ اما نمی‌توان

به این تفسیر زیاد اعتماد کرد (هرچند در ادامه مشاهده می‌گردد که در برخی موارد خوب

جواب داده است).

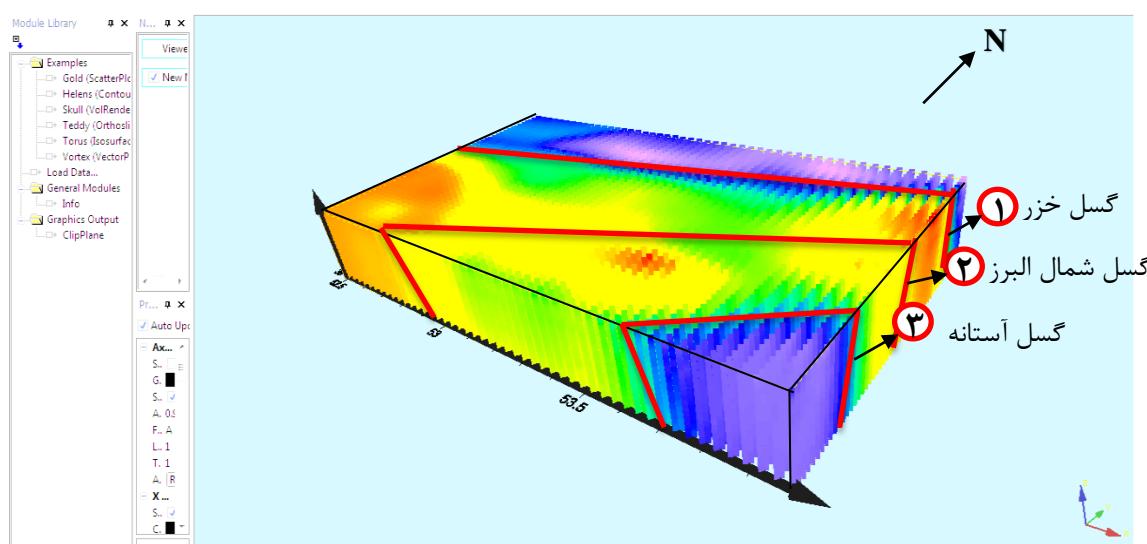
۴- می‌توان تفسیر تقریباً کیفی و حتی شبه کمی از امتداد گسل داشت. زیرا این مقوله مربوط به

گسترش افقی ساختار است نه عمقی.

۵- تفسیر کمی شیب گسل پس از اعمال این فیلتر غیرمعمول و حتی ناممکن است.

داده‌ها پس از اعمال فیلتر میانگین‌گیری در نرم‌افزار MATLAB به فرمت نرم‌افزار Voxler درآمده

و در این نرم‌افزار به صورت سه‌بعدی ترسیم شده‌اند (شکل ۹-۳).



شکل ۹-۳: نقشه مغناطیس شرق مازندران حاصل از اعمال کد میانگین‌گیری پی‌درپی و نمایش در نرم‌افزار Voxler

از یافته‌های حاصل از شکل ۹-۳ می‌توان نتایج آتی را به دست آورد (ضمیماً یادآور می‌گردد که

موقعیت گسل‌هایی که در موارد زیر به آن اشاره می‌گردد در شکل (۱۰-۳) آورده شده است):

- ۱ - گسل خزر امتداد شمال شرقی-جنوب غربی دارد و جهت شیب آن به سمت جنوب است.
- ۲ - گسل شمال البرز نیز امتداد و جهت شیب مشابه گسل خزر دارد.
- ۳ - جهت شیب گسل‌های بادله و لَلَهِ بند در شکل به خوبی مشخص نشده است.
- ۴ - مجموعه گسلی آستانه، جهت شیب به سمت جنوب شرق و امتداد شمال شرقی-جنوب‌غربی دارد.

با وجود معایب این فیلتر و همچنین سادگی فرآیند پردازشی آن، نتایج قابل قبولی از اعمال کد نوشته شده برای این فیلتر به دست آمد؛ اما برای درک صحیح‌تر از منطقه لازم است از فرآیندهای پردازشی دقیق‌تر استفاده شود.

### ۲-۵-۳ فیلتر ادامه‌ی فراسو

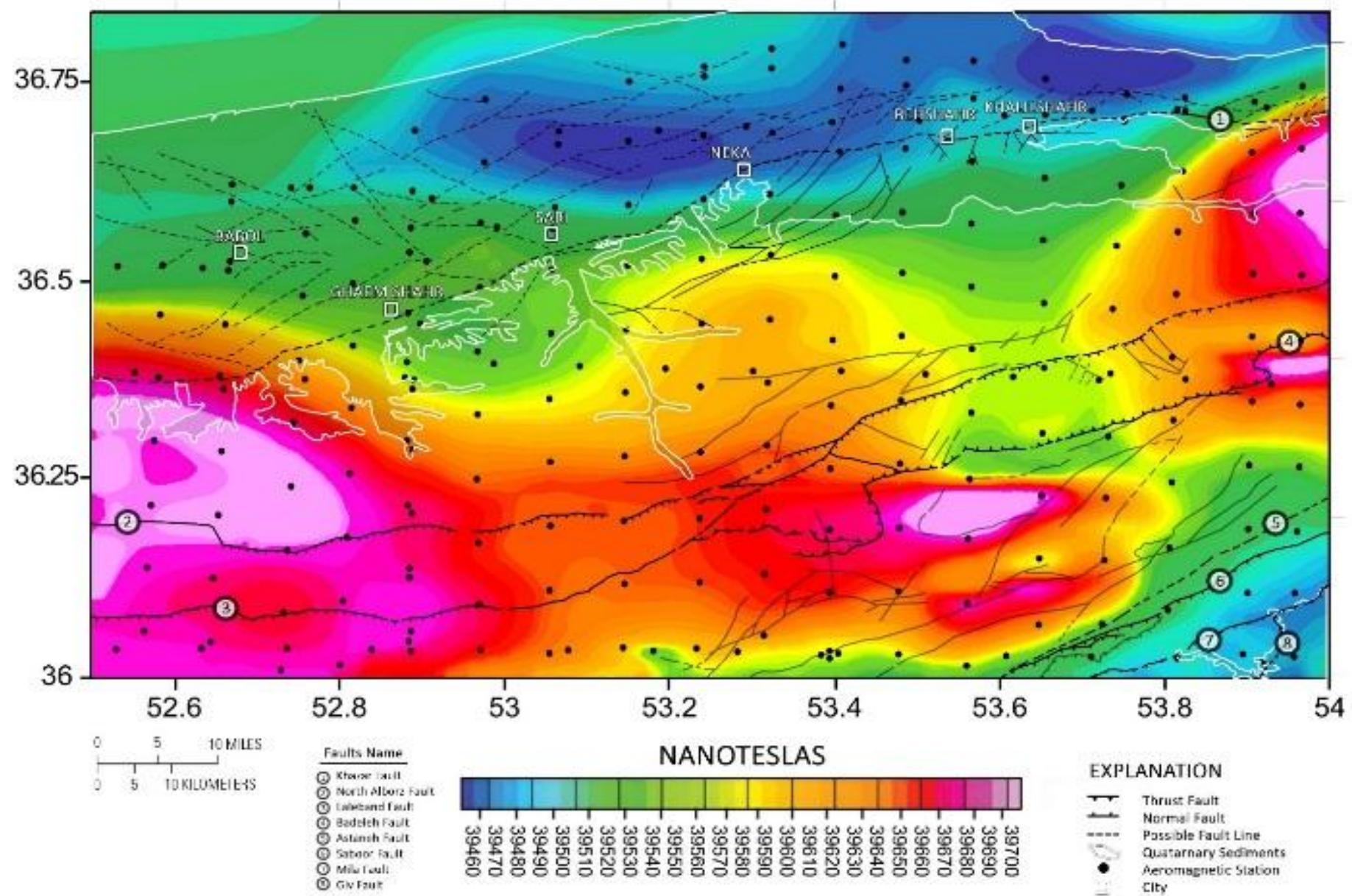
پس از انجام مراحل ذکر شده در بالا، از فیلتر ادامه‌ی فراسو استفاده شد و نتیجه آن با تلفیق نقشه شدت میدان مغناطیسی کل شرق مازندران و نقشه‌های زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه دنبال شد. پس از تلفیق نقشه مغناطیسی هوابرد و همچنین زمین‌شناسی شرق مازندران در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، محل گسل‌های زمین‌شناسی، محدوده رسوبات کواترنری، مختصات شهرها و مختصات نقاط برداشت هوایی بر روی نقشه تلفیقی نهایی پیاده‌سازی شد. نقشه نهایی در شکل (۳-۱۰) به نمایش درآمده است.

با اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو با ارتفاع بالاتر، پاسخ مغناطیسی مشاهده شده از سطوح ارتفاعی پایین‌تر ناشی می‌گردد. در نتیجه، با اعمال این فیلتر در مرز گسل و یا مرز بین دولایه‌ی شیبدار با خواص مغناطیسی متفاوت، می‌توان دید که مکان قرارگیری بی‌亨جاری مغناطیسی ناشی از مرز بین دو لایه روی نیمرخ‌های مغناطیسی با افزایش ارتفاع به طور جانبی در جهت شیب گسل جابه‌جا می‌شوند. پس با توجه به این مطلب می‌توان شیب لایه‌های زمین‌شناسی موجود در یک منطقه را از روی داده‌های

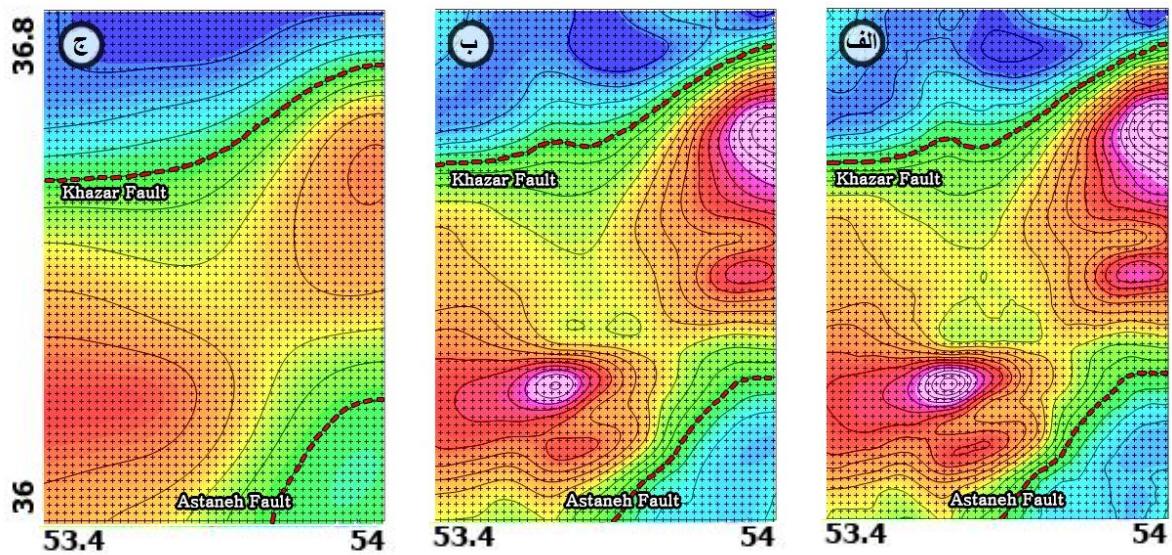
مغناطیسی برداشت شده از منطقه تعیین کرد.

در ادامه، فیلتر ادامه فراسو برای سطوح ارتفاعی متعدد (۰ تا ۳۵۰۰۰) بر روی داده‌های مغناطیسی شرق مازندران اعمال شد (در شکل ۱۱-۳ این مقادیر به ازای سه سطح ارتفاعی ۳۰، ۳۰- و ۱۰۰۰- متر بین طول‌های جغرافیایی ۵۴ تا ۵۳.۴ و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ تا ۳۶.۸ نمایش داده شده است که شهرهای بهشهر و خلیل‌شهر را پوشش داده است). نتایج به دست آمده نخست به فرمت نرم‌افزار Surfer و سپس به فرمت نرم‌افزار Voxler درآورده شد. نقشه‌های فیلتر شده، هر کدام ماتریسی از سطح ارتفاعی خاص هستند (البته معرف عمق دقیق نمی‌باشند). با روی هم قرار دادن این ماتریس‌ها در واقع تانسوری به دست می‌آید که یک دید وسیع از رفتار گسل در زیر سطح زمین می‌دهد. با تلفیق اطلاعات سطحی سازندها، رسوبات کواترنری و گسل‌ها با تانسور نهایی مغناطیسی، نمایی از خصوصیات زیرسطحی تکتونیکی پدید آمده است؛ که در شکل (۱۲-۳) مشاهده می‌گردد.

جهت ارائه‌ی فهمی صحیح از عوارض تکتونیکی، با درک صحیح از تکتونیک سطحی و تغییر در چینش رنگی ماتریس سطحی در نرم‌افزار Voxler (تا حدی که مرزهای گسلی را به بهترین وجه نشان دهد و صحیح‌ترین و قابل‌هضم‌ترین دید را در مخاطب فراهم آورد) و تثبیت آن و سپس اعمال آن بر روی کلیت تانسور، نقشه‌ای سه‌بعدی از شدت میدان مغناطیسی کل منطقه تشکیل شد؛ که در شکل (۱۳-۳) به نمایش درآمده است. مطابق شکل (۱۰-۳)، تطابق قابل قبولی میان خطواره‌های مغناطیسی و مرزهای تکتونیکی گسل‌های موجود در منطقه مشاهده می‌گردد. البته گسل خزر بین طول‌های جغرافیایی ۵۲.۲ تا ۵۴ یعنی شهرهای نکا، بهشهر، خلیل‌شهر تا گلوگاه دارای تطابق قابل قبول بوده و در طول‌های پایین‌تر یعنی ۵۲.۵ تا ۵۳.۲ (شهرهای ساری، قائم‌شهر و بابل) مطابقت دیده نمی‌شود.



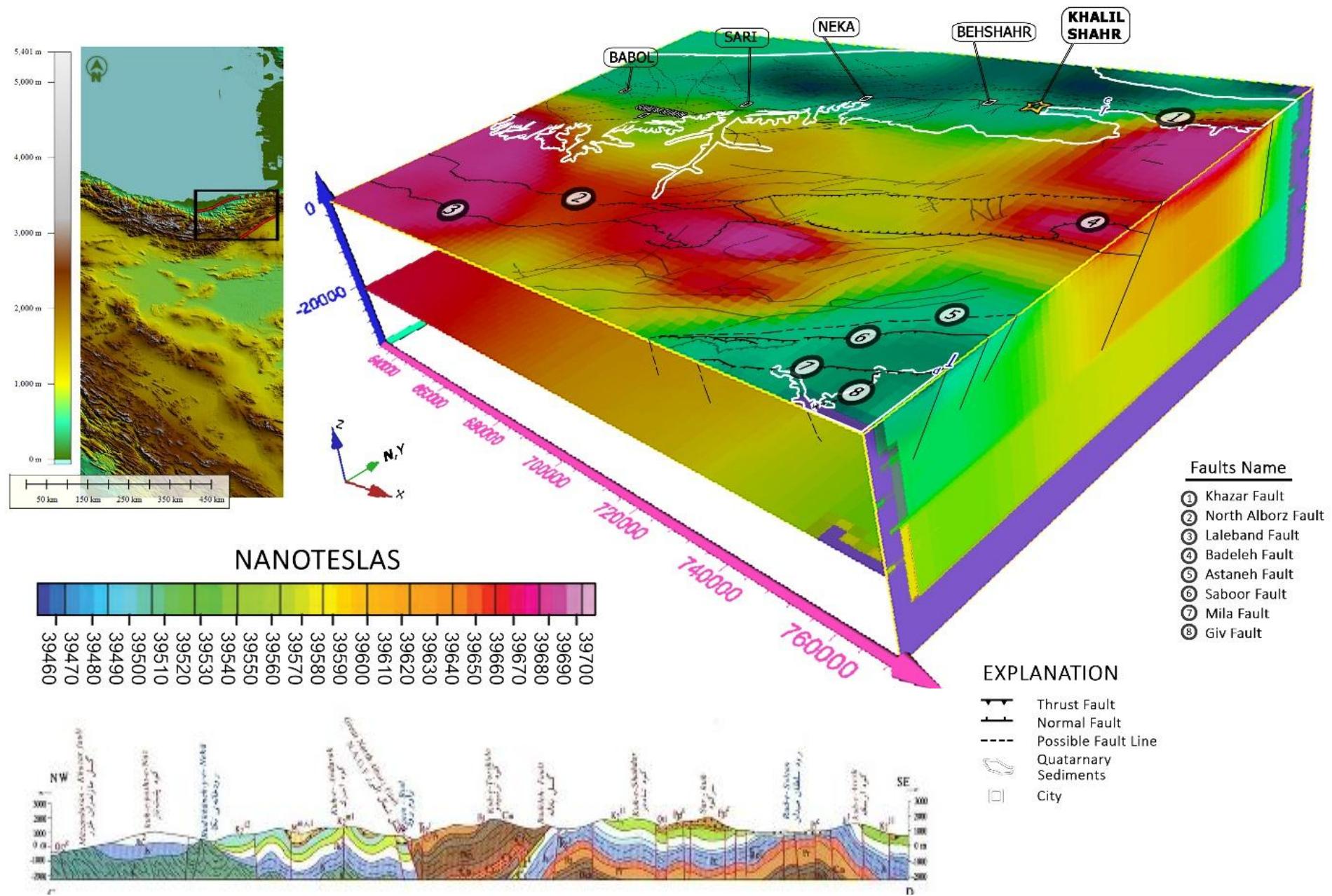
شکل ۳-۱۰: نقشه نهایی مغناطیس هوابرد ۱:۲۵۰۰۰ شرق مازندران پس از تلفیق نتایج مغناطیسی با اطلاعات نقشه زمین‌شناسی ساری



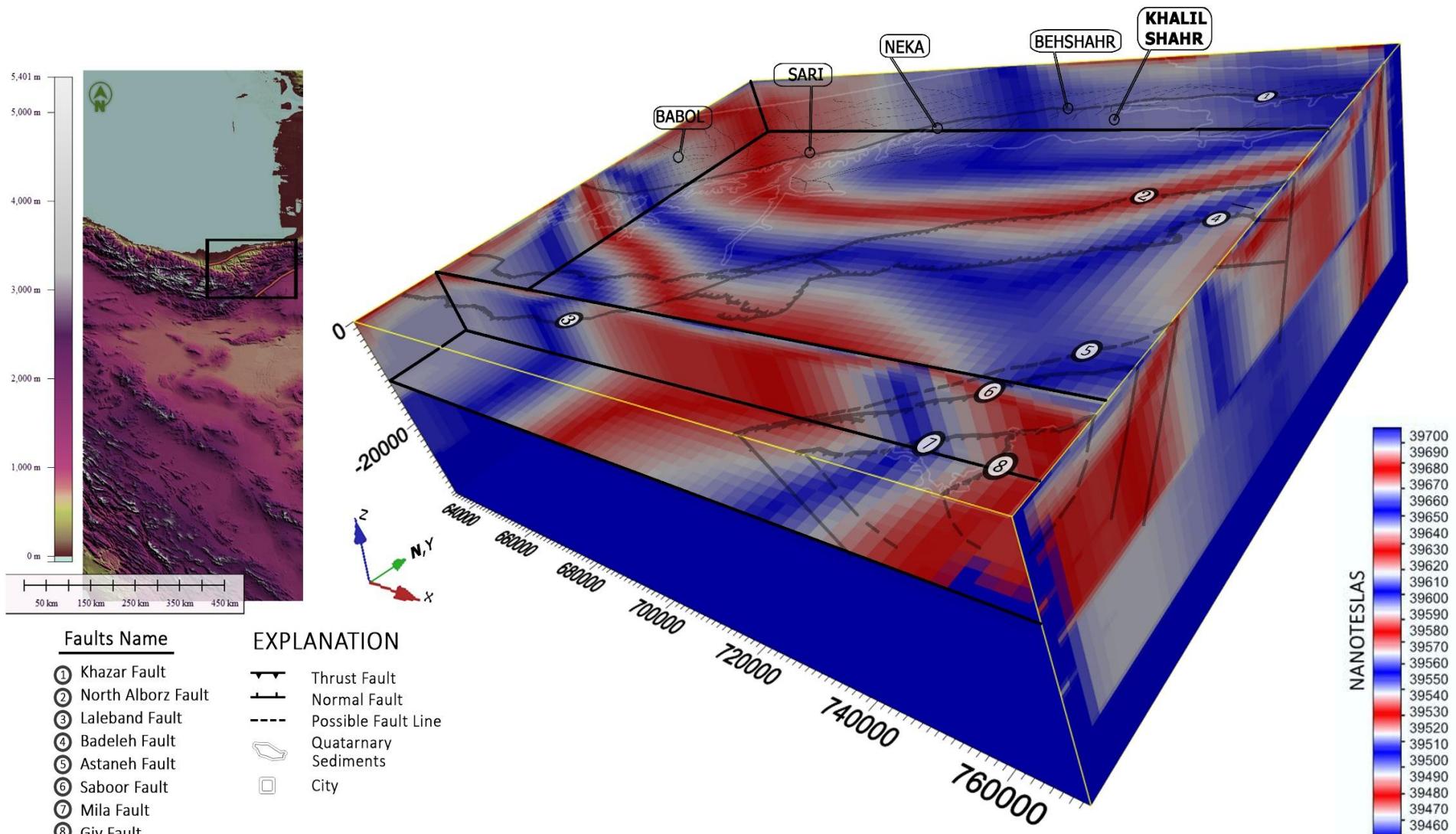
شکل ۱۱-۳: شبکه‌بندی‌های مغناطیسی پس از اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو به ازای سطوح ارتفاعی مختلف،  
الف) ۳۰ متر، ب) ۱۰۰۰ متر، ج) ۱۰۰۰۰ متر

### ۱-۲-۵-۳ اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو پس از تصحیح IGRF

بر روی داده‌های مغناطیس منطقه پس از تصحیح IGRF نیز فیلتر ادامه‌ی فراسو اعمال شد. همچنین پس از حذف نقاط سفید از نقشه توسط تغییر مش‌بندی یا مربع‌بندی در نرم‌افزار اوسیس مونتاژ، فیلتر ادامه‌ی فراسو برای سطوح ارتفاعی مختلف اعمال شد. همچنین همین داده‌ها پس از تصحیح IGRF دوباره پردازش شده و فیلتر ادامه‌ی فراسو بر روی آن‌ها اعمال گردید. لذا به سبب اختصار در نگارش این فصل، کلیه موارد مذکور در پیوست ج آورده شده‌اند.



شکل ۱۲-۳: تansور حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو، به ازای سطوح ارتفاعی مختلف، پس از نمایش سه بعدی در نرم افزار Voxler و تلفیق با نتایج زمین شناسی



شکل ۱۳-۳: تansور حاصل از اعمال فیلتر ادامه فراسو، به ازای سطوح ارتفاعی مختلف، پس از نمایش سه بعدی در نرم افزار Voxler و تلفیق با نتایج زمین‌شناسی

نمایش گرافیکی تانسور به دست آمده، طرح کلی و جامع تغییرات گسل‌های منطقه از جمله گسل خزر، شمال البرز، بادله، آستانه، میلا و صبور نسبت به محور  $x$ ,  $y$  و  $z$  می‌باشد. این طرح تأییدی است بر بسیاری از فرضیات و نظریات زمین‌شناسی و تکتونیکی و البته ردی بر برخی دیگر از فرضیات. تانسور مذکور در واقع طرح جامعی از میزان شیب، جهت شیب، امتداد و اطلاعات زمین‌شناسی ساختاری منطقه می‌باشد؛ بنابراین با توجه به شکل (۱۱-۳) تا (۱۳-۳) می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- ۱- گسل شماره ۱ (گسل خزر)، ساز و کاری فشارشی [نظری و شهیدی، ۱۳۹۰] داشته و با توجه به شیب عمومی  $80-70$  درجه SE (بین سطوح ارتفاعی  $0$  تا  $15000$  متر) از نوع معکوس می‌باشد (بنابراین این شیب بین سطوح ارتفاعی  $0$  تا  $3000$  متر کمتر از  $45$  درجه SE می‌باشد که نشان‌دهنده تراستی بودن گسل در سطح است). تغییرات شدید شدت میدان مغناطیسی در طرفین گسل به دلیل تغییرات لیتولوژی (رسوبات کواترنری با مغناطیس پذیری کمتر در شمال گسل و سازندهای عمدتاً آهکی با مغناطیس پذیری بالاتر در جنوب گسل) به صورت کاملاً مشهودی در شکل‌های ۱۱-۳ و ۱۲-۳ قابل رؤیت است. این تغییرات در طول-های جغرافیایی بالاتر (قسمت‌های شرقی نقشه)، شدیدتر است. این گسل دارای امتداد عمومی N80E می‌باشد. طول (درازا) این گسل در نقشه مذکور در حدود  $160$  کیلومتر می‌باشد.
- ۲- گسل شماره ۲ (گسل شمال البرز)، ساز و کاری فشارشی [نظری و شهیدی، ۱۳۹۰] داشته و با توجه به شیب عمومی  $45$  درجه SE (بین سطوح ارتفاعی  $0$  تا  $15000$  متر) از نوع گسل تراستی می‌باشد. قسمت‌های شمالی گسل دارای شدت میدان مغناطیسی بالاتر (در حدود  $39700$  نانوتسلا) نسبت به بخش‌های جنوبی (که دارای شدت میدان مغناطیسی  $39610$  نانوتسلا هستند) می‌باشد. این گسل دارای امتداد عمومی N75E می‌باشد که انطباق قابل توجهی بین مرز مغناطیسی و مرز تکتونیکی (شکل ۲-۳-ب) گسل دیده می‌شود. طول این گسل در نقشه مذکور در حدود  $160$  کیلومتر می‌باشد.

۳- گسل شماره ۳ (گسل لِله بند)، ساز و کاری فشارشی [نظری و شهیدی، ۱۳۹۰] داشته و با توجه به شیب عمومی بیش از ۴۵ درجه SE از نوع گسل معکوس می‌باشد. طرفین گسل مذکور دارای شدت میدان مغناطیسی پایین‌تری نسبت به بخش‌های مرکزی آن می‌باشد. همانندی جالب‌توجهی میان این گسل و گسل شماره ۴ وجود دارد. به‌طوری‌که این دو گسل با فاصله‌ی مشخصی نسبت به گسل شمال البرز قرار گرفته‌اند. لیکن جهت شیب این گسل SE است که دقیقاً بر عکس جهت شیب گسل شماره ۴ می‌باشد. این گسل دارای امتداد عمومی N70E می‌باشد که انطباق قابل‌توجهی بین مرز مغناطیسی و مرز تکتونیکی گسل دیده می‌شود. طول این گسل در نقشه مذکور در حدود ۷۰ کیلومتر می‌باشد.

۴- گسل شماره ۴ (گسل بادله)، ساز و کاری فشارشی [نظری و شهیدی، ۱۳۹۰] داشته و با توجه به شیب عمومی ۴۵ درجه و حتی کمتر با جهت شیب به سمت شمال غرب (بین سطوح ارتفاعی ۰ تا ۵۰۰۰- متر) از نوع گسل تراستی می‌باشد. بلوک فرادیواره آن در برگیرنده واحد-های سنگ چینهای دونین تا تریاس پایینی است که بر روی شیل‌های ژوراسیک شمشک، سنگ‌های ائوسن و نهشته‌های نئوژن در بلوک فرودیواره، رانده شده‌اند به همین سبب قسمت‌های شمالی گسل دارای شدت میدان مغناطیسی پایین‌تر (در حدود ۳۹۶۱۰ نانوتسل) نسبت به بخش‌های جنوبی (که دارای شدت میدان مغناطیسی ۳۹۷۰۰ نانوتسل هستند) می‌باشد. گسل بادله به موازات گسل شمال البرز و در فرادیواره آن قرار گرفته است. این گسل، احتمالاً می‌تواند یک پس‌راندگی در فرادیواره گسل شمال البرز باشد که به همراه آن، ساختار فراجسته‌ای از سنگ‌های پالئوزویک را تشکیل داده است. این گسل دارای امتداد عمومی N85E می‌باشد که همانند گسل شمال البرز، انطباق قابل‌توجهی بین مرز مغناطیسی و مرز تکتونیکی گسل دیده می‌شود. طول این گسل در نقشه مذکور در حدود ۷۵ کیلومتر می‌باشد.

۵- گسل شماره ۵ (گسل آستانه)، ساز و کاری فشارشی [نظری و شهیدی، ۱۳۹۰] داشته و با توجه به شیب عمومی بیش از ۳۰ درجه در جهت SE از نوع گسل راندگی می‌باشد. قسمت‌های

شمالی گسل دارای شدت میدان مغناطیسی بالاتر (در حدود ۳۹۵۷۰ نانوتسلا) نسبت به

بخش های جنوبی (که دارای شدت میدان مغناطیسی ۳۹۵۱۰ نانوتسلا هستند) می باشد. این

گسل دارای امتداد عمومی N55E می باشد که انطباق قابل توجهی بین مرز مغناطیسی و مرز

تکتونیکی گسل دیده می شود. طول این گسل در نقشه مذکور در حدود ۴۵ کیلومتر می باشد.

۶- گسل شماره ۶ (گسل صبور)، ساز و کاری فشارشی [نظری و شهیدی، ۱۳۹۰] داشته و با توجه

به شیب عمومی بیش از ۴۵ درجه SE از نوع گسل معکوس می باشد. در برخی مقالات همچون

(طاهری و همکاران، ۱۳۹۱) این گسل از نوع راستالغز چپبر با مؤلفه معکوس یاد شده است.

این گسل دارای امتداد عمومی N65E می باشد و انطباق خوبی بین مرز مغناطیسی و مرز

تکتونیکی گسل دیده می شود. طول این گسل در نقشه مذکور در حدود ۴۰ کیلومتر می باشد.

۷- گسل شماره ۷ (گسل میلا)، دارای شیب عمومی بیش از ۴۵ درجه SE و ساز و کار آن نیز

احتمالاً معکوس می باشد. این گسل دارای امتداد عمومی N60E می باشد. درازا یا طول این

گسل در نقشه مذکور در حدود ۲۵ کیلومتر می باشد.

۸- گسل شماره ۸ (گسل گیو)، دارای شیب عمومی بیش از ۵۰ درجه SE و امتداد عمومی

و درازا یا طول (در نقشه مذکور) در حدود ۵ کیلومتر می باشد.

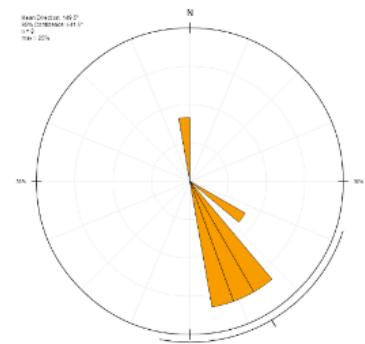
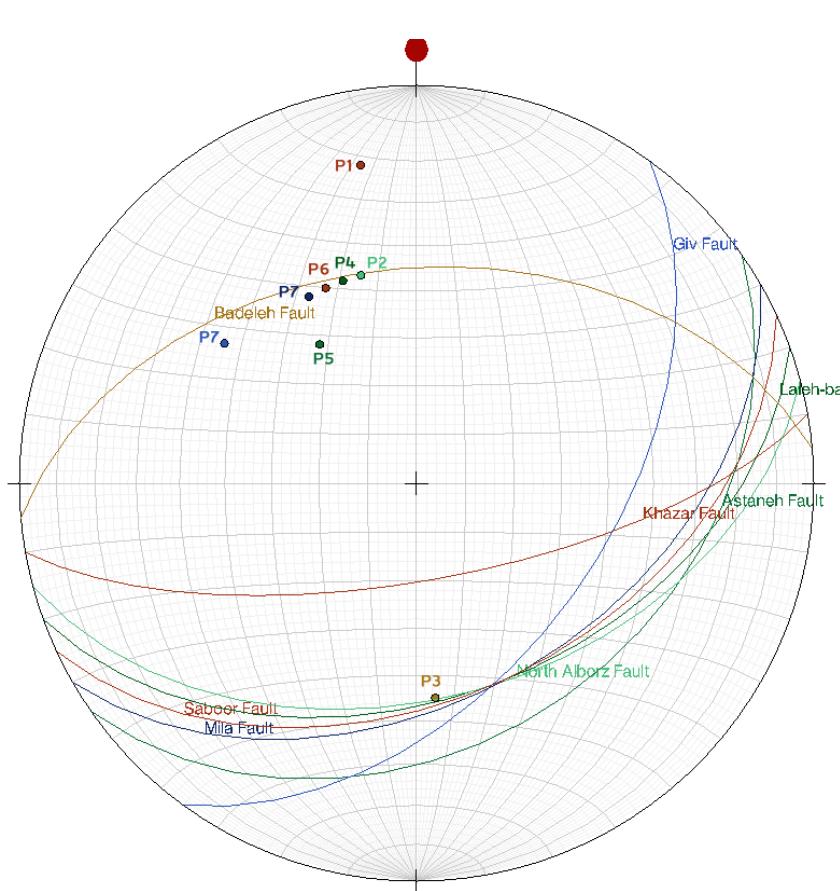
در نهایت می توان از نتایج حاصل از مشاهدات فوق (تلفیق نقشه تانسوری یا سه بعدی مغناطیس و

اطلاعات زمین شناسی)، شیب، امتداد، جهت شیب و قطب گسل های اصلی و لرزه زای منطقه را مطابق

شکل (۱۴-۳) به دست آورد. این شکل، پایه مطالعات دقیق تر بعدی در زمینه تکتونیک و زمین-

شناسی است و به زمین شناس طرح و قطب و پارامترهای دیگر گسل های لرزه زای شرق مازندران را

نشان می دهد.



شکل ۱۴-۳: نمایش طرح<sup>۱</sup> و  
قطب<sup>۲</sup> گسل‌های اصلی و لرزه‌زای  
موجود در منطقه مورد مطالعه  
(شرق مازندران) ترسیم شده در  
نرم‌افزار Online Stereonet به  
همراه نمودار گل‌سرخی<sup>۳</sup> حاصل  
(پس از تلفیق نتایج نقشه‌ی  
تansوری مغناطیسی و نقشه‌ی  
زمین‌شناسی منطقه)

### ۲-۲-۵-۳ بررسی ارتباط میان مقادیر شدت میدان مغناطیسی و توپوگرافی منطقه

گاهی شدت میدان مغناطیسی از توپوگرافی نیز تأثیر می‌پذیرد. به این دلیل که در محیط‌های فشارشی یا در مکان‌هایی که گسل عملکردی معکوس دارد، فرadiowاره را به سطحی بالاتر انتقال داده و ایجاد دیواره گسلی می‌کند. یعنی در طرفین مرز گسلی تغییرات ارتفاعی ایجاد می‌نماید. در صورت وجود تباين در طرفین گسل و وسعت بالای منطقه گسل خورده، می‌توان با یک برداشت دقیق و سریع تغییرات شدت میدان مغناطیسی آن را به خوبی نمایش داد. عملکرد گسل‌های استان مازندران به خصوص گسل خزر نیز باعث ایجاد تغییرات شدید توپوگرافی شده است (مطابق شکل ۲-۳-الف عملکرد گسل خزر سازندهای قدیمی‌تر و اغلب آهکی را بر روی رسوبات جدیدتر آورده است. و با توجه به شکل‌های ۱۰-۳ تا ۱۳-۳، تغییرات ناگهانی لیتولوژی و توپوگرافی در طرفین گسل توأمً

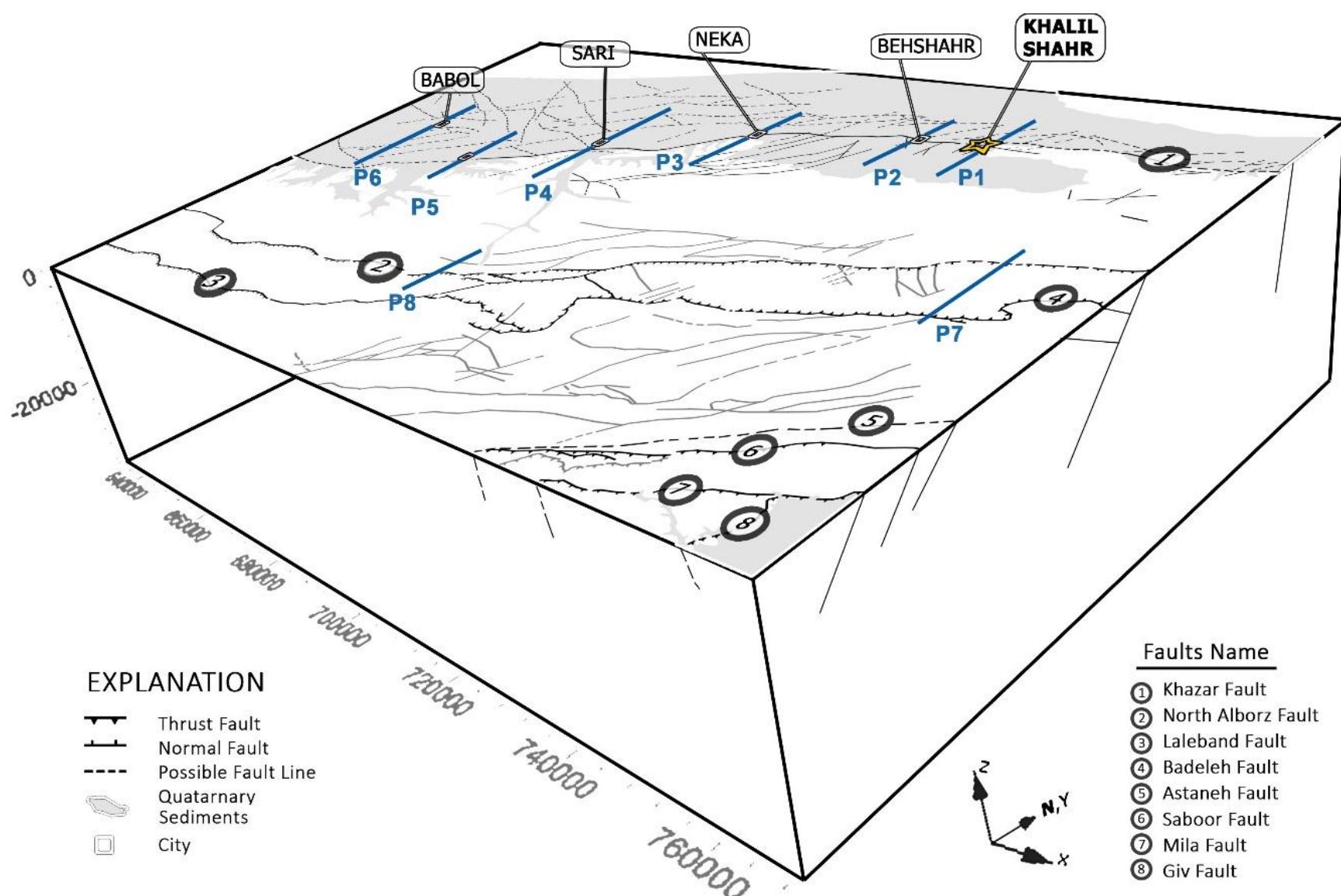
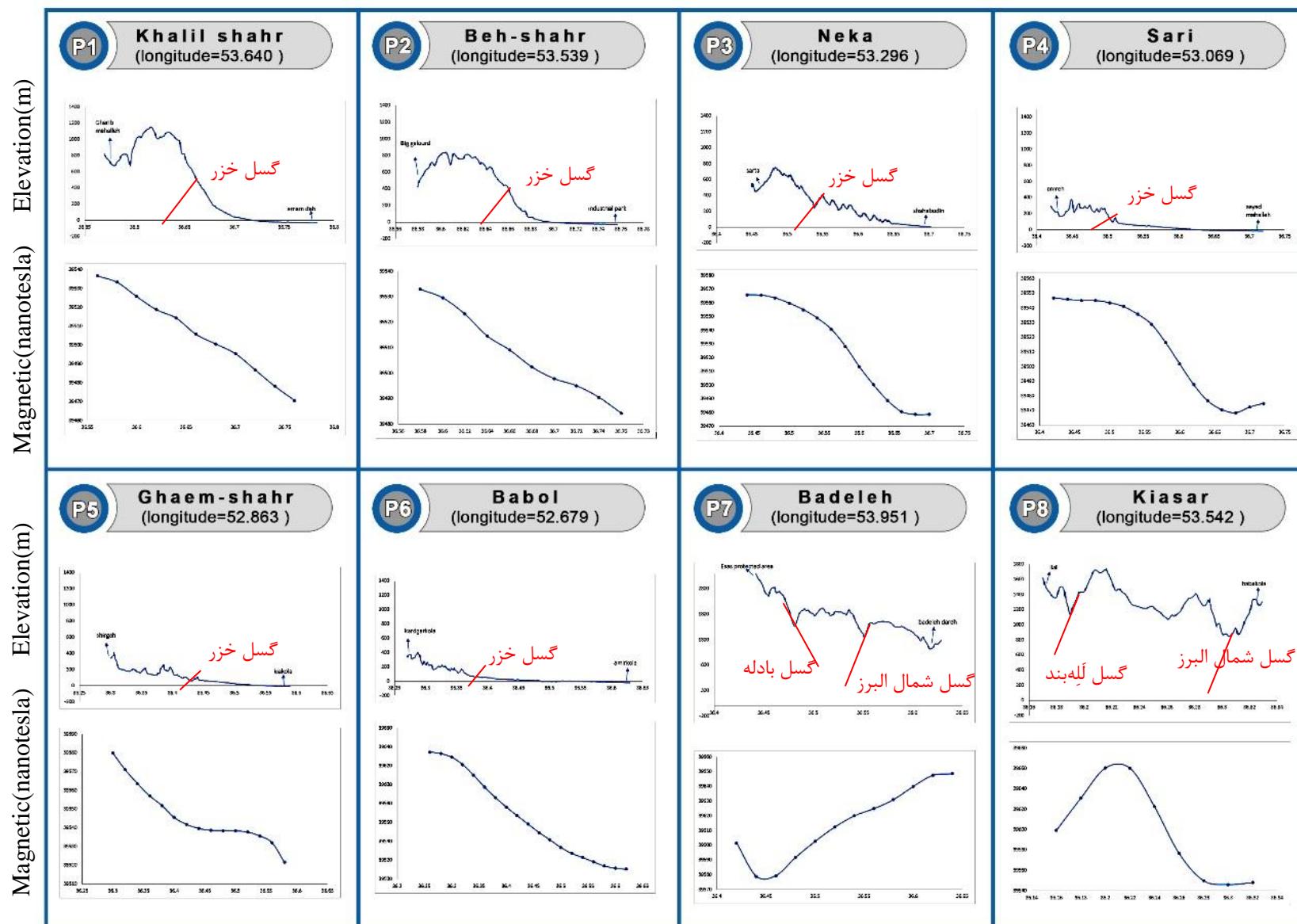
<sup>1</sup> Plan

<sup>2</sup> Pole

<sup>3</sup> Rose Chart

باعث تغییرات مغناطیسی شده‌اند).

شکل ۱۵-۳، به بررسی ارتباط میان تغییرات میدان مغناطیسی در برابر تغییرات توپوگرافی می-  
پردازد. مطابق این شکل، در مجموع در ۸ پروفیل مغناطیسی در راستای محور طول جغرافیایی این  
مقایسه صورت پذیرفته است. به ترتیب (از P1 تا P8)، شهرهای خلیل‌شهر، بهشهر، نکا، ساری، قائم-  
شهر، بابل، بادله و کیاسر دیده می‌شود.



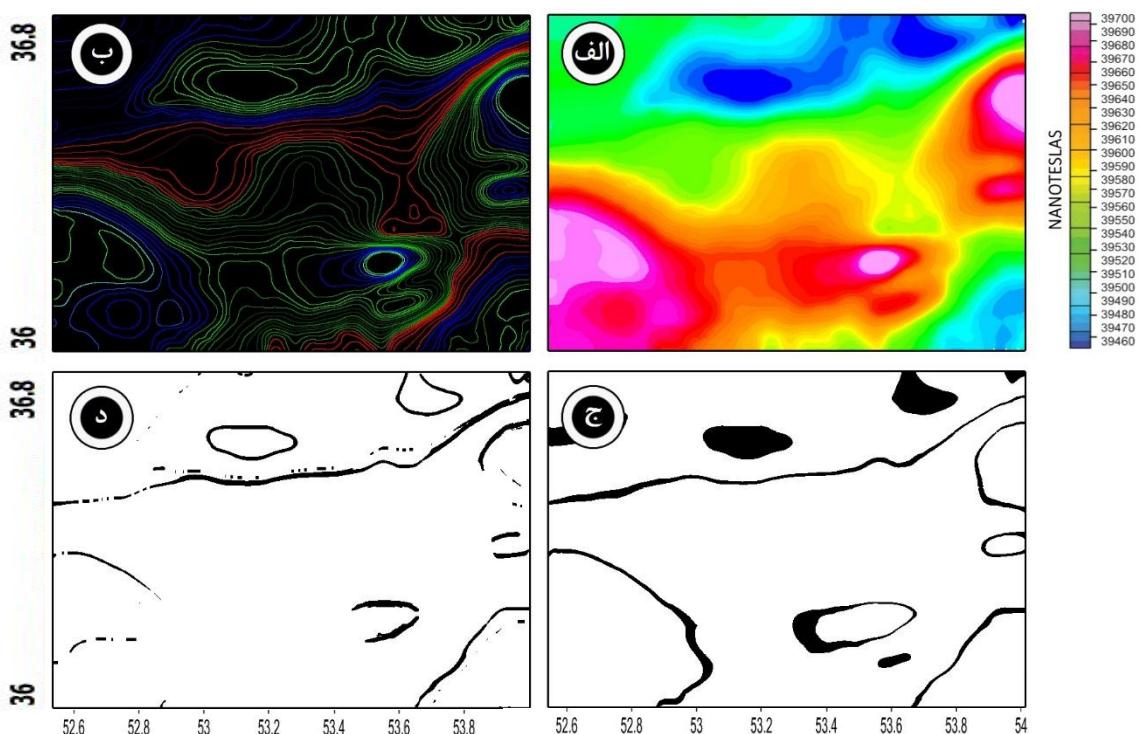
شکل ۳: مقایسه رابطه توپوگرافی با مغناطیس منطقه شرق مازندران



### ۳-۵-۳ فیلترهای لبه‌یابی

برای تعیین مرز دقیق بین واحدهای زمین‌شناسی (رسوبات کواترنری و سازندهای قدیمی‌تر) منطبق بر منابع بی‌亨جار مغناطیسی، از یک مجموعه از فیلترهای لبه‌یابی استفاده شد. مطابق شکل (۱۶-۳)، پاسخ داده‌های مغناطیسی هوابرد شرق مازندران پس از نمایش در نرم‌افزار ژئوسافت بدون اعمال فیلتر (شکل الف)، پس از اعمال فیلتر لبه‌درخسان<sup>۱</sup> (شکل ب)، پس از اعمال فیلتر لبه‌بریده<sup>۲</sup> (شکل ج) و پس از اعمال فیلتر تمبر<sup>۳</sup> (شکل د) آورده شده است.

فیلترهای مذکور از فیلترهای خاص لبه‌یابی در نرم‌افزارهای پردازش تصویر می‌باشد. در این مطالعه پس از اطمینان از صحت کار این فیلترها، فیلتر تمبر قابل قبول‌تر ارزیابی شده و در نهایت این فیلتر بر روی داده‌های مغناطیسی واقعی منطقه مورد مطالعه یعنی شرق استان مازندران اعمال شد.



شکل ۱۶-۳: نقشه میدان مغناطیسی کل منطقه مورد مطالعه (الف) بدون اعمال پردازش، ب) پس از اعمال پردازش لبه‌درخسان، ج) لبه‌بریده، د) فیلتر تمبر

<sup>1</sup> glowing adges

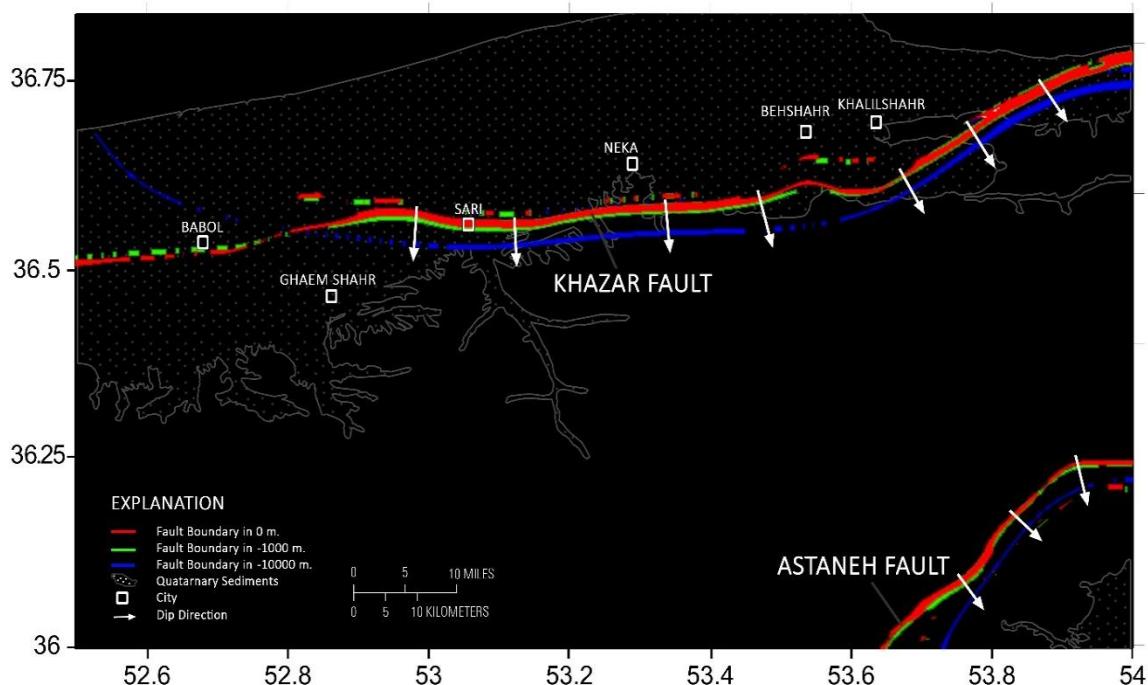
<sup>2</sup> torn edges

<sup>3</sup> stamp

نتایج حاصل از اعمال فیلتر تمبر، به صورت تصاویر RGB<sup>۱</sup> در شکل (۱۷-۳) به نمایش در آمده است.

در واقع این شکل تلفیقی از ترکیبات رنگی قرمز، سبز و آبی است؛ که به ترتیب معرف سطوح ارتفاعی ۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ متر می‌باشند، این سطوح ارتفاعی نتیجه فیلتر ادامه فراسو به ازای مقادیر ذکر شده می‌باشد.

در نهایت مرز به دست آمده به ازای سطوح مختلف ارتفاعی با مرز رسوبات کواترنری موجود در منطقه ادغام شده و مقایسه این دو نشان از صحت کار لبیابی و انطباق اطلاعات زمین‌شناسی و مغناطیس هوابرد دارد.



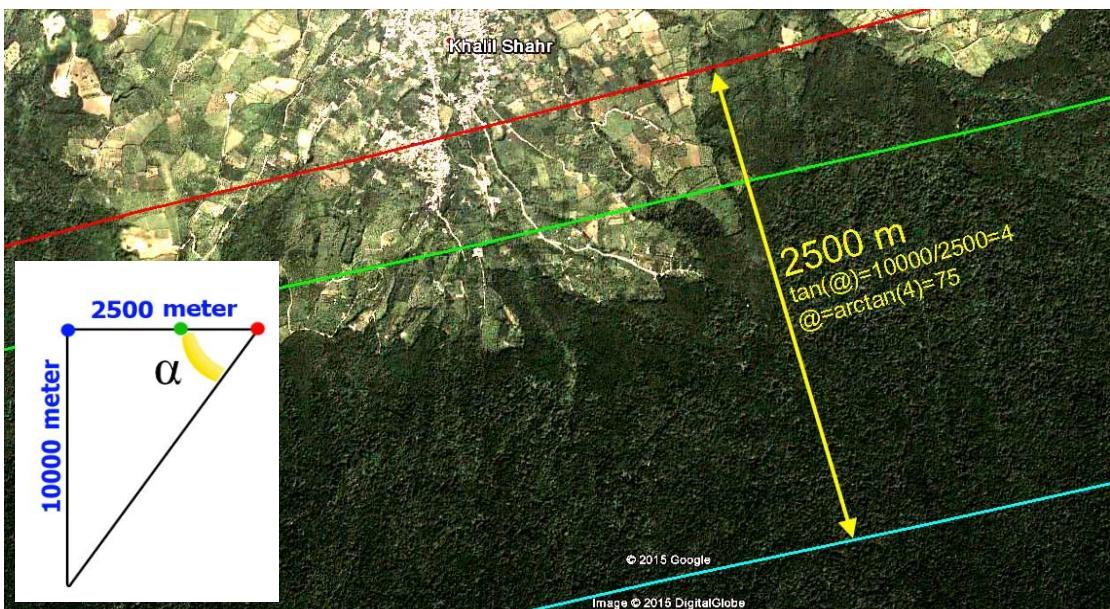
شکل ۳: نمایش RGB از مرز مغناطیسی گسل‌های خزر و آستانه پس از اعمال فیلتر تمبر به همراه محدوده قرارگیری رسوبات کواترنری منطقه

پس از ثبت مختصات مرزهای گسلی به ازای سطوح ارتفاعی مختلف و پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار GoogleEarth، می‌توان شیب گسل‌های مختلف را به دست آورد. جهت شیب گسل خزر با توجه به شکل (۱۷-۳) در طول‌های جغرافیایی ۵۳.۶ تا ۵۴ درجه، شمال شرقی-جنوب غربی و در طول‌های

<sup>۱</sup> Red-Green-Blue

جغرافیایی ۵۲.۵ تا ۵۳.۶ درجه، شرقی-غربی است. جهت شیب گسل آستانه نیز شمال شرقی-جنوب غربی است.

با ژئورف نمودن نقشه‌های فیلتر شده در نرم‌افزار GlobalMapper و تلفیق نتایج در نرم‌افزار GoogleEarth شکل (۱۸-۳) حاصل شد. این شکل محل گسل خزر را در منطقه‌ی خلیل‌شهر به ازای سه سطح ارتفاعی • (خط گسلی قرمز رنگ)، ۱۰۰۰ - (خط گسلی سبز رنگ در وسط) و ۱۰۰۰۰ - (خط گسلی آبی رنگ در پایین نقشه) نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۸-۳) با محاسبه جابجایی گسل نسبت به افق و با در دست داشتن جابجایی نسبت به ارتفاع با استفاده از نسبتهای مثلثاتی شیب گسل خزر محاسبه شد. شیب گسل خزر در شهر خلیل‌شهر ۷۵ درجه SE به دست آمد. این فرآیند برای این گسل و گسل آستانه در محل‌ها و شهرهای مختلف پیگیری شد.



شکل ۳-۱۸: نمایش RGB از مرز مغناطیسی گسل خزر در منطقه‌ی خلیل‌شهر پس از اعمال فیلتر تمبر

### ۳-۶ نتیجه‌گیری

پس از پردازش اولیه‌ی داده‌های مغناطیسی هوابرد شرق استان مازندران، سازندهای مختلف از یکدیگر تمیز و تفکیک داده شده و خطوارهای مغناطیسی گسل‌ها ترسیم شد. مشاهدات حاکی از انطباق بسیار خوب میان خطوارهای مغناطیسی و مرزهای تکتونیکی گسل‌های موجود در منطقه

دارد؛ که این نکته اهمیت بالای روش مورد استفاده را با توجه به وسعت زیاد منطقه‌ی برداشت داده-های مغناطیس هوابرد نشان می‌دهد.

در ادامه، با اعمال فیلتر ادامه فراسو بر روی داده‌های مذکور حدود سازنده‌ها به ازای سطوح ارتفاعی مختلف تعیین شده و ویژگی‌های مختلف گسل‌های منطقه از جمله شیب، امتداد و جهت شیب گسل‌ها تعیین شد و سپس در نرم‌افزار Streonet Online این خصوصیات پیاده‌سازی شد و در نتیجه توسط Rose Chart، خصوصیات تکتونیکی غالب منطقه، به نمایش در آمد.

## فصل چهارم: مدل سازی پیشرو،

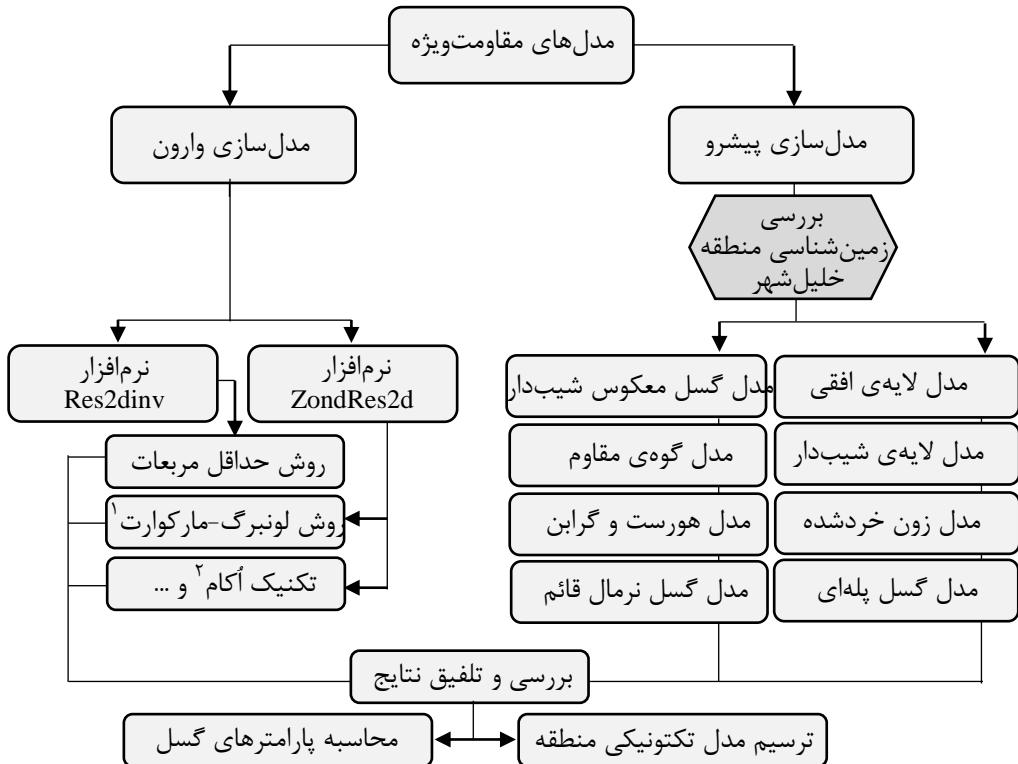
پردازش و تفسیر داده های مقاومت و پژوهش

## ۱-۴ - مقدمه

گسل خزر با طول ۴۵۰ کیلومتر [بربریان و همکاران، ۱۳۷۱] با ساز و کار مخرب [اعزیز زنجانی و همکاران، ۱۳۲۰] به سبب فعالیت‌های لرزه‌ای مختلف در شاخه‌های مختلف آن (برای مثال ۱۷ تیر ۱۳۶۴ در جنوب شرقی بهشهر و ۱۸ مهر ۱۳۸۶ در شرق بهشهر)، از جمله گسل‌های جنبا و پویا شناخته می‌شود.

با وجود توسعه شهری بر روی شاخه‌های گسل خزر، شناخت کامل از ساز و کار گسل و نیز آشکارسازی امتدادهای گسل در مناطق حساس شهری حائز اهمیت است. از طرفی به سبب پوشیده شدن مناطق توسط رسبات کواترنری و رخنمون نداشتن گسل در بسیاری از مناطق، رویکرد اساسی جهت بررسی گسلش، استفاده از روش‌های اکتشافات زیرسطحی بهویژه روش‌های ژئوفیزیکی است. در این فصل با بهره‌گیری از روش مقاومت‌ویژه الکتریکی و سپس مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های مقاومت‌ویژه، مرزهای گسل در زیر سطح زمین پیگیری و آشکارسازی می‌گردد.

کلیات این فصل، به صورت خلاصه در فلوچارت نشان داده شده در شکل (۱-۴) به نمایش در آمده است. مطابق این فلوچارت، فصل چهارم به دو بخش مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های مقاومت‌ویژه تقسیم می‌گردد؛ که در ادامه هر کدام تشریح خواهند شد.



شکل ۴-۱: دید کلی تحقیق انجام شده در زمینه‌ی روش مقاومت‌ویژه

## ۲-۴- زمین‌شناسی عمومی منطقه خلیل شهر

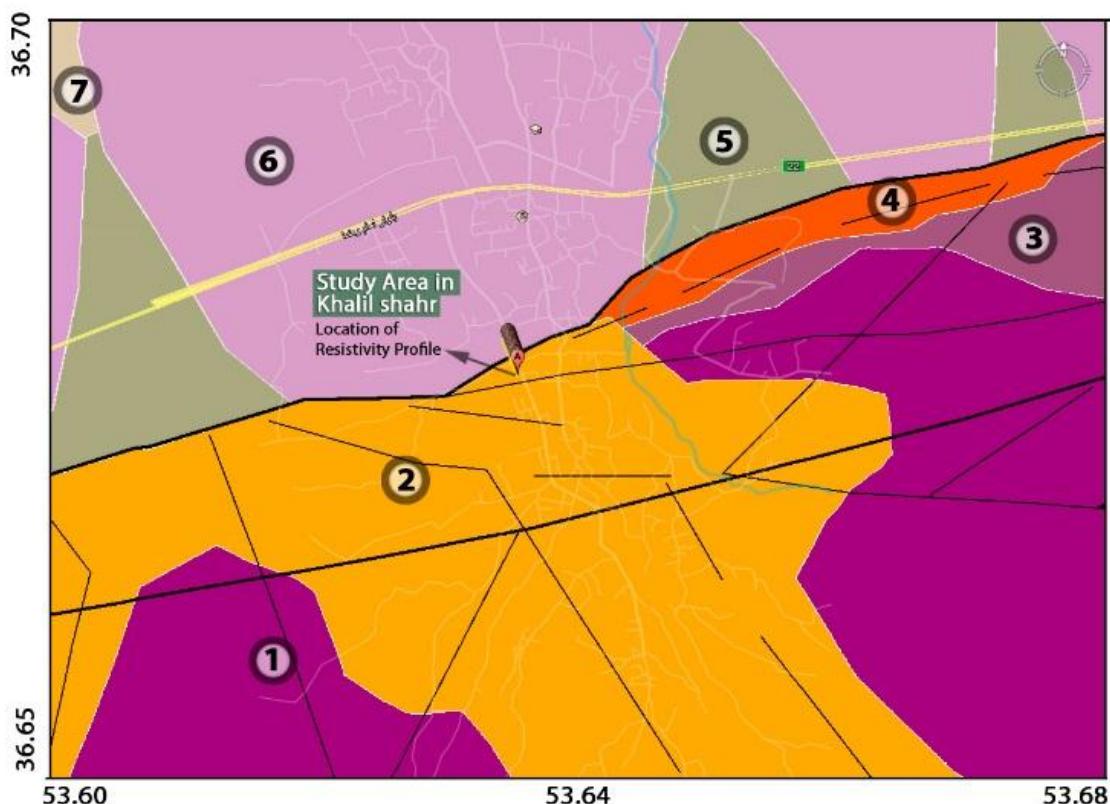
در این مطالعه، قسمتی از نقشه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهشهر مورد بررسی قرار گرفته است. زمین‌شناسی عمومی منطقه و محدوده‌ی احتمالی مقاومت‌ویژه الکتریکی به شرح جدول (۱-۴) و شکل (۲-۴) می‌باشد: مقادیر احتمالی مقاومت‌ویژه منطقه در ایجاد مدل‌های مصنوعی و مدل‌سازی پیشرو مقاومت‌ویژه الکتریکی به کار گرفته شد.

<sup>۱</sup> Levenberg-Marquardt

<sup>۲</sup> Occam

جدول ۴-۱: سازندهای زمین‌شناسی به همراه بازه‌ی احتمالی مقاومت‌ویژه منطقه

ردیف	لیتو‌لوژی	بازه‌ی احتمالی مقاومت‌ویژه (اهم‌متر)
۱	سازند شمشک (مارن؛ شیل؛ ماسه‌سنگ؛ سیلتستون؛ کنگلومرا)	متوسط (۵۰ تا ۲۰۰)
۲	لُس	بسیار پایین (۰ تا ۲۰)
۳	سنگ‌های ولکانیک حد واسط و بازیک، دگرگونی	بالا (۲۰۰ تا ۱۰۰۰)
۴	ساب و لکانیک‌های بازیک، حد واسط و اسیدی و سنگ‌های درون‌گیر؛ گابرو، دیوریت، مونزونیت، گرانیت و متامورفیک	بالا (۱۰۰۰ تا ۲۰۰)
۵	تبديل لُس و آبرفت	پایین تا متوسط (۰ تا ۸۰)
۶	نهشته‌های بادبزنی اخیر (پروگریمال)	پایین (۰ تا ۵۰)
۷	نهشته‌های بادبزنی (دیستال)	پایین (۰ تا ۵۰)



شکل ۴-۲: نقشه زمین‌شناسی  $1:50000^1$  خلیل شهر به همراه موقعیت برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه (خطوط سیاه معرف موقعیت شاخه‌های گسل خزر در منطقه می‌باشد)

<sup>1</sup> مطابق سایز چاپی پایان‌نامه

### **۴-۳- مدل سازی پیشرو مقاومت ویژه الکتریکی**

برای فهم بهتر پاسخهای مقاومت ویژه زمین در منطقه مورد مطالعه، ابتدا اقدام به ساخت مدل مصنوعی به شیوه مدل سازی پیشرو داده های مقاومت ویژه الکتریکی شد. پاسخ مدل های زمین شناسی و تکتونیکی رایج که احتمال وجود آن ها در منطقه مورد مطالعه می رفت، با استفاده از مدل سازی پیشرو در نرم افزار Res2dmod محاسبه شد و سپس داده های خروجی مدل سازی پیشرو حاصل از این نرم افزار یک بار بدون در نظر گرفتن نوافه های محیطی و بار دیگر با اضافه نمودن ۹ درصد نوافه تصادفی، به عنوان ورودی به نرم افزار Res2dinv داده شده و نتایج حاصل از وارون سازی به نمایش در آمده است. مدل های زمین شناسی مذکور عبارتند از: مدل لایه افقی، گسل تراستی، زون خردشده یا گسلیده و گسل پلمهای و ... که در ادامه پس از توضیح مقدماتی در مورد ساز و کار هر یک، به تفصیل در مورد پاسخ مدل پیشرو و نیز نتایج وارون سازی هر کدام از مدل ها بحث خواهد شد.

### **۱-۳-۴ - مدل لایه افقی**

از اصول و مبانی نظری اولیه چینه شناسی، اصل نخست استنو<sup>۱</sup> یعنی افقی بودن لایه ها است. با فرض حاکم بودن دو اصل دیگر استنو در منطقه مورد مطالعه، یعنی جوان تر بودن لایه فوقانی به سبب رسوب گذاری و نیز اصل ادامه ای طبقات، مدل زمین دو لایه ای در نظر می گیریم؛ که از این سه اصل تبعیت نموده است. بدین صورت که لایه زیرین قدیمی تر بوده و به سبب تراکم و فشردگی بالا از مقاومت ویژه بالایی (۵۰۰ اهم متر) برخوردار است؛ که توسط رسوبات جدید، مرطوب، دارای ضخامت ۳.۵ متر و مقاومت ویژه پایین (۱۰ اهم متر) پوشیده شده است. این رسوبات که به وفور در منطقه خلیل شهر یافت می شوند؛ از نوع ذرات آواری غیر آلی ناشی از هوازدگی، حمل و رسوب گذاری سنگ منشأهای جنوبی منطقه می باشند.

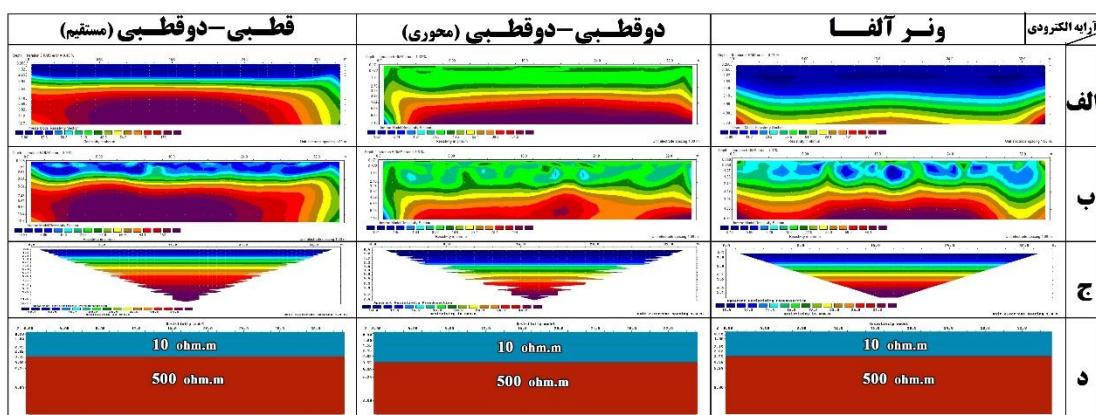
به طور کلی با توجه به توپوگرافی کوهستانی جنوب منطقه، همچنین میزان بارندگی و پوشش گیاهی به سبب اقلیم مرطوب خلیل شهر و نیز جنس و سن رسوبات و سنگ های (غلب آهکی و شیلی)

<sup>۱</sup> نیکلاس استنو (Nicolas Steno) چینه شناس و محقق بر جسته دانمارکی

موجود در منطقه، می‌توان حتی ضخامت رسوبات آواری را بیش از مقدار مفروض در مدل مذکور نیز در نظر گرفت. بدین سبب که اختلاف ارتفاع، میزان بارندگی و پوشش گیاهی و سنگ‌های منشأ در میزان تخریب و نوع بار رودخانه مؤثر می‌باشند. سنگ منشأ شیلی باعث افزایش بار معلق رودخانه و سنگ منشأ آهکی باعث افزایش بار محلول رودخانه خواهد شد. در ادامه این پژوهش، در مورد تغییرات ضخامت رسوبات آواری پوشاننده منطقه نیز بحث خواهد شد.

در شکل (۳-۴)، مدل مقاومت‌ویژه زمین دو لایه‌ای افقی، پاسخ مدل پیشرو مقاومت‌ویژه برای سه آرایش الکترودی قطبی-دوقطبی مستقیم، دوقطبی محوری و ونر آلفا، و همچنین پاسخ وارون سازی مدل پیشرو حاصل در نرمافزار Res2dinv در صورت نبود نوفه محیطی و نیز وجود ۹ درصد نوفه محیطی آورده شده است.

فوائل الکترودی در شکل‌های ۳-۴ تا ۱۰-۴ برابر مقدار واحد یعنی ۱ متر لاحظ شده است.

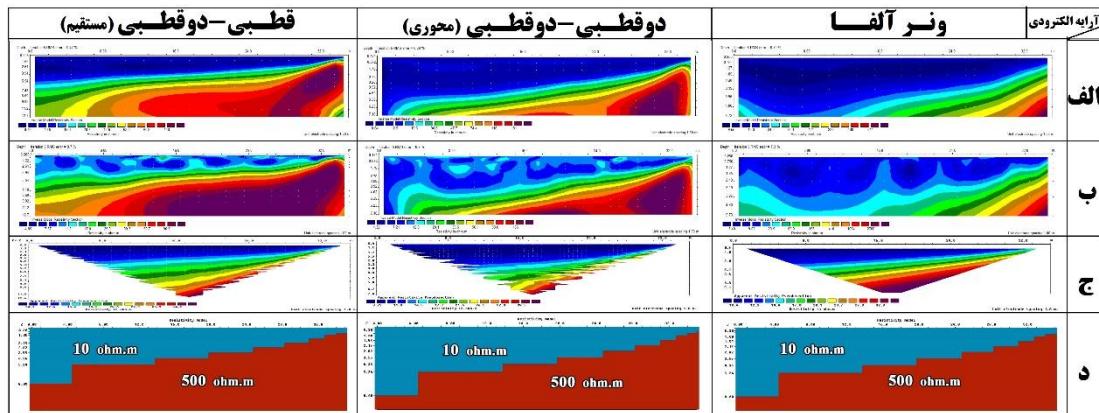


شکل ۳-۴: (الف) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون، (ب) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نوفه، (ج) شبهمقطع حاصل از مدل‌سازی پیشرو لایه‌ی افقی، (د) مدل مقاومت‌ویژه لایه‌ی افقی (با روباره‌ای به ضخامت ۳.۵ متر و فوائل الکترودی ۱ متر)

#### ۴-۳-۲- لایه شیبدار (و یا گسل تراستی)

در این مدل (شکل ۴-۴) ساز و کار گسل تراستی با شیب کمتر از ۴۵ درجه به خوبی دیده می‌شود، که معرف محیط‌های فشارشی است. بهدلیل اینکه حرکات تکتونیکی جوان، بیشتر در فرادیواره گسل

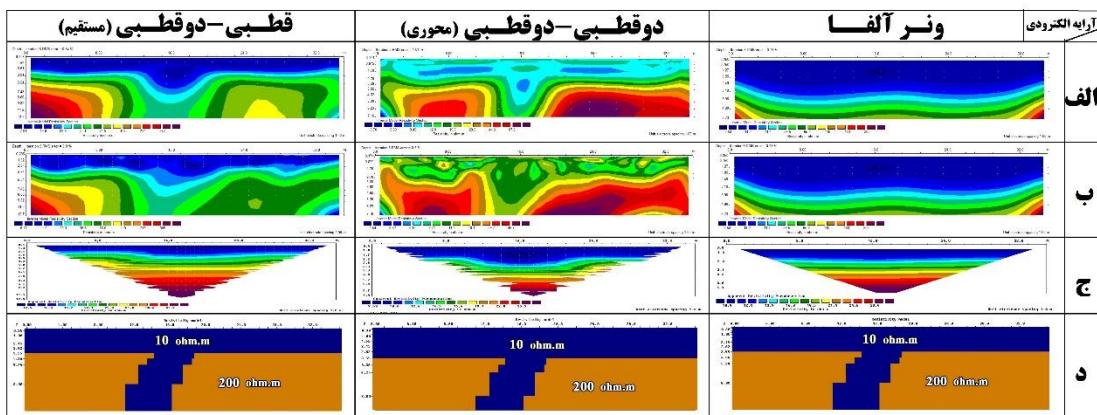
اتفاق می‌افتد بنابراین انتظار وجود درزه و شکستگی فراوان در فرادیواره گسل می‌رود. بنابراین در این مدل دو بلوک مثلثی، که در آن بخش پایینی، معرف فرودیواره‌ی گسل و سنگبستر متراکم آهکی با مقاومت‌ویژه ۵۰۰ اهمتر و بخش بالایی، معرف فرادیواره‌ی گسل و از همان جنس می‌باشد، لحاظ شده است. که به دلیل وجود شکستگی‌های بسیار زیاد در لایه فوقانی، این لایه دارای مقاومت‌ویژه پایین ۱۰ اهمتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۴: (الف) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون، (ب) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نوفه،<sup>۹</sup> (ج) شبه‌مقطع حاصل از مدل‌سازی پیشرو گسل تراستی، (د) مدل مقاومت‌ویژه گسل تراستی

### ۴-۳-۳-۴- دایک رسانای شیبدار (و یا زون خردشده و شکسته)

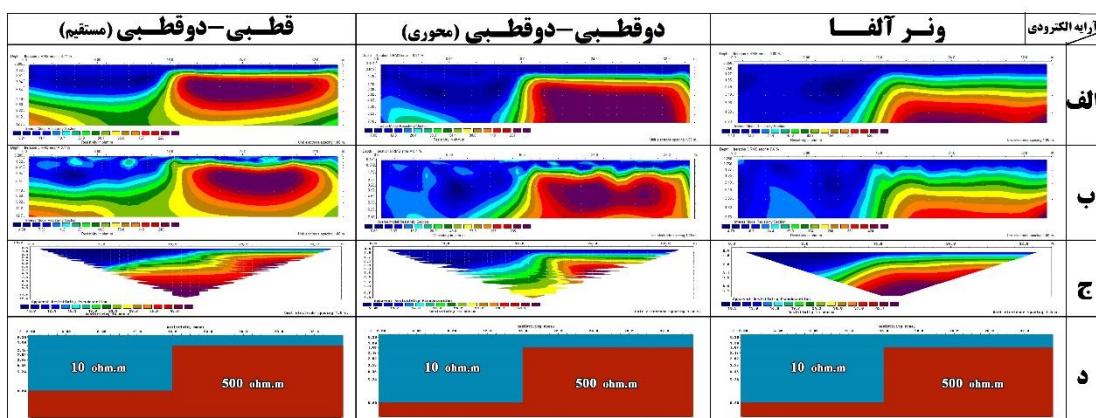
گاهی حرکات تکتونیکی منجر به ایجاد زون گسیخته می‌گردند. بدین معنی که همیشه یک سطح گسلیده وجود نخواهد داشت؛ بلکه ممکن است گسل خوردگی محدوده‌ای فراتر از یک خط یا سطح باشد. در این صورت زون گسل خورده با کاهش مقاومت‌ویژه الکتریکی همراه خواهد بود. در این مدل (شکل ۴-۵) زمینه‌ای با مقاومت‌ویژه ۲۰۰ اهمتر، دربردارنده زون گسیخته‌ای با مقاومت‌ویژه پایین ۱۰ اهمتر دیده می‌شود. این نوع گسلیدگی با عمق کم ممکن است حاصل انشعابات گسله اصلی منطقه باشد. مدل غالب در گسلش F1 و F2 و ... منطقه خلیل شهر، از این نوع مشتق می‌گردد.



شکل ۴-۵: الف) مقطع حاصل از مدل سازی وارون، ب) مقطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نویه،  
ج) شبهمقطع حاصل از مدل سازی پیشرو زون خردشده، د) مدل مقاومت‌ویره زون خردشده

#### ۴-۳-۴- گسل نرمال قائم

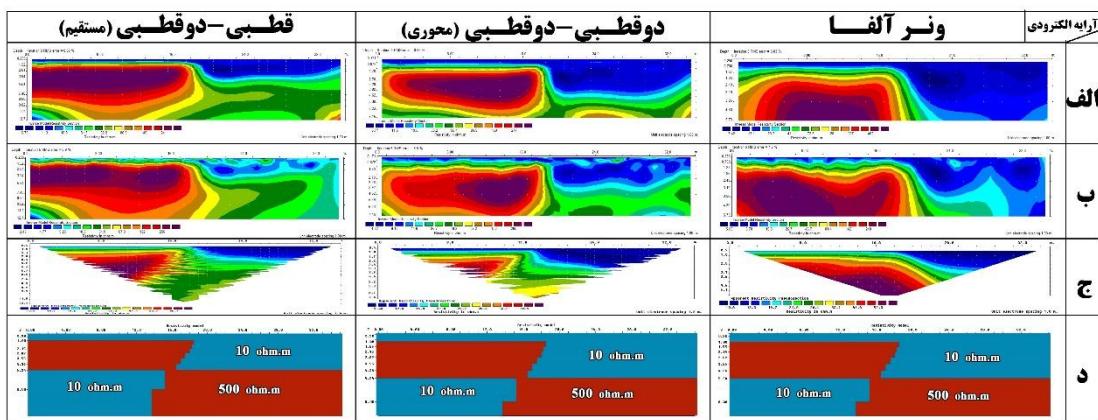
در اصطلاح زمین‌شناسی اگر فرادیواره نسبت به فرودیواره به طرف پایین حرکت کند، گسل را گسل نرمال می‌نامند. در واقع این گسل در محیط‌های با عملکرد کششی ایجاد می‌گردد. در شکل (۶-۴) مدل ایده‌آلی از گسل نرمال با زاویه ۹۰ درجه آورده شده است. مطابق این شکل، به سبب اینکه احتمال فعالیت تکتونیکی در فرادیواره گسل بیشتر است. بنابراین مقاومت‌ویره آن پایین بوده و در زمینه‌ی لایه‌ای مقاوم قرار دارد.



شکل ۴-۶: الف) مقطع حاصل از مدل سازی وارون، ب) مقطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نویه،  
ج) شبهمقطع حاصل از مدل سازی پیشرو گسل قائم، د) مدل مقاومت‌ویره گسل قائم

### ۴-۳-۵- گسل شیب‌لغز (فشارشی یا معکوس)

گسل شیب‌لغز گسلی است که حرکت آن تا اندازه‌ی زیادی به موازات شیب گسل است و بنابراین جابجایی آن می‌تواند به صورت قائم باشد. در شکل (۷-۶)، نوعی از این رفتار دیده می‌شود؛ که به سبب سطح شکست زاویه‌دار، لایه‌ها در جهت شیب گسل جابه‌جا شده‌اند. البته این شکل هم نشان-دهنده‌ی گسل نرمال و هم معکوس است.

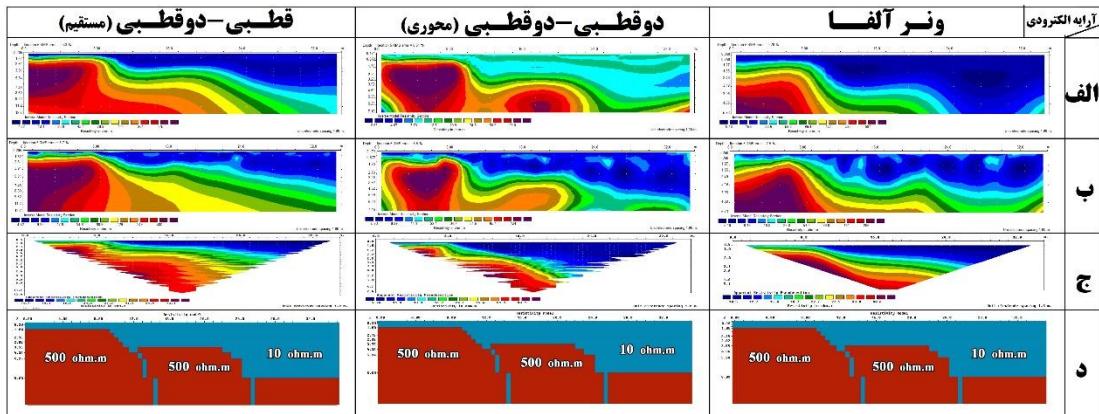


شکل ۷-۶: (الف) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون، (ب) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نویه، (ج) شبهمقطع حاصل از مدل‌سازی پیشرو گسل شیب‌لغز، (د) مدل مقاومت‌ویژه گسل شیب‌لغز

### ۴-۳-۶- گسل پله‌ای<sup>۱</sup>

در واقع این گسل، نوعی از تظاهر گسل‌های راستا لغز در سطح زمین است؛ که در آن قطعات گسلی آرایشی منفصل و نرdbانی را از خود به نمایش می‌گذارند. در واقع ممکن است به سبب برخی حرکات تکتونیکی در طول زمان، حالت پله‌ای به وجود بیاید. مدل گسل پله‌ای و پاسخ مقاومت‌ویژه مربوطه در شکل ۸-۴ به نمایش در آمده است. ممکن است اسکارپ‌های گسلی منطقه درمجموع حالت پله‌ای داشته باشند؛ حتی در صورت وجود چنین حالتی بازهم باید ساز و کار هر شاخه مجزا بررسی گردد؛ که در ادامه هر کدام از این حالت‌ها مورد بحث و بررسی دقیق‌تر قرار خواهد گرفت.

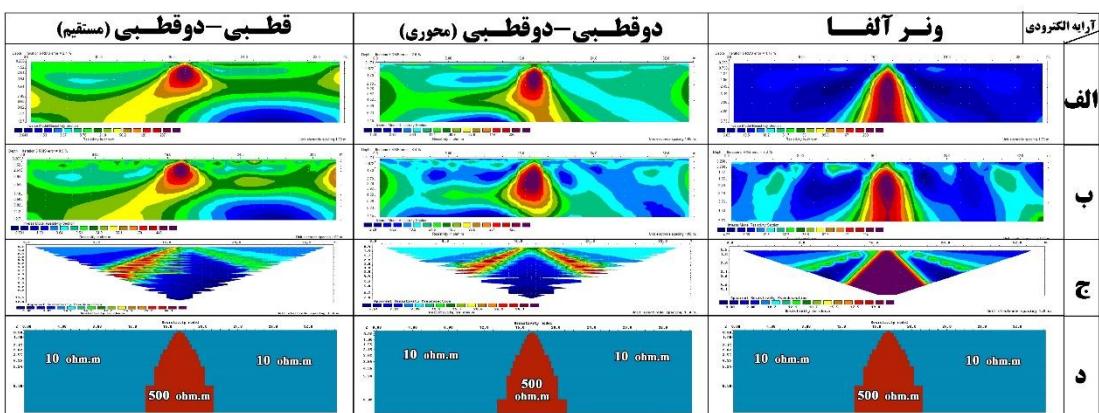
<sup>۱</sup> En Echelon



شکل ۴-۸: الف) مقطع حاصل از مدل سازی وارون، ب) مقطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نوفه ۹،  
ج) شبهمقطع حاصل از مدل سازی پیشرو گسل پله‌ای، د) مدل مقاومت‌ویژه گسل پله‌ای

### ۷-۳-۴ - گوه مقاوم

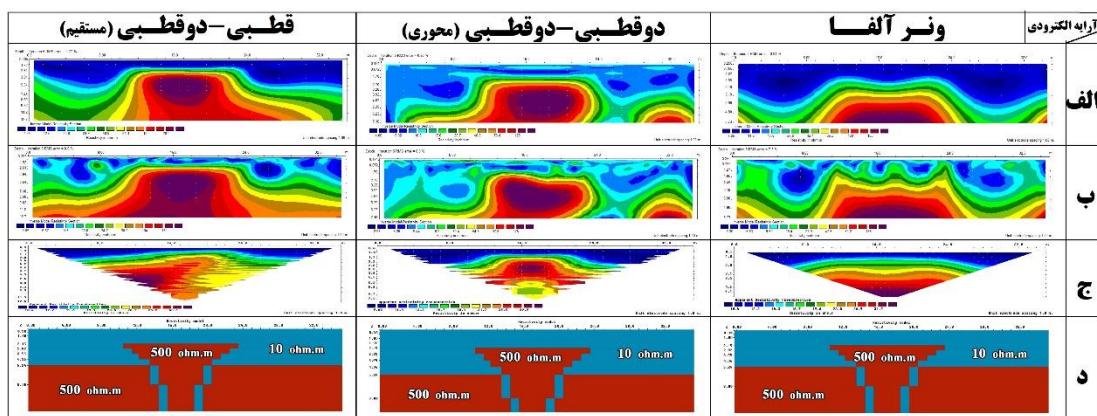
شاید در کنار مقایسه حالت‌های مختلف گسلی لازم بود پاسخ مقاومت‌ویژه ناشی از آرایش‌های مختلف نیز در حضور بی‌هنگاری‌هایی با شکل هندسی نوک‌تیز بررسی گردد. برای همین منظور مدلی گوه‌ای ترسیم شد و پاسخ آرایه‌های مختلف الکترودی در نمایش مرزهای ناگهانی گوه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۹-۴). در این مدل، پهنه‌ای گوه به سمت عمق افزایش می‌یابد. بنابراین روباره‌ی رسانایی این گوه را در برگرفته است. این مدل صرفاً به این پرسش طرح شده، پاسخ می‌دهد که با وجود روباره‌ی با مقاومت‌ویژه‌ی پایین در منطقه، اشکال خاص هندسی تا چه حدی و با چه آرایشی به خوبی نمایش داده می‌شوند.



شکل ۹-۴: الف) مقطع حاصل از مدل سازی وارون، ب) مقطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نوفه ۹،  
ج) شبهمقطع حاصل از مدل سازی پیشرو گوه، د) مدل مقاومت‌ویژه گوه

### ۸-۳-۴- هورست و گرابن

اگر قطعه‌ای از پوسته‌ی زمین، در اثر فعالیت دو گسل نرمال که آن را محدود می‌کند با لغزش تقریباً مساوی، از نواحی اطراف پایین‌تر قرار گیرد، آن را فرو زمین یا گرابن می‌نامند. گسل‌های نرمال به وجود آورنده‌ی فرو زمین اغلب پرشیب می‌باشند. همچنین هرگاه قطعه‌ای از پوسته‌ی زمین، برادر حرکت دو گسل نرمال که آن را محدود می‌کند، با لغزش تقریباً مساوی، بالاتر قرار گیرد ساختی به وجود می‌آورد که آن را فرا زمین یا هورست می‌نامند. در شکل ۴-۱۰، مدل هورست و گرابن و پاسخ‌های مقاومت‌ویژه مختلف به نمایش در آمده است.



شکل ۴-۱۰: (الف) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون، (ب) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ی حاوی سطح نوفه،  
ج) شبهمقطع حاصل از مدل‌سازی پیشرو هورست و گرابن، د) مدل مقاومت‌ویژه هورست

### ۴-۴- بررسی پاسخ مدل‌سازی پیشرو

در مجموع از بررسی شکل‌های ۳-۴ تا ۱۰-۴، می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- آرایش قطبی- دوقطبی مستقیم، در تشخیص عمق دقیق لایه افقی (شکل ۳-۴)، حتی با وجود ۹ درصد نوفه محیطی، بهتر از دو آرایش دیگر عمل کرده است.

۲- آرایش دوقطبی- دوقطبی، در نمایش لایه شیبدار و یا گسل تراستی (شکل ۴-۴) در محیط فاقد نوفه بهتر از آرایش ونر عمل 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 به صورت نوک تیز و بلکه تدریجی نشان می دهد. در آرایش و نر آلفا نیز این مرز کاملاً تدریجی است.

۳- در نمایش زون خردشده یا شکسته (شکل ۴-۵) نیز، آرایش های قطبی- دوقطبی و دوقطبی-

دوقطبی موفق تر عمل کرده اند و آرایش و نر بسیار ضعیف عمل کرده است.

۴- در نمایش گسل نرمال (شکل ۴-۶)، 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 ضخیم با مقاومت بسیار پایین (۱۰ اهمتر) قرار گرفته است، باز هم آرایش قطبی- دوقطبی موفق تر عمل کرده است. اما در نمایش گسل نرمال قائم، هر سه آرایش، عملکرد مناسب و قابل قبولی داشته اند.

۵- در نمایش گسل شیبدار (شکل ۴-۷)، 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 ی گسل یعنی سمت راست مدل بنگریم، یعنی درست در جایی که لایه با مقاومت پایین در زیر لایه مقاوم قرار گرفته است، باز هم به این نتیجه خواهیم رسید که آرایش قطبی- دوقطبی موفق تر عمل کرده است. پس هم در حالتی که لایه مقاوم در زیر لایه غیر مقاوم قرار می گیرد و هم حالت بالعکس آن، این آرایش تفکیک قابل قبولی دارد.

۶- در نمایش گسل پله ای (شکل ۴-۸)، هر سه آرایش به خوبی عمل کرده اند.

۷- از محدود جاهایی که آرایش و نر برتر از سایر آرایش ها بوده، توانایی در نمایش گوهی مقاوم است. به خوبی در شکل (۴-۹) دیده می شود که آرایش و نر، به بهترین وجه حالت هندسی گوهی مقاوم را حفظ کرده و به نمایش درآورده است.

۸- آرایش قطبی- دوقطبی، هورست و گرابن (شکل ۴-۱۰) را بهتر نشان می دهد. با وجود نوافه این توانایی بهتر مشاهده می گردد.

۹- مطابق مطالعات پیروز و همکاران از اواخر دهه‌ی ۷۰ تا اواخر دهه‌ی ۸۰ (برای مثال جهانبین 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 موفق‌ترین آرایش‌ها در نمایش ساختارهای (قائم) گسلی و زون‌های شکستگی است. در عمل پیاده‌سازی این آرایش در صورت برداشت با دستگاه‌های مولتی الکترودی ایده‌آل‌ترین حالت خواهد بود؛ اما به سبب نبود این سیستم و به دلیل این‌که یکی از الکترودها به بی‌نهایت فرضی (و یا فاصله‌ای دور) انتقال می‌یابد، برداشت با این آرایش با مشکلاتی همراه خواهد بود.

۱۰- آرایش و نر نیز با وجود سادگی هندسی، از نظر اجرا، بسیار وقت‌گیر 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.

۱۱- در نهایت، آرایش دوقطبی- دوقطبی نیز با وجود مزیت‌های دیگر آرایش‌ها، به سبب برداشتی ساده‌تر و نمایش مناسب ساختارهای زیرسطحی از قبیل شکستگی‌ها و گسل‌ها، در این مطالعه جهت برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه در منطقه خلیل شهر، مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴-۵- برداشت و مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی برداشت‌شده در منطقه مورد مطالعه

با توجه به شواهد زمین‌شناسی و تعیین مرز تقریبی گسترش گسل خزر، خط برداشتی با آزمیزه ۱۷۵ درجه تقریباً عمود بر امتداد گسل، طراحی شد. و در نهایت، تعداد ۷۵ نقطه، در ۱۸ ایستگاه با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر در راستای خط برداشت مذکور و با آرایش دوقطبی- دوقطبی اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی توسط تیمی از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به سرپرستی محمدی ویژه انجام شد.

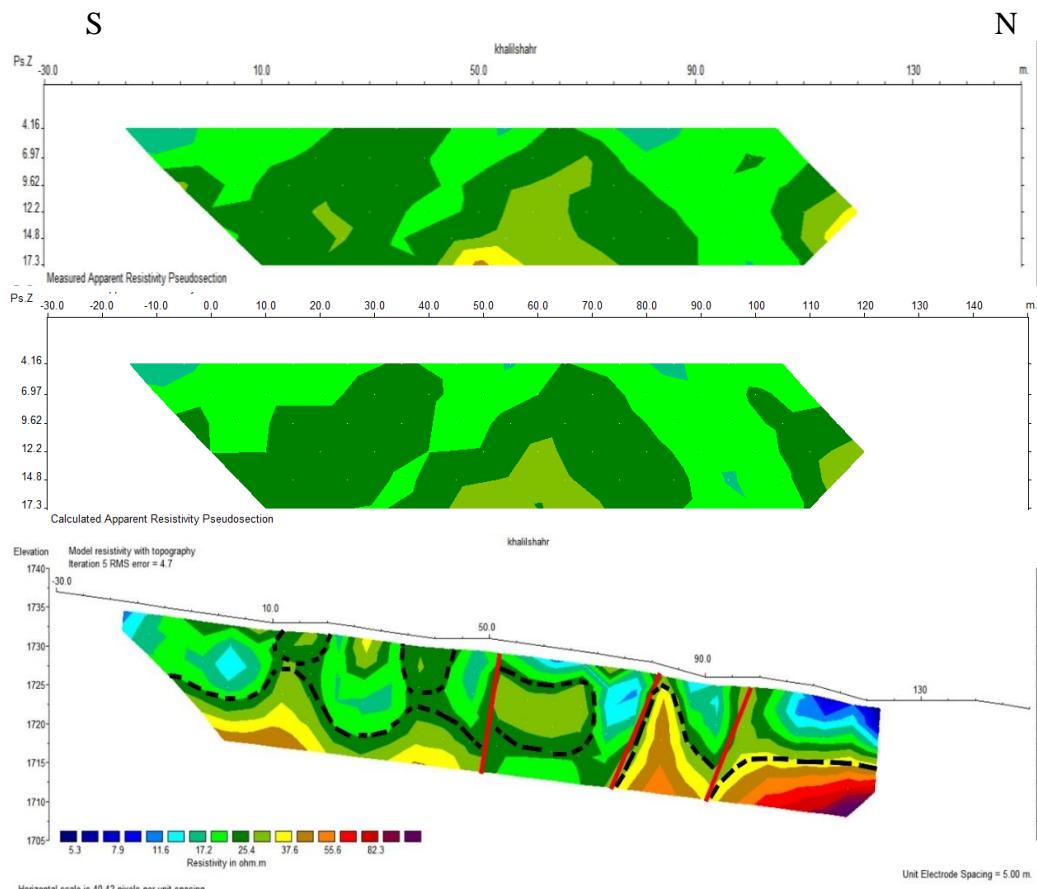
در این مطالعه، جهت انجام مدل‌سازی وارون ابتدا از نرم‌افزار Res2DInv و روش حداقل مربعات و همچنین روش‌های متعدد نرم‌افزار ZondRes2d استفاده شده است؛ که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش لونبرگ-مارکوارت اشاره کرد.

#### ۶-۴ پردازش داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی

قبل از برداشت مقاومت‌ویژه، گروه زمین‌شناسی معتقد به وجود دو اسکارپ گسلی به سبب وجود مقداری جابه‌جایی سطح ارتفاعی در منطقه داشتند. این دو اسکارپ تقریباً در فاصله ۵۰ و ۸۰ متری (البته شروع پروفیل از ۳۰-می باشد)، یعنی این دو اسکارپ در وسط پروفیل مقاومت‌ویژه برداشت شده قرار گرفته‌اند. در تمامی حالت‌های محاسبه شده فاکتورهای کنترلی<sup>۱</sup> (از ذکر شکل‌ها به سبب رعایت اختصار خودداری شده است)، به خوبی این دو مرز (اسکارپ) قابل مشاهده و پیگیری است. در نهایت بهترین حالت از فاکتور کنترلی همان مقادیر پیشنهادی آقای لوک یعنی فاکتور کنترلی ۰.۱۶ و کمترین میزان فاکتور ۰.۰۱۵ در نظر گرفته شد.

پس از بازبینی و ویرایش داده‌ها و در نهایت پس از تعیین بهترین مقدار فاکتور کنترلی، تصحیح توپوگرافی همزمان با مدل‌سازی داده‌ها انجام شد و در نهایت مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه الکتریکی تهییه شد. مدل مذکور در تکرار پنجم و با خطای ریشه میانگین مربعات (RMS) برابر ۴.۲ درصد به دست آمده است و نهایتاً با بررسی زمین‌شناسی منطقه، محل گسل‌ها، لایه‌ها و سایر عوارض بر روی مقطع پیاده‌سازی شد. نتیجه در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. در ادامه شرح بیشتری در این خصوص ذکر خواهد شد.

<sup>1</sup> Damping Factor



شکل ۱۱-۴: از بالا: شبیه مقاطع اندازه‌گیری شده و محاسبه شده مقاومت‌ویژه ظاهری و نهایتاً مقطع مقاومت‌ویژه واقعی حاصل از وارون سازی در نرم‌افزار Res2dinv

در ادامه داده‌های برداشت شده مقاومت‌ویژه در نرم‌افزار Zondres2d<sup>۱</sup> نیز با روش‌های دیگری مدل‌سازی شدند. این کار صرفاً به‌خاطر مقایسه نتایج به‌دست آمده قبلی بوده است. فرمت ورودی داده‌ها به این نرم‌افزار با نرم‌افزار Res2dinv تفاوت دارد. ضمناً تصحیح توپوگرافی همزمان با مدل‌سازی انجام شده است. در شکل ۱۲-۴ نتایج مدل‌سازی به روش‌های هموار مقید<sup>۲</sup>، اکام<sup>۳</sup>، مارکوارت<sup>۴</sup>، بلوك<sup>۵</sup>، متمرکز<sup>۶</sup> و پروفیلر<sup>۷</sup> آورده شده است.

<sup>۱</sup> Smoothness Constraine

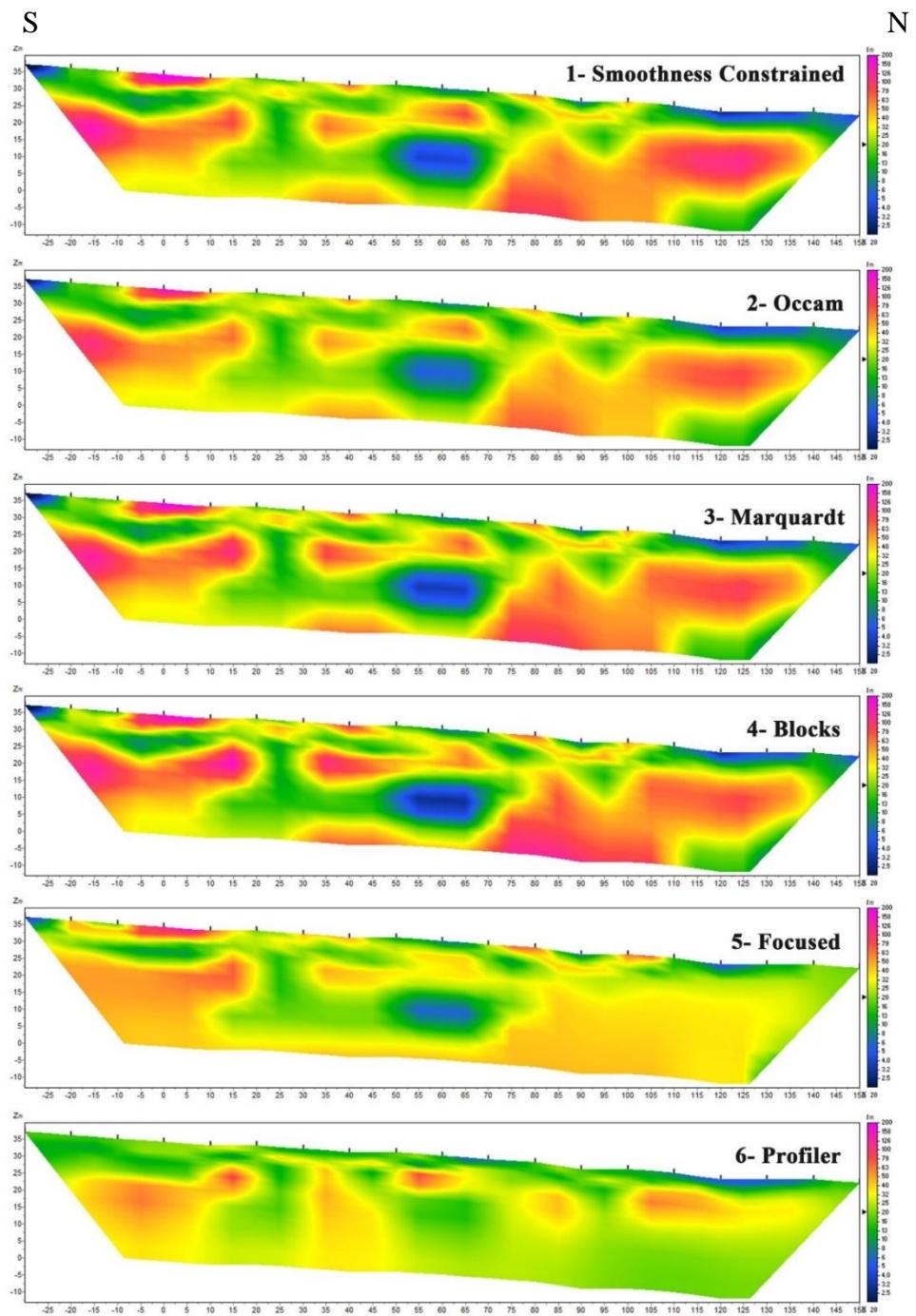
<sup>۲</sup> Occam

<sup>۳</sup> Marquardt

<sup>۴</sup> Blocks

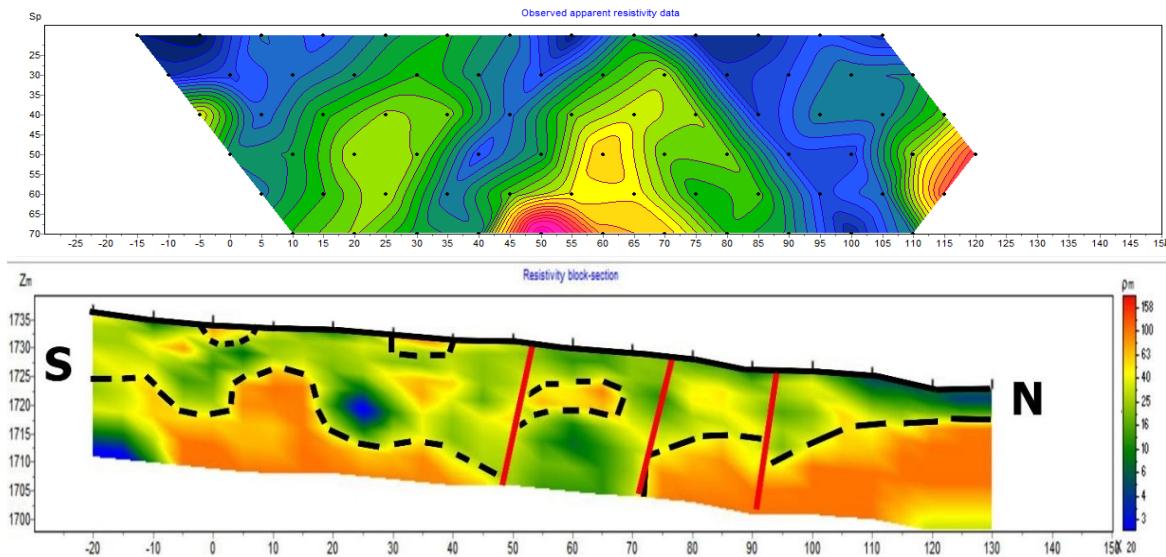
<sup>۵</sup> Focused

<sup>۶</sup> Profiler



شکل ۱۲-۴: مقاطع حاصل از وارونسازی با روش‌های مختلف نرم‌افزار Zondres2d

پس از اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی مقطع مقاومت‌ویژه، تغییر زوایای مقطع و بررسی زمین‌شناسی منطقه، محل گسل‌ها، لایه‌ها و سایر عوارض بر روی مقطع پیاده‌سازی شد؛ که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳: از بالا: شبیه مقاطع اندازه‌گیری شده مقاومت‌ویژه ظاهری و مقطع مقاومت‌ویژه واقعی حاصل از وارون سازی با روش مارکوارت پس از تصحیحات در نرم‌افزار Zondres2d

با مقایسه مقاطع به دست آمده از روش‌های مختلف وارون‌سازی (شکل‌های ۱۱-۴ تا ۱۳-۴)، نتایج زیر

حاصل می‌شود:

۱- مقاطع حاصل از نرم‌افزار Res2dinv و Zondres2d شباهت چشم‌گیری با یکدیگر دارند. با

این تفاوت که مقاطع حاصل از نرم‌افزار Res2dinv عوارض گسلی را ناگهانی‌تر نشان می‌دهد.

۲- در هر ۶ مقطع به دست آمده از روش‌های مختلف وارون‌سازی در نرم‌افزار Zondres2d

عارض مربوط به اسکارپ‌های گسلی دیده می‌شود.

۳- حتی جابه‌جایی لبه‌ها در حاشیه گسل قابل مشاهده است.

۴- دو عارضه زمینی مربوط به بتن‌ریزی و استحکامات جاده‌ای تقریباً در فواصل ۵ و ۴۰ متری

تمامی مقاطع قابل مشاهده است.

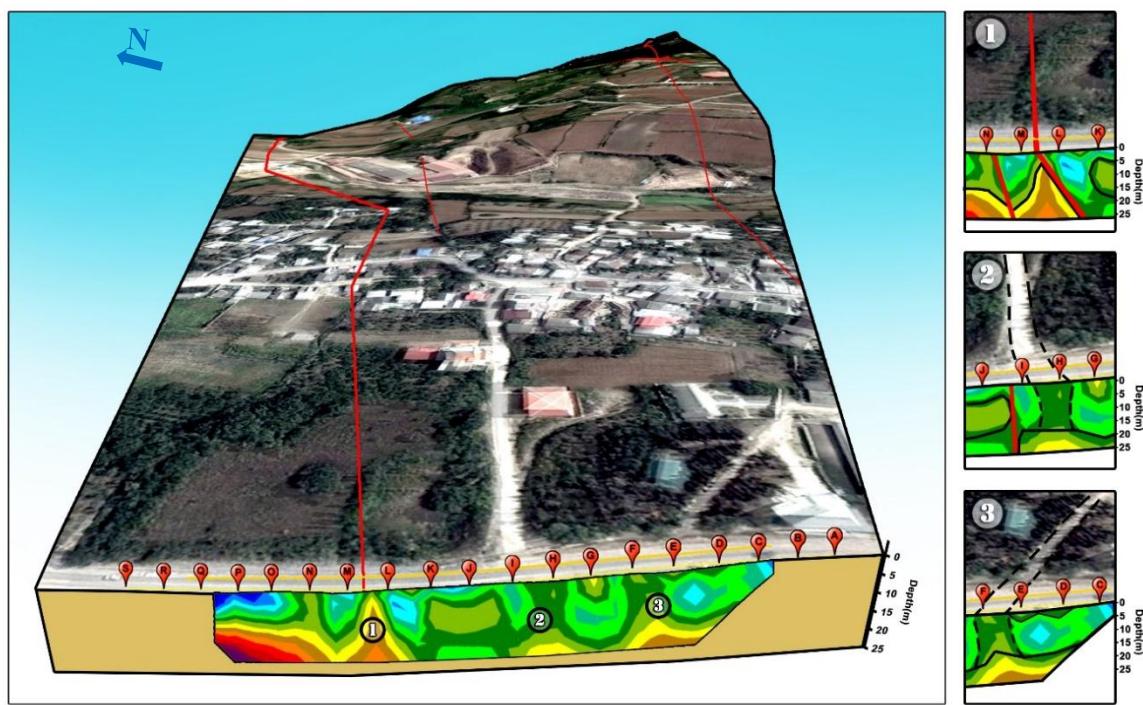
#### ۷-۴- تفسیر مقاطع مقاومت‌ویژه و ترسیم مدل زمین‌شناسی منطقه

پس از اعمال تصحیحات و رسم مقاطع مقاومت‌ویژه (به همراه توپوگرافی) در هر دو نرم‌افزار، نتایج با

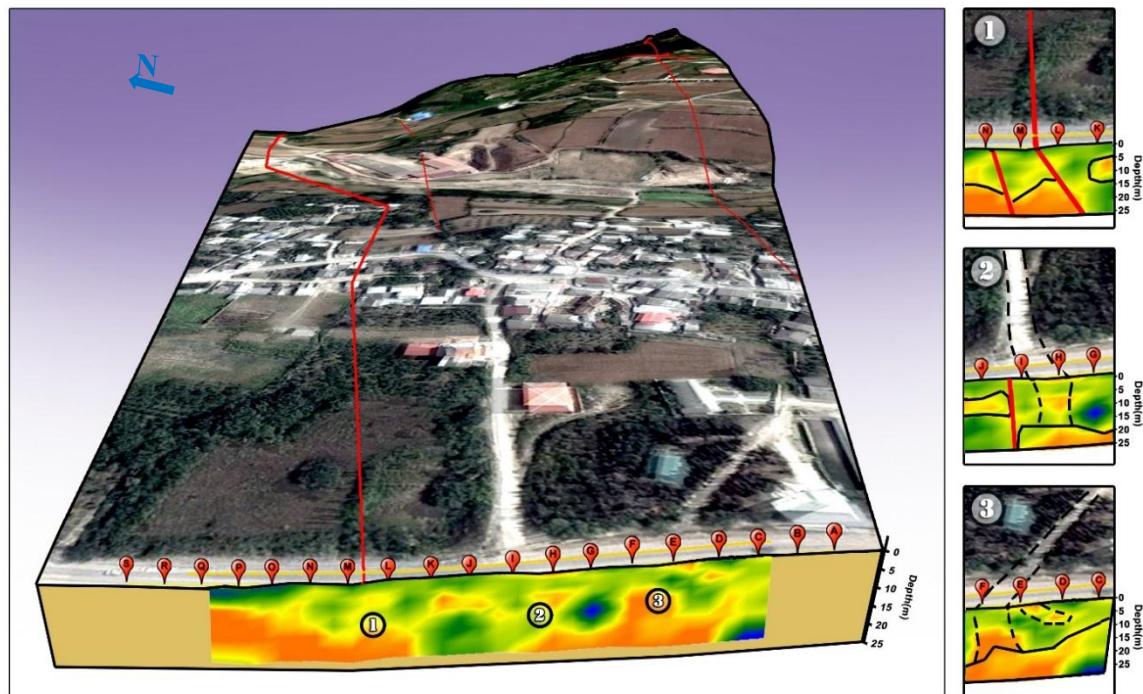
اطلاعات تکتونیک و عکس‌های هوایی منطقه خلیل شهر تلفیق شد، موقعیت الکتروودها نیز در نرم‌افزار

Google Earth پیاده شد و در نهایت در شکل‌های (۱۴-۴) و (۱۵-۴) به نمایش در آمده است. لازم

به ذکر است، که تصاویر هوایی از سال ۱۴۰۵ تا ۲۰۰۵ با هم تلفیق شده و سپس شفافیت تصویر در نرم افزار Photoshop افزایش یافته تا نمای ۳ بعدی بهتری به دست بیاید.



شکل ۱۴-۴: مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی نهایی (خروجی نرم‌افزار Res2dinv) منطقه خلیل شهر پس از تلفیق با اطلاعات تکتونیک، عکس ماهواره‌ای و توپوگرافی منطقه به همراه موقعیت نقاط برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی



شکل ۱۵-۴: مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی نهایی (خروجی نرم‌افزار Zondres2d) منطقه خلیل شهر پس از تلفیق با اطلاعات تکتونیک، عکس ماهواره‌ای و توپوگرافی منطقه به همراه موقعیت نقاط برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی

با توجه به شکل ۱۴-۴ و ۱۵-۴، شاخه‌های گسل خزر در طول پروفیل مشخص شده است. شاخه‌های مذکور نشان‌دهنده‌ی 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. رخداد مذکور از نوع گسلش نرمال بوده که نشان‌دهنده‌ی رژیم تکتونیکی کششی حاکم بر منطقه می‌باشد. مطابق این دو شکل، بی‌亨جارتی‌های شاخصی در طول مقطع دیده می‌شود که هر کدام می‌تواند نمایان گر پدیده‌ی مربوط به خود باشد، که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱- مقاومت‌ویژه الکتریکی در طول پروفیل (شکل ۱۴-۴ و ۱۵-۴) از سطح تا عمق تقریبی ۱۰

متر دارای مقادیر پایین (۰ تا ۲۰ اهمتر) بوده و پس از این عمق مقاومت‌ویژه افزایش می-

یابد. حدود تغییرات در این محدوده بین ۲۰ تا ۱۳۰ اهمتر می‌باشد.

۲- در فاصله بین الکترودهای F و E (۴۰ تا ۵۰ متری از قسمت ابتدایی یا جنوبی پروفیل (شکل

۱۴-۴ و ۱۵-۴)، به سبب فشردگی خاک و همچنین بتن‌ریزی جهت ساخت جاده، افزایش

مقاومت‌ویژه کاملاً مشهود است.

۳- در فاصله بین الکترودهای I و H (۷۰ تا ۸۰ متری از ابتدای پروفیل) نیز، به سبب فشردگی

خاک و همچنین بتن‌ریزی جهت ساخت جاده، افزایش مقاومت‌ویژه کاملاً مشهود است. پاسخ

مذکور تا عمق ۱۰ متر یعنی حتی بیشتر از عمق بتن‌ریزی ادامه یافته است.

۴- در فاصله بین الکترودهای J و I (۸۰ تا ۹۰ متری از ابتدای پروفیل)، گسلش مشهودی سبب

جاده‌جایی نرمال دو بلوك نسبت به هم شده است. میزان جاده‌جایی تقریباً ۱۰ متر برآورد

شده است. این شاخه‌ی گسلی در این پژوهش، Fji نام‌گذاری شده است.

۵- در فاصله بین الکترودهای L و M (۱۱۰ تا ۱۲۰ متری از ابتدای پروفیل)، تغییرات شدید

مقاومت‌ویژه به چشم می‌خورد؛ که ناشی از گسلش اصلی منطقه می‌باشد. به‌طوری‌که بلوك

فرادیواره دارای مقاومت‌ویژه پایین (۱۰ اهمتر) و بلوک فرودیواره دارای مقاومت‌ویژه متوسط

(۵۵ اهمتر) می‌باشد. این شاخه‌ی گسلی در این پژوهش، F1 نام‌گذاری شده است.

۶- در فاصله بین الکترودهای M و N (۱۲۰ تا ۱۳۰ متری از ابتدای پروفیل)، تغییرات شدید

مقاومت‌ویژه همانند مورد ۴ دیده می‌شود؛ که نشان‌دهنده‌ی شاخه‌ی دیگری از گسل می-

باشد. بلوک فرادیواره دارای مقاومت‌ویژه پایین (۱۰ اهمتر) و بلوک فرودیواره دارای

مقاومت‌ویژه متوسط (بیش از ۵۵ اهمتر) می‌باشد. این شاخه‌ی گسلی در این پژوهش، Fnm

نام‌گذاری شده است.

درنتیجه مدل زمین‌شناسی منطقه را می‌توان مانند شکل (۱۶-۴) نشان داد. با توجه به یافته‌های

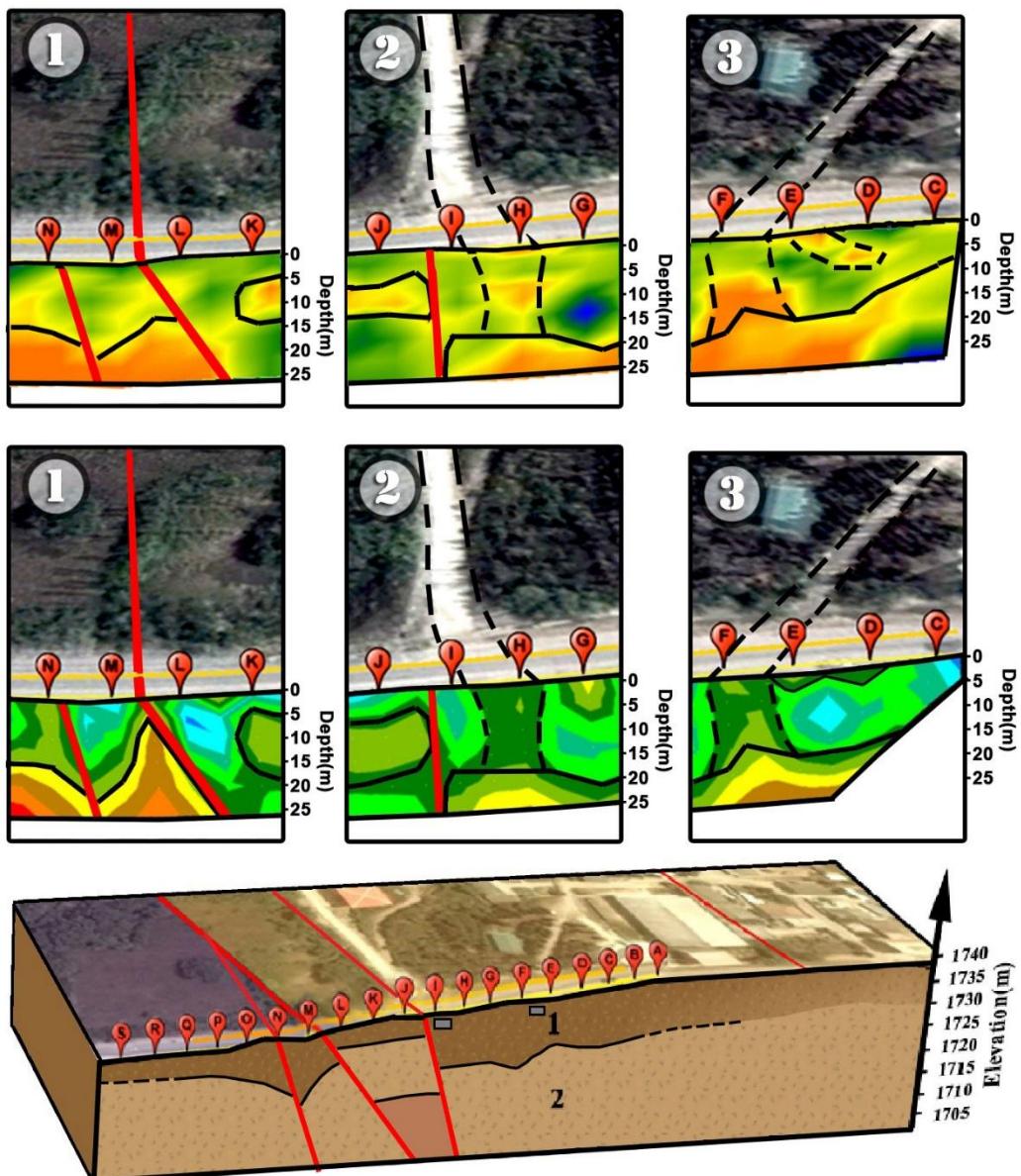
اخیرالذکر، می‌توان شبیب و امتداد عمومی شاخه‌های گسله خزر (شاخه‌ی Fji، F1 و Fnm) در

منطقه مورد مطالعه را محاسبه نمود. در جدول (۲-۴) پارامترهای مختلف شاخه‌های گسل مذکور

آورده شده است.

N

S



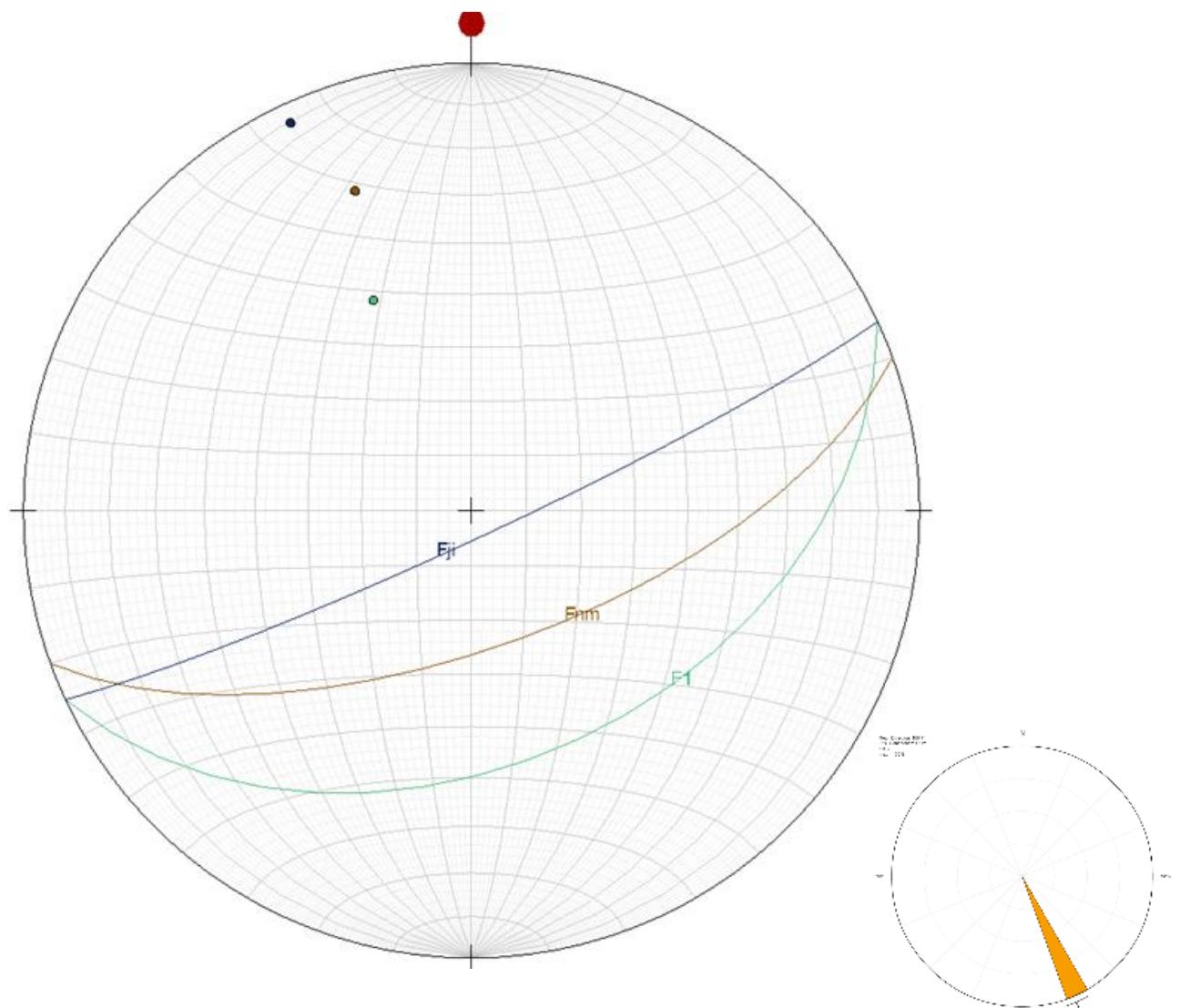
شکل ۴: مقطع مقاومت‌ویژه و پروفیل عمقی معرف شیب و جهت شیب شاخه‌های گسله خزر

جدول ۲-۴: شیب و امتداد عمومی شاخه‌های گسله خزر

ردیف	نام گسل	ساز و کار	شیب و امتداد
۱	F1	نرمال	۶۵°, ۴۳° SE
۲	Fnm	نرمال	۷۰°, ۶۵° SE
۳	Fji	نرمال	۶۵°, ۸۵° SE

در نهایت با پیاده‌سازی پارامترهای ذکر شده‌ی جدول (۲-۴) در نرم‌افزار Streonet، شیب و امتداد و

قطب شاخه‌های گسلی به همراه Rose Chart گسله‌ها مطابق شکل (۱۷-۴) به دست می‌آید.



شکل ۱۷-۴: شیب و امتداد عمومی و قطب شاخه‌های گسل خزر شامل  $F_{ji}$ ,  $F_{nm}$ ,  $F_1$  و  $F_{j1}$  به همراه Rose Chart گسلهای حاصل محاسبه پس از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی منطقه خلیل شهر

#### ۸-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری فصل

- ۱- بازه‌ی احتمالی تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی با توجه به لیتوژوژی عمومی منطقه تعیین شد.
- این بازه، بین  $0$  تا  $1000$  اهم متر متغیر بوده و در نهایت در مدل‌های مصنوعی به کار گرفته شد.

- ۲- پس از مدل سازی پیشرو داده های مقاومت ویژه، پاسخ های ناشی از مدل های زمین شناسی مختلف (زمین لایه ای، گسل تراستی، زون خردشده و گسل پله ای) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. این مدل ها ذهنیت عمومی از منطقه مورد مطالعه را شکل دادند.

- ۳- بهترین آرایش جهت برداشت واقعی انتخاب شد. در این مطالعه، آرایش دوقطبی- دوقطبی (به رغم مزیت های سایر آرایش ها نسبت به آن در برخی موارد) به سبب سادگی در برداشت و همچنین پاسخ های مناسب مدل پیشرو، در امر برداشت مقاومت ویژه منطقه خلیل شهر مورد استفاده قرار گرفت.

- ۴- پس از برداشت، تصحیح، پردازش و مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه و تلفیق نتایج حاصل از آن با اطلاعات زمین شناسی و تکتونیکی عمومی منطقه، پارامترهای مختلف شاخه های گسل خزر مورد ارزیابی قرار گرفتند.

- ۵- سه شاخه ای عمدی گسلی در طول مقطع مقاومت ویژه مشاهده می گردد. این شاخه ها F1، Fnm و Fji نام گذاری شدند.

- ۶- در نهایت ساز و کار گسل ها، نرمال و محیط تکتونیکی کشنی تشخیص داده شد. این نتیجه به این معنی نیست که نتایج مقاومت ویژه و مغناطیس هوابرد با هم مغایرت دارد (در فصل مغناطیس هوابرد به این نتیجه رسیدیم که گسل خزر ساز و کار معکوس دارد) بلکه یک گسل می تواند ساز و کار معکوس یا تراستی داشته باشد و شاخه های جوان آن گسل امتداد لغز و یا نرمال باشند. تشخیص نرمال بودن شاخه های جوان گسل خزر مطابق فصل حاضر، تأییدی است بر نظر شهیدی و نظری، ۱۳۹۰ که ساز و کار شاخه های گسل خزر را در رویان نور از نوع نرمال تشخیص داده اند.

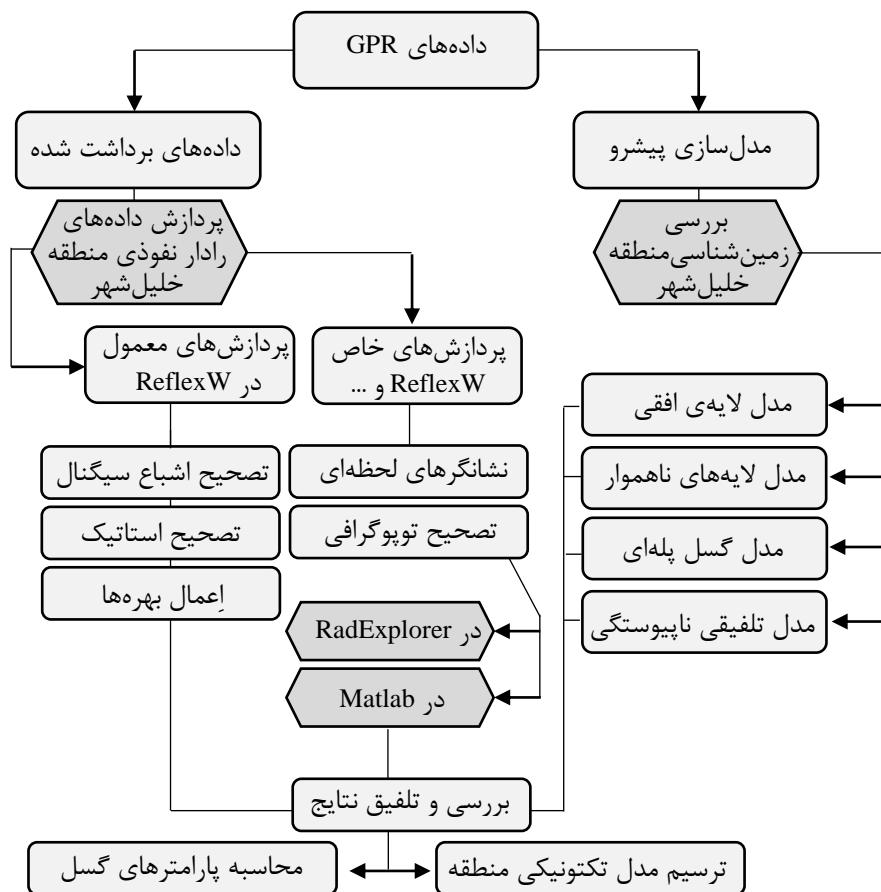
- ۷- گسل F1، دارای امتداد ۶۵ درجه و شیب SE ۴۳°، گسل Fnm دارای امتداد ۷۰ درجه و شیب SE ۶۵° و گسل Fji دارای امتداد ۶۵ درجه و شیب SE ۸۵° می باشد.



**فصل پنجم: مدل سازی پیش رو،  
پردازش و تفسیر داده های GPR**

## ۱-۵ - مقدمه

فصل حاضر مطابق فلوچارت نشان داده شده در شکل ۱-۵، مشتمل بر دو بخش عمده می باشد. ابتدا مدل سازی پیشرو داده های GPR مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد و سپس داده های واقعی برداشت شده در منطقه مورد پردازش قرار گرفته و در نهایت با توجه به اطلاعات زمین شناسی، تکتونیک و مقاومت ویژه منطقه مورد تفسیر و ارزیابی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱-۵: فلوچارت تحقیق انجام شده در زمینه GPR

## ۲-۵ - مدل سازی پیشرو داده های GPR

به منظور بررسی پاسخ GPR اهداف مدفون، مرزهای بازتابندهای GPR و همچنین عوارض زمین-شناختی، نخست اقدام به ساخت مدل سازی پیشرو داده های GPR شد. برای این کار، از روش

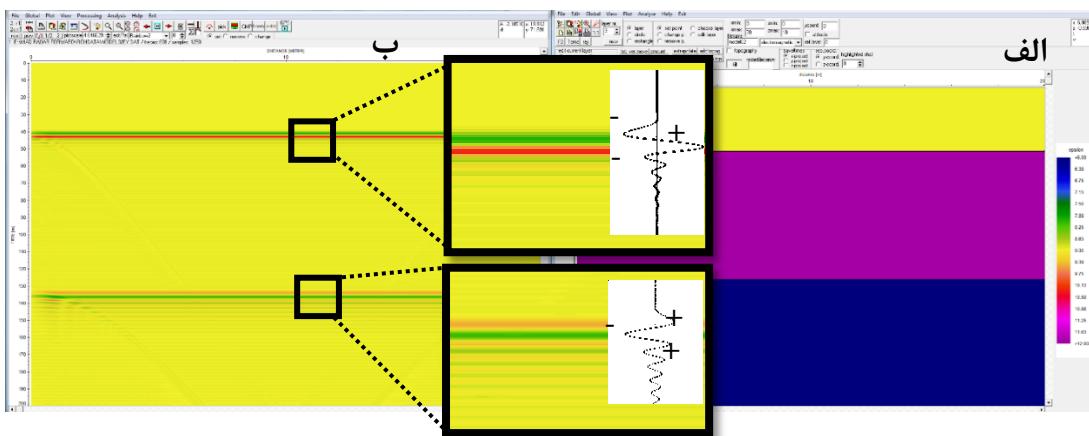
مدل‌سازی پیشرو دو بعدی داده‌های GPR به روش تفاضل محدود در نرم‌افزار ReflexW استفاده شد. مدل‌های پیشرو ساخته شده عبارتند از: مدل لایه‌ی افقی، لایه‌های ناهموار، گسل پله‌ای و در نهایت مدل تلفیقی ناپیوستگی‌های موجود در منطقه، که ذیلاً به ذکر توضیحاتی در مورد هر کدام از این مدل‌ها پرداخته می‌شود.

### ۱-۲-۵- مدل لایه‌ی افقی

همانند مدل‌سازی پیشرو داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی طرح شده در فصل ۴، در این بخش نیز، مدل زمین لایه‌ی افقی ساخته شد (شکل ۲-۵ و ۳-۵). این مدل دارای دو مرز بازتابنده با خصوصیات عکس یکدیگر است. در اینجا به یادآوری این نکته اشاره می‌شود که، اجسام و سطوحی که از لحاظ گذردهی الکتریکی با محیط اطراف خود تباین قابل توجهی دارند، امواج الکترومغناطیسی ارسالی از فرستندهی GPR را بازتاب و یک موجک با سه قسمت عمدۀ در رده‌های GPR ایجاد می‌کنند (Steven et al., 1995). بسته به شکل موجک ورودی و میزان تغییرات رسانندگی و گذردهی الکتریکی، شکل موجک بازتاب یافته از فصل مشترک لایه‌ها تغییر می‌کند. برای نشان دادن اثر تغییرات رسانندگی و گذردهی الکتریکی، یک بار تغییرات رسانندگی الکتریکی در نظر گرفته شد (شکل ۲-۵) و بار دیگر رسانندگی الکتریکی لایه‌ها صفر لاحظ شد (شکل ۳-۵). با مشخص شدن قطبیت موجک بازتاب یافته از فصل مشترک‌های معین زیرسطحی، می‌توان به مقایسه ماهیت لایه‌های ناشناخته زیرسطحی پرداخت. مشخصات مدل لایه‌های افقی طراحی شده با وجود تغییرات رسانندگی الکتریکی در شکل (۲-۵)، به شرح جدول (۱-۵) آورده شده است.

جدول ۱-۵: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل پیشرو لایه‌ی افقی

لایه	ضخامت (متر)	گذردهی الکتریکی نسبی (Sm/m)	رسانندگی الکتریکی
لایه ۱	۰/۰۰۱	۹	۲
لایه ۲	۰/۰۰۵	۱۲	۴
لایه ۳	۰/۰۰۰۱	۶	۴



شکل ۲-۵: الف) مدل مصنوعی لایه‌ی افقی و ب) پاسخ حاصل از مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR

با توجه به شکل (۲-۵)، ذکر برخی نکات بسیار حائز اهمیت بوده و در امر تفسیر داده‌های واقعی می‌تواند راه‌گشا باشد.

۱- پس از برخورد امواج الکترومغناطیسی ارسالی از فرستنده‌ی GPR به سطوح بازتابی (که

از لحاظ گذردهی الکتریکی با محیط اطراف خود تباین قابل توجهی دارد). امواج بازتاب می-

شوند و یک موجک با سه قسمت عمدۀ در ردهای GPR ایجاد می‌کنند.

۲- با بررسی سه قسمت موجود در موجک می‌توان گذردهی دو طرف مرز بازتابی را موردنبررسی قرار داد.

۳- 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.

۴- از سطح به عمق، مشاهده می‌گردد که امواج دچار تضعیف شده‌اند؛ که این تضعیف در لایه‌های رساناتر بیشتر است.

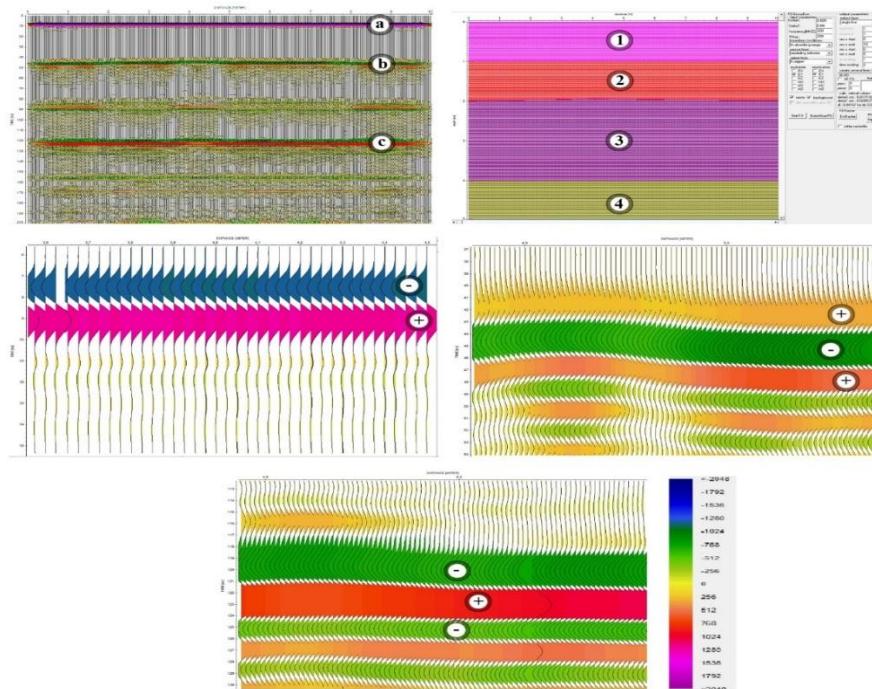
۵- برای جبران تضعیف امواج GPR می‌توان از بهره<sup>۱</sup>‌ها استفاده کرد.

<sup>1</sup> Gain

مشخصات مدل لایه‌های افقی طراحی شده بدون تغییرات رسانندگی الکتریکی در شکل (۳-۵)، به شرح جدول (۲-۵) آورده شده است. با در نظر گرفتن  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$  یعنی دو محیط غیر رسانا در مدل مذکور (شکل ۳-۵) و با قرار دادن  $\epsilon_i = \epsilon_{ir} \epsilon_0$ ، فرمول ۸-۲ (که در فصل ۲ ذکر شد) ساده می‌شود و ضریب بازتاب کاملاً تحت تأثیر گذردهی الکتریکی نسبی می‌گیرد. پس با افزایش گذردهی از مقدار ۱ به ۳۰ ضریب بزتاب منفی خواهد شد. پس مرز بازتابی اول منفی-مثبت خواهد بود.

جدول ۲-۵: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل پیشرو لایه‌های افقی

لایه	ضخامت (متر)	گذردهی الکتریکی نسبی (Sm/m)	رسانندگی الکتریکی (Sm/m)
لایه ۱	۱	۱	۰
لایه ۲	۱	۱	۳۰
لایه ۳	۲	۱	۱۰
لایه ۴	۱	۱	۲۵



شکل ۳-۵: (الف) مدل مصنوعی لایه‌های افقی و (ب) پاسخ حاصل از مدل سازی پیشرو داده‌های GPR پس از پردازش مهاجرت F-K<sup>۱</sup>، (ج) قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته از مرز GPR اول، (د) مرز بازتابی GPR دوم، (ه) مرز بازتابی GPR سوم.

<sup>۱</sup> A two-dimensional Fourier transform over time and space is called an F-K (or K-F) transform where F is the frequency (Fourier transform over time) and K refers to wave-number (Fourier transform over space).

## ۲-۵-۲- مدل لایه‌های ناهموار

در واقعیت، شاید همیشه زمین حالت لایه‌های افقی نداشته باشد. گاهی ممکن است در برخی از قسمت‌های منطقه مورد مطالعه، لایه‌های زیرسطحی به‌سبب برخی فرآیندهای زمین‌شناسی حالتی آشفته به خود بگیرند. فشار لایه‌های متراکم فوقانی گاهی حالت چینه‌ای لایه‌ای را برهم می‌زند. اگر از دید عرضی دهانه یک رودخانه قدیمی پرشده بررسی شود، آنگاه ممکن است اصلاً لایه‌بندی افقی دیده نشود. حتی گاهی حرکات تکتونیکی باعث گسیختگی لایه‌ها شده و نظم افقی را برهم می‌زند. با این توصیف زمینی متشکل از ۴ لایه در نظر گرفته شد که گذردهی الکتریکی و رسانندگی الکتریکی در هر کدام از لایه‌ها مطابق جدول ۳-۵، مقادیر متفاوتی نسبت به سایر لایه‌ها دیده می‌شود. البته سعی شده اعداد و مقادیری مورد استفاده قرار گیرد که انتظار می‌رود پس از مدل‌سازی، مرزها را به صورت نوک‌تیز (ناگهانی) به ما نشان دهد. لذا تباین در هر لایه بایستی نسبت به لایه‌های پیرامون بارز باشد. همچنین مطابق شکل ۴-۵، برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌هایی در سراسر مدل در نظر گرفته شده است و این موضوع به این دلیل بوده که رفتار امواج الکترومغناطیسی بازتاب شده از سطح برآمده یا فرورفته بررسی گردد. در ادامه ذکر خواهد شد که نوعی رفتار خاص همچون امواج لرزه‌نگاری در اینجا نیز دیده می‌شود.

جدول ۳-۵: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل پیشرو لایه‌های ناهموار

لایه	ضخامت (متر)	گذردهی الکتریکی نسبی (Sm/m)	رسانندگی الکتریکی (Sm/m)
۱ لایه ۱	۰-۰۰۱	۹	۳ تا ۱
۲ لایه ۲	۰-۰۰۰۵	۱۲	۰ تا ۵
۳ لایه ۳	۰	۱	۵ تا ۱
۴ لایه ۴	۰-۰۰۰۱	۶	۰ تا ۵

همان‌طور که در شکل ۴-۵، مشاهده می‌گردد، چند نکته قابل ذکر وجود دارد:

- فرورفتگی‌ها و یا ناوگون‌ها (اگر بتوان چنین اسمی به آن اطلاق کرد)، در سرتاسر پاسخ مدل به دست آمده به صورت حالت پاپیونی دیده می‌شود. این حالت پاپیونی و یا پراش بر روی

بازتاب‌های اولیه ممکن است ما را در تشخیص بازتاب‌های اولیه دچار اشتباه کند. این پدیده همچنین باعث شده تا شکل این ناوگون‌ها یا فروافتادگی‌ها خیلی کوچک‌تر از حالت واقعی مشاهده گردد.

- ۲- پاسخ GPR برآمدگی‌هایی که حالت تیز دارند، کمی هموارتر و گردتر مشاهده می‌گردد؛ و حتی در مقطع GPR پاسخ برآمدگی‌ها یا تاقگون‌ها کمی بزرگ‌تر از حالت عادی مدل مفروض دیده می‌شود.

- ۳- در مرز بازتابی GPR دوم و سوم، قسمت‌های پرشیب، پاسخ ضعیفی از خود نشان می‌دهند.

- ۴- همچنین مرز بازتابی GPR دوم و سوم، مقداری نسبت به حالت مفروض مدل، فشرده‌تر و چسبیده‌تر دیده می‌شوند که می‌تواند به‌سبب میزان رسانندگی بسیار پایین لایه‌های سوم و چهارم باشد (لازم به ذکر است که رسانندگی لایه‌ی سوم صفر است و هرچه رسانندگی بیشتر باشد میرایی موج بیشتر است و بالعکس کم بودن رسانندگی سبب نمود نوعی تراکم در امواج خواهد شد).

- ۵- برای رفع حالت پاپیونی بایستی از یکسری فیلترهایی استفاده شود که بی‌هنجری‌ها را در جای واقعی خودشان قرار دهد و درواقع این نوع دگرنامی (الیاسینگ)<sup>۱</sup> را برطرف نماید؛ بنابراین ما از فیلتری به نام فیلتر مهاجرت F-K (شکل ۴-۵ ج) استفاده نمودیم. مطابق شکل ۴-۵ ج مشاهده می‌گردد که پاسخ مدل بهبود یافته است و شباهت بیشتری به مدل اولیه دارد.

- ۶- پس از إعمال فیلتر مهاجرت F-K، حالتهای گردشده‌ی بی‌مورد نیز برطرف شده است و تیزی مرزهای برآمده خصوصاً در سمت چپ مرز دوم به‌وضوح در شکل ۴-۵ ج، مشاهده می‌گردد.

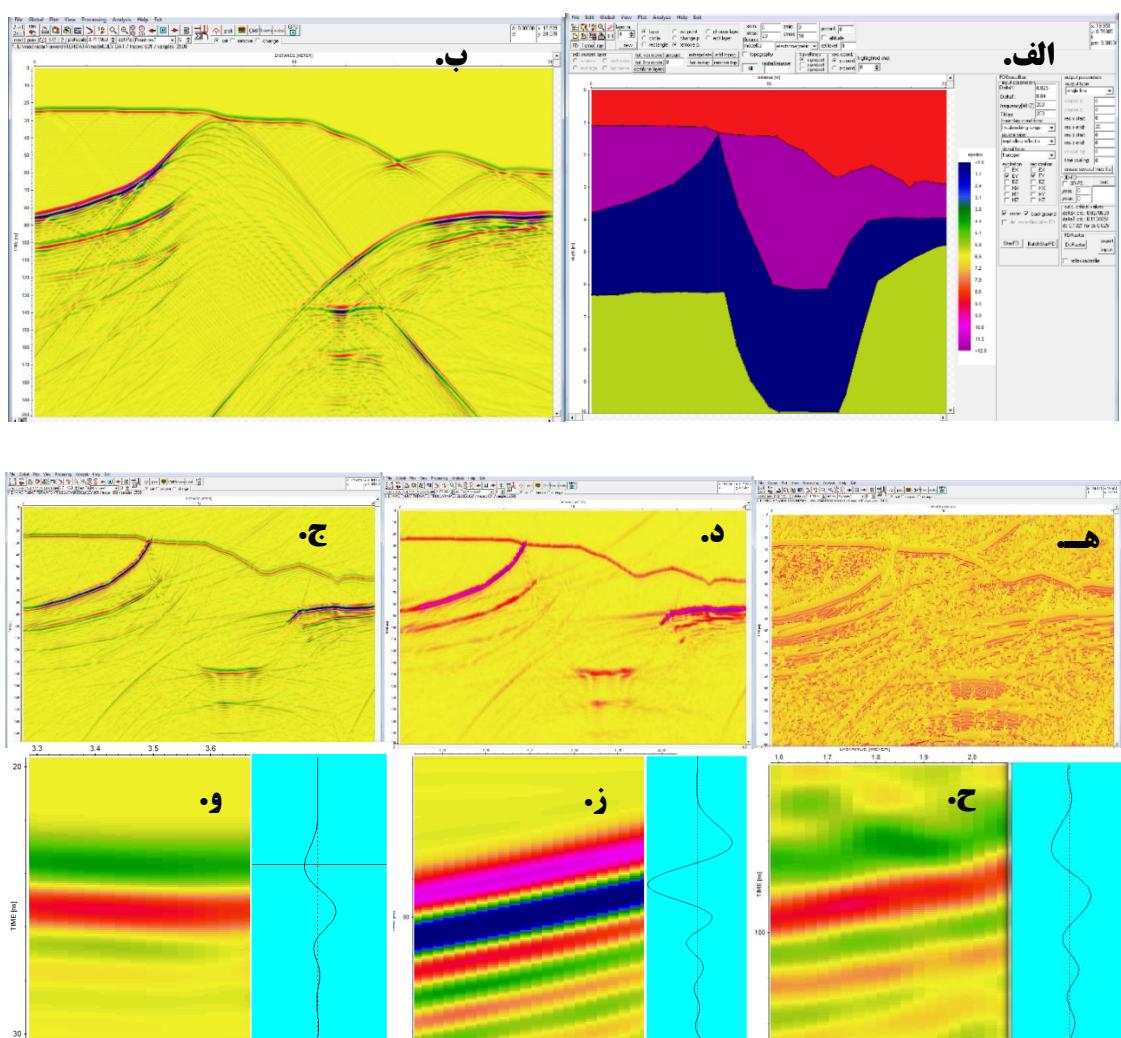
---

<sup>1</sup> Aliasing

۷- نشانگرهای لحظه‌ای (فرکانس، فاز و دامنه‌ی لحظه‌ای) نیز می‌توانند در امر تشخیص مرزها

مورد استفاده قرار گیرند، در این مثال از دو نشانگر پوش‌دامنه<sup>۱</sup> و فاز لحظه‌ای استفاده شد

(شکل ۴-۵ د و ۴-۵ ه).



شکل ۴-۵: (الف) مدل مصنوعی لایه‌های ناهموار و (ب) پاسخ حاصل از مدل‌سازی پیشرو بدون پردازش  
ج) پس از اعمال فیلتر مهاجرت F-K، د) پردازش با استفاده از نشانگر پوش‌دامنه، ه) پردازش با استفاده از نشانگر فاز  
لحظه‌ای و) قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته از مرز GPR اول، ز) مرز بازتابی GPR دوم، ح) مرز بازتابی GPR  
سوم.

<sup>1</sup> Envelop

- همانند مدل لایه‌ی افقی، برای زمین با لایه‌های هموار نیز می‌توان از طریق قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته از فضول مشترک لایه‌های GPR، به ضریب گذردهی و درواقع گذردهی الکتریکی لایه‌ها نسبت به یکدیگر پی برد.

به‌این‌ترتیب که در مرز بازتابی اول (شکل ۴-۵-و)، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به‌ترتیب عبارتند از؛ منفی- مثبت- منفی، پس گذردهی لایه‌ی اول کمتر از لایه‌ی دوم است (مطابق جدول ۳-۵، گذردهی لایه اول برابر با ۹ و لایه‌ی دوم برابر با ۱۲ است، یعنی مطلب مذکور کاملاً صحیح می‌باشد).

در مرز بازتابی دوم (شکل ۴-۵-ز) نیز، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به‌ترتیب عبارتند از؛ مثبت- منفی- مثبت و بخش منفی وسطی قویاً به چشم می‌آید؛ بنابراین گذردهی لایه‌ی دوم بایستی خیلی بیشتر از لایه‌ی سوم باشد (مطابق جدول ۳-۵، گذردهی لایه دوم برابر با ۱۲ و لایه‌ی سوم برابر با ۱ است).

در مرز بازتابی سوم (شکل ۴-۵-ح) نیز، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به‌ترتیب عبارتند از؛ منفی- مثبت- منفی، پس گذردهی لایه‌ی سوم کمتر از لایه‌ی چهارم است (مطابق جدول ۳-۵، گذردهی لایه سوم برابر با ۱ و لایه‌ی چهارم برابر با ۶ است).

### ۳-۲-۵- مدل گسل پله‌ای<sup>۱</sup>

همانند بخش مدل‌سازی پیشرو مقاومت ویژه که در فصل قبل ذکر شد، در این فصل نیز به بررسی مجموعه گسلی می‌پردازیم که ریختشناسی آن باعث شده که به این مجموعه، گسل‌های پله‌ای گفته شود؛ بنابراین سعی نمودیم تا پاسخ GPR بازتابی از این ساختار را به نمایش درآوریم. لیکن برای شباهت محیط با منطقه مورد مطالعه در خلیل شهر، نخست، سعی نمودیم تا مقادیر گذردهی و

<sup>1</sup> En Echelon

رسانندگی الکتریکی مدل همانندی کاملی با این مقادیر در منطقه داشته باشد ازین‌رو مطابق جدول

۴-۵، پارامترهای مدل را انتخاب نمودیم.

جدول ۴-۵: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل پیشرو گسل پله‌ای

لایه	ضخامت (متر)	رسانندگی الکتریکی نسبی (Sm/m)	گذردهی الکتریکی نسبی
لایه ۱(هوای) لایه ۲(خاک لومی مرطوب)	۱	۰	۰.۰۱
لایه ۳(خاک لومی خشک) لایه ۴(خاک لومی خشک)	۱	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰۵
لایه ۵(سنگ‌آهک)	۱ تا ۴	۶	۰.۰۰۱

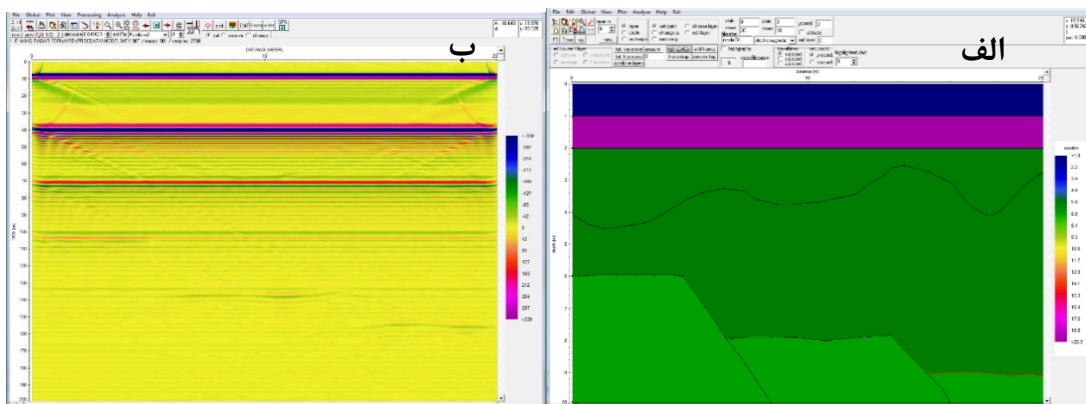
از خصوصیات بارز و موردنوجه در ساخت این مدل، سوای رعایت ریخت‌شناسی گسل‌های پله‌ای، می-

توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱- لایه‌ی هوا به این سبب طراحی شده که معمولاً در برداشت‌های GPR اولین موج ورودی به گیرنده موج مستقیمی است که از فرستنده مستقیماً ارسال می‌گردد؛ و پاسخ امواج مستقیم عبوری از هوا تا زمان رسید اولین بازتاب از سطح بازتابنده‌ی اول ادامه خواهد یافت. از پردازش‌های ابتدایی داده‌های GPR تصحیح استاتیک یا تصحیح صفر زمانی است که در آن پاسخ موج مستقیم اولیه فرستنده حذف می‌گردد و صفر واقعی را مرز هوا و لایه‌ی اول در نظر می‌گیرند.

۲- در این مدل (شکل ۴-۵)، تغییرات رطوبت خاک نیز به نمایش درآمده است (نام‌گذاری خاک‌ها روند خاص خود را دارد، معمولاً در تقسیم‌بندی زمین‌شناسی، خاک‌ها را بر اساس درصد مواد سازنده رسی، سیلتی و ماسه‌ای نام‌گذاری می‌کنند. خاک لومی، خاکی است که هر سه مورد ذکر شده را به مساوات داراست و گاهی با مواد آلی نیز همراه است).

۳- لایه سوم و چهارم (شکل ۵-۵) فقط در مقدار رسانندگی الکتریکی متفاوت‌اند، یعنی تأثیر رطوبت تنها بر رسانندگی در نظر گرفته شد و گذردهی الکتریکی ثابت فرض شد. همین مسئله ایجاد مشکل بزرگی نمود که سبب اصلاح پارامترهای مدل شد.



شکل ۵-۵: (الف) مدل مصنوعی گسل پله‌ای، (ب) پاسخ حاصل از مدل‌سازی پیشرو پس اعمال مهاجرت F-K

با توجه به شکل ۵-۵، می‌توان دریافت که:

۱- اولاً در مرز بازتابی اول، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ترتیب عبارتند از؛ منفی و سپس مثبت و این مرز، بازتابی بسیار قوی از خود نشان می‌دهد. پس گذردهی لایه‌ی اول خیلی کمتر از لایه‌ی دوم است (مطابق جدول ۴-۵، گذردهی لایه اول برابر با ۱ و لایه‌ی دوم برابر با ۲۰ است). تنها با اعمال تصحیح استاتیک در نرم‌افزار ReflexW می‌توان پاسخ ناشی از هوا را حذف نمود و صفر واقعی را به سطرهای بالاتر انتقال داد.

۲- مرز بازتابی دوم، مرز بین خاک لومی مرطوب و خشک است. گذردهی و رسانندگی الکتریکی لایه‌ی بالایی (دوم) یعنی خاک لومی مرطوب بیشتر از خاک لومی خشک است. پس انتظار می‌رود پاسخ GPR در قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته از مرز مذکور به ترتیب شامل بخش‌های مثبت- منفی- مثبت باشد که به درستی در شکل ۵-۵- ب به نمایش درآمده است.

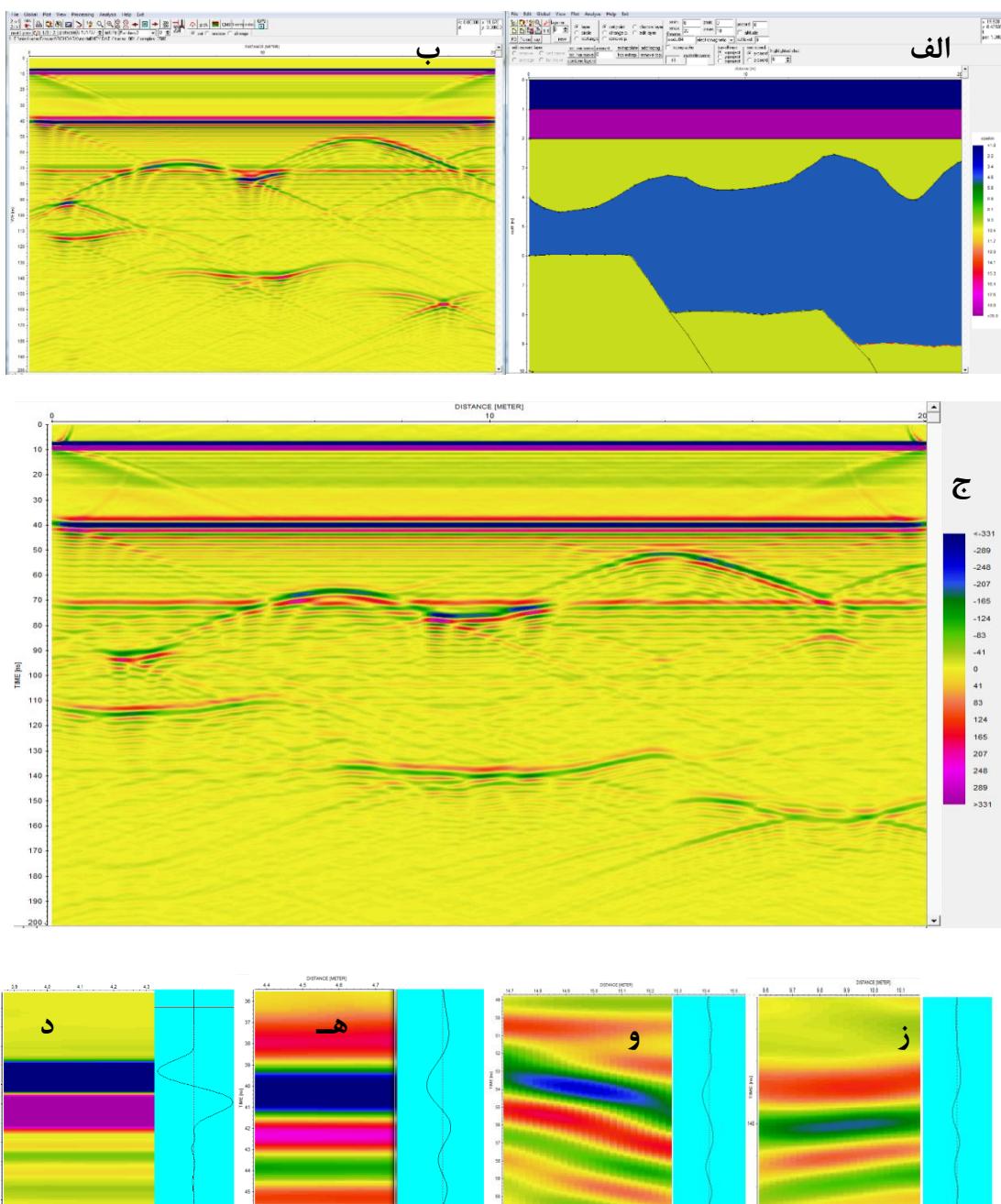
۳- در مرز سوم موجود در مدل که تعمدًا به صورت فرورفتگی و برآمدگی طرح شده است، مشاهده می‌گردد که لایه‌های طرفین مرز، از لحاظ گذردهی با هم برابرند و مقدار گذردهی الکتریکی

هر دو لایه برابر ۶ است؛ و تنها تفاوتشنان در میزان رسانندگی الکتریکی آن‌ها است. ازین‌رو پاسخ این مرز، به خوبی مشاهده نمی‌گردد و در عمق و فاصله زمانی مربوطه دو حادثه کاذب به چشم می‌خورد.

۴- مرز چهارم که هدف اصلی این مدل بوده است پاسخ ضعیفی از خود به نمایش گذاشته است و این مطلب می‌تواند به دو علت رخ داده باشد: اول به‌سبب تباین کم گذردگی الکتریکی لایه‌ی چهارم و پنجم و دوم این‌که افزایش عمق نفوذ و وجود لایه‌های رسانا سبب میرائی موج الکترومغناطیس خواهد شد. البته می‌توان این ضعف را با اعمال پردازش بهره‌ها جبران نمود.

بنابراین بر آن شدیم تا با اصلاح پارامترهای مدل، به پاسخ بهتر و مناسب‌تری از مرز گسل‌های پله‌ای دست یابیم. لیکن نباید از این نکته غفلت ورزید که همیشه شرایط برای برداشت GPR ما آرمانی نخواهد بود و ممکن است اتفاقی مشابه با حالت مشاهده شده در شکل ۵-۵ اتفاق بیفتد و پاسخ‌های بسیار ضعیفی از پدیده‌ها ثبت گردد که در مواردی شاید حتی نتوان با برخی پردازش‌ها این ضعف و کاستی را جبران نمود.

مدل اصلاح‌شده‌ی گسل پله‌ای در شکل ۶-۵ به نمایش درآمده است. تنها تغییراتی که در این مدل پدید آمده عبارت است از: تغییر گذردگی الکتریکی لایه سوم از مقدار ۶ به ۱۰، تغییر گذردگی الکتریکی لایه چهارم از مقدار ۶ به ۵ و تغییر گذردگی الکتریکی لایه پنجم از مقدار ۷ به ۱۰.



شکل ۵-۶: (الف) مدل مصنوعی اصلاح شده گسل پلهای و (ب) پاسخ حاصل از مدل سازی پیشرو و بدون پردازش GPR (ج) پاسخ حاصل از مدل سازی پیشرو پس اعمال مهاجرت F-K، (د) قسمت های مختلف موجک بازتاب یافته از مرز اول، (ه) مرز بازتابی GPR دوم و (ز) مرز بازتابی GPR سوم، (ز) مرز بازتابی GPR چهارم.

از مشاهده شکل ۵-۶ (مدل اصلاح شده گسل پلهای)، نتایج ذیل استنباط می گردد:

- ۱- مرز بازتابی اول و دوم همانند مدل اولیه (شکل ۵-۵) بوده و خصوصیات آنرا مطابق با توضیحات مذکور قبلی می توان استخراج نمود.

در مرز بازتابی اول، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ترتیب عبارتند از؛ منفی و سپس مثبت و این مرز، بازتابی بسیار قوی از خود نشان می‌دهد. پس گذردهی لایه‌ی اول خیلی کمتر از لایه‌ی دوم است (گذردهی الکتریکی لایه‌ی اول برابر ۱ و لایه‌ی دوم برابر ۲۰ است).

در مرز بازتابی دوم، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ترتیب عبارتند از؛ مثبت-منفی-مثبت، پس گذردهی لایه‌ی دوم بیشتر از لایه‌ی سوم است (گذردهی الکتریکی لایه‌ی دوم برابر ۲۰ و لایه‌ی سوم برابر ۱۰ است).

۲- دامنه‌ی امواج بازتابی در شکل ۶-۵ د تا ز، از سطح به عمق تضعیف می‌شود تا جایی که تشخیص قطبیت لایه‌ی چهارم سخت می‌شود. البته می‌توان باِعمال بهره‌ها بر این نقص فائق آمد. پس ازِعمال بهره می‌توان به خوبی قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته از فصول مشترک را تمییز داد.

۳- در مرز بازتابی سوم، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ترتیب عبارتند از؛ مثبت-منفی-مثبت، پس گذردهی لایه‌ی دوم بیشتر از لایه‌ی سوم است. (گذردهی الکتریکی لایه‌ی سوم برابر ۱۰ و لایه‌ی چهارم برابر ۵ است)

۴- در مرز بازتابی چهارم، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ترتیب عبارتند از؛ منفی-مثبت-منفی، پس گذردهی لایه‌ی چهارم کمتر از لایه‌ی پنجم است. (گذردهی الکتریکی لایه‌ی چهارم برابر ۵ و لایه‌ی پنجم برابر ۱۰ است)

۵- همانند مدل زمین با لایه‌های ناهموار در این مدل نیز مرزهای پرشیب خصوصاً قسمت‌های پرشیب مرز بازتابی چهارم، پاسخ ضعیفی از خود نشان می‌دهند.

#### ۴-۵- مدل تلفیقی ناپیوستگی‌های منطقه

در نهایت مدلی ترسیم شد تا برخی از خصوصیات منطقه مورد مطالعه را در خود جای داده باشد که از آن دست می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. پارامترهای مدل به شرح جدول ۵-۵ و شکل ۷-۵ است.

- ۱- همانند مدل گسل پلهای، در این مدل نیز اثر هوا یا جابه‌جایی صفر زمانی لحاظ شده است.
- ۲- گوهی رسانایی با گذردهی الکتریکی بالا فرض شده و رفتار گوه در دو قسمت نازک‌شونده و بسیط‌شونده مدل موردنبررسی قرار گرفته است.
- ۳- همانند مدل گسل پلهای، در این مدل نیز فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های در لایه‌ی خاک لومی در نظر گرفته شده است.
- ۴- از جمله مواردی که این مدل را خاص‌تر از سایر مدل‌های مذکور نموده، تعریف دو عرضه نقطه‌ای ناشی از لوله و یک عرضه مربعی به ابعاد  $1 \times 1$  مترمربع ناشی از تأسیسات جاده‌ای می‌باشد. در ادامه توضیح خواهیم داد که این عوارض هرکدام باعث ایجاد پدیده‌ای خاص خواهند شد. پارامترهای عوارض کروی و مربعی در جدول ۵-۶ ذکر شده است.

جدول ۵-۵: مشخصات لایه‌های شبیه‌سازی شده در مدل پیشرو تلفیقی ناپیوستگی‌های منطقه

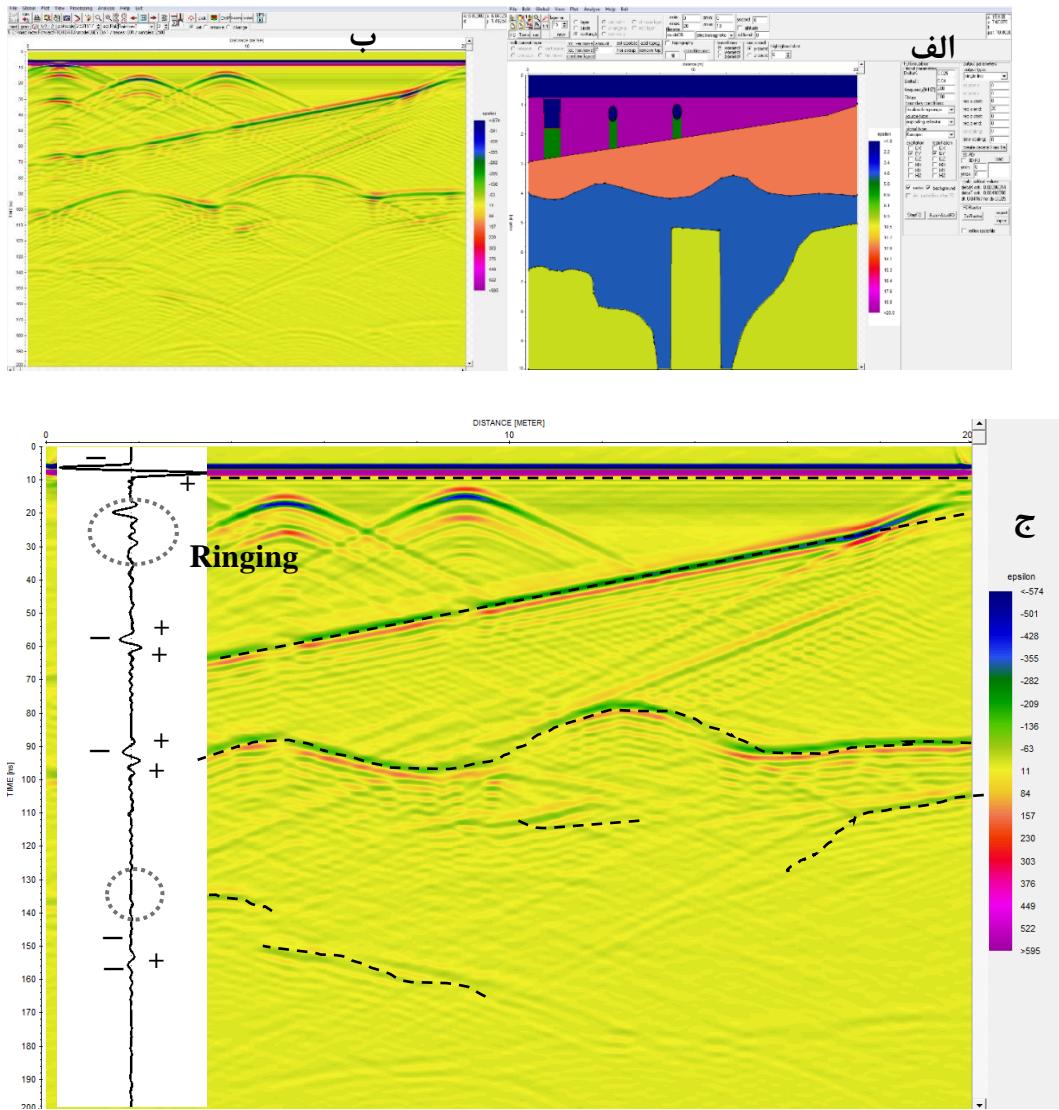
لایه	ضخامت (متر)	گذردهی الکتریکی نسبی ( $\text{Sm}/\text{m}$ )	رسانندگی الکتریکی
لایه ۱ (هوا)	۰.۷۵	۱	۰
لایه ۲ (خاک لومی مرطوب)	۰.۲۵ تا ۰.۲۵	۲۰	۰.۰۱
لایه ۳ (خاک لومی با رطوبت کم)	۱ تا ۳	۱۳	۰.۰۰۸
لایه ۴ (خاک لومی خشک)	۱ تا ۶	۵	۰.۰۰۱
لایه ۵ (سنگ‌آهک)	۵ تا ۲	۱۰	۰.۰۰۰۵

جدول ۵-۶: مشخصات عوارض کروی و مربعی در مدل پیشرو تلفیقی ناپیوستگی‌های منطقه

عارضه	نوع	گذردهی الکتریکی نسبی (زمینس بر متر)	رسانندگی (زمینس بر متر)	شعاع	طول	عرض	پارامتر هندسی (متر)
کره	In circle	۱	۰	-	-	-	۰.۲۵
	Out (below)	۶	۰.۰۰۰۱	-	-	-	۰.۲۵
مربع	In rectangle	۱	۰	۱	۱	۱	-
	Out (below)	۶	۰.۰۰۰۱	-	-	-	۰.۰۰۰۵

- ۵- ضمناً به‌سبب برخی محدودیت‌های نرم‌افزاری در ترسیم مدل GPR، حرکت تکتونیکی مدنظر در لایه‌ی آهکی همانند مدل زمین‌شناسی پیشنهادی در فصل مقاومت‌ویرژه، به نمایش در

نیامده است؛ اما در ترسیم مدل شیب تند لایه (شکل ۷-۵) تا حدودی مناسب بوده است. در ادامه در مورد پاسخ GPR شیب‌های تند توضیح داده خواهد شد.



شکل ۷-۵: (الف) مدل مصنوعی تلفیقی ناپیوستگی‌های منطقه و (ب) پاسخ حاصل از مدل‌سازی پیشرو و بدون پردازش،  
ج) پاسخ حاصل از مدل‌سازی پیشرو پس از عمل مهاجرت F-K

با بررسی شکل ۷-۵، می‌توان دریافت که:

- ۱- قوی‌ترین بازتاب و یا طولی‌ترین موجک در مرز بازتابی اول مشاهده می‌گردد که به‌سبب تباین بارز بین لایه‌های اول و دوم می‌باشد. قسمت‌های مختلف موجک مذکور، همانند آنچه در شکل ۷-۵-ج مشاهده می‌گردد عبارت است از بخش اولیه‌ی قویاً منفی و سپس بخش

مثبت، ضمناً در تمامی مدل‌های پیشروی که در این فصل ترسیم شده مرز ابتدایی شامل موجکی با دو بخش قویاً مثبت و منفی است و بخش سوم دیده نمی‌شود یا بسیار ضعیف است.

- پاسخ‌های بازتابی GPR ناشی از مرزها به ترتیب از مرز بالایی به سمت مرزهای عمیق‌تر، میرا شده و تضعیف گردیده است؛ که به‌واسطه‌ی اتلاف و پخش هندسی امواج الکترومغناطیس، این تضعیف به‌وجود آمده است. محدوده عمق نفوذ امواج GPR توسط میزان رسانایی الکتریکی زمین، بسامد مرکزی پراکنده شده و قدرت تابش محدود می‌شود به‌طوری که با افزایش رسانایی، محدوده عمق نفوذ کاهش می‌یابد.

- ۳- جهت تقویت پاسخ موجک‌های بازتاب یافته از مرزهای عمیق‌تر می‌توان از بهره‌هایی مانند AGC، بهره‌ی انتخابی<sup>۱</sup> و سایر بهره‌ها استفاده کرد. در این پژوهش برای تقویت پاسخ‌های عمیق داده‌های واقعی از فیلتر بهره‌ی انتخابی استفاده شده است.

- ۴- مطابق نشانگر فاز لحظه‌ای (مقطع فاز به‌سبب رعایت اختصار آورده نشده) پاسخ گوهی رسانا در سمت راست یعنی جایی که گوه نازک می‌گردد دچار نوعی تداخل و اعوجاج شده و علت اصلی آن، به‌خاطر این است که لایه بهقدرتی نازک شده که زمان رسید بازتاب مرز اول و دوم با هم دچار تداخل شده‌اند.

- ۵- در مرز بازتابی دوم (شکل ۷-۵-ج)، 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).

- ۶- پاسخ GPR مرز سوم مطابق با شکل ۷-۵-ب که در آن مرز بین خاک لومی مرطوب و خشک به‌صورت برآمدگی و فرورفتگی در نظر گرفته شده است، در قسمت‌های ناوگونی حالت پاپیونی نشان داده و شکل این فرورفتگی‌ها خیلی کوچک‌تر از حالت واقعی دیده می‌شود.

<sup>1</sup> Manual Gain(Y)

همچنین بخش‌های تاقگون، کمی گرددتر و بزرگ‌تر از حالت عادی مدل دیده می‌شوند؛ که

این موارد پس از اعمال فیلتر مهاجرت F-K اصلاح شده است.

۷- در مرز بازتابی سوم (شکل ۵-۵-ج)، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ترتیب عبارتند

از؛ مثبت- منفی- مثبت، پس گذردهی لایه‌ی سوم بیشتر از لایه‌ی چهارم است. (گذردهی

الکترویکی لایه سوم برابر ۱۳ و لایه چهارم برابر ۵ است)

۸- پس از پردازش مهاجرت F-K، در پاسخ ناشی از عوارض کروی و مربعی هیچ تغییر محسوسی

ایجاد نشد. در صورتی که انتظار می‌رفت با اعمال فیلتر مهاجرت، هذلولی‌های ناشی از عوارض

مذکور به اهداف نقطه‌ای تبدیل گردند.

۹- در این عوارض بخش‌های مثبت و منفی موجک مرتباً و به طور ممتد بازتاب یافته‌اند که به این

پدیده حلقوی‌شدن موج الکترومغناطیسی گفته می‌شود.

۱۰- عمق پوسته‌ی امواج GPR در فلزات بسیار پایین است از این‌رو این امواج به سرعت در اهداف

فلزی مستهلك می‌شوند. به همین سبب بازتابی از قسمت تحتانی عوارض کروی در مقاطع

دیده نمی‌شود و همچنین تأثیر دو عارضه فلزی کروی در مرزهای زیرین محسوس است.

به طوری که دقیقاً در زیر این دو عارضه، بازتاب سایر لایه‌ها بسیار ضعیف دیده می‌شود.

۱۱- پاسخ عارضه مربعی که از مثال‌های بارز آن کانال‌های زیرزمینی است باعث ایجاد پدیده‌ی

بازآوری امواج شده و باعث شده تا شاهد ایجاد بازتاب‌های مکرر از سطح تا عمق باشیم البته

طول موجک تکراری بازتاب یافته به سمت عمق کم می‌شود.

۱۲- همانند امواج لرزه‌ای در اینجا نیز، مرزهای پرشیب (بالاخص در مرز چهارم بازتابی) پاسخ

شدیداً ضعیفی از خود نشان می‌دهند و مرزهای قائم اصلاً دیده نمی‌شوند.

۱۳- در مرز بازتابی (شکل ۵-۷-ج)، قسمت‌های مختلف موجک بازتاب یافته به ترتیب عبارتند از؛

منفی- مثبت- منفی، پس گذردهی لایه‌ی چهارم کمتر از لایه‌ی پنجم است. (گذردهی

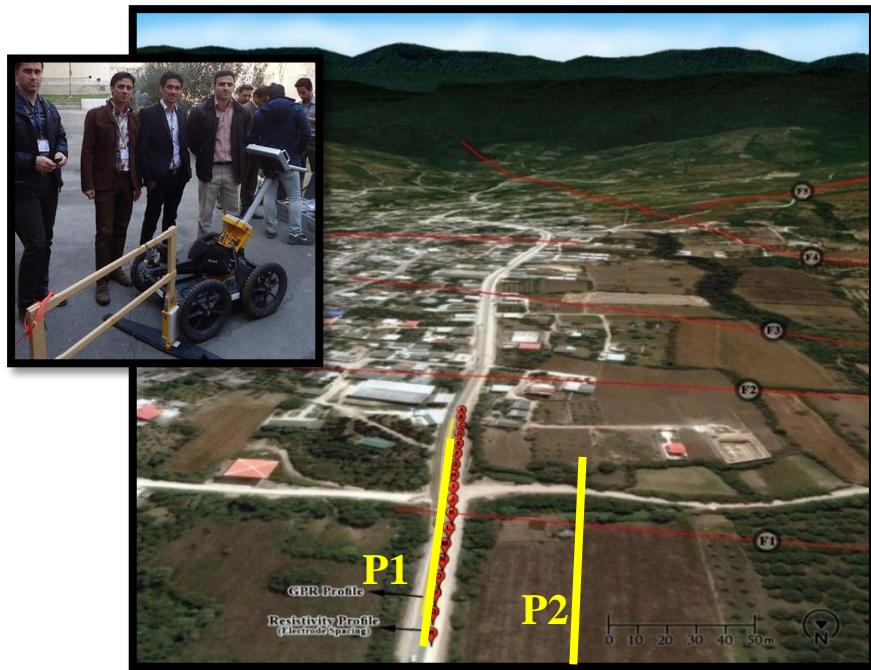
الکترویکی لایه سوم برابر ۵ و لایه چهارم برابر ۱۰ است)

### ۳-۵- برداشت داده‌های GPR در منطقه خلیل شهر

برداشت داده‌های GPR توسط تیمی از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مجموعاً<sup>۶</sup> پروفیل در دو خط برداشت موازی مطابق شکل ۸-۵ و جدول ۷-۵، توسط دستگاه GPR ساخت شرکت سوئدی Mala صورت پذیرفت؛ که سهم خط اول (P1)، ۲ پروفیل GPR با آنتن‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاهرتز پوششی و برداشت دستی پیوسته (P1-100sh و P1-250sh) و ۲ پروفیل با آنتن‌های ۱۰۰ مگاهرتز پوششی و غیر پوششی و از نوع برداشت دستی گسسته یعنی با فواصل زمانی بیشتر نسبت به برداشت پیوسته (P1b-1000sh و P1b-100unsh) می‌باشد؛ و در خط دوم (P2) نیز، در ۲ پروفیل ۱۰۰ مگاهرتز پوششی و غیر پوششی و به صورت دستی (P2-1000sh و P2-100unsh) برداشت داده‌های GPR انجام شد.

**جدول ۷-۵:** مشخصات پروفیل‌های برداشت داده‌های GPR در منطقه خلیل شهر

Name	Traces	Sample	trace increment (m)	time increment (ns)	X end(m)	Y end(ns)	odometer
P1-100sh	772	352	0.198	0.6309	152.44	221.46	Meas. Wheel 100 MHz
P1-250sh	1501	183	0.100	0.4056	150.00	73.82	Meas. Wheel 250-800
P1b-100sh	121	152	1.270	0.8112	152.44	122.49	
P1b-100unsh	122	144	1.260	0.9013	152.44	128.89	
P2-100sh	75	152	2.060	0.8112	152.44	122.49	
P2-100unsh	76	144	2.033	0.9013	152.44	128.89	



شکل ۵-۸: موقعیت شاخه‌های متعدد گسل خزر در منطقه‌ی خلیل شهر به همراه موقعیت پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی و الکترودها (نقاط قرمز A تا S) و پروفیل GPR

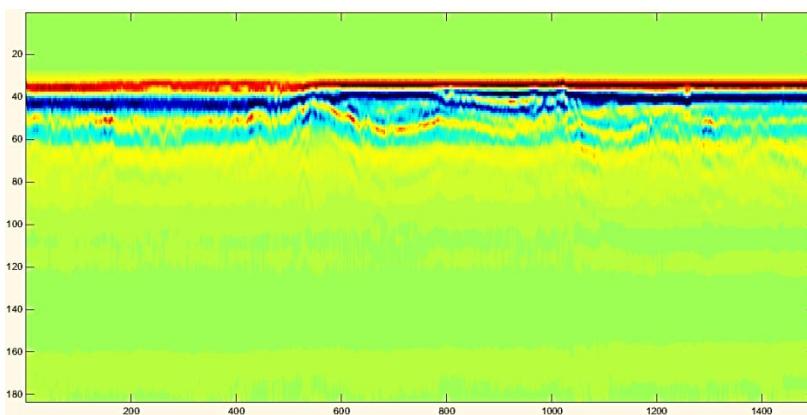
### ۳-۵-۱- پیش‌پردازش داده‌های GPR برداشت‌شده در منطقه‌ی خلیل شهر

داده‌های برداشت‌شده توسط دستگاه‌های GPR با توجه به شرکت سازنده‌ی دستگاه می‌تواند با پسوندهای خاص همان شرکت ثبت گردد و در نهایت در نرمافزارهای پردازشی داده‌های GPR، به طور مستقیم، مقطع نهایی پردازش نشده نشان داده می‌شود. با این حال اگر همین مقاطع را بتوان به ماتریس عددی تبدیل نمود شاید بتوان هم فهم صحیح‌تری از داده‌ها کسب نمود و هم توسط نرم‌افزارهای کدنویسی که با ماتریس سروکار دارند امر پردازش را انجام داد.

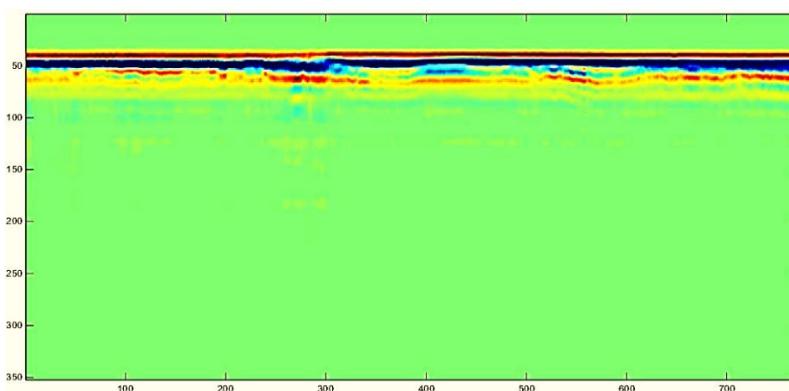
داده‌های GPR مورد استفاده در این پایان‌نامه که توسط دستگاه GPR شرکت سوئدی Mala برداشت شده‌اند، دارای پسوند rd3 می‌باشند. لذا ابتدا اقدام به تبدیل این پسوند خاص نمودیم. برای این منظور ابتدا داده‌ها را در نرمافزار RadExplorer فراخوانی کردیم و سپس آن را با پسوند SGY ذخیره نمودیم (لازم به ذکر است که این پسوند برای داده‌های لرزه‌ای هم مورد استفاده قرار می‌گیرد که البته پس از این کار می‌توان داده‌ها را در نرمافزارهای لرزه‌ای همچون Seismic Unix و ... بهنمایش

درآورده). در ادامه با واردکردن مجموعه دستورات altread-segy و plot-seismic به نرم‌افزار MATLAB و فراخوانی داده‌های SGY توانستیم ماتریس حاصل را توسط دستورات کوچکی هم به صورت Wiggle و هم به صورت jet-plot به نمایش درآوریم.

شکل‌های ۹-۵ و ۱۰-۵، مقاطع حاصل از نمایش jet-plot در نرم‌افزار MATLAB می‌باشند. در این شکل‌ها محور افقی، شماره رد و محور قائم، تعداد نمونه می‌باشد. درواقع این شکل‌ها ماتریس‌هایی هستند که هر ستون آن یک رد<sup>۱</sup> و هر سطر آن یک نمونه<sup>۲</sup> می‌باشد و درایه‌های ماتریس همان دامنه‌ی امواج GPR در موقعیت‌های مختلف محور افقی و قائم می‌باشد.



شکل ۹-۵: مقطع پروفیل اندازه‌گیری شده با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی-نمایش jet-plot در نرم‌افزار MATLAB (محور افقی شماره رد و محور قائم تعداد نمونه)



شکل ۱۰-۵: مقطع پروفیل اندازه‌گیری شده با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی-نمایش jet-plot در نرم‌افزار MATLAB (محور افقی شماره رد و محور قائم تعداد نمونه)

<sup>1</sup> Trace

<sup>2</sup> Sample

سپس ماتریس‌های مذکور توسط دستور دیگری تبدیل به فرمت نرم‌افزار Excel یعنی xls شد و پس

از اعمال تغییرات در مقیاس رنگی موجود در قسمت Conditional Formatting، برای هر ۶ پروفیل

ذکر شده در جدول ۵-۶، مقطع رقومی پردازش نشده به نمایش درآمد.

در شکل ۱۱-۵، قسمت کوچکی از مقطع پروفیل اندازه‌گیری شده با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی پس

از تبدیل به حالت رقومی قابل مشاهده و نمایش در نرم افزار Excel، آورده شده است که محدوده‌ی آن

شامل ردهای ستون ۵۰۰ تا ۵۲۰ و نمونه‌های سطر ۲۹ تا ۸۶ است.

شکل ۵-۱۱: ردهای ستون ۵۰۰ تا ۵۲۰ و نمونه‌های سطر ۲۹ تا ۸۶ از نمایش به فرمت xls

در نهایت محور افقی مقاطع فوق (شکل‌های ۹-۵ تا ۱۱-۵)، باید به فاصله و محور قائم، به زمان و

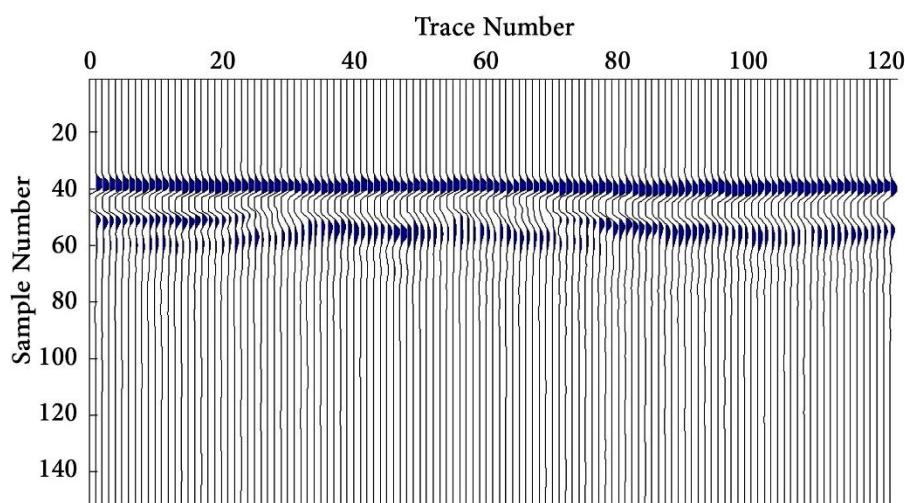
سیسی به عمق تبدیل شود. برای تبدیل شماره رد به فاصله (و یا طول پروفیل)، کافی است فواصل

نمونه برداری پا فوائل دو رد از پکدیگر را در تعداد ردها ضرب کنیم؛ و نیز برای تبدیل محور قائم

یعنی تعداد نمونه به زمان می‌پاس است فواصل نمونه‌ها را در تعدادشان ضرب کنیم و در نهایت برای

تبديل زمان به عمق باید سرعت موج الکترومغناطیسی را در لایه‌های مختلف به دست آورد. به عنوان مثال تعداد ردها در برداشت با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی ۷۷۲ و فاصله دو رد نسبت به هم<sup>۱</sup> برابر ۱۹۷۷ متر می‌باشد که با ضرب این دو در یکدیگر طول پروفیل برابر ۱۵۲.۶۲۴ متر به دست می‌آید. همچنین تعداد نمونه‌ها (محور قائم) برابر ۳۵۲ و فواصل نمونه‌برداری ۰.۶۳۰۹ نانوثانیه می‌باشد که در نهایت حداکثر بازه زمانی اندازه‌گیری برابر ۲۲۲.۰۷۶ نانوثانیه خواهد شد. با به کار گیری این روند برای پروفیل برداشت شده با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی، طول پروفیل برابر ۱۵۰.۱ متر و حداکثر بازه زمانی اندازه‌گیری برابر ۷۴.۲۲۴ نانوثانیه خواهد شد. البته حداکثر بازه زمانی، بهتر است پس از اعمال پردازش‌هایی مثل تصحیح استاتیک بررسی گردد. اگر سرعت سیر موج الکترومغناطیسی را به واسطه جنس خاک‌های پوشاننده منطقه ۰.۱ متر بر نانوثانیه فرض کنیم حداکثر طول محور قائم (یا همان عمق مورد بررسی) در مقطع پروفیل ۱۰۰ مگاهرتز ۲۲.۲ متر و در مقطع پروفیل ۲۵۰ مگاهرتز برابر ۷.۴ متر خواهد بود.

شکل ۱۲-۵، مقطع حاصل از اعمال دستور plotseismic در نرم‌افزار MATLAB می‌باشد. در این شکل محور افقی، شماره رد و محور قائم، تعداد نمونه می‌باشد.



شکل ۱۲-۵: مقطع Wiggle پروفیل P1b-100sh (نمایان داده شده در شکل ۸-۸) بر اساس تعداد نمونه و رد های برداشتی

<sup>۱</sup> Trace Increment

### ۳-۵-۲- پردازش داده‌های GPR برداشت شده در منطقه‌ی خلیل شهر

به‌طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیکی، دست‌یابی به تصویری واضح از اهداف زیرسطحی با حذف نوشهای ناخواسته و افزایش نسبت سیگنال به نویه و درواقع تقویت سیگنال‌های مفید است. پردازش‌های مناسب به مفسر کمک می‌کند تا با اعتماد به نفس بیشتری به تفسیر مقاطع ژئوفیزیکی پردازد. دامنه پردازش‌های به کار رفته بر روی داده‌های GPR، با مقدار نویه وارد شده بر روی داده‌ها و هدف مورد مطالعه تعیین می‌شود [پرنو، ۱۳۹۳]. نوع و دامنه پردازش‌هایی که بر روی داده‌های GPR اعمال می‌گردد به مشخصات منطقه موردنرسی، فرکانس آنتن GPR، نوع آنتن (پوششی یا غیر پوششی)، نرم‌افزارهای به کار رفته و همچنین اهداف کلی برداشت، وابسته است [اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۳].

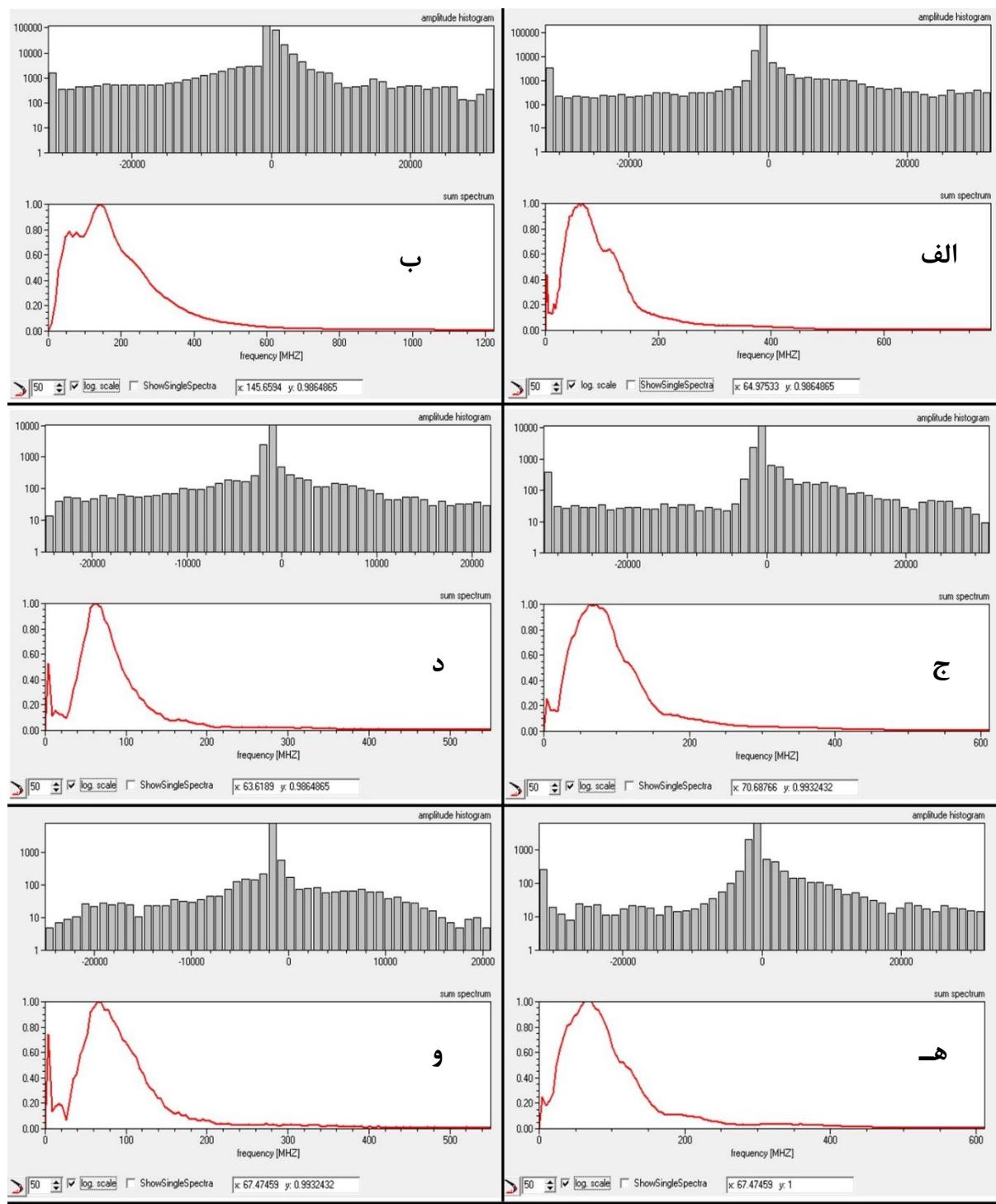
در این پژوهش داده‌های GPR برداشت شده، توسط نرم‌افزار ReflexW پردازش و به نمایش درآمد. همچنین فرآیندهای پردازشی با روندی مشابه در نرم‌افزار RadExplorer تکرار شده‌اند و سپس به نمایش درآمده‌اند. همچنین تصحیح توپوگرافی نیز پس از اعمال کامل مراحل پردازش، توسط نرم‌افزار RadExplorer انجام شد. ضمناً در پایان هر مرحله از پردازش خروجی تمامی مقاطع به فرمت SGY تبدیل شده و پس از طی مراحل ذکر شده در صفحات قبل، ماتریسی عددی پدید آمد. سپس بر روی ماتریس‌های موجود، با اعمال کدی در نرم‌افزار MATLAB، تصحیح توپوگرافی صورت پذیرفت که در جای خود توضیح داده خواهد شد.

#### الف- تحلیل میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌های موردنرسی

همان‌طور که قبلاً گفته شد، دامنه پردازش‌های به کار رفته در GPR، با توجه به مقدار نویه‌ای همراه داده‌ها و هدف مورد مطالعه تعیین می‌شوند؛ بنابراین قبل از اعمال هرگونه پردازشی باید دید صحیحی از میانگین طیف فرکانسی و دامنه پروفیل‌های موردنرسی وجود داشته باشد. نمودار طیف دامنه

به منظور تعیین فرکانس غالب و طراحی فیلترهای مناسب برای حذف نویه‌های با فرکانس مشخص، مفید است. شرکت‌های سازنده‌ی دستگاه‌های GPR، فرکانس آنتن‌ها را بر مبنای اندازه‌گیری در هوا مشخص می‌کنند؛ بنابراین فرکانس داده‌های برداشت‌شده بر روی زمین، به دلیل حذف فرکانس‌های بالا در محیط‌های رسانا (نسبت به هوا)، معمولاً کمتر از فرکانس امواج ارسالی است [محمدی ویژه، ۱۳۹۱]. در شکل ۱۳-۵، تغییرات طیف دامنه نسبت به فرکانس مقاطع پروفیل ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاهرتز پوششی و سایر پروفیل‌ها، قبل از اعمال هرگونه پردازشی نشان داده شده است (البته نرمافزار، طیف فرکانسی همه‌ی ردۀای یک پروفیل را بر روی نمودار نمایش می‌دهد و در نهایت با میانگین‌گیری از طیف فرکانسی همه‌ی ردۀا، یک نمودار برازش شده را نمایش می‌دهد).

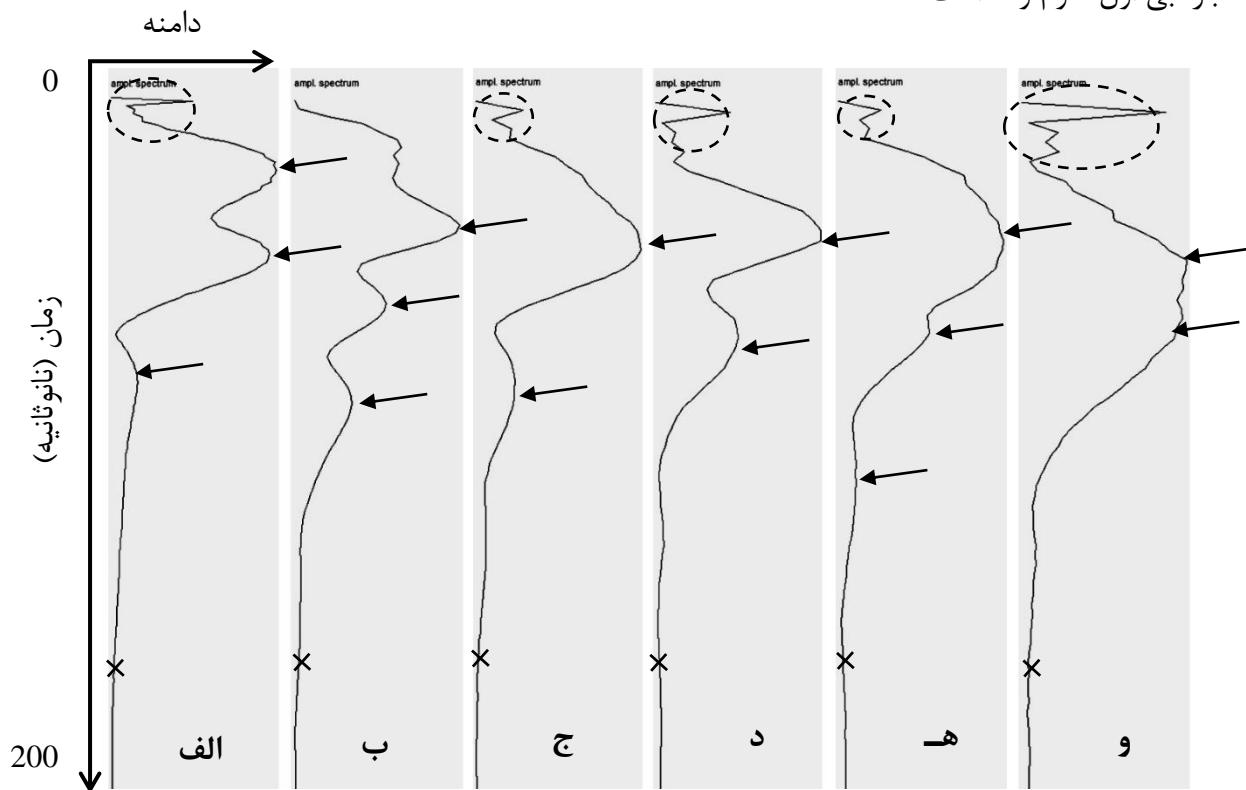
همان‌طور که در شکل ۱۳-۵-الف تا و مشاهده می‌شود، فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل P1-100sh، ۶۵ مگاهرتز، فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل P1-250sh، ۱۴۵ مگاهرتز، فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل P1b-100sh، ۷۰ مگاهرتز، فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل P2-100sh، ۶۷ مگاهرتز و فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل P1b-100unsh، ۶۳ مگاهرتز، فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل P2-100unsh، ۶۷ مگاهرتز است. در نتیجه مشاهده می‌گردد فرکانس غالب بر نمودار طیف دامنه پروفیل‌های برداشت‌شده، به دلیل حذف فرکانس‌های بالا در محیط‌های رسانا (نسبت به هوا)، کمتر از فرکانس امواج ارسالی است. برای رفع این نقیصه پردازش‌هایی صورت گرفته است که در ادامه به ذکر آن خواهیم پرداخت. در ادامه، با استفاده از رابطه  $f = \lambda / V$  (که در آن  $\lambda$  طول موج،  $V$  سرعت موج الکترومغناطیسی در محیط و  $f$  فرکانس غالب موج الکترومغناطیسی که بیشترین تمرکز انرژی در آن وجود دارد، می‌باشد) و با در نظر گرفتن سرعت ۱۰۰ متر بر نانوثانیه، می‌توان تفکیک‌پذیری قائم را به صورت تئوری تخمین زد.



شکل ۱۳-۵: میانگین طیف فرکانسی پروفیل‌های GPR به همراه هیستوگرام دامنه، الف) پروفیل P1-100sh، ب) P2-100unsh، ج) P1-250sh، د) P1b-100sh، ه) P1b-100unsh

در شکل ۱۴-۵، میانگین طیف دامنه امواج GPR بازتابی بر حسب زمان انتشار موج الکترومغناطیسی، برای پروفیل‌های مورد بررسی (پروفیل ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاهرتز پوششی و سایر پروفیل‌ها)، نشان داده

شده است. در این نمودارها اغتشاش‌هایی در ابتدای اکثر پروفیل‌ها دیده می‌شود که به صورت پیک‌های کاذب رخنمون دارند این حوادث را با دوایر خطچین مشخص نمودیم. همچنین پیک‌هایی که نمایانگر مرزهای بازتابی در منطقه می‌باشند نیز با علامت‌های پیکان مشخص شده است. اولین پیک یا علامت پیکان نمایانگر مرز هوای آسفالت سطح جاده است، سپس پیک‌هایی بعدی به ترتیب مرزهای بازتابی اول، دوم و ... است.



شکل ۱۴-۵: میانگین طیف دامنه بر حسب زمان پروفیل‌های GPR. (الف) پروفیل P1-100sh، (ب) P1-250sh، (ج) P2-100unsh، (د) P2-100sh، (ه) P1b-100unsh، (و) P1-200sh

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. البته در شکل ۱۴-۵ به سبب این‌که از نرم‌افزار ReflexW جهت نمایش مقادیر میانگین طیف دامنه بر حسب زمان استفاده نمودیم، محدوده‌ی مقادیر زمان و دامنه در Wiggle Window مشاهده نمی‌گردد. لیکن با نگاهی اجمالی به شکل‌ها می‌توان دید تقریبی از محدوده‌ی پاسخ مناسب مرزهای بازتابی و یا بیشترین عمق نفوذ داشت.

در شکل ۱۴-۵-الف تا و، قسمت‌هایی از فواصل زمانی با علامت  $\times$  مشخص شده‌اند که در زمان‌های بیشتر از این مقادیر، سطوح دامنه‌ای، پایین‌ترین مقادیر را دارند. لذا با فرض این‌که، این سطوح سطح دامنه نویه است و سرعت ۰.۱ متر بر نانوثانیه (یعنی  $h=t/20$ )، عمق نفوذ مفید امواج GPR در پروفیل P2-100sh، P1b-100unsh، P1b-100sh، P1-250sh، P1-100sh و P2- ۹.۲۵ متر، ۲.۵ متر، ۰.۱۰۰unsh، هر کدام ۴.۵ متر تخمین زده می‌شود. البته با اعمال برخی پردازش‌ها همانند بهره‌ها، می‌توان تضعیف دامنه نسبت به عمق را جبران نمود و حوادث بازتابی عمیق‌تر را با وضوح بیشتری نشان داد اما گاهی این کار اثر نویه‌ها را افزایش می‌دهد و همیشه پاسخگو نیست.

### ب- تصحیح اشباع سیگنال

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد داده‌های GPR که به دلیل نزدیک بودن آنتن‌های گیرنده و فرستنده و خصوصیات الکتریکی زمین به وجود می‌آید، میدان‌های نزدیک فرستنده شامل انرژی‌های پایین فرکانس<sup>۱</sup>، همراه با میدان‌های الکترواستاتیک و القایی هستند که به سرعت با افزایش فاصله میرا می‌شوند. این سیگنال‌ها باعث پوشیده شدن انعکاس‌ها با فرکانس‌های بالا می‌شوند (Jol, 2009). 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]. باید توجه داشت که هنگام استفاده از داده‌هایی که فیلتر Dewow بر آن‌ها اعمال شده، گاهی به دلیل ایجاد پیک‌های کاذب بر روی موجک، باید دقت شود که سبب تفسیر اشتباه قطبیت رد GPR نگردد [Lrvine-Fynn et al., 2005]

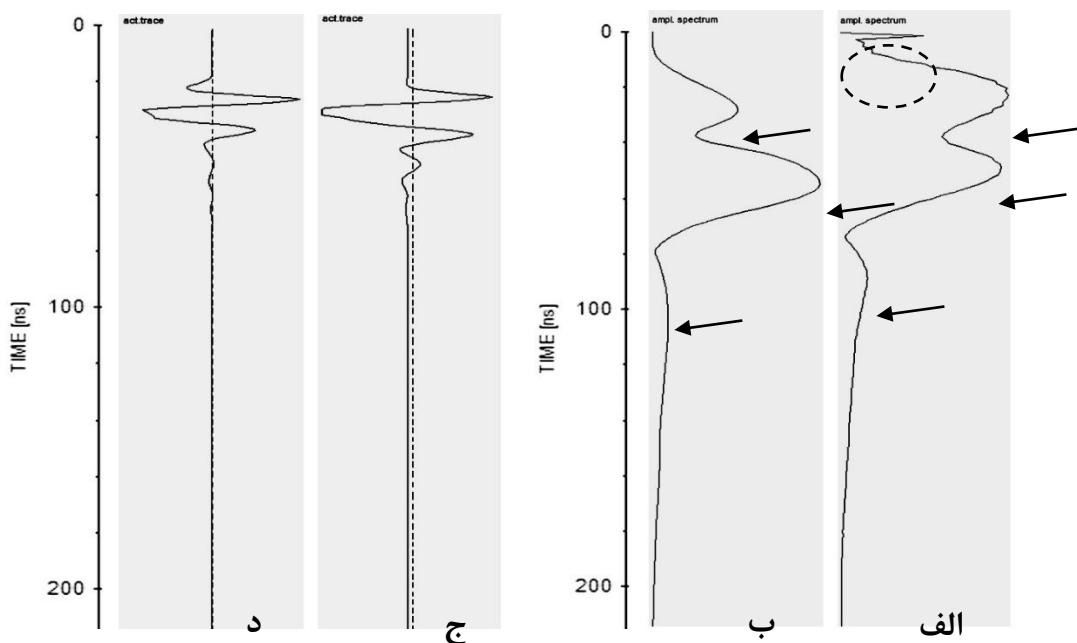
این پردازش، اولین پردازشی است که بر روی تمامی مقاطع مورد استفاده در این پایان‌نامه مورد اعمال شده است. در شکل‌های ۱۵-۵ تا ۱۷-۵ نتایج اعمال این پردازش بر روی پروفیل P1-100sh آورده

<sup>۱</sup> Wow

شده است. این پردازش در سایر مقاطع نیز نتایجی مشابه داشته که از ذکر آن بهسبب رعایت اختصار در نوشتمن فصل خودداری شده است.

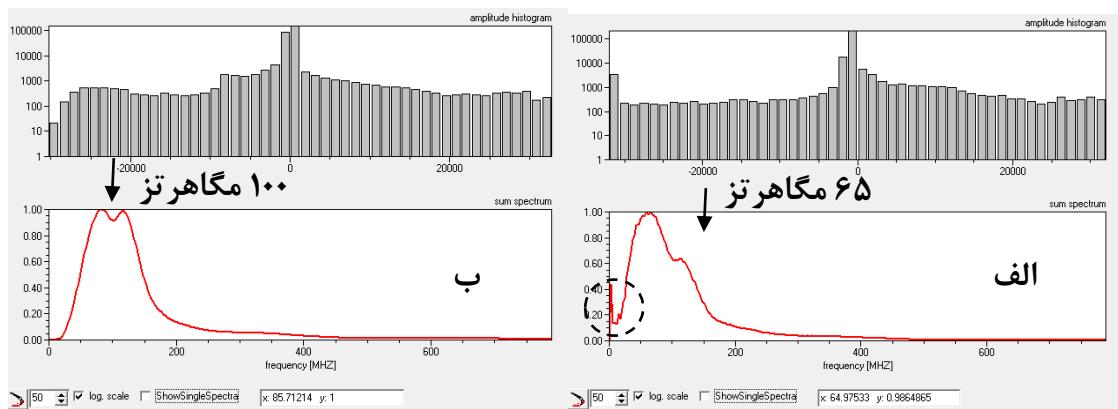
مطابق شکل ۱۵-۵-الف و ب (میانگین طیف دامنه بر حسب زمان پروفیل P1-100sh)، مشاهده می-شود که قبیل از انجام پردازش، پیک کاذبی در ابتدای منحنی دیده می-شود که این نقیصه پس از پردازش برطرف شده است. لیکن مقداری از دامنه مرز بازتابی اول و سوم کاسته شده است که اگر این مقدار کاهش بیش از حد متعارف باشد ممکن است ما را در امر تفسیر دچار اشتباه کند.

مطابق شکل ۱۵-۵-ج و د (نمایش دامنه رد ۷۰۰)، مشاهده می-شود که پس از انجام پردازش، دامنه-ها در جای واقعی خود قرار گرفته‌اند (در شکل ۱۵-۵-ج کاملاً این نقص مشهود است). لازم به ذکر است مقداری در پیک‌ها تغییر احساس می-شود، این تغییر در ابتدای پروفیل یعنی مرز بین هوا و لایه-ای اول، مفید به نظر می-رسد همچنین در انتهای پروفیل، کمی کاهش دامنه دیده می-شود که می‌توان با استفاده از بهره‌ها، این اثر را جبران نمود.



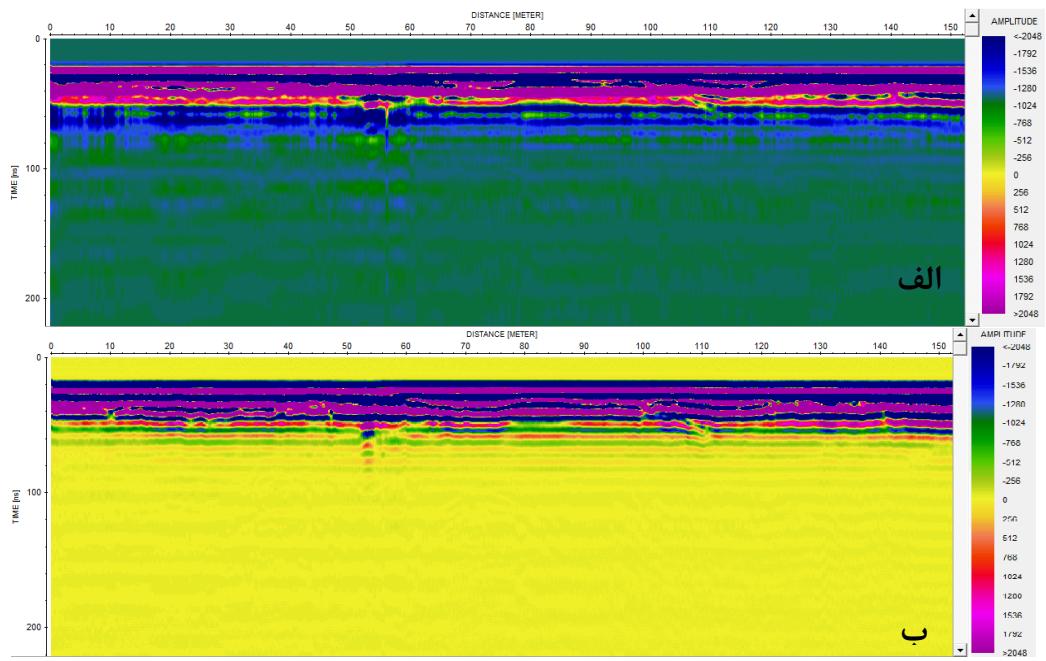
شکل ۱۵-۵: الف) میانگین طیف دامنه بر حسب زمان پروفیل P1-100sh بدون اعمال پردازش و ب) پس از اعمال پردازش Dewow ، ج) نمایش دامنه یک رد (ستون ۷۰۰) قبل از پردازش و د) پس از اعمال پردازش

مطابق شکل ۱۶-۵ (میانگین طیف فرکانسی پروفیل P1-100sh به همراه هیستوگرام دامنه)، مشاهده می‌شود که پس از انجام پردازش، دامنه‌ها در جای واقعی خود قرار گرفته‌اند، به‌طوری‌که قوی‌ترین دامنه در جای واقعی خود قرار گرفته است یعنی معرف فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز است. قبل از پردازش، مقدار حداقل پیک معرف فرکانس ۶۵ مگاهرتز بوده است. ضمناً پس از اعمال پردازش Dewow، پیک کاذب ابتدای نمودار حذف شده است.



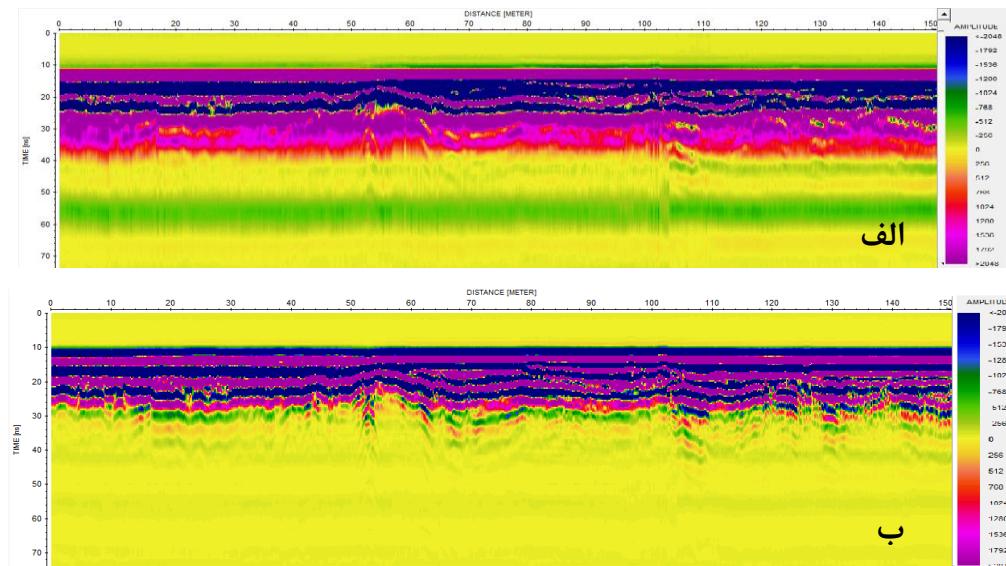
شکل ۱۶-۵: میانگین طیف فرکانسی پروفیل P1-100sh به همراه هیستوگرام دامنه، الف) قبل از اعمال پردازش و ب) پس از اعمال پردازش Dewow

نهایتاً مقاطع پروفیل P1-100sh قبل و بعد از اعمال پردازش Dewow، در شکل ۱۷-۵ به نمایش درآمده است.



شکل ۱۷-۵: مقطع پروفیل P1-100sh (الف) بدون اعمال پردازش، (ب) پس از اعمال پردازش Dewow

همچنین مقاطع پروفیل P1-250sh قبل و بعد از اعمال پردازش Dewow در شکل ۱۸-۵ به نمایش درآمده است. مطابق این شکل مشاهده می‌گردد که پس از اعمال پردازش Dewow، مقطع بهبود چشمگیری یافته است و دید صحیح‌تری در امر تفسیر می‌دهد.

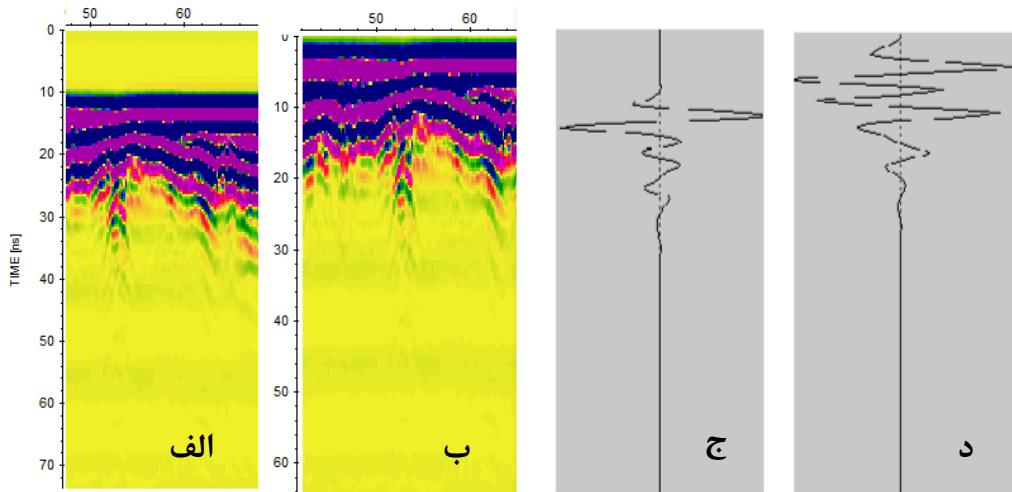


شکل ۱۸-۵: مقطع پروفیل P1-250sh (الف) بدون اعمال پردازش و (ب) پس از اعمال پردازش Dewow

## ج- تصحیح استاتیک یا جابه‌جایی صفر زمانی

امواج در بازتاب و عبور از ساختارهای زیرسطحی، بهصورت رویدادهای مجزا بهصورت تابعی از زمان در گیرنده دریافت می‌شوند. اولین رویدادی که در گیرنده دریافت می‌شود، موج مستقیمی است که از طریق هوا از آنتن فرستنده به گیرنده می‌رسد [اسحاقی، ۱۳۸۹]. جابه‌جایی زمانی اولین رویداد و بهواسطه آن جابه‌جایی در رویدادهای ثانویه که در بین آن‌ها پاسخ از اهداف زیرسطحی نیز موجودند، باعث ایجاد خطأ در اندازه‌گیری‌ها می‌گردد. این خطأ پیوستگی بازتاب‌های ناشی از اهداف زیرسطحی را از بین برده و در صورت لحاظ نشدن، تفسیر داده‌ها را با مشکلاتی همراه می‌سازد. بهمنظور جابه‌جایی زمانی اولین رویداد در طول ردهای برداشتی در پروفیل‌های بازتابی GPR، مجموعه نرم‌افزارهای GPR معمولاً این به خط شدگی را بهصورت خودکار با جابه‌جایی هر رد بهصورت جداگانه، انجام می‌دهند. برای این منظور یک مقدار زمینه برای تشخیص اولین رویداد در این نرم‌افزارها به‌کاررفته می‌رود که بهواسطه آن اولین رویداد (موج مستقیم هوا) را تشخیص دهنند. به خط شدگی موفقیت‌آمیز اولین رویداد باعث می‌شود که بازتاب‌ها در مکان واقعی‌شان به نمایش درآیند. از این‌رو اولین پردازش مورد استفاده بر روی داده‌ها، تصحیح جابه‌جایی صفر زمانی می‌باشد.

شکل ۱۹-۵، قسمتی از پروفیل P1-250sh Dewow را بعد از پردازش و استاتیک نشان می‌دهد و در آن مشاهده می‌گردد که پس از انجام تصحیح استاتیک، داده‌ها به سطح واقعی خود آورده شده‌اند و در واقع صفر واقعی مقطع یا همان مرز هوا و لایه‌ی اول (آسفالت جاده) به سطرهای بالاتر انتقال داده شده است.



شکل ۱۹-۵: قسمتی از مقطع پروفیل P1-250sh (الف) پس از اعمال پردازش Dewow، (ب) پس از تصحیح استاتیک، (ج) نمایش دامنه یک رد (در فاصله ۶۰ متری) پس از اعمال پردازش Dewow و (د) پس از تصحیح استاتیک

#### ۵- بهره‌ها

توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش سیگنال مربوطه به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد. از این‌رو پاسخ دریافتی از توده‌های عمیق، ضعیفتر می‌باشد. برای حل این مشکل با اعمال بهره بر روی داده‌ها، توان سیگنال در اعمق بیشتر را افزایش می‌دهیم. بهره یک تابع متغیر با زمان است و از بهره‌های مختلفی برای اعمال بر داده‌های GPR استفاده می‌شود.

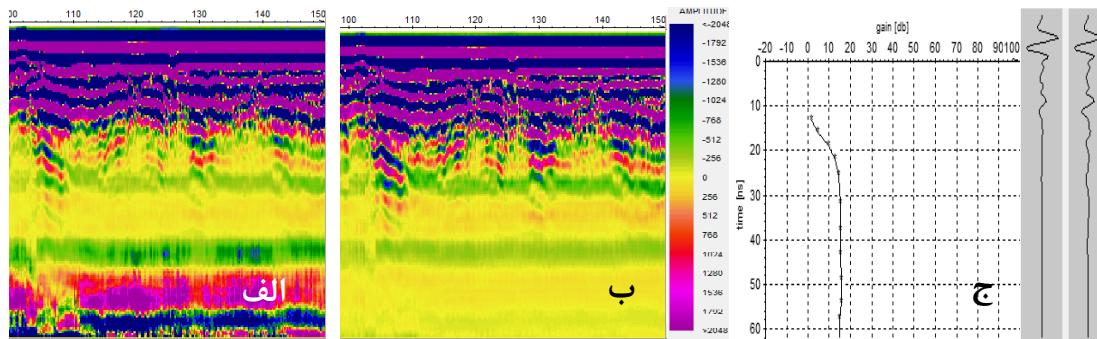
استفاده از بهره‌ها راهی بسیار مناسب برای نمایش داده‌ها می‌باشد. ولی نباید تأثیرات نامطلوب آن در برجسته کردن انواع نویسه‌های محیطی و سامان‌مند<sup>۱</sup> را نادیده گرفت. استفاده از بهره بایستی به دقت موردن توجه قرار گیرد تا اطلاعات مربوط که ساختارهای زیرسطحی را نمایش می‌دهند، بدون به وجود آمدن مشکلات به دست آیند.

در این پایان‌نامه جهت تقویت سیگنال‌های عمیق از بهره‌ی انتخابی استفاده نمودیم. شاید راحتی کار با این بهره و همچنین نداشتن نقیصه‌ی موجود در بهره‌هایی همچون AGC و ... (که دامنه‌ی همه‌ی رخدادها را هم‌سطح می‌سازند)، سبب شد تا از این بهره، جهت پردازش همه‌ی مقاطع استفاده کنیم.

<sup>1</sup> Systematic

ناگفته نماند که بهره‌های AGC و SEC هر کدام مزایایی داشته و در مطالعات رسوب‌شناسی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند لیکن در این مطالعه به اعمال بهره‌ی انتخابی، اکتفا نمودیم. نتایج حاصل از اعمال بهره‌های AGC و بهره‌ی انتخابی بر روی پروفیل ۲۵۰ مگاهرتز پوششی در شکل ۲۰-۵ آورده شده است.

در شکل ۲۰-۵-الف، طول پنجره انتخاب شده، ۷۵، مقدار مقیاس، ۱.۰، بیشینه بهره، ۲۵۰۰۰ و بیشینه مقدار نرمالایز، ۵۰۰۰۰ انتخاب شد. با تغییر در این مقادیر می‌توان به نتایج بهتر و حتی مشابه شکل ۲۰-۵-ب دست یافت. لیکن بهره‌ی انتخابی، به سبب این‌که می‌توان نوع تابع اعمال شونده را به صورت دستی ترسیم نمود و این‌که دامنه رد دلخواه ما را قبل و بعد از اعمال تابع نشان می‌دهد (شکل ۲۰-۵-ج، سمت راست رد بعد از پردازش) مناسب‌تر می‌باشد. به همین خاطر برای تقویت بازتاب‌های عمیق سایر مقاطع نیز از این بهره استفاده نمودیم.



شکل ۲۰-۵: قسمتی از مقطع پروفیل P1-250sh (الف) پس از اعمال بهره‌ی AGC، (ب) پس از اعمال بهره‌ی انتخابی، (ج) تابع نمایی بهره‌ی انتخابی<sup>۱</sup>

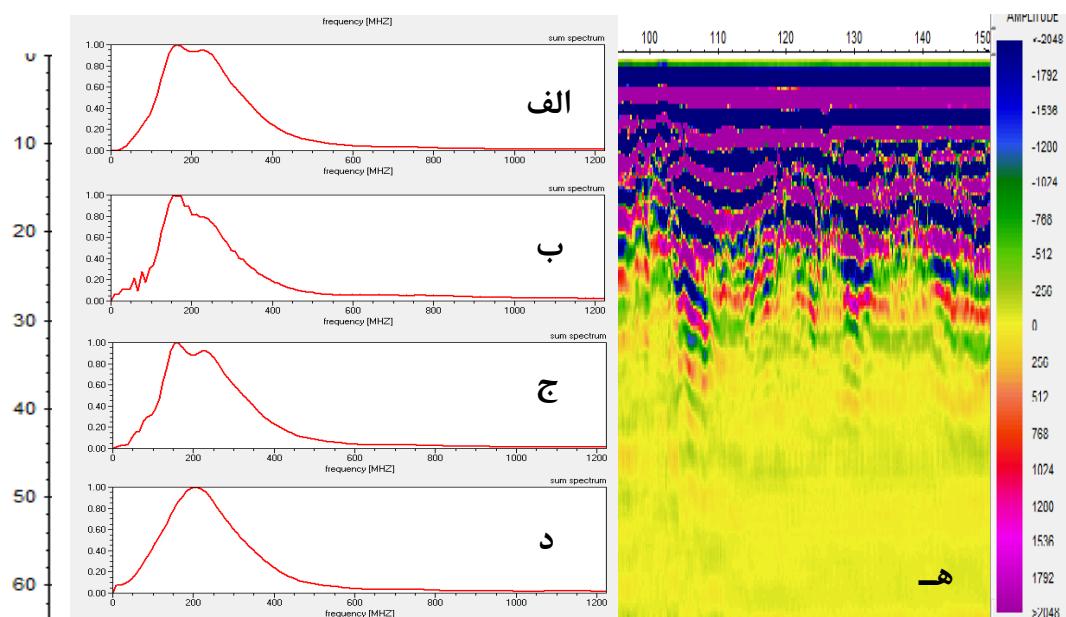
## ه- فیلتر حذف زمینه<sup>۱</sup>

در شکل ۲۱-۵-الف تا د، میانگین طیف فرکانسی پروفیل ۲۵۰ مگاهرتز پوششی پس از اعمال برخی پردازش‌ها مشاهده می‌گردد. در شکل ۱۳-۵-ب، مقدار بیشینه پیک دامنه، منطبق بر ۱۴۵ مگاهرتز بوده که پس از پردازش dewow و استاتیک در شکل ۲۱-۵-الف این مقدار بر ۲۰۰ مگاهرتز منطبق

<sup>1</sup> background removal

شده است (هرچند که فرکانس مرکزی فرستنده ۲۵۰ مگاهرتز بوده و به سبب اتلاف در محیط این مقدار کاهش یافته است). در شکل ۲۱-۵-ب، مقدار پیک حداکثری مقداری کمتر از ۲۰۰ را نشان می‌دهد و در ابتدای منحنی نیز اعوجاج ایجاد شده است و شاید یکی از دلایل عدم استفاده از پردازش AGC همین مسئله بوده است. در شکل ۲۱-۵-ج، این نقیصه کاهش یافته است پس پردازش background removal مربوطه قابل اطمینان می‌باشد؛ اما شکل ۲۱-۵-د که نشان‌دهنده‌ی پردازش removal است، اثرات نویه‌های ناخواسته را تا حدودی کاهش داده و درواقع اثر زمینه را تقلیل داده است. در

شکل ۲۱-۵-ه قسمتی از پروفیل مربوطه پس از عوامل این پردازش به نمایش درآمده است.

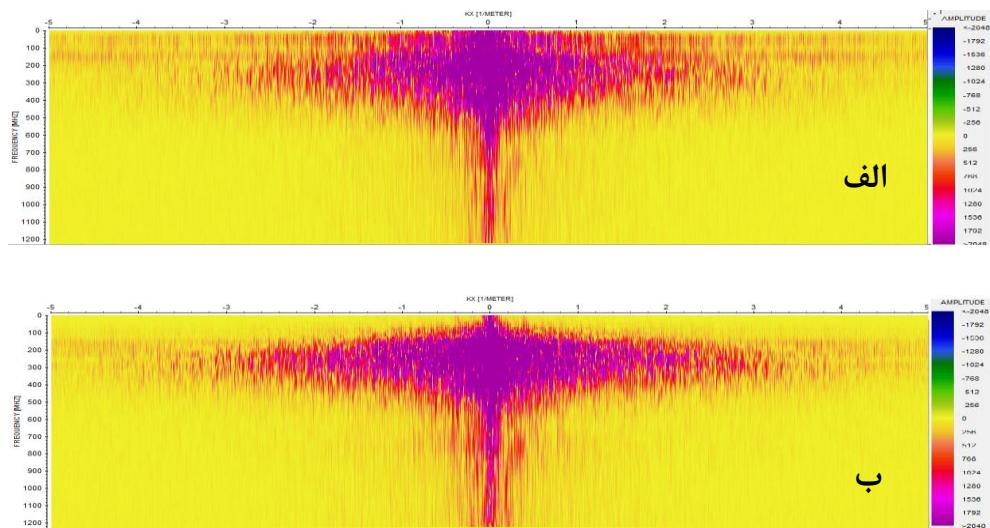


شکل ۲۱-۵: الف) میانگین طیف فرکانسی پروفیل P1-250sh پس از اعمال پردازش‌های dewow و استاتیک، ب) پس از اعمال AGC، ج) پس از اعمال بهره‌ی انتخابی، د) پس از اعمال فیلتر حذف زمینه و ه-) قسمتی از مقطع پروفیل پس از اعمال فیلتر حذف زمینه P1-250sh

## و- فیلتر سرعت

فیلتر سرعت، توسط تبدیل فوریه دوبعدی داده‌ها را از حوزه‌ی مکان-زمان به حوزه عدد موج-فرکانس انتقال می‌دهد. سپس در حوزه عدد موج-فرکانس، منطقه‌ی حاوی نویه حذف می‌شود. بعدازاین مرحله، داده‌ها از حوزه‌ی عدد موج-فرکانس به حوزه‌ی مکان-زمان انتقال داده

می‌شوند [پیروز، ۱۳۹۳]. در واقع بعد از انتقال داده‌ها به حوزه‌ی عدد موج- فرکانس، امواج مستقیم زمینی از بازتاب‌های زیرسطحی جدا می‌شود. به عبارت دیگر، توسط این انتقال و تباین در سرعت امواج مستقیم سطحی و بازتابی، نوشه از سیگنال جدا می‌شود. ابته در این فصل حذف امواج مستقیم زمینی با استفاده از فیلترهای دیگری صورت گرفته که در شکل ۲۲-۵ به نمایش در آمده است. در این شکل، مقطع انتقال یافته پروفیل P1-250sh به حوزه‌ی عدد موج- فرکانس آورده شده است. نتایج پروفیل‌ها پس از پردازش F-K، جهت رعایت اختصار در این فصل ذکر نشده است.



شکل ۲۲-۵: مقطع انتقال یافته پروفیل P1-250sh به حوزه‌ی عدد موج- فرکانس (الف) قبل از هرگونه پردازش و (ب) پس از پردازش‌های (تصحیح اشباع سیگنال، استاتیک، بهره و حذف اثر زمینی)

### ز- نشانگرهای لحظه‌ای

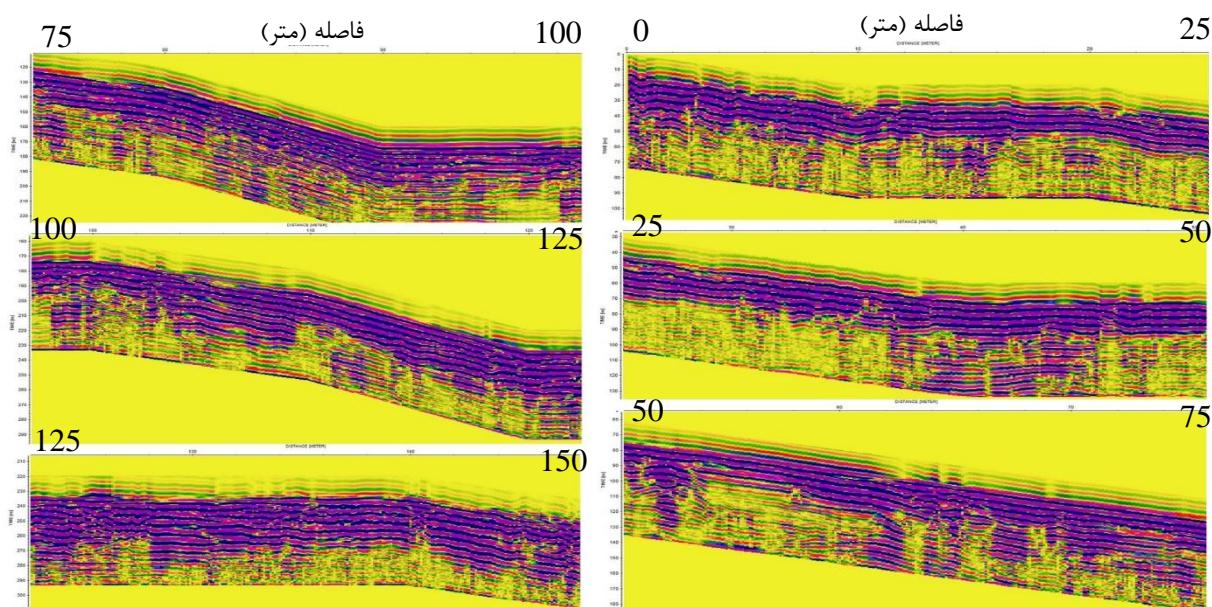
همانند لرزه‌نگاری بازتابی، می‌توان در بحث GPR نیز از نشانگرهای لحظه‌ای برای تفسیر ساختارها، لایه‌بندی و رسوب‌شناسی بهره جست (Liu and Oristaglio, 1998). لذا سعی شده تا با استفاده از نشانگرهای مختلف لحظه‌ای، دید صحیح‌تری از پروفیل‌های GPR منطقه خلیل شهر داشته باشیم. برخی از نشانگرهای لحظه‌ای مربوط به پروفیل‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاهرتز پوششی در شکل ۲۹-۵ آورده شده است.

در مقاطع مذکور، با قرار دادن سرعت  $1.0$  متر بر نانوثانیه برای امواج GPR در فرمول  $D=v.t/2$ ، می-توان عمق پدیده‌ها را هم‌زمان به نمایش درآورد. نرمافزار ReflexW شاخص عمق را در سمت راست مقاطع نمایش می‌دهد. به عبارتی مقاطع زمانی هم‌زمان به صورت مقاطع عمقی نیز نمایش داده شده است. در رابطه فوق،  $D$  و  $t$  به ترتیب، عمق، سرعت موج الکترومغناطیسی و زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی است.

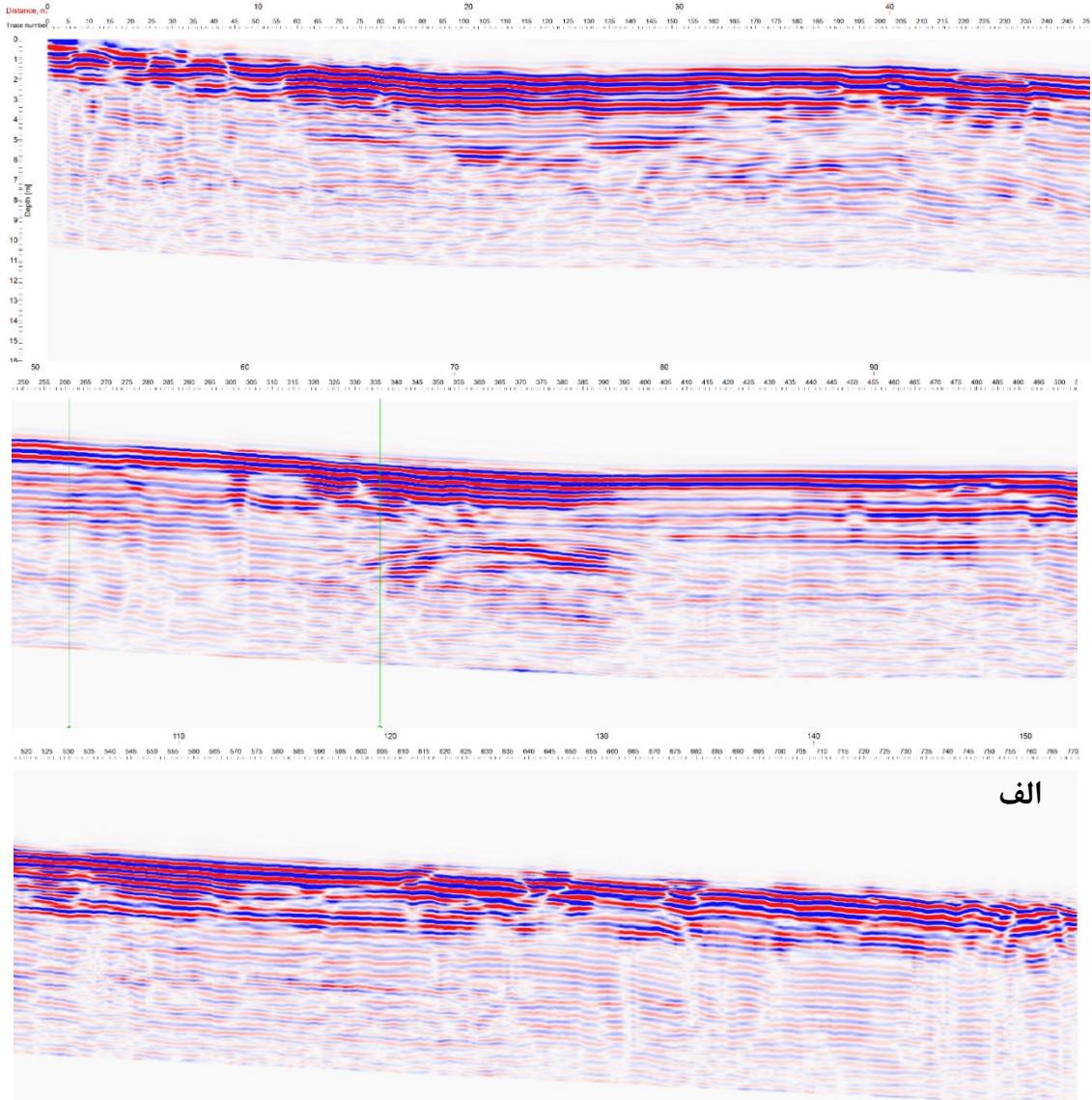
نشانگر دامنه لحظه‌ای، یک موجک با قسمت‌های مثبت و منفی بر روی رد را به صورت یک تک پالس با مؤلفه مثبت تبدیل می‌کند. این فرآیند ماهیت نوسانی امواج GPR را از بین برده و داده‌ها را در تفکیک واقعی خود به نمایش می‌آورد (Sensors and software, 1999). درنتیجه استفاده از این نشانگرها سبب تفسیر مطلوب‌تری از منطقه شده که در ادامه توضیح داده خواهد شد. سایر نشانگرها را به سبب نامناسب بودن پاسخ، ذکر نمی‌نماییم.

#### ح- تصحیح توپوگرافی

تصحیح توپوگرافی در نرمافزار RadExplorer صورت پذیرفت. این تصحیح پس از اعمال تصحیحات ذکرشده فوق اعمال شد. نتایج پروفیل‌های  $100$  و  $250$  مگاهرتز پوششی در شکل‌های  $23-5$  تا  $25-5$  به نمایش درآمده است.



شکل ۲۳-۵: مقطع پروفیل P1-250sh پس از اعمال تصحیحات بهره، استاتیک، حذف اثر دامنه و سپس تصحیح توپوگرافی پس از نمایش در نرمافزار ReflexW

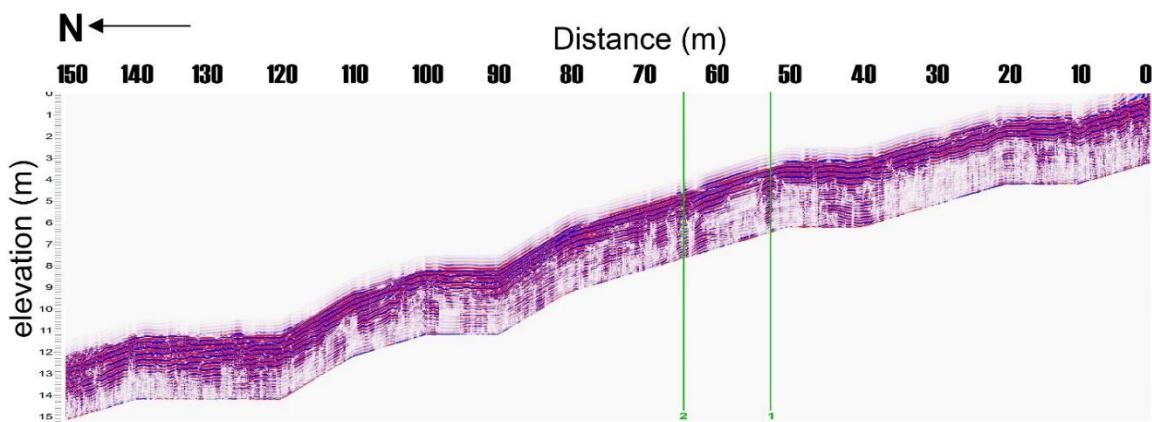


شکل ۲۴-۵: مقطع پروفیل P1-100sh پس از اعمال تصحیحات بهره، استاتیک، حذف اثر دامنه و سپس تصحیح توپوگرافی پس از نمایش در نرمافزار RadExplorer

ب

ضمناً فرآیند تصحیح توپوگرافی، در نرمافزار MATLAB نیز صورت گرفت. بدین صورت که مقاطع پس از تکمیل روند پردازش در نرمافزار ReflexW وارد نرمافزار RadExplorer شده و از آن‌ها خروجی SGY گرفته شد. در ادامه با طی روند ذکرشده در بخش ۱-۳-۵ و ۲-۳-۵، ماتریسی از

مقادیر دامنه‌ی امواج بازتابی پدید آمد. لازم به ذکر است به‌سبب این‌که پروفیل‌های ۱ تا ۴ از جدول ۶-۵ منطبق بر خط برداشت مقاومت ویژه بوده و پروفیل‌های ۵ و ۶ نیز هم‌عرض با آن‌ها می‌باشند و این‌که موقعیت نقاط با GPS به‌صورت دستی در ۱۵ نقطه برداشت شده، بنابراین ابتدا می‌بایست موقعیت ارتفاعی هر رد را به‌دست می‌آوریم تا در نهایت میزان جابه‌جایی هر سطر از ماتریس را برای اعمال کد در نرم‌افزار MATLAB به‌دست آورد.



شکل ۲۵-۵: مقطع پروفیل P1-250sh پس از اعمال بهره، حذف اثر دامنه و سپس تصحیح توپوگرافی پس از نمایش در نرم‌افزار RadExplorer

برای محاسبه میزان جابه‌جایی هر سطر مراحل زیر را به‌ترتیب انجام دادیم:

- ۱- جدولی مشابه جدول ۷-۵ در Excel تشکیل دادیم؛ یعنی علی‌رغم دو ستون شماره رد و ارتفاع آن، ستون‌های: میزان جابه‌جایی ارتفاعی بر مبنای صفر (zero)، میزان جابه‌جایی زمانی بر مبنای صفر (time)، میزان جابه‌جایی نمونه بر مبنای صفر (sample) و همچنین شبیه خط (m) تشکیل دادیم.

جدول ۵-۶: مشخصات ارتفاع، شیب خطوط و میزان جابه‌جایی سطرها در هر ستون از ماتریس (پروفیل ۲۵۰ مگاهرتز)

trace	evalution	zero	time	sample	m
100	53	0	0	0	0.00
200	53	0	0	0	-0.49
300	52	-1	-20	-49	-0.49
400	51	-2	-40	-99	0.00
500	51	-2	-40	-99	-0.49
600	50	-3	-60	-148	-0.49
700	49	-4	-80	-197	-0.49
800	48	-5	-100	-247	-0.99
900	46	-7	-140	-345	0.00
1000	46	-7	-140	-345	-0.49
1100	45	-8	-160	-394	-0.99
1200	43	-10	-200	-493	0.00
1300	43	-10	-200	-493	0.00
1400	43	-10	-200	-493	-0.49
1500	42	-11	-220	-542	-

۲- حداکثر ارتفاع، صفر پایه یعنی بدون جابه‌جایی در نظر گرفته شد و بر این اساس از سایر

ارتفاع‌ها به همین مقدار کاسته شد؛ که در ستون zero به نمایش درآمده است.

۳- با توجه به فرمول  $t=2d/v$  و در نظر گرفتن سرعت  $0.1\text{ m/s}$  ستون zero به ستون time تبدیل

می‌گردد یعنی مقاطع عمقی به مقاطع زمانی تبدیل می‌شود.

۴- اگر زمان را تقسیم بر فواصل زمانی کنیم مقادیر نمونه به دست می‌آید (sample). به سبب

این که مقدار نمونه‌ها همان شماره سطر در ماتریس نهایی است بنابراین مقادیر مذکور رُند

شده است.

۵- در نهایت طبق فرمول  $m=y_2-y_1/x_2-x_1$ ، همچنین در دست داشتن مقادیر x یعنی ردّها و y

یعنی نمونه‌ها، شیب خط (m) به ازای فواصل معلوم، به دست آمد.

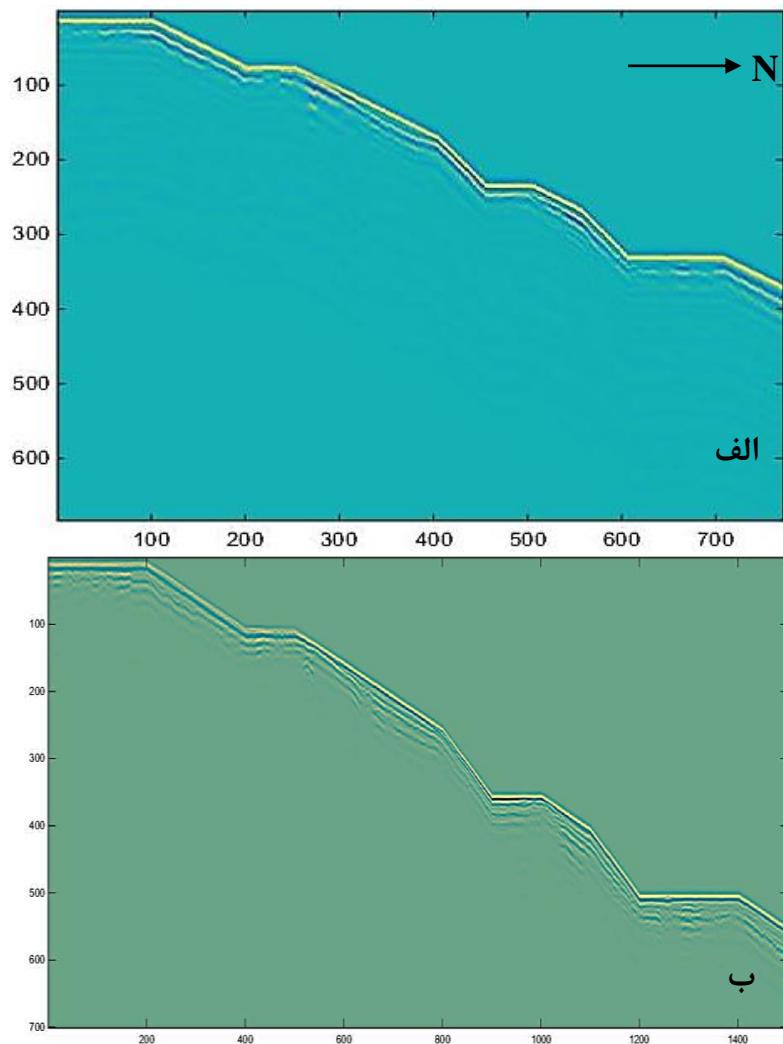
۶- حال با در دست داشتن مقادیر شیب خط از رد شماره‌ی ۱ تا ۱۵۰۰ و معلوم بودن ستون  $x$  (ردها) و مقدار  $y_1$  می‌توان به ترتیب  $y_2$  تا  $y_{1500}$  را محاسبه نمود. در جدول ۷-۵ مثال‌هایی ذکر شده است.

جدول ۷-۵: مثال‌هایی از محاسبه مقادیر نمونه‌ها با در دست داشتن شیب خط، شماره رد و شماره اولین نمونه

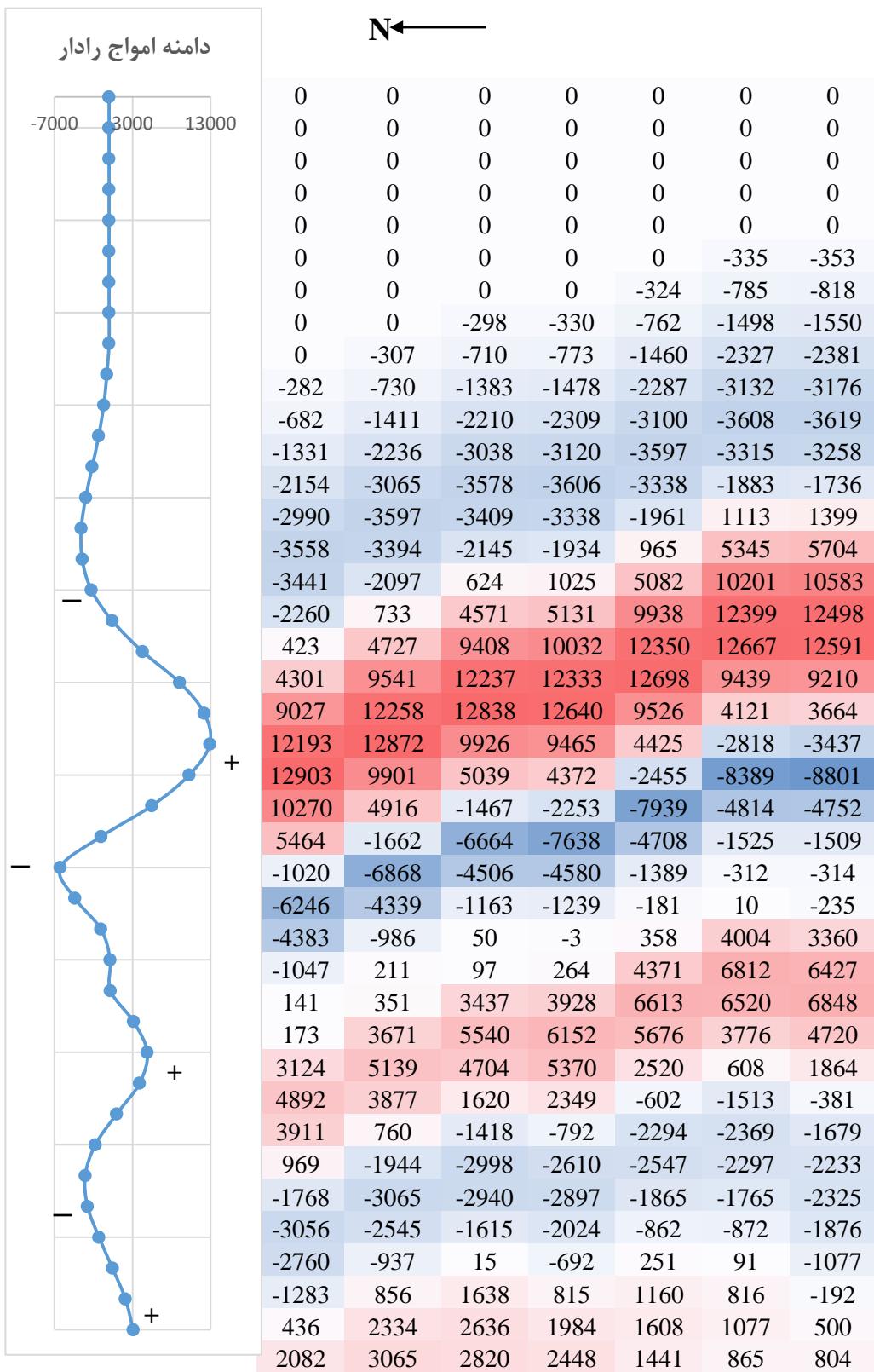
Trace(x)	m	Sample(Y)	Trace(x)	m	Sample(Y)
795	-0.4931	-243.59	200	0	0
796	-0.4931	-244.083	201	-0.4931	0
797	-0.4931	-244.576	202	-0.4931	-0.4931
798	-0.4931	-245.069	203	-0.4931	-0.98619
799	-0.4931	-245.562	204	-0.4931	-1.47929
800	-0.98619	-246.055	205	-0.4931	-1.97239
801	-0.98619	-247.041	206	-0.4931	-2.46548
802	-0.98619	-248.028	207	-0.4931	-2.95858
803	-0.98619	-249.014	208	-0.4931	-3.45168
804	-0.98619	-250	209	-0.4931	-3.94477
805	-0.98619	-250.986	210	-0.4931	-4.43787

۷- مقادیر  $y_1$  تا  $y_{1500}$  به دست آمده میزان جابه‌جایی سطرها در هر ستون (۱ تا ۱۵۰۰) است که اساس کد مربوطه در نرم‌افزار MATLAB می‌باشد.

۸- در ادامه با اعمال کد توپوگرافی در نرم‌افزار MATLAB، عملیات جابه‌جایی سطرهای هر ستون و یا تصحیح توپوگرافی انجام شد. نتایج در شکل ۲۶-۵-الف و ب آمده است. البته می‌توان با تغییر رنگ‌بندی مقطع، به نتایج بهتری در نرم‌افزار MATLAB دست یافت.



شکل ۵-۲۶: (الف) مقطع پروفیل P1-100sh و (ب) مقطع پروفیل P1-250sh پس از پردازش‌های مذکور و سپس تصحیح توپوگرافی پس از اعمال کد در نرم‌افزار MATLAB



شکل ۲۷-۵: بخش کوچکی از ماتریس مربوط به پروفیل P1-100sh بعد از تصحیح توپوگرافی در نرم‌افزار MATLAB

### ۳-۳-۵- تفسیر مقاطع GPR

در تفسیر مقاطع GPR منطقه خلیل شهر به یک سری نکات توجه ویژه نموده ایم که ذیلاً به شرح آنها می پردازیم:

۱- مرزهای بازتاب کننده امواج الکترومغناطیسی GPR، می توانند تا حدودی نشان دهنده‌ی

فصل مشترک‌ها یا مرزهای رسوبی و یا چینه‌شناختی باشند. لیکن تعداد این مرزها الزاماً

نشان دهنده‌ی تغییرات جنس لایه و یا لیتولوژی نیست. ممکن است، لیتولوژی تا عمق معینی

ثابت باشد، لیکن به‌سبب تغییرات دانه‌بندی، رطوبت، تراکم و فشردگی، درصد تخلخل و

شکستگی و خیلی پارامترهای دیگر، مرزهای بازتاب کننده‌ی GPR متعددی مشاهده گردد.

۲- پاسخ GPR ناشی از مرزهای پرشیب (همانند نتایج مدل‌سازی پیشرو در ابتدای فصل) ضعیف

بوده و در مرزهای قائم، این پاسخ صفر است. پس نباید انتظار بازتاب از این فضول را داشت.

۳- ممکن است جابه‌جایی لایه‌ها توسط شاخه‌های گسلی، لایه‌های رسانا و مقاوم را در کنار

یکدیگر قرار داده باشد که در فصل مقاومت ویژه تقریباً چنین حالتی دیده شده است (رجوع

شود به شکل‌های ۱۶-۴ تا ۱۸-۴)، انتظار می‌رود در لایه‌های رسانا یا به عبارت صحیح‌تر لایه-

های با مقاومت ویژه پایین، با میرائی امواج GPR مواجه شویم. حال چه کاهش مقاومت ویژه

یا رساناتر شدن به‌سبب وجود آب باشد، یا کاهش اندازه‌ی دانه‌بندی، یا لسی بودن یا لومی

بودن خاک، باید این موارد در ادامه بررسی گردد.

۴- برخی پروفیل‌ها با آنتن غیرپوششی و برخی نیز با آنتن پوششی برداشت شده‌اند، کیفیت داده-

های برداشتی نیز حائز اهمیت است. (در پیوست د ذکر شده است).

از تلفیق نتایج مقاطع پردازش شده و تصویر سه‌بعدی از منطقه خلیل شهر، شکل ۲۸-۵ و ۲۹-۵ حاصل

شده است. با توجه به این شکل و رعایت نکات ذکر شده‌ی اخیر، 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:

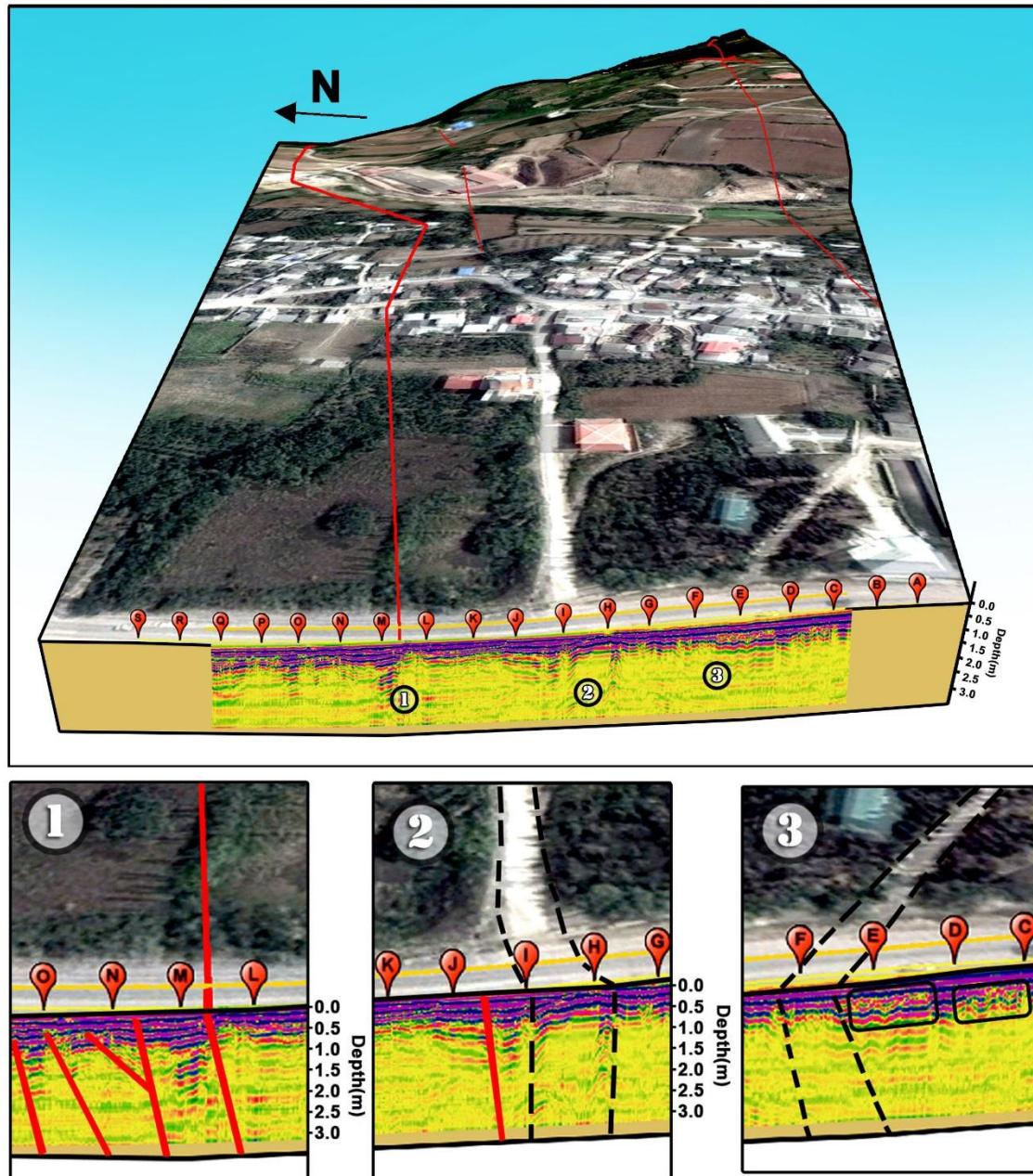
۱- از سطح تا عمق ۱.۵ متری پاسخ دامنه امواج GPR قویاً به چشم می‌خورد، با توجه به این‌که پروفیل‌های P1b-100unsh، P1b-100sh، P1-100sh، P1-250sh برداشت شدند و معمولاً برای ساخت جاده آسفالته نیاز به رعایت الزامات مهندسی خاک همچون تحکیم و تراکم و ... می‌باشد. لذا ممکن است پاسخ‌های قوی مذکور مربوط به خاک‌های تراکم‌یافته باشد. تفکیک این لایه نسبت به لایه‌های پایینی در مقطع دامنه لحظه‌ای (شکل ۴-۲۹-۵ تا ۳) کاملاً مشهود است. البته در مقطع فاز لحظه‌ای (شکل ۴-۲۹-۵ تا ۶) نیز این مرز دیده می‌شود که البته نسبت به نشانگر دامنه لحظه‌ای مقداری ضعیفتر عمل کرده است.

۲- در برخی قسمت‌های مقاطع در شیب مرزهای بازتابی تغییر ناگهانی دیده می‌شد، یا این‌که تعداد مرزهای بازتاب‌کننده تغییر می‌کرد لذا در امر تفسیر به مرزهایی که تغییرات در طرفین آن احساس می‌شد، توجه شده است.

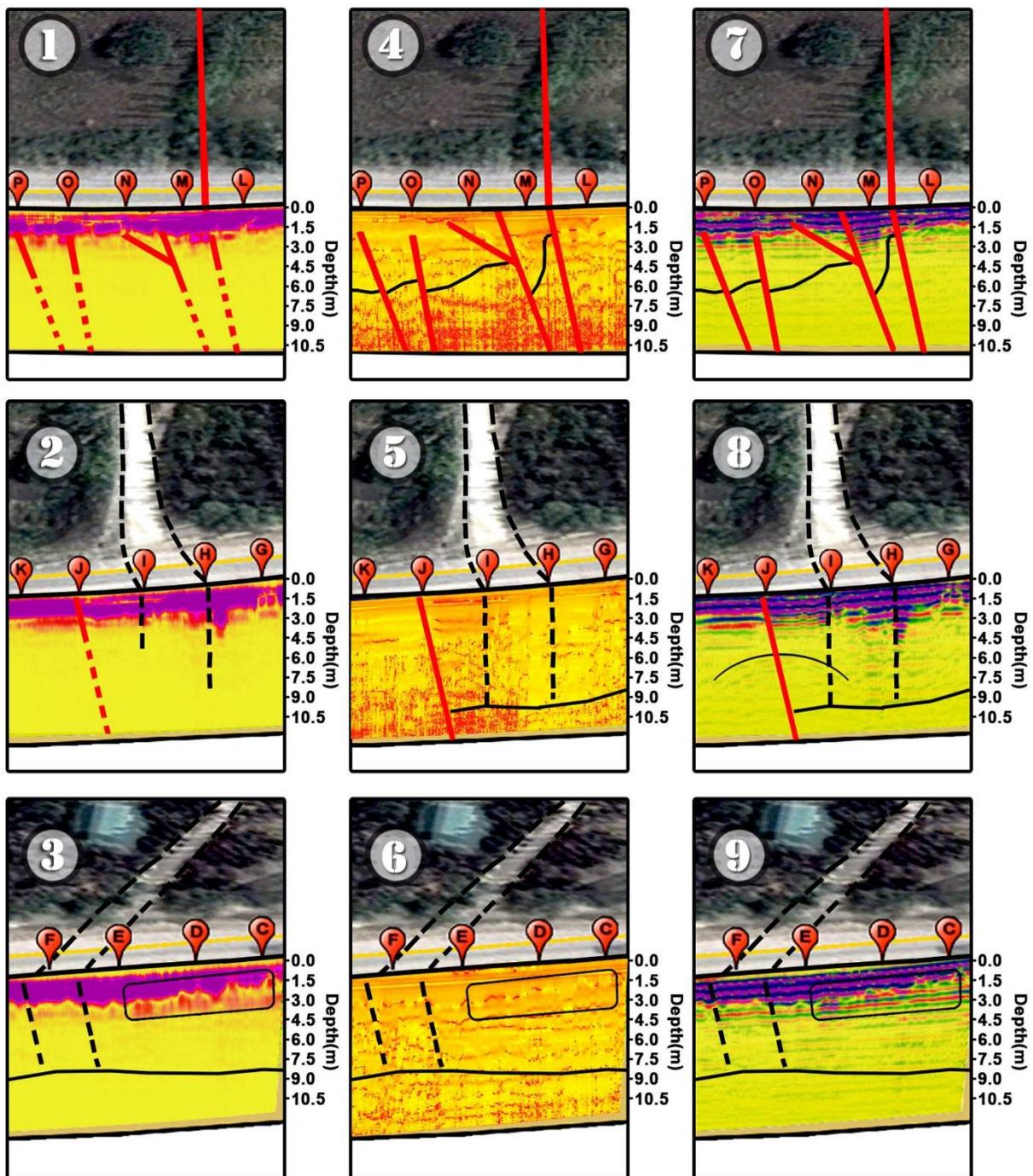
۳- در فاصله بین F و E (شکل ۲۸-۵ و ۲۹-۵)، به‌سبب فشردگی خاک و همچنین بتون‌ریزی جهت ساخت جاده فرعی در محل تلاقی با جاده اصلی، کاهش رسانندگی الکتریکی سبب شده تا بازتاب‌های زیر سطح جاده متفاوت از طرفین آن و به‌خصوص ضلع جنوبی جاده باشد. این مرز به‌صورت خط‌چین مشخص شده است و در پروفیل ۲۵۰ مگاهرتز از عمق ۱ تا ۳ متری امتداد می‌یابد. در شکل ۹-۲۹-۵ یعنی پروفیل P1-100sh این اختلاف به‌طور واضح‌تری 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 به‌سبب فشردگی و یا عدم فشردگی خاک و یا تغییر اندازه ذرات خاک باشد. البته از ذکر این نکته هم نباید غافل بود که در پی‌ریزی جاده در محل‌های خاصی از رس به‌جهت استحکامات استفاده می‌شود که وجود

آن سبب میرائی امواج الکترومغناطیسی می‌گردد). مقطع فاز لحظه‌ای پروفیل P1-100sh (۵-۲۹-۶)، تفاوت‌های مشهودی در طرفین مرز از خود نشان داده که در امر تفسیر بسیار راه‌گشا بوده است. در عمق پایین‌تر از ۷.۵ متر نیز تغییرات فاز مشهود است که این تغییرات در مقطع اصلی نیز قابل مشاهده است لیکن نشانگر دامنه‌ی لحظه‌ای در این مورد انتظارات ما را برآورده نساخته است.

۴- در فاصله بین I و H (شکل ۲۸-۵ و ۲۹-۵) نیز همانند مورد ۲، به سبب فشردگی خاک و همچنین بتون‌ریزی جهت ساخت جاده فرعی در محل تلاقی با جاده اصلی، بازتاب‌های زیر سطح جاده متفاوت از طرفین آن جاده می‌باشد. این مرز به صورت خط‌چین مشخص شده است و در پروفیل P1-250sh از عمق ۱ تا ۳ متری و در پروفیل P1-100sh نیز از عمق ۱.۵ تا ۷.۵ متر قابل مشاهده است. در این فاصله مشاهده می‌گردد که پروفیل P1-250sh بازتاب قوی در دو طرف مرز نشان می‌دهد و این بازتاب قوی تا حد اکثر عمق پروفیل GPR یعنی ۳ متر قابل مشاهده است. پروفیل P1-100sh نیز دقیقاً پاسخی مشابه با پروفیل P1-250sh از خود نشان می‌دهد با این تفاوت که این پاسخ تا عمق ۷.۵ متری ادامه یافته است. نشانگر فاز لحظه‌ای پروفیل P1-100sh (۵-۲۹-۵)، همانند مورد قبل، تفاوت‌های بارزی در طرفین مرز از خود نشان داده که در امر تفسیر بسیار راه‌گشا بوده است. در عمق پایین‌تر از ۷.۵ متر نیز تغییرات فاز مشهود است که این تغییرات در مقطع اصلی نیز قابل مشاهده است لیکن نشانگر دامنه‌ی لحظه‌ای در این مورد نیز انتظارات ما را به طور کامل برآورده نساخته است لیکن تا حدودی یال جنوبی مرز مذکور را آشکار ساخته است (۵-۲۹-۲). در نهایت دو ساختار ناشی از ساخت‌وسازهای راه‌سازی در محور تلاقی جاده‌های فرعی به اصلی به صورت خط‌چین به نمایش درآمده است.



شکل ۵-۲۸: مدل تلفیقی از نتایج پروفیل GPR برداشت شده در طول پروفیل P1-250sh در منطقه خلیل شهر به همراه موقعیت عوارض



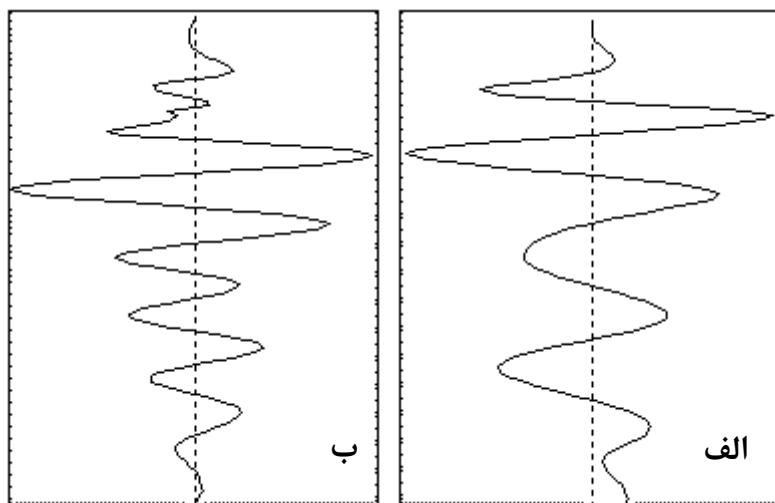
شکل ۲۹-۵: مدل تلفیقی از نتایج پروفیل GPR برداشت شده در طول پروفیل P1-100sh (۱ تا ۳: نشانگر دامنه لحظه‌ای، ۴ تا ۶: نشانگر فاز لحظه‌ای و ۷ تا ۹: مقطع اصلی رادار) به همراه موقعیت عوارض

۵- در فاصله بین J و I (شکل ۵ و ۲۹-۵) گسلش مشهودی سبب جابه‌جایی نرمال دو بلوك

نسبت به هم شده است. اين شاخه‌ي گسلی در اين پژوهش،  $F_{ji}$  نام‌گذاري شده است.

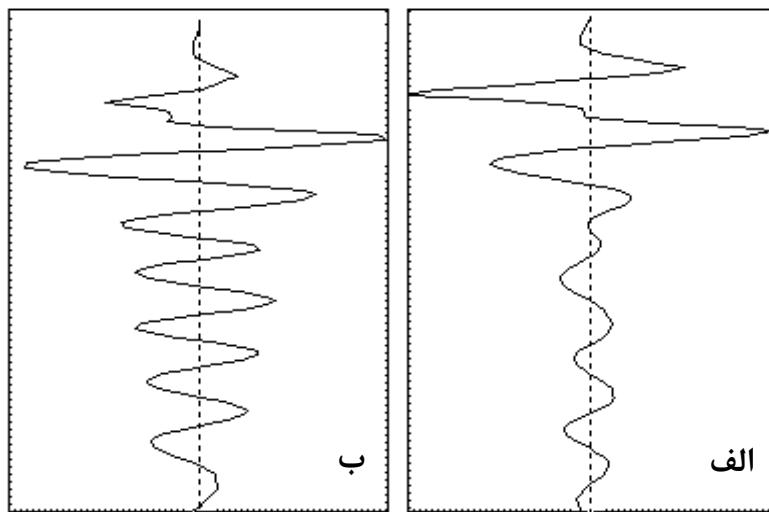
تغیيرات دامنه، در دو طرف مرز گسل کاملاً مشهود بوده به طوری‌كه تعداد پيك دامنه بلوك

فرادیواره‌ی گسل (ضلع جنوبی) کمتر از تعداد پیک دامنه در بلوک فرودیواره‌ی گسل (ضلع شمالی) است. تغییرات دامنه‌ی امواج بازتابی طرفین گسل Fji در شکل ۳۰-۵-الف و ب آورده شده است. نشانگر فاز لحظه‌ای نیز در دو طرف مرز گسل دچار تغییرات شده است. این تغییرات در نشانگر دامنه‌ی لحظه‌ای به صورت ضعیفی قابل مشاهده است.



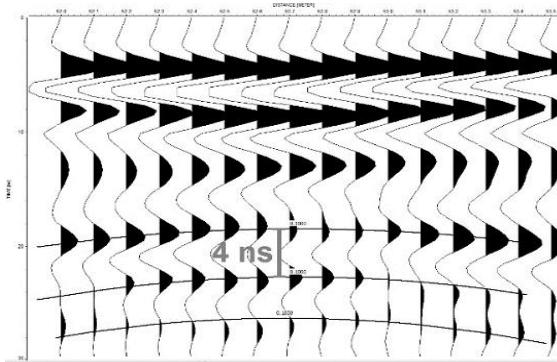
شکل ۳۰-۵: نمایش دامنه ردهای طرفین گسل Fji در پروفیل P1-100sh، الف) ضلع جنوبی گسل، ب) ضلع شمالی گسل

۶- در فاصله بین L و M (شکل ۲۸-۵ و ۲۹-۵) نیز همانند مورد قبلی سبب ایجاد گسلش مشهودی با جابه‌جایی نرمال دو بلوک نسبت به هم شده است. این شاخه‌ی گسلی در این پژوهش، F1 نام‌گذاری شده است. تغییرات دامنه، در دو طرف مرز گسل کاملاً باز بوده به‌طوری‌که تعداد پیک دامنه بلوک فرادیواره‌ی گسل (ضلع شمالی) کمتر از تعداد پیک دامنه در بلوک فرودیواره‌ی گسل (ضلع شمالی) است. تغییرات دامنه‌ی امواج بازتابی طرفین گسل در شکل ۳۱-۵-الف و ب آورده شده است. نشانگر فاز لحظه‌ای نیز در دو طرف مرز گسل F1 دچار تغییرات شده است (شکل ۲۹-۵-۴). این تغییرات در نشانگر دامنه‌ی لحظه‌ای نیز قابل مشاهده است (شکل ۲۹-۵-۱). در پروفیل P1-250sh نیز قسمت غربی مرز گسل F1 (فرودیواره‌ی گسل) دامنه‌ی قوی‌تری نسبت به بخش فرادیواره از خود نشان می‌دهد. همچنین تغییرات عمقی در لایه‌بندی تقریباً در عمق ۵ متری در شکل مشاهده می‌شود.



شکل ۳۱-۵: نمایش دامنه ردهای طرفین گسل F1 در پروفیل P1-100sh، الف) ضلع جنوبی گسل، ب) ضلع شمالی گسل

-۷ در فاصله‌ی H (شکل ۲۸-۵ و ۲۹-۵) از پروفیل‌های P1-100sh و P1-250sh، هذلولی ناشی از وجود لوله‌ی آب جهت مصارف زمین‌های کشاورزی دیده می‌شود. قسمتی از پروفیل P1-250sh که دربردارنده‌ی هذلولی ناشی از اثر لوله آب بود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مطابق شکل ۳۲-۵ و فرمول موجود در شکل، لوله برفرض این‌که از آب پُر باشد (که احتمالاً نیست چون برداشت در اواسط فصل تابستان بوده و آب کمتری نسبت به فصل کاشت و داشت برای مصارف باغبانی و کشاورزی استفاده می‌شود)، در عمق ۷۵ سانتی‌متری با قطر ۶ سانتی-متر تخمین زده می‌شود که به دلایلی نامعقول است معمولاً لوله‌ی آب زمین‌های کشاورزی ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر باید باشد. پس می‌توان به این نتیجه رسید که تنها مقداری از لوله دارای آب می‌باشد. در این صورت، بایستی سرعت امواج GPR، میانگینی از سرعت موج در هوا و آب باشد، هر چه درصد هوا بیشتر، در نهایت قطر لوله بیشتر خواهد بود. برای رسیدن به قطر واقعی لوله، بایستی سرعت امواج رادار در حدود ۰.۰۷۵ تا ۰.۱ متر بر نانوثانیه باشد.



$$V = D/(t/2), \quad V_{\text{water}} = 0.03 \text{ m/ns}$$

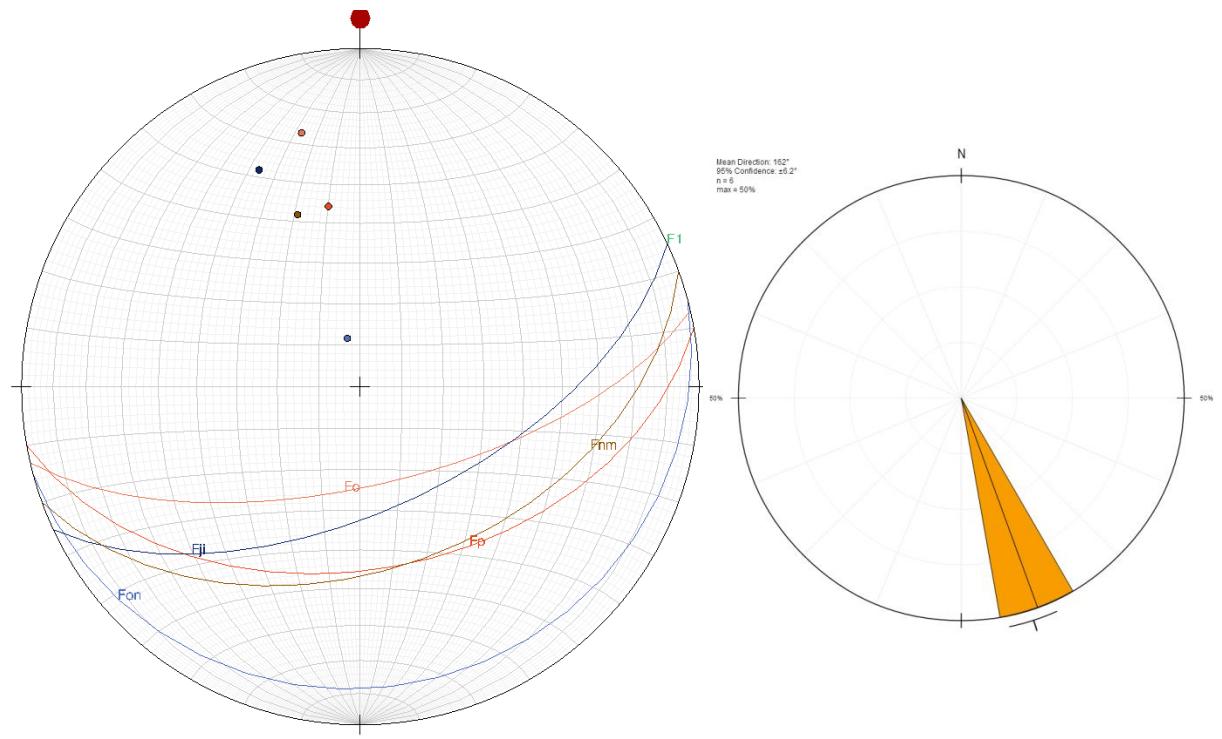
$$D = 0.03 \text{ m/ns} * (4/2) \text{ ns} = 0.06 \text{ m} = 6 \text{ cm}$$

D = Diameter of water pipe

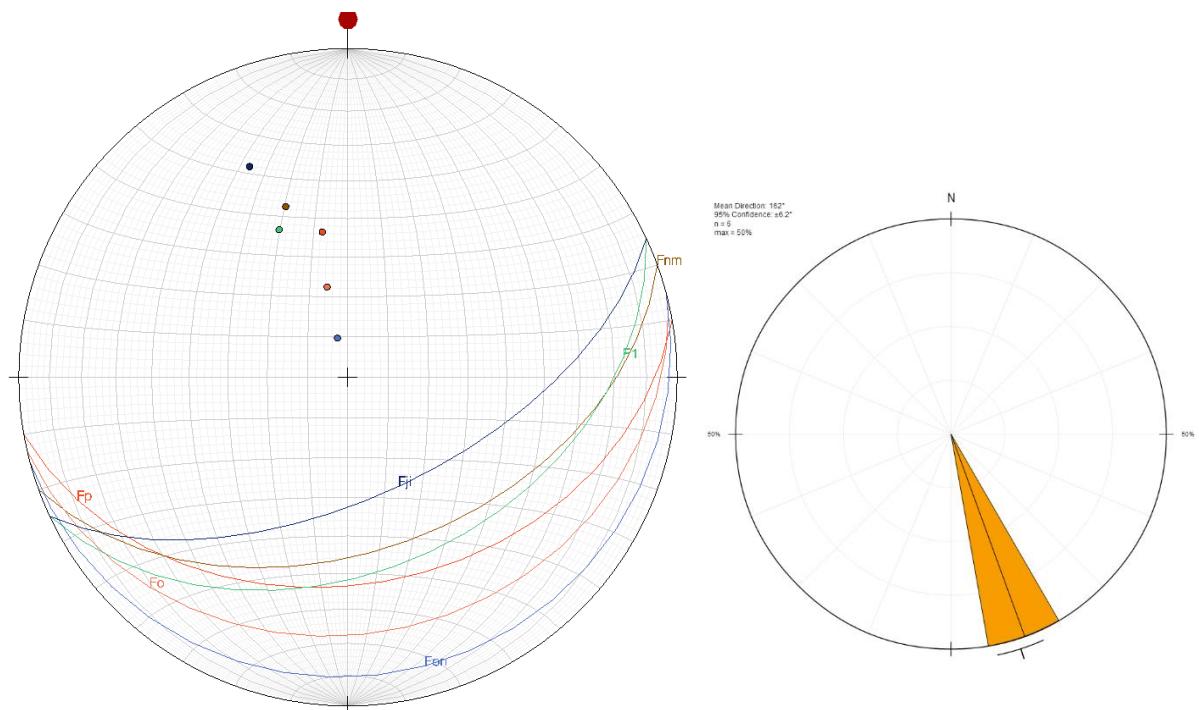
شکل-۳۲-۵: نمایش هذلولی نشان دهنده لوله‌ی آب جهت مصارف کشاورزی و محاسبه قطر لوله در صورت پر بودن لوله (که فرضی اشتباہ است)

-۸- در فاصله بین M و N، محل O و P (شکل ۲۸-۵ و ۲۹-۵) نیز شاخه‌های دیگری از گسل دیده می‌شود که می‌توان از وجود تغییرات ناگهانی دامنه‌ی رد، تغییرات در نشانگر دامنه‌ی لحظه‌ای و تغییرات در نشانگر فاز لحظه‌ای به وجود هر کدام پی برد. البته دید صحیح اولیه از محل تقریبی شاخه‌های گسل و نیز تلفیق این نتایج با پروفیل‌های برداشت شده مقاومت ویژه در همین محل نیز بسیار راه‌گشا بوده است.

-۹- در نهایت با در دست داشتن امتداد شاخه‌های اصلی گسل از اطلاعات تکتونیکی منطقه و Streonet پیگیری عمقی گسل از روی پروفیل‌های GPR و پیاده‌سازی نتایج در نرم‌افزار توانستیم روند شیب و امتداد عمومی شاخه‌های گسلی، قطب شاخه‌های گسلی و همچنین رُز دیاگرام از تکتونیک عمومی شاخه‌های گسلی در منطقه‌ی خلیل شهر را ترسیم نماییم. نتایج حاصل در شکل‌های ۳۳-۵ و ۳۴-۵ به ترتیب برای پروفیل‌های P1-100sh و P1-250sh نمایش درآمده است.



شکل ۳۳-۵: سازوکار شاخه‌های گسل خزر در منطقه خلیل شهر پس از مدل‌سازی داده‌های GPR آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پوششی



شکل ۳۴-۵: سازوکار شاخه‌های گسل خزر در منطقه خلیل شهر پس از مدل‌سازی داده‌های GPR آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی

## **فصل ششم- نتیجه کری و پیشنهادات**

## ۱-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان در موارد ذیل خلاصه کرد:

- ۱- مجموعاً ۳ کد در فصل سوم جهت پردازش داده‌ها نوشته شد که در نتیجه‌ی اعمال کد  $a$ ، داده‌های پراکنده، نظاممند می‌گردد؛ در نتیجه‌ی اعمال کد  $b$ ، نقاط صفر از گردید حذف می‌گردد. و در نتیجه‌ی اعمال کد  $c$ ، از داده‌ها میانگین گرفته می‌شود.
- ۲- نقشه‌ی مغناطیس هوایی به خوبی عوارض گسلی را به نمایش درآورده است. بالاخص در تفکیک آبرفت‌های کواترنری از سازندهای قدیمی‌تر موفق بوده است.
- ۳- نتایج حاصل از پردازش داده‌های مغناطیس هوایی انتباق قابل توجهی با نتایج تکتونیکی و زمین‌شناسی منطقه دارد.
- ۴- مرز مغناطیسی گسل‌های اصلی منطقه (شامل گسل‌های خزر، شمال البرز، بادله، لِله بند، آستانه، میلا، صبور و گیو) مشخص شده و سازوکار این گسل‌ها تعیین شده است.
- ۵- گسل خزر که از جمله مهم‌ترین گسل‌های منطقه می‌باشد دارای سازوکار معکوس بوده و با توجه به تفسیر تانسور مغناطیس عمومی منطقه دارای شیب به سمت جنوب تشخیص داده شده است. میزان شیب و جهت شیب گسل خزر نیز به خوبی محاسبه شده است. این نتیجه که با نظریات زمین‌شناسی متعدد نیز سازگار است چشم‌انداز دقیقی از برداشت‌های بعدی در منطقه به ما داده است.
- ۶- میزان شیب، جهت شیب و امتداد هر یک از گسل‌های خزر، شمال البرز، بادله، لِله بند، آستانه، میلا، صبور و گیو محاسبه شده و در این پایان‌نامه ارائه شده است.
- ۷- تکنیک‌های مختلف وارون‌سازی نرم‌افزارهای ZondRes2D و RES2DINV، نتایجی یکسان به همراه داشته است (البته نرم‌افزار RES2DINV پاسخ را تیزتر نشان داده) و دیواره‌های پنهان گسلی را به خوبی به نمایش درآورده‌اند.

-۸- پس از تلفیق نتایج حاصل از وارونسازی در نرمافزار ZondRes2D و RES2DINV، سه شاخه‌ی

عمده‌ی گسلی در طول مقاطع مقاومت ویژه مشاهده شد. این شاخه‌ها F<sub>ji</sub>، F<sub>1</sub> و F<sub>nm</sub>

نام‌گذاری شدند. نتایج با اطلاعات زمین‌شناسی به‌طور کامل انطباق داشت. (شاخه‌ای F<sub>ji</sub>، F<sub>1</sub>

از ابتدای امر مورد نظر زمین‌شناسان بوده است).

-۹- مقاطع GPR در نمایش شاخه‌ای F<sub>ji</sub>، F<sub>1</sub> عملکردی مناسب داشتند.

-۱۰- از تلفیق مقاطع مقاومت ویژه و GPR شکل ۱-۶ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱-۶ و

مقایسه‌ی پروفیل‌های حاصل از دو روش GPR و مقاومت ویژه منطقه خلیل شهر، شاخه‌های

گسل خزر در طول پروفیل مشخص شده است. شاخه‌های مذکور نشان‌دهنده حرکات تکتونیکی

جوان گسل خزر بوده که به سبب کشیده شدن امتداد گسل به داخل رسوبات عهد حاضر این

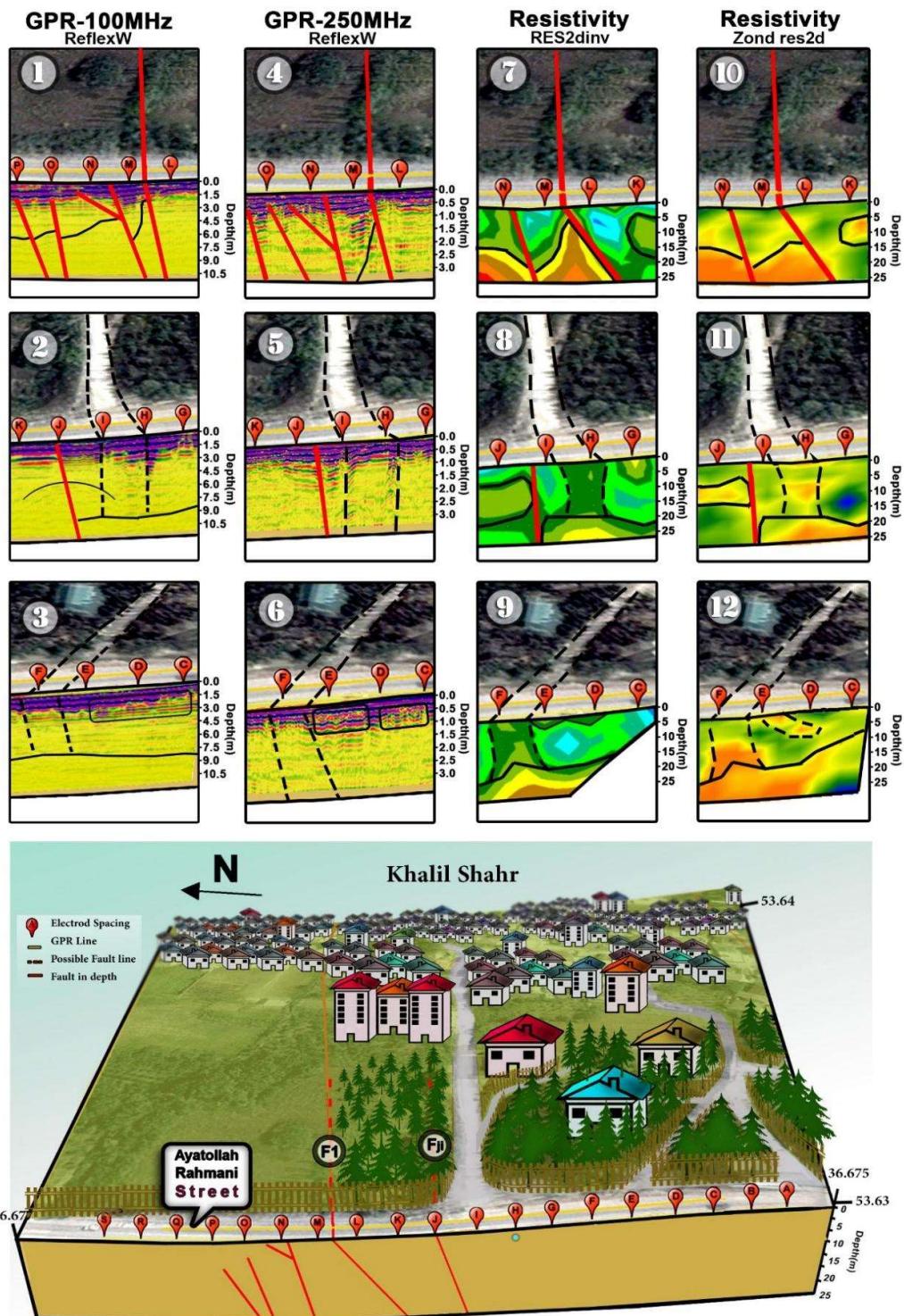
حرکات از دید پنهان مانده است. رخداد مذکور از نوع گسلش نرمال بوده که نشان‌دهنده‌ی

رژیم تکتونیکی کششی حاکم بر منطقه می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش هم‌راستا با برخی

نظریات زمین‌شناسی است.

-۱۱- شب و جهت شب گسل‌ها که از جمله مهم‌ترین اطلاعات گسلی است از تلفیق نتایج حاصل

از هر سه روش به کار گرفته شده در این پایان‌نامه محاسبه شده است.



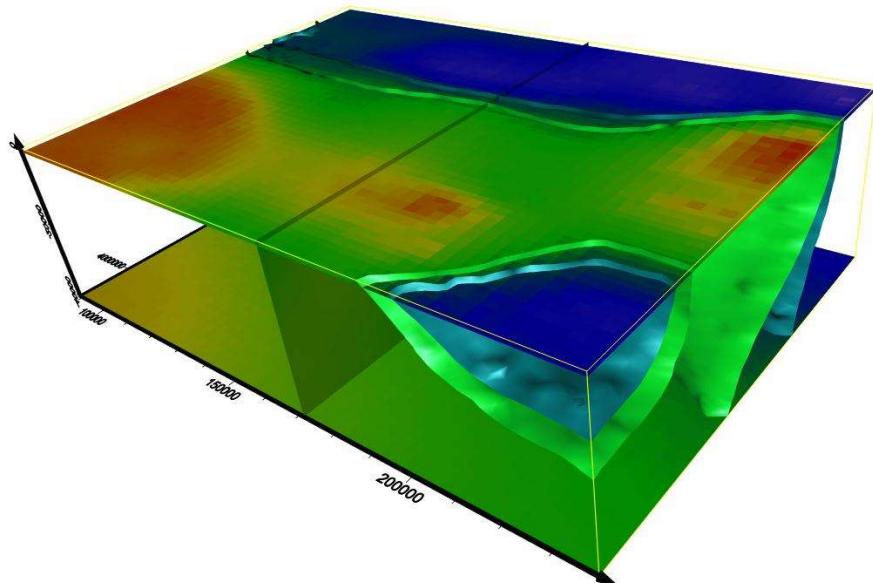
شکل ۶-۱: مقایسه پروفیل مقاومت ویژه و پروفیل GPR در منطقه خلیل شهر

## ۱-۶ پیشنهادات

- ۱- از جمله فیلترهای لبه‌یابی که می‌توان بر روی داده‌های مغناطیس اعمال کرد و مرز بی‌هنچاری را با دقت بیشتری به دست آورد باید به فیلتر ZS اشاره نمود. توصیه می‌شود پاسخ این فیلتر برای شناسایی لبه‌های بی‌هنچاری‌های منطقه خلیل شهر مورد بررسی قرار گیرد.
- ۲- توصیه می‌شود جهت بررسی شاخه‌های پنهان گسل خزر در شهرهای حساسی همچون آمل، نور، بابل، ساری و همچنین شهرک صنعتی امامزاده عبدالله آمل (که گسل خزر از آن می‌گذرد) از روش‌های بکار گرفته شده در این پایان‌نامه استفاده شود.
- ۳- به سبب تکتونیک فعال منطقه، حرکات تکتونیکی و لرزه‌ای که احتمال وقوع آن‌ها در زمان آتی بوده، جوامع ساکن در شهرهای فوق الذکر را تهدید می‌نماید، لذا انتظار می‌رود که از نتایج به دست آمده از این پایان‌نامه در مطالعات بعدی (لرزه‌نگاری، زلزله و ...) استفاده شده و در برنامه‌های آتی توسعه شهری به کار گرفته شود.

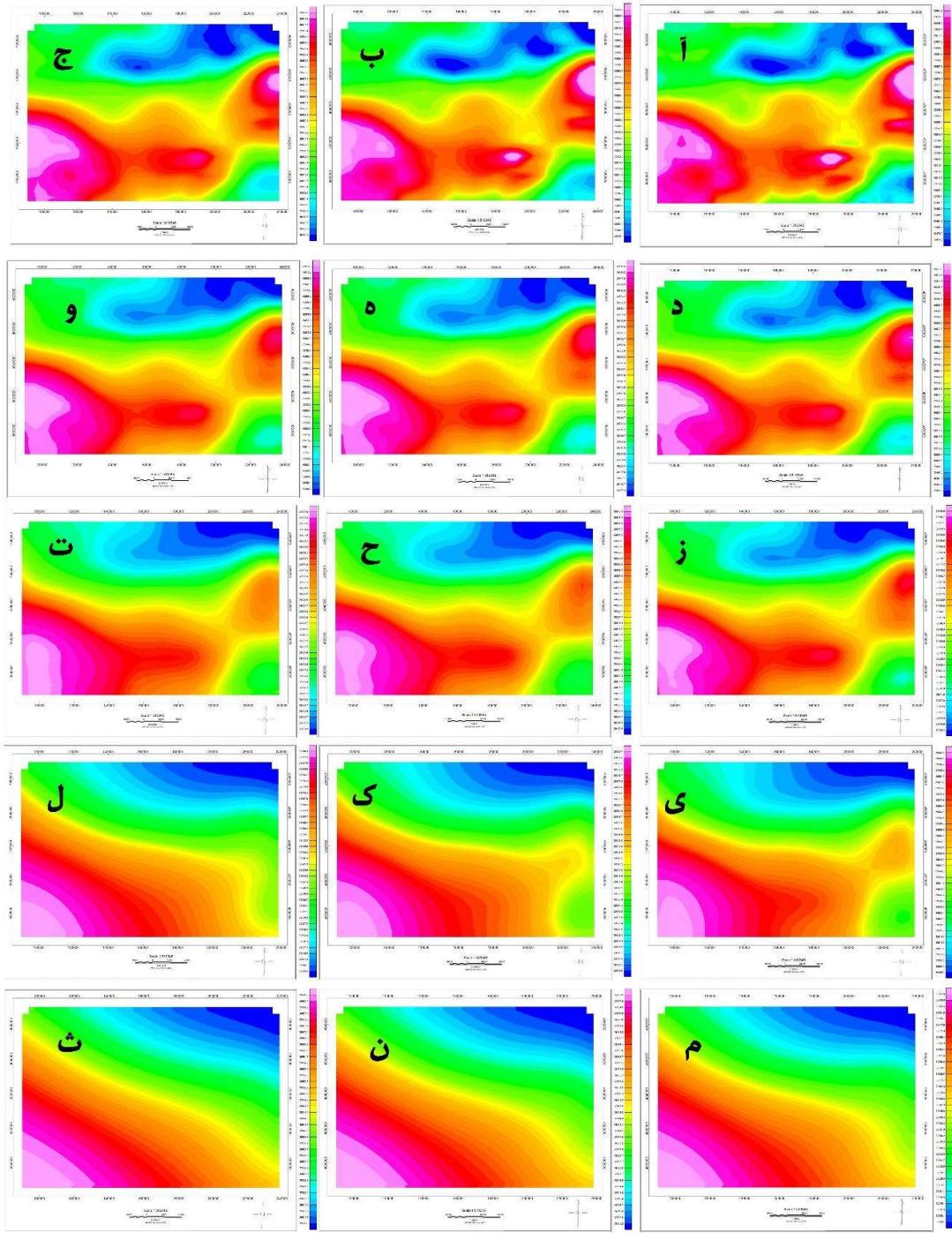
## پوست الف: تغییر مشبکه مغناطیسی در نرم افزار اوسیس مونتاژ

داده‌های رقومی‌شده‌ی مغناطیسی هوابرد منطقه‌ی خلیل شهر وارد محیط نرم‌افزار اوسیس مونتاژ شده و پس از رسم نقشه‌ی مغناطیسی، جهت حذف نقاط صفر از شبکه حاصل، نسبت به تغییر ابعاد مربع‌بندی در این نرم‌افزار اقدام شد و پس از آن فیلتر ادامه‌ی فراسو برای اعمق مختلف اعمال شد. سپس شبکه‌های به دست‌آمده به فرمت نرم‌افزار Voxler درآورده شد. خروجی نهایی مطابق شکل پ-الف-۱ به نمایش در آمده است. گسل‌های خزر، البرز، آستانه و صبور به صورت هم‌سطح<sup>۱</sup> در شکل پ-الف-۱ مشاهده می‌شود. فرآیند تغییر مشبکه بندی در نرم‌افزار اوسیس مونتاژ نه تنها انتظارات ما را جهت افزایش کیفیت برآورده نساخت، بلکه به این نتیجه رسیدیم که داده‌ها پس از اعمال کدهای نوشته شده‌ی ما (که در فصل سوم به ذکر آن‌ها پرداختیم)، از کیفیت بالاتری برخوردار است.



شکل پ-الف-۱: نمایش سه‌بعدی مغناطیسی منطقه مورد مطالعه پس از تغییر شبکه‌بندی در اوسیس مونتاژ

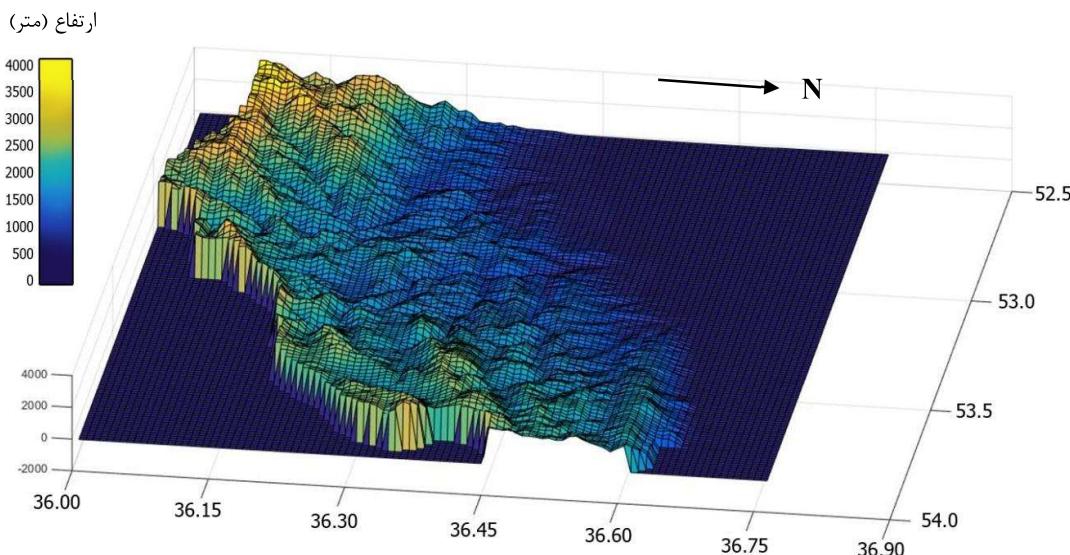
<sup>۱</sup> Isosurface



شکل پ-الف-۲: آگرید مغناطیس هوایی شرق مازندران بدون اعمال پردازش (پس از تغییرات مشبندی در نرم افزار اوپسیس مونتاژ)، ب. پس از اعمال فیلتر ادامه‌ی فراسو ۱۰۰۰ متر، ج. ۲۰۰۰ متر، د. ۳۰۰۰ متر، ه. ۴۰۰۰ متر، ز. ۵۰۰۰ متر، ح. ۶۰۰۰ متر، ت. ۸۰۰۰ متر، س. ۱۰۰۰۰ متر، ک. ۱۵۰۰۰ متر، ل. ۲۰۰۰۰ متر، م. ۲۵۰۰۰ متر، ن. ۳۰۰۰۰ متر، پ. ۳۵۰۰۰ متر، و. ۴۰۰۰۰ متر.

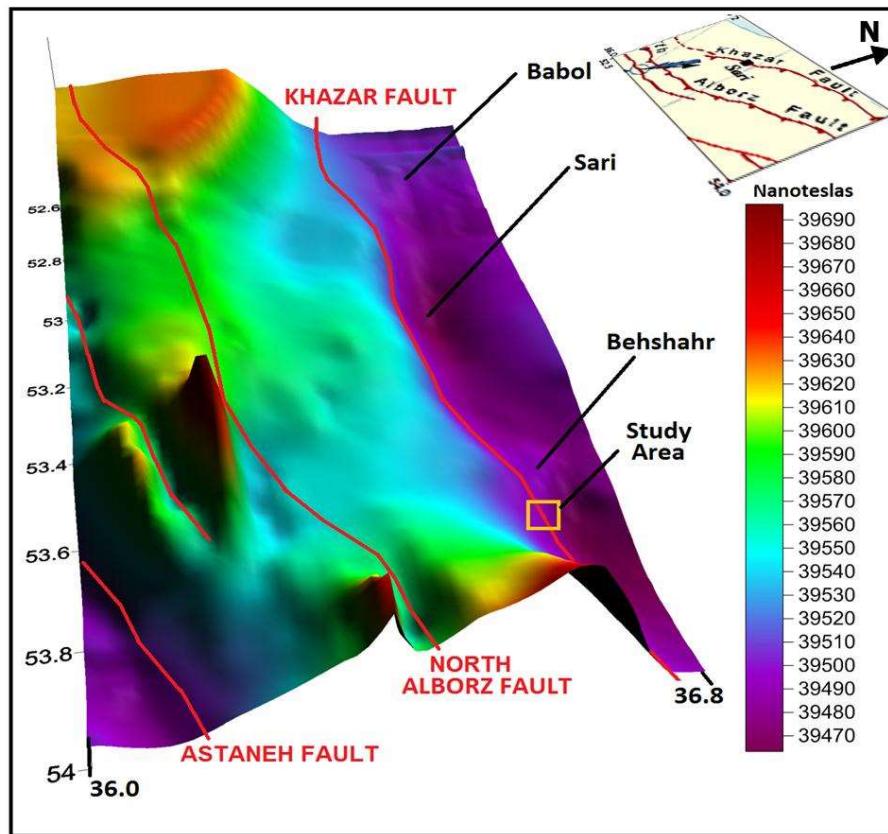
## پیوست ب: بررسی ارتباط توپوگرافی باشدت میدان مغناطیسی کل منطقه

پس از اعمال کد مربع‌بندی (کد a) نوشته شده در این پایان‌نامه بر روی داده‌های SRTM شرق مازندران، توپوگرافی این منطقه در نرم‌افزار MATLAB به نمایش در آمد (شکل پ-ب-۱). همچنین نقشه مغناطیسی هوابرد شرق مازندران در نرم‌افزار Surfer به نمایش در آمد (شکل پ-ب-۲). مرزهای گسل‌های لرزه‌زای منطقه موردمطالعه نیز بر روی نقشه مغناطیسی پیاده شد.



شکل پ-ب-۱: نقشه توپوگرافی شرق مازندران نمایش داده شده در نرم‌افزار MATLAB پس از اعمال کد شبکه‌بندی داده‌های SRTM منطقه موردمطالعه

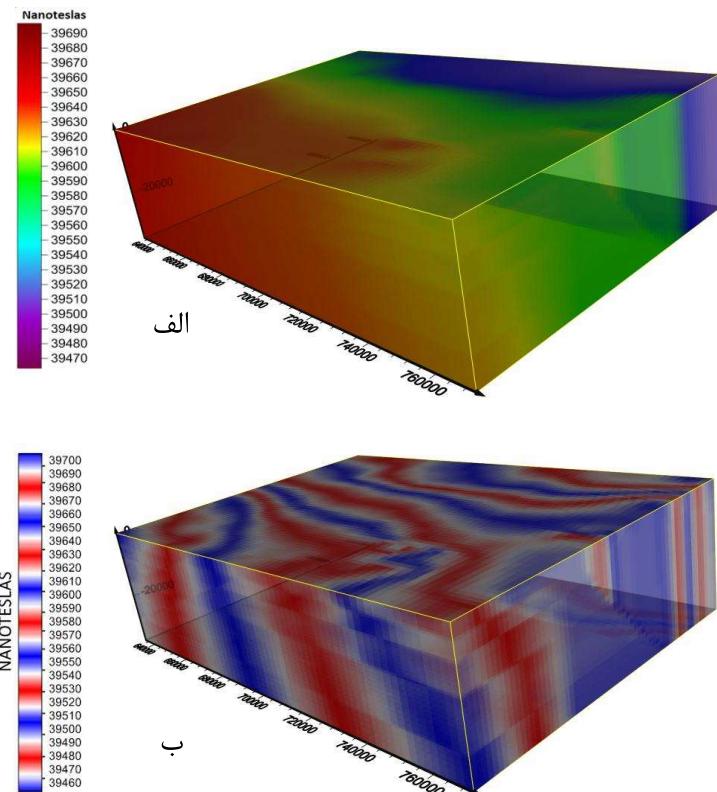
با مقایسه شکل‌های پ-ب-۱ و پ-ب-۲ می‌توان به ارتباط میان تغییرات شدت میدان مغناطیسی نسبت به توپوگرافی پی برد. بدین صورت که در این منطقه نقاط پست‌تر دارای مغناطیسی کمتری می‌باشند و بلعکس نقاط مرتفع‌تر از مغناطیسی بالاتری برخوردارند. البته این قاعده در همه‌جا صدق نمی‌کند.



شکل پ-ب-۲: نمایش شدت میدان مغناطیس منطقه مورد مطالعه در نرم افزار Surfer

# پیستج: اعمال تصحیح IGRF و فیلتر دامنه‌ی فراسوبر مجموعه داده‌های

## مغناطیسی سطحه مورد مطالعه



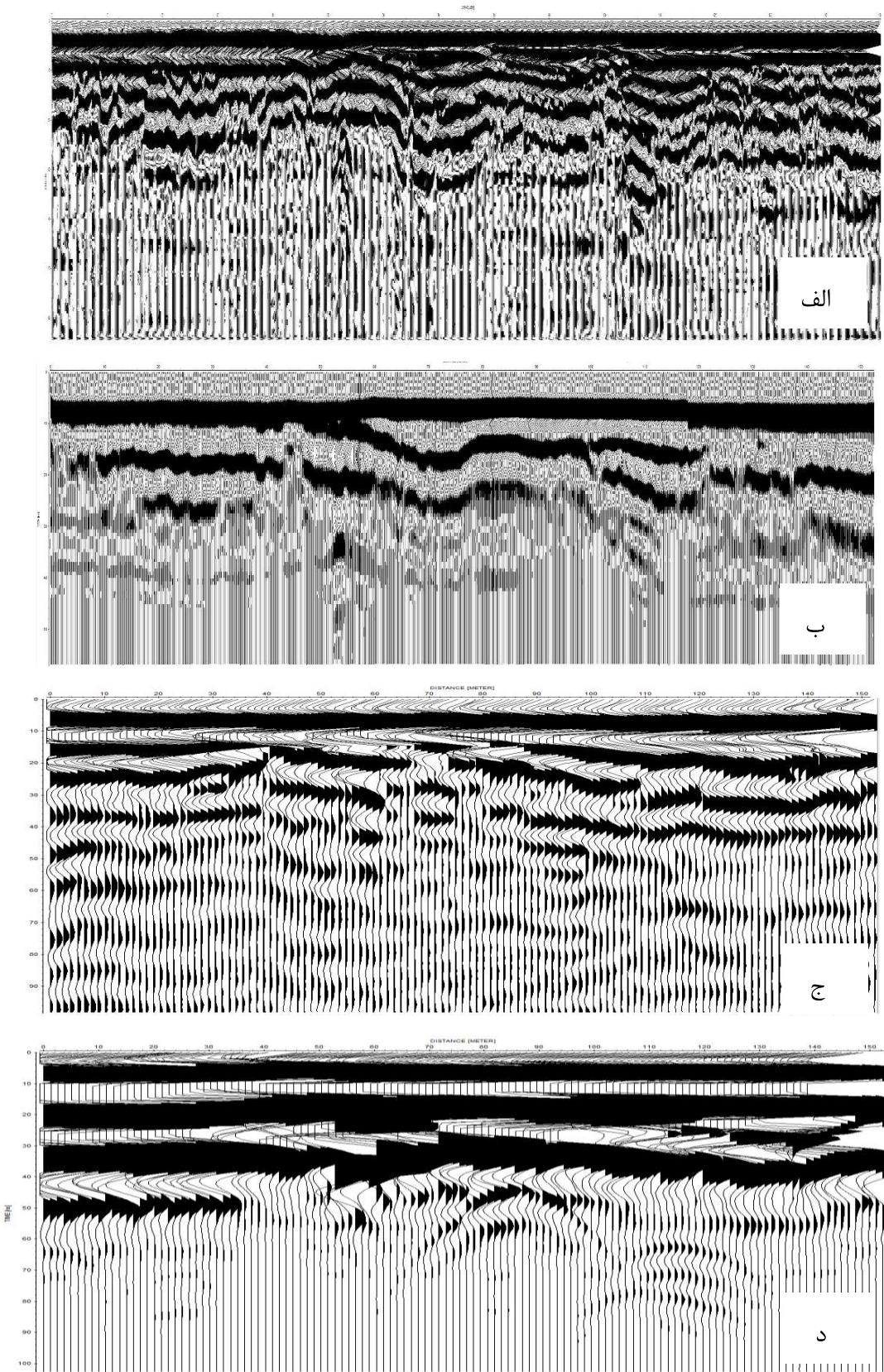
برای جداسازی بی‌هنجری‌های ناحیه‌ای از مقادیر محلی از روی نقشه مغناطیس هوابرد شرق مازندران، تصحیح IGRF به ازای سطوح ارتفاعی مختلف از ۰ تا ۳۵۰۰۰ متر در نرم‌افزار اوسمیس مونتاژ انجام شد. سپس داده‌ها به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار Voxler با دو مقیاس رنگی ساده و خاص به نمایش در آمدند (شکل پ-ج-۱-الف و ب).

شکل پ-ج-۱: نمایش سه‌بعدی مغناطیس محلی شرق مازندران  
(الف) پس از اعمال تصحیح IGRF (نمایش ساده) و (ب) نمایش با مقیاس خاص

# پیوست د- کیفیت مقطع GPR

مقاطع پروفیل‌های GPR برداشت شده در منطقه خلیل شهر پس از تبدیل پسوند و تبدیل به داده‌ی ماتریسی در نرم‌افزار MATLAB به صورت Wigle به نمایش درآمدند (پ-۵-۱-الف تا د). با توجه به شکل‌های پ-۵-۱-الف تا د، مطالب ذیل قابل استنباط است:

- ۱- به ترتیب از الف تا د قدرت تفکیک کاهش می‌یابد. شکل الف بالاترین فرکانس و تفکیک‌پذیری را داراست. شکل ب، ج و د، هر سه با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز برداشت شده‌اند. لیکن شکل ب چون پیوسته‌تر برداشت شده، تفکیک‌پذیری بالاتری نسبت به دو شکل دیگر دارد. شکل ج آنتن پوششی دارد و نسبت به شکل د که با آنتن غیر پوششی برداشت شده، کمتر با نویه همراه است، پس کیفیت بالاتری نسبت به آن دارد.
- ۲- روند لایه‌بندی رسوبی در هر ۴ مقطع مشابه است.
- ۳- شکل‌های الف و د کمترین عمق نفوذ را دارند. شکل الف به‌خاطر استفاده از آنتن با فرکانس بالاتر و شکل د به‌خاطر غیرپوششی بودن و نویزی شدن دیتا.
- ۴- پدیده‌های هذلولی در شکل د به‌خاطر نویه‌های سطحی است و نه پدیده‌های خطی فلزی.
- ۵- لوله‌ی آب که در ابتدای پروفیل قرار دارد در دو شکل اول با وضوح بالاتری قابل پیگیری است.



شكل بـ-١: (الف) پروفيل P1b-100unsh، (ب) پروفيل P1-250sh، (ج) پروفيل P1-100sh، (د) پروفيل P1b-100sh

## منابع

- [۱] احمدزاده، غ.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "اکتشاف آب های زیرزمینی با استفاده از مدل سازی معکوس دو بعدی داده های مقاومت ویژه در آهک های کرتاسه واقع در شمال شاهروド"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهروド.
- [۲] اسحاقی، ا.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "مقایسه و تلفیق داده های توموگرافی الکتریکی و رadar نفوذی به زمین در اکتشاف لایه ها و قنات آب زیرزمینی در منطقه درخانیاب مجن شاهروود"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهروド.
- [۳] اسماعیلی، م.، دلیری، س.، (۱۳۹۳)، "استفاده از نتایج برداشت دستگاه GPR به منظور ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی در روسازی آسفالتی"، اولین همایش ملی و دومین کارگاه تخصصی رadar نفوذی به زمین، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.
- [۴] استکی، م.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "پردازش، مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و لرزه نگاری انکساری و مقایسه و تلفیق نتایج تفسیر به منظور شناسایی دقیقتر لایه های زیر سطحی ساختگاه سد"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهروド.
- [۵] بربیان، م.، قریشی، م.، ارزنگ روش، ب.، مهاجر اشجاعی، ا.، (۱۳۷۱)، "پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه در گستره تهران"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- [۶] پرنو، س.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "پردازش، مدل سازی و تفسیر داده های رadar نفوذی به زمین به منظور تعیین عمق، ضخامت و محدودهای جانبی یخچال ها در منطقه علم کوه مازندران"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهروド.
- [۷] پیروز، ا.، (۱۳۹۳)، جزو آموزشی، "تحلیل سیگنال های ژئوفیزیکی و کاربرد آن در ژئوفیزیک"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهروド.

- [۸] ترکمنچه، ح.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۶)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "اکتشاف گسل پنهان شاهروド در محدوده دره کال قرنو با استفاده از روش ژئوالکتریک"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۹] جهان بین، م.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۶)، پایان نامه 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.
- [۱۰] حسینی، م.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۸۸)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین در منطقه‌ی شاهرود و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج ژئومغناطیس در منطقه‌ی مزبور"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۱۱] 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.
- [۱۲] رحمانی جوینانی، م.، (۱۳۸۷)، "معکوس سازی سریع مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی دو بعدی با استفاده از روش حداقل مربعات"، ویرایش اول، انتشارات دانشگاه افسری امام علی(ع)، تهران.
- [۱۳] رفعت هراب، ع.، پیروز، ا.، انصاری جعفری، م.، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "اکتشاف آبهای زیرزمینی با استفاده از مدل سازی معکوس دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه در سازند لار واقع در غرب شاهرود"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۱۴] طاهری، ا.، امیدی، پ.، طاهری، ع. ا.، (۱۳۹۱)، "بررسی عملکرد گسل کواترنری صبور در خاور فولاد محله و ارتباط سینماتیک آن با گسل چشممه قلقل (شمال باختر دامغان)", شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز.
- [۱۵] علیان نژاد، ع.، مرادی هرسینی، ک.، قرشی، م.، خادمی، س.، علیان نژادی، ع.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی کارایی روشهای ژئوالکتریک و ژئورadar در شناخت گسلهای فرعی تهران"، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی، مشهد.

- [۱۶] فردوسی، ح.، پیروز، ا.، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "تهیه مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای مربوطه برای اندازه‌گیریهای ژئوالکتریکی گسل‌ها و دایک‌های قائم"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهروド.
- [۱۷] قاسمی، ع.، (۱۳۷۱)، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهشهر"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- [۱۸] کامکار روحانی، ا.، شکری، د.، مرادزاده، ع.، (۱۳۹۱)، "تعیین شیب و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی از روی داده‌های مغناطیس هوایی"، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸، ۳، ۱۲۷-۱۱۱.
- [۱۹] کلاغری، ع.، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز، ص ۱۸۰.
- [۲۰] محمدی ویژه، م.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین در منطقه‌ی شاهروド و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه‌ی مزبور"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۲۱] مقتدر، س. م.، پیروز، ا.، حافظی مقدس، ن.، (۱۳۸۶)، پایان نامه 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.
- [۲۲] موسوی، س. ح.، عرب امیری، ع. ر.، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "مدل‌سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت‌ویژه به منظور اکتشاف ذخایر مس در منطقه هفت‌کوه کوه کرمان"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۲۳] نظری، ح.، شهیدی، ع.، (۱۳۹۰)، "زمین‌ساخت ایران(البرز)", سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- [۲۴] وحدتی دانشمند، ف.، سعیدی، ع.، (۱۳۶۹)، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ اساری"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

- [25] Aghanabati, A., (2005). “**Geology of Iran**”. Ministry of Industry and Mines, Geological Survey of Iran, pp 106-112.
- [26] Annan, A. P., (2001), "Ground penetrating radar workshop note", **Sensors and software**.
- [27] 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.
- [28] Christie, M., Tsolfias, 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.
- [29] Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., (2008), "Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics", **Geophysics**, 73(3), H1-H4.
- [30] Davis, J. L., and Annan, A.P., (1989), "Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy", **Geophysical Prospecting**, v. 37, p. 531-551.
- [31] Davis, K. and Li, Y., (2009), "*Enhancement of depth estimation techniques with amplitude analysis*, 67th Annual International Meeting", **Society of Exploration Geophysicists (SEG)**, Expanded Abstracts, 908-912.
- [32] Dey, A., and Morrison, H. F., (1979), "resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures", **Geophysical Prospecting**, V27, I1, pp 106–136.
- [33] Dobrin, M.B., Savit C.H., (1988), "**Introduction to geophysical prospecting**", McGraw-Hill 867.
- [34] Encom Technology Pty Ltd., (2003), "*ModelVision Pro (Version 5.0) User Guide*".
- [35] Encom Technology Pty Ltd., (2007), "*Profile Analyst (Version 7.0) Reference Manual*".
- [36] 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.
- [37] Grauch, V.J.S., Hudson, M.R., (2007), "Guides to understanding the aeromagnetic expression of faults in sedimentary basins: Lessons learned from the central Rio Grande rift, New Mexico", **Geosphere**; v. 3; no. 6; p. 596–623; doi: 10.1130/GES00128.1.

- [38] Grauch, V.J.S., Phillips, J.D., Koning, D.J., Johnson, P.S., Bankey, V., (2009), "Geophysical Interpretations of the Southern Española Basin, New Mexico, That Contribute to Understanding Its Hydrogeologic Framework", **U.S. Geological Survey Professional Paper**, 1761, 88 p.
- [39] Gunn, P.J. & Dentith, M.C., (1997). "Magnetic responses associated with mineral deposits". **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, 17:2:145-158.
- [40] Hedlin, C., Constable, S., (1990), "Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data", **GEOPHYSICS**, VOL. 55, NO. 12 , P. 1613-1624.
- [41] Hinz, K., Dostmann, H., and Fritsch, J., (1982), "The Continental Margin of Morocco: Seismic Sequences, Structural Elements and Geological Development", in von, Rad, U., Hinz, K., Sarnthein, M., and Seibold, E. (eds.), *Geology of the Northwest African Continental Margin*, **Springer Verlag**, Berlin, pp. 34–59.
- [42] <http://app.visiblegeology.com/stereonetApp.html>.
- [43] Jol, H., (2008). "Ground Penetrating Radar Theory and Applications", University of Wisconsin, Eau Claire, USA.
- [44] Lashkari, A., Ghassemi, M. R., & Qorashi, M., (2009), "Effects of Caspian (Khazar) Fault Activity on Geomorphology of Qaemshahr area", Scientific Quarterly Journal, **GEOSCIENCES**, Vol 19, No 73, pp 17-28.
- [45] Langer, R.E., (1933), "On an inverse problem in differential equations", *Bull Am Math Soc*, 39, pp 814–820.
- [46] Langer, R.E., (1936), "On determination of earth conductivity from observed surface potentials", *Bull Am Math Soc*, 42, pp 747–754.
- [47] Liu L., and Oristaglio M. (1998) "GPR signal analysis: 90instantaneous parameter estimation using the wavelet transform" International Conference on Ground penetrating Radar, pp 219-224, Lawrence, Kansas.
- [48] Loke, M. H., (2004), "Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys".
- [49] 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.
- [50] Loke, M. H., and Barker, R. D., (1996), "Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion", **Geophysical prospecting**, 44, 499–523.

- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Memarian, H., (2012), "**Engineering geology and Geotechnics**". Tehran University Press, pp 496-502.
- [54] Meju, M., (1994), "*Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice*", **Society of Exploration Geophysicsts**, United State of America.
- [55] 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.
- [56] Mooney, H. M.( 1980), "**Hand book of engineering geophysics**", Vol. 2, Bison Instruments, Minneapolis.
- [57] Nazari, H., Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., (2008), "Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma", **The Geological Society of America**, V.36.no. 10; p. 763–766.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] Neal, A., (2004), "Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress", **Earth-science reviews**, 66, 261-330.
- [61] Neawsuparpa, K., Charusiria, P. and Meyers, J., (2005), "*New Processing of Airborne Magnetic and Electromagnetic Data and Interpretation for Subsurface Structures in the Loei Area, Northeastern Thailand*", **ScienceAsia**, 31, 283-298 .

- [62] 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.
- [63] Parasnis, D. S., (1997), "**Principles of applied geophysics**", fifth edition, Chapman and Hall.
- [64] Parsons, S., Nadeau, L., Keating, P. and Chung, C. J., (2006), "*Optimizing the use of aeromagnetic data for predictive geological interpretation: an example from the Grenville Province*", **Quebec, Computers & Geosciences**, 32, 565-576.
- [65] 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.
- [66] Reynolds, J. M., (2011), "**An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**", 2nd Edition, ISBN: 978-0-471-48535-3.
- [67] Reynolds, J.M., (1997), "**An introduction to applied and environmental geophysics**" John Wiley.
- [68] Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., and Richard, G., (2005), "Electrical resistivity survey in soil science: a review: *Soil and Tillage Research*", 83, pp 173-193.
- [69] Sensors and software, (1999), EKKO\_Mapper User's Guide, Version 2.0 .
- [70] Sensors and software, (1999), Ground penetrating radar survey design .
- [71] Sensors and software, (1999), NOGGIN smart system Users Manual, Version 1.1.
- [72] Shi, Z. and Boyd, D., (1993), "AUTOMAG? An automated method to estimate thickness of overburden from aeromagnetic profiles", **Exploration Geophysics**, 24(4), 789-794 .
- [73] Shi, Z., and Butt, G., (2004), "New Enhancement Filters for geological mapping", Proceedings of 17th ASEG Annual Conference, Sydney, 73-79.
- [74] Silvester, P. P., & Ferrari, R. L., (1990), "Finite Elements for Electrical Engineers", ISBN-13: 978-0521449533
- [75] Slichter, L.B., (1933), "The interpretation of the resistivity prospecting method for horizontal structures", **J Appl Phys**, v4, pp 307–322.
- [76] Steven, A. Arcone., Daniel, E. Lawson. And Allan, J. Delaney. (1995) "Short-pulse radar wavelet recovery and resolution of dielectric contrasts within englacial and basal ice of Matanuska Glacier, Alaska, U.S.A" **J. of Glaciology.**, 137, 41, pp 68-86.

- [77] Tarlowski, C., Gunn, P. J. & Mackey, T., (1997), "Enhancement of the magnetic map of Australia", **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17(2), p 77- 82.
- [78] Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., (1990), "**Applied Geophysics**", Second Edition. Cambridge University Press, pp 558-559.
- [79] Tikhonov, A. N., (1949), "**единственности решения задачи электроразведки**" Doklady Akademii Nauk SSSR (in Russian) 69 (6): 797–800.
- [80] U.S.A.E.C. (1973), "**Seismic Design and Seismic Hazard Assessment**", Issue 07.
- [81] Ward, S. H., (1990), "*Resistivity and Induced Polarization Methods in Geotechnical and Environmental Geophysics*", SEG, vol.1, pp. 147-189.
- [82] ZondRes2d software manual, (2012), "**Program for two-dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods**", pp19-22.
- [83] Zonge Engineering and Research Organization, (1994), "**The application of Surface Electrical Geophysics to groundwater problems**", Electrical Geophysics Seminar notes., pp 2-15.

## **Abstract**

Almost 70 percent of the Mazandaran province and many areas of urban and rural populations due to intense tectonic activities of Alborz region, is located on the faults or on the sidelines of the faults. The performance and structure of many faults in eastern part of central Alborz have been determined from numerous studies of structural geologists over the years in the region. Some of the results have been obtained based on the surface studies. These surface studies need to be combined with the results obtained from subsurface studies. One of the cheap and powerful tools for mapping geological hidden (subsurface) structures on a large scale and to estimate the thickness, depth and spread of sedimentary basins, is the airborne aeromagnetic (aeromagnetic) method. Various geological units in an area often exhibit different magnetic properties. Due to this distinction in magnetic properties of the geological units, a correlation between the type of a geological unit and its magnetic response can be established. To determine the lateral and vertical extents of geological units from the magnetic data in a survey area, a number of filters for processing magnetic data can be used. Magnetic responses of deep anomalies are generally obtained by applying upward continuation filter on the magnetic data. If the upward continuation filter in contact between two layers having different magnetic properties is applied, the magnetic profiles with increasing height are displaced laterally. This displacement is carried out in the direction of the dip between the two layers. Combining the upward continuation filter results in the form of a three-component combination image, we can obtain the dips of geological layers from the magnetic data or map.

In this study, the aeromagnetic data of eastern part of Mazandaran province have, first, been processed, and consequently, different geological formations have been distinguished. Then, the upward continuation filter has been applied, and as a result, different formations at different altitude levels have been determined. In addition, the dip angle and dip direction of faults (Including Khazar fault, north Alborz fault, Astaneh fault, Badeleh fault, Laleh-band fault, etc) in eastern part of Mazandaran province have been determined by calculating the boundary line of faults in different subsurface elevation level from the aeromagnetic data. In the next stage, these results have been combined with the results of the regional tectonic studies, and an analysis and assessment have been made on the combined results. The combined results well match the results of geological maps and studies.

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 have managed to detect the fault boundaries under the earth surface using the electrical resistivity and GPR methods, and then, forward and inverse modeling of the resistivity and GPR data. For this purpose, we initially design the resistivity and GPR survey lines perpendicular to the imaginary fault strike, and then, the obtained resistivity data have been modeled and inverted using the nonlinear least squares optimization method with the help of the RES2DINV software. The obtained GPR data have been also modeled using the ReflexW software. Furthermore, the Khazar fault Synthetic resistivity model has been built in the Res2dmod software using the forward modeling method. The synthetic GPR model of the fault has also been built using the ReflexW software. Finally the geological model and especially the Khazar fault borders in Khalil Shahr region have been determined by comparing the forward and inverse modeling results, and also, by interpretation of the cross-sections obtained from the inversion process.

**Keywords:** Aeromagnetic method, Resistivity method, GPR, Forward and inverse modeling, Hidden faults, Geometric parameters, Khalil Shahr.



**Shahrood University of Technology**  
Faculty of mine engeniering, oil and geophysics

**Aplication of aeromagnetic, electrical resistivity and GPR  
methods in investigation of faults and discontinuities  
in Khalil Shahr**

**Miad Badpa**

**Supervisors:**

**Abolghasem Kamkar Rohani**

**Alireza Arab Amiri**

**Advisor:**

**Mahdi Mohammadi Vijhe**

March 2016