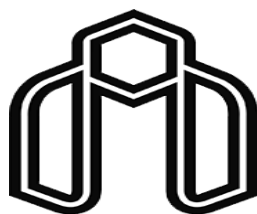


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

اکتشاف منابع مس با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در منطقه

غرب رفسنجان

نگارنده: سید علی حسینی

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر سوسن ابراهیمی

مهر ۱۴۰۰

صورتجلسه

با نام و یاد آنکه به گل ها رنگ، بو طراوت و زیبایی بخشید...

تقدیم با تار و پود وجودم به علامه های محبت، معرفت، عطاوت و صداقت خدمت نازنین پدر و مادر عزیزم...

پدرم، یار و یاور دانسته ایم، با گفته های گویا در ذهن و افکارم معدن طلایی را ثبت کردی که تا جان در کالبد دارم از آن بهره برداری و برداشت خواهیم کرد...

مادر، مهربان مهربانان، به اندازه گلبرگ شکوفه های رنگارنگ بهاران و دانه های زلال و شفاف و نقره خام بهاران به تو عشق می ورزم و آموزه های پر مهر تو در دل و جانم ماندگار و در همه جا در قلمم به یادگار مانده است...

خواهر و برادر دلبندم، با یاد ها و خاطره های بی نظیر کودکی، که دور هم بودیم زندگی میکنم و صدافوس که دوران ملکوتی بچگی چه زود تمام شد...

با آرزوی توفیق و تندرستی از اهلای درونم برای شانزدیگانه و همه شاخواندگان نوشته ایم...

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. اکنون که به یاری خداوند این دوره را به پایان رسانیده‌ام، بر خود واجب می‌دانم از اساتید راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر علیرضا عرب امیری و سرکار خانوم دکتر سوسن ابراهیمی به پاس زحمات بی شائبه شان در طی انجام این تحقیق سپاسگزاری نمایم. همچنین از اساتید گرانمایه، جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و آقای دکتر حمید آقاجانی که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند نهایت تشکر را دارم. از جناب آقای مهندس ریاحی، مدیر عامل محترم شرکت زمین شناسی مهندسی و علوم زمین امید که امکانات استفاده از تجهیزات و حضور در برداشت‌های ژئوفیزیکی را فراهم نموده اند؛ کمال تشکر را دارم. از آقای مهندس محمدی و آقای مهندس حیدری بابت راهنمایی هایشان قدردانی می‌نمایم.

در نهایت از پدر و مادر عزیزم، تمامی اساتید و همه دوستان که با الطاف صمیمانه‌ی خود طی این مسیر را بر من هموار کردند، قدردانم و برایشان ارزوی در تمامی مراحل زندگی موفقیت و سلامتی آرزو می‌کنم.

تعهدنامه

اینجانب سید علی حسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه اکتشاف منابع مس با استفاده از مطالعات زمین شناسی و ژئوفیزیکی در منطقه غرب رفسنجان تحت راهنمایی دکتر علیرضا عرب امیری و خانوم دکتر سوسن ابراهیمی متعهد می شوم:

- تحقیقات این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محقق های دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا افراد دیگر برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج پایان نامه تأثیرگذار بوده اند 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.

امضاء:

تاریخ:

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. 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 نمی باشد.

شناسایی و تعیین عمق و محل کانی‌سازی از مهمترین اهداف کارهای اکتشافی است که برای دستیابی به آن می‌توان از روش‌های متفاوت ژئوفیزیکی استفاده نمود. روش ژئوالکتریک که شامل IP و مقاومت‌ویژه می‌باشند، از بهترین روش‌ها برای شناسایی کانی‌سازی سولفیدی است. محدوده اکتشافی قانون در جنوب غرب شهر رفسنجان شواهد کانی‌سازی مس سولفیدی را در سطح نشان داده است. محدوده از لحاظ ساختاری در زون ماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است و سنگ میزبان کانی‌سازی، سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری ائوسن با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت، تراکی بازالت و توف می‌باشند. کانی‌سازی به صورت پراکنده در داخل حفرات و رگچه‌های ظریف در سنگ میزبان مشاهده شده است و شامل کانی‌های کالکوزیت، مالاکیت و مس خالص است.

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و بررسی محدوده‌های کانی‌سازی در منطقه، به منظور کشف نواحی عمقی و جانبی بی‌هنجاری‌ها برداشت داده‌های IP و مقاومت‌ویژه در قالب ۱۰ پروفیل با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فواصل الکترودی ۲۰ و ۴۰ متر طراحی و انجام گرفت. بعد از برداشت، داده‌ها به روش وارون‌سازی هموار دوبعدی توسط نرم‌افزار RES2DINV پردازش شده و در نهایت مدل‌سازی انجام گرفت. سپس نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی با استفاده از اطلاعات رخنمون‌های سطحی زمین‌شناسی تعبیر و تفسیر گردید. مطالعات نشان می‌دهد، نواحی بی‌هنجار با مقادیر بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط تا بالا منطبق با کانی‌سازی بوده است. با توجه به مطالعات ژئوفیزیک و زمین‌شناسی ۴ نقطه برای حفاری و تعیین عمق کانی‌سازی پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: مس نوع مانتو، قطبش القایی (IP)، مقاومت‌ویژه الکتریکی، آرایه دوقطبی- دوقطبی، مدل‌سازی وارون، قانون، رفسنجان.

فهرست مطالب

فصل ۱ : کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تاریخچه موضوع و مروری بر مطالعات انجام شده	۴
۳-۱ ضرورت و هدف انجام تحقیق	۶
۴-۱ روش تحقیق	۷
۵-۱ ساختار پایان نامه	۸
فصل ۲ : نگرشی بر مبانی روش های مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی (IP)	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی	۱۱
۱-۲-۲ مقدمه	۱۱
۲-۲-۲ اساس کار روش مقاومت ویژه الکتریکی	۱۲
۳-۲-۲ مواردی از کاربرد های روش مقاومت ویژه الکتریکی	۱۴
۴-۲-۲ مزایا و معایب روش مقاومت ویژه الکتریکی	۱۵
۳-۲ روش قطبش القایی (IP)	۱۶
۱-۳-۲ مقدمه	۱۶

۱۷.....	۲-۳-۲ اساس و منبع IP
۱۸.....	الف) قطبش غشایی
۱۹.....	ب) قطبش الکترودی
۲۰.....	۲-۳-۳ مبنای اندازه‌گیری‌های قطبش‌القایی
۲۱.....	الف) اندازه‌گیری IP در حوزه‌ی زمان
۲۴.....	۲-۳-۴ مزایا و معایب روش IP
۲۵.....	۲-۳-۴-۱ مزایا
۲۵.....	۲-۳-۴-۲ معایب و محدودیت‌ها
۲۶.....	۲-۴ آرایه‌های الکترودی مورد استفاده در برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP
۲۶.....	۲-۴-۱ مقایسه بین آرایه‌های الکترودی مختلف و انتخاب آرایه مناسب
۲۷.....	۲-۴-۲ آرایه دوقطبی-دوقطبی
۲۹.....	فصل ۳: موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
۳۰.....	۳-۱ مقدمه
۳۰.....	۳-۲ موقعیت و شرایط جغرافیایی
۳۲.....	۳-۳ مطالعه‌ی زمین‌شناسی در مقیاس ناحیه‌ای
۳۵.....	۳-۴ مطالعه زمین‌شناسی در مقیاس منطقه‌ای
۳۸.....	۳-۵ دگرسانی‌های سنگ میزبان

۴۰	۳-۶ کانی سازی
۴۳	فصل ۴ : برداشت ، مدل سازی و تحلیل داده های مقاومت ویژه الکتریکی و IP
۴۴	۱-۴ مقدمه
۴۴	۲-۴ روش های مدل سازی ژئوفیزیکی
۴۴	۱-۲-۴ مدل سازی فیزیکی
۴۵	۲-۲-۴ مدل سازی عددی
۴۵	الف- مدل سازی پیشرو (مستقیم)
۴۶	ب- مدل سازی وارون (معکوس)
۴۹	۳-۴ روش های عددی برای حل مسائل معکوس سازی
۵۰	۱-۳-۴ روش کمترین مربعات گوس- نیوتن
۵۰	۲-۳-۴ روش شبه نیوتن
۵۱	۴-۴ رویه وارون سازی هموار دوبعدی به وسیله نرم افزار RES2DINV
۵۴	۵-۴ عملیات برداشت داده های مقاومت ویژه و IP و تجهیزات مورد استفاده
۵۴	۱-۵-۴ نحوه انجام عملیات صحرایی برداشت داده های مقاومت ویژه و IP
۵۴	۲-۵-۴ تجهیزات و ابزار مورد استفاده در برداشت
۵۶	۶-۴ پردازش داده ها
۵۸	۴-۷ تحلیل و بررسی نتایج برداشت های ژئوفیزیکی در منطقه مورد مطالعه
۵۹	۱-۷-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل DD-Data1

۶۱	DD-Data2 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۶۳	 DD-Data3 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۶۴	 DD-Data4 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۶۶	 DD-Data5 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۶۸	DD-Data6 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۶۹	 DD-Data7 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۷۱	 DD-Data8 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۷۲	 DD-Data9 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۷۴	 DD-Data10 تفسیر نتایج مدل سازی و ارون پروفیل
۷۷	 فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۸	 ۵-۱ نتیجه گیری
۷۹	 ۲-۵ پیشنهادات
۸۲	 منابع و مآخذ
۸۳	 منابع

فهرست اشکال

- شکل ۲-۱: آرایه الکتروودی کلی در بررسی های مقاومت ویژه الکتریکی..... ۱۲
- شکل ۲-۲: تنگ شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی و ایجاد قطبش غشایی..... ۱۸
- شکل ۲-۳: ایجاد قطبش غشایی به دلیل وجود بار منفی ذرات رسی و المان رشته ای..... ۱۹
- شکل ۲-۴: : قطبش الکتروودی، الف) شارش الکتروولیتی، ب) ایجاد قطبش الکتروودی..... ۲۰
- شکل ۲-۵: اندازه گیری IP در حوزه ی زمان اندازه گیری IP در حوزه ی زمان..... ۲۳
- شکل ۲-۶: : نمای کلی از برداشت دوقطبی-دوقطبی..... ۲۸
- شکل ۳-۱: نقشه ی مربوط به راهنمایی راهها برای دسترسی به محدوده مورد مطالعه..... ۳۱
- شکل ۳-۲: : نمایی از توپوگرافی محدوده مورد مطالعه..... ۳۲
- شکل ۳-۳: : نقشه تقسیم بندی ساختاری ایران..... ۳۴
- شکل ۳-۴: : نقشه زمین شناسی ساده شده..... ۳۶
- شکل ۳-۵: : نمایی از واحد E^{ab} ۳۷
- شکل ۳-۶: : نمایی نزدیک از واحد توف E^{ta} ۳۷
- شکل ۳-۷: : دگرسانی زئولیتی..... ۳۹
- شکل ۳-۸: : دگرسانی پروپلیتیک..... ۳۹
- شکل ۳-۹: : نمایی از دگرسانی هماتیت در تراکی آندزیت..... ۴۰

- شکل ۳-۱۰: نمایی از دگرسانی سیلیسی ۴۰
- شکل ۳-۱۱: کانی‌سازی مس (مالاکیت) همراه با زئولیت در حفرات داخل سنگ میزبان آتشفشانی ۴۱
- شکل ۳-۱۳: کانی‌سازی مس خالص همراه با رگچه‌های کلسیتی و زئولیتی در سنگ میزبان آندزیتی ۴۲
- شکل ۴-۱: مدل اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار RES2DINV ۵۳
- شکل ۴-۲: تجهیزات و ابزار ارسال جریان ۵۵
- شکل ۴-۳: دستگاه گیرنده GRx8-32 به همراه نمایشگر دستی ۵۶
- شکل ۴-۴: شیوه نشان دادن داده‌های مقاومت‌ویژه (در امتداد پروفیل DD-Data3) به منظور حذف یا کاهش قابل ملاحظه نوفه ۵۷
- شکل ۴-۵: تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه همراه با محل شکستگی‌ها و خطواره‌ها ۵۸
- شکل ۴-۸: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data1 ۶۰
- شکل ۴-۹: مدل‌سازی وارون داده‌های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data1 .. ۶۰
- شکل ۴-۱۰: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data2 ۶۲
- شکل ۴-۱۱: مدل‌سازی وارون داده‌های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data2 .. ۶۲
- شکل ۴-۱۲: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data3 ۶۳
- شکل ۴-۱۳: مدل‌سازی وارون داده‌های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data3 ۶۳

شکل ۴-۱۵: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data4 . ۶۵

شکل ۴-۱۶: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data5

۶۷

شکل ۴-۱۷: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data5 . ۶۷

شکل ۴-۱۹: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data6 . ۶۹

شکل ۴-۲۰: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data7 . ۷۰

شکل ۴-۲۱: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data7 . ۷۰

شکل ۴-۲۲: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data8

۷۱

شکل ۴-۲۳: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data8 ۷۲

شکل ۴-۲۴: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data9

۷۳

شکل ۴-۲۵: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data9 ۷۳

شکل ۴-۲۷: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data10

۷۴

شکل ۵-۱: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD-Data1 همراه

با موقعیت گمانه پیشنهادی. ۸۰

شکل ۵-۲: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD-Data4 همراه

با موقعیت گمانه پیشنهادی ۸۰

شکل ۵-۳: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD-Data5 همراه

..... ۸۱

فهرست جداول

جدول ۱-۲: مقادیر بارپذیری برخی کانی ها ۲۴

جدول ۵-۱: مشخصات نقاط پیشنهادی برای حفاری های اکتشافی ۸۱

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف مواد معدنی و انتخاب محل‌های مناسب برای اکتشاف، امری متداول محسوب می‌شود. با توجه به اینکه فلزات پایه مانند آهن، مس، سرب و روی بسیار مورد نیاز می‌باشد و منابع سطحی این عناصر هم روبه کاسته شدن است باعث شده تا توجه به ذخیره‌های عمیق‌تر این فلزات بیشتر شود. در نتیجه، برای اکتشاف این ذخایر روش‌های پیشرفته‌تری مورد نیاز می‌باشد که روش‌های ژئوفیزیکی جزء این گروه به حساب می‌آیند. در انتخاب روش اکتشافی سعی می‌شود تا آنومالی مناسب با روشی سریع‌تر و کم هزینه‌تر و با کیفیت و دقتی مناسب بدست آید. عمده‌تاً در میان روش‌های ژئوفیزیکی، روش‌های الکتریکی جزء مهم‌ترین روش‌های به کار گرفته شده در اکتشاف ذخایر معدنی سولفیدی هستند. مبنای کار ژئوفیزیک اکتشافی حضور هر ماده معدنی در درون زمین که نوعی تمایز در خاصیت فیزیکی آن نقطه با نقاط اطراف به وجود می‌آورد. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی می‌تواند ما را در کسب، اطلاعاتی مانند ساختارهای پنهان زمین‌شناسی کمک کند که از آن‌ها میتوان به صورت مستقیم و غیرمستقیم در کشف مواد معدنی، هیدروکربن‌ها، آب‌های زیرزمینی، بررسی‌های مهندسی، زیست‌محیطی و مانند آن‌ها استفاده کرد [قنبری، ۱۳۹۶].

روش‌های ژئوفیزیکی شامل روش‌های متعددی از جمله مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی، لرزه‌ای، الکتریکی و الکترومغناطیسی هستند؛ که هر کدام نیز دارای چندین روش جانبی‌اند. روش‌های قطبش‌القایی^۱ (IP) و مقاومت-ویژه الکتریکی که از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی‌اند؛ جزء روش‌های الکتریکی هستند و در کشف مواد معدنی کاربرد گسترده‌ای دارند [ربیع‌صادق آبادی، ۱۳۹۶].

اصلی‌ترین کاربرد روش IP کشف فلزات پایه و همچنین تشخیص نواحی کانی‌سازی سولفیدی پراکنده^۲ می‌باشد، همچنین می‌توان برای کشف مناطق کانی‌سازی شده به صورت رگه‌ای^۳ و حتی توده‌ای^۴ نیز از این روش استفاده

¹ Induced polarization

² Disseminated

³ Vein type

⁴ Massive

کرد. از آنجا که نتایج مطالعات ژئوفیزیکی ذخایر فلزی متعدد، حاکی از ارتباط بی‌هنجاری‌های IP و مقاومت‌ویژه با یکدیگر است؛ لذا در اکثر موارد هم‌زمان با اندازه‌گیری‌های IP، مقادیر مقاومت‌ویژه نیز با روش مقاومت‌سنجی اندازه‌گیری و ثبت می‌شود [ربیعی صادق آبادی، ۱۳۹۶]. روش مقاومت‌سنجی الکتریکی بر مبنای تعیین مقاومت-ویژه الکتریکی زمین بنا شده است. مقاومت‌ویژه الکتریکی لایه‌هایی که در زیر زمین تشکیل شده‌اند به دلیل اختلافی که بین جنس مواد تشکیل دهنده وجود دارد، دارای تمایز می‌باشد و برای مطالعه لایه‌های زیر سطحی می‌توان از روش مقاومت سنجی استفاده کرد. در روش مقاومت‌سنجی یک میدان الکتریکی به صورت مصنوعی^۱ در زمین ایجاد می‌شود و اختلاف پتانسیل ناشی از این میدان در دو نقطه دلخواه زمین اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به شدت جریان الکتریکی ایجاد شده در زمین و اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده و موقعیت نقطه‌های ارسال جریان الکتریکی و اختلاف پتانسیل، می‌توان مقاومت‌ویژه الکتریکی زمین را در محل‌های مختلف برآورد کرد [رمضی، ۱۳۹۸].

محدوده اکتشافی قانون در ۲۰ کیلومتری شهر رفسنجان واقع شده است؛ که از نظر زمین‌شناسی کانی‌سازی مس به‌صورت رگه و رگچه‌هایی که مالاکیت در درون شکاف و درزه‌های واحدهای آتشفشانی ائوسن با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت، تراکی بازالت و توف حضور دارند. به‌دلیل وجود کربنات مس در مناطق سطحی محدوده اکتشافی، استفاده از روش IP، برای وجود یا عدم وجود داشتن کانی‌های سولفیدی مس مانند کالکوپیریت در اعماق حائز اهمیت است.

¹ Artificial Electrical Field

۱-۲ تاریخچه موضوع و مروری بر مطالعات انجام شده

ابداع روش مقاومت‌سنجی توسط کنراد شلومبرژه^۱ در سال ۱۹۱۲ میلادی و طی انجام آزمایش‌هایی صحرایی صورت گرفت. این روش در سال‌های ۱۹۲۳ و ۱۹۲۶، مورد استفاده قرار گرفت و به ترتیب باعث کشف گاز در کشور رومانی و همچنین کشف گنبد‌های نمکی در فرانسه شد [مهدوی، ۱۳۸۳].

پدیده IP نیز توسط شلومبرژه در سال ۱۹۱۳ کشف شد. این روش در اواخر سال ۱۹۴۰ به طور گسترده برای اکتشاف ذخایر سولفیدی افشان به کار گرفته شد. تا سال ۱۹۵۰، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از این روش در حوزه زمان صورت می‌گرفت [Seigel, 1959].

اکادا^۲ (۱۹۹۵) در منطقه هیشی کاری در ژاپن برای کشف ذخایر سولفیدی که به صورت رگه‌ای هستند و همچنین کانی‌سازی اپی ترمال از روش‌های IP و مقاومت ویژه استفاده کرده است. در این موضوع جوابی که IP به ما می‌دهد اطلاعات معتبرتری در مقایسه با مقاومت ویژه و روش گرانی‌سنجی ارائه می‌دهد [Gurin, 2015].

بست^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، باهدف سنجش قابلیت روش‌های IP و مقاومت ویژه در شناسایی کانی‌سازی‌های فلزی سولفیدی از جمله مس، سرب، روی، نقره و طلا، داده‌ها را توسط سه آرایه الکترودی دو قطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی و شلومبرژه معکوس در محل ۹ ذخیره معدنی به کشف رسیده در کانادا برداشت کردند. در حالت کلی، موفقیت روش‌های IP و مقاومت ویژه در کشف کانی‌سازی‌های مذکور به اثبات رسید؛ هر چند که نتایج دو آرایه دوقطبی-دوقطبی و شلومبرژه معکوس قابل اعتمادتر بودند [Best, 2015].

قنبری و همکاران (۱۳۹۶)، در محدوده اکتشافی شریف آباد که در شمال غرب شهر بردسکن واقع شده است؛ مطالعات ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی به وسیله دو شبکه با آرایش مستطیلی و در مجموع پنج

¹ Conrad Schlumberger

² Okada

³ Best

پروفیل با آرایش دوقطبی-دوقطبی به منظور اکتشاف مس برداشت کردند. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی انجام شده، چهار گسل احتمالی در محدوده مورد مطالعه تشخیص داده شد که هشت محل نیز جهت حفاری گمانه های اکتشافی پیشنهاد گردید [قنبری، ۱۳۹۶].

محمدی ویژه (۱۳۹۳)، با توجه به حضور کانی‌های سولفیدی در منطقه کبودان، برداشت داده‌های مقاومت ویژه و IP را با دو آرایه مستطیلی و دوقطبی-دوقطبی به منظور پی‌جویی و اکتشاف ذخایر پلی متال در این منطقه را انجام دادند. در نتیجه در مقاطع IP و مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها، مناطق حاوی کانی‌های سولفیدی با بار پذیری بالا و مقاومت ویژه پایین مشخص شده‌اند [محمدی ویژه، ۱۳۹۲].

موسوی (۱۳۹۳)، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های IP و مقاومت ویژه به منظور اکتشاف ذخایر مس در منطقه هفت کوه کرمان انجام گرفت. چهار پروفیل دوقطبی-دوقطبی در مناطق مستعد وجود بی‌هنجاری برداشت شد. در نهایت مناطق با پتانسیل بالا با داده‌های حفاری اعتبار سنجی شدند [موسوی، ۱۳۹۳].

محمد زاده و همکاران (۱۳۹۴)، در منطقه صاحب دیوان که در فاصله ی ۲۰ کیلومتری شمال باختر مشگین شهر در استان اردبیل قرار دارد، داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی را به منظور اکتشاف مس و عناصر همراه آن انطباق دادند. با توجه به همه شواهد حاصل از مطالعات صحرایی و انطباق نتایج ژئوفیزیکی با ترکیب سنگی و دگرسانی‌های منطقه و در پایان بررسی پهنه‌های مستعد کانی‌زایی، نقاط حفاری بهینه با اولویت بی‌هنجاری منطبق بر پهنه پتاسیک به دلیل پتانسیل بالای کانی‌زایی مس پیشنهاد شد [محمدزاده، ۱۳۹۴].

مصطفی قربانی و همکاران (۱۳۹۷)، برای شناسایی و تعیین محدوده‌های کانی‌سازی مس در منطقه ی عباس آباد در شرق استان سمنان روش‌های مغناطیس‌سنجی همراه با روش‌های قطبش‌القایی و مقاومت ویژه بکار گرفته‌اند. از آنجایی که مس به صورت کانی‌های پراکنده، در توده‌های نارسا یافت می‌شود، در مقاطع دوبعدی، مناطقی را که دارای مقاومت‌ویژه و بارپذیری بالا به صورت متناظر می‌باشند، مناطق هدف برای حفاری در نظر گرفته شده اند [قربانی، ۱۳۹۷].

ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۷)، در محدوده معدنی آسمانو که در ۸۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان شاهرود واقع شده است، داده‌های مقاومت ویژه و قطبش‌القایی را به منظور اکتشاف مس انطباق دادند. با توجه به شواهد حاصل از مطالعات زمین‌شناسی از جمله کانی‌شناسی، بافت و ساخت کانسنگ و داده‌های حاصل از میانبرهای سیال و همچنین نتایج بدست آمده از مطالعات ژئوفیزیکی متوجه شدند کانی‌سازی منطقه آسمانو قابل مقایسه با ذخایر مس نوع مانتو می‌باشد [ابراهیمی، ۱۳۹۷].

۱-۳ ضرورت و هدف انجام تحقیق

انسان از زمانی که بر عرصه‌ی هستی پا نهاد تا به الان، بر اساس نیازهایی که داشته از مواد معدنی استفاده کرده است و امروزه نیز تمامی مواد معدنی را به شکل و راه‌های مختلف مورد بهره‌برداری قرار داده است. مواد معدنی در تامین نیازهای اولیه صنایع مختلف نقش بسیار مهمی دارد، به همین دلیل جستجوی آن‌ها با روش‌های کاربردی، ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین نیاز به علم معدنکاری بیش از پیش احساس می‌شود و این شاخه از علم رشد فزاینده‌ای داشته است.

هدف از انجام این تحقیق، تشخیص وجود نواحی کانی‌سازی سولفیدی مس در قسمت‌های عمقی می‌باشد که چون کانی‌سازی کربناتی در سطح تشکیل شده است، می‌توان از تلفیق عملیات ژئوفیزیک به روش IP و مقاومت ویژه استفاده کرد و به وجود کانی‌سازی در عمق پی برد. با توجه به مستندات عینی و نتیجه‌ای که از برداشت‌های زمین‌شناسی در محدوده گرفته شد، تشکیل ماده معدنی مس به صورت رگه‌ای و رگچه می‌باشد، بنابراین بهترین روش برای مطالعه ژئوفیزیکی، تلفیق روش‌های IP و مقاومت‌ویژه می‌باشد. با توجه به اینکه به تنهایی نمی‌توان به مطالعات اولیه زمین‌شناسی و آنالیز شیمیایی نمونه‌ها برای اکتشاف نهایی اکتفا کرد به همین دلیل با انجام عملیات ژئوفیزیکی به صورت تکمیلی سعی شده تا از ریسک اکتشاف کاسته شود. همچنین چون که عملیات حفاری اکتشافی در میان مراحل اکتشاف بسیار هزینه بر می‌باشند، بنابراین با تلفیق اطلاعات بررسی‌های صورت گرفته در زمینه ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی سعی خواهد شد مناسب‌ترین نقاط برای عملیات حفاری مشخص شود که این

امر مهم توسط ارزیابی و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده و مطابقت دادن آن با مطالعات انجام شده در زمینه‌ی زمین‌شناسی حاصل می‌گردد. از ضرورت‌های انجام این تحقیق، می‌توان به کاهش ریسک اکتشاف و کاهش هزینه‌های مالی طرح اشاره نمود.

۱-۴ روش تحقیق

این پروژه بر اساس بررسی‌ها و مطالعات انجام شده‌ی صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. (۱) پس از انجام پیمایش‌های صحرایی و کنترل واحدهای سنگی موجود در منطقه‌ی معدنی قانون نمونه‌برداری از نهشته‌های آتشفشانی، پهنه‌های دگرسان و کانی‌سازی‌های سطحی و زیر سطحی انجام شد که با استفاده از این اطلاعات می‌توان به تعیین نوع کانی‌سازی مس در منطقه پی برد. (۲) با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و شواهد کانی‌سازی در منطقه، عملیات صحرایی برداشت داده‌های IP و مقاومت‌ویژه در قالب ۱۰ پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی با فواصل الکترودی ۲۰ متر و ۴۰ متر و فاکتور عددی (n) ۱ تا ۸ توسط شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید برداشت گردید، داده‌های مربوط به توپوگرافی نیز در امتداد هر پروفیل ثبت شده‌اند. در مجموع ۸۳۶ ایستگاه برای هر روش IP و مقاومت‌ویژه برداشت گردید. اندازه‌گیری IP و مقاومت ویژه توسط دستگاه فرستنده جریان مدل TxIII و دستگاه گیرنده مدل GRx8-32 ساخت شرکت کانادایی GDD انجام شد که به همراهی نگارنده به عنوان کارشناس اکتشاف این شرکت، در پاییز ۱۳۹۸ صورت گرفته است. (۳) مدل سازی داده‌های خام صحرایی حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و IP با نرم افزار RES2DINV به روش وارون سازی هموار دوبعدی انجام می‌شود و نتایج آن‌ها به عنوان خروجی مطالعات ژئوفیزیکی در نظر گرفته می‌شود. (۴) تعبیر و تفسیر مربوط به هر پروفیل بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است؛ که مقایسه و اعتبار سنجی نتایج بدست آمده از مطالعات ژئوفیزیکی، بر اساس نتایج مطالعات زمین‌شناسی و اطلاعات حاصل از رخنمون‌های سطحی مشاهده شده طی پیمایش‌های صحرایی صورت گرفته است. (۵) در آخر با مقایسه

و ترکیب نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی، محدوده‌های احتمالی کانی‌سازی مس مشخص می‌گردند و محل‌های مناسب برای حفاری پیشنهاد خواهند شد.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

پروژه انجام شده دارای پنج فصل است؛ که فصل جاری به بیان مقدمه، تاریخچه موضوع و مروری بر مطالعات انجام شده، ضرورت و هدف از انجام تحقیق و همچنین روش تحقیق پرداخته است. در فصل دوم، به نگرشی بر روش‌های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و IP، اصول کلی این روش‌ها و مزایا و محدودیت‌های هر یک و همچنین مبحث آرایه‌های الکترودی مورد استفاده در برداشت‌های صحرایی و آرایه‌های استفاده شده در انجام این پژوهش پرداخته شده است. فصل سوم، به شرح زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، بررسی نتایج بدست آمده از مطالعات زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی) و تعیین مدل کانی‌سازی اختصاص یافت. فصل چهارم شامل سه بخش مختلف است؛ بخش اول به شرح چگونگی انجام عملیات صحرایی برداشت داده‌ها با آرایه دوقطبی- دوقطبی، و تجهیزات و وسایل مورد استفاده در عملیات صحرایی پرداخته است. بخش دوم به مبحث مدل‌سازی و پردازش با نرم افزار RES2DINV اختصاص یافت. بخش سوم هم به ارائه نتایج مدل‌سازی دوبعدی داده‌های برداشت شده و تحلیل هر یک از این مدل‌ها بر پایه‌ی اطلاعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی می‌پردازد. در نهایت در فصل پنجم، نتایجی که از مطالعات انجام شده در این پژوهش صورت گرفته و همچنین پیشنهادهای لازم برای مطالعات بعدی ارائه شد.

فصل ۲: نگرشی بر مبانی روش های مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی (IP)

۲-۱ مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی برای اکتشاف مواد معدنی وجود دارد که به نوع کانسار و کانی‌سازی وابسته بوده و از یک یا چند روش به طور همزمان می‌توان استفاده کرد. هر کدام از این روش‌های ژئوفیزیکی یک خاصیت مهم فیزیکی مربوط به زمین را مورد بررسی قرار می‌دهد که در ابعاد گسترده (مرحله اکتشاف منطقه‌ای و ناحیه‌ای) و در ابعاد محدود (مرحله اکتشاف محلی) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در انتخاب هر روش اکتشافی سعی می‌شود تا بی‌هنجاری موجود با روشی سریع و مقرون به صرفه، همچنین با کیفیت و دقت مناسب حاصل شود [قنبری، ۱۳۹۶] روش‌هایی که در مطالعات ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد بر مبنای منبع کمیت‌های فیزیکی مورد مطالعه به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل روش‌هایی است که در آن‌ها کمیت‌های فیزیکی با منشاء طبیعی مورد بررسی واقع می‌شوند. این مطالعات شامل اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، رادیومتری طبیعی، اندازه‌گیری‌های حرارتی، بررسی مانیسیم زمین‌لرزه‌ها در تعیین ساختمان زمین در مقیاس بزرگ، بررسی اثرات خورشید در میدان مغناطیس زمین، مطالعه اطلاعات تعیین‌کننده چگونگی ساختمان زمین در گذشته (پالئومغناطیس) اندازه‌گیری‌های پتانسیل خودزا، برخی از روش‌های چاه‌پیمایی و غیره می‌باشد [استکی، ۱۳۹۰].

گروه دوم شامل روش‌هایی می‌باشد که به مطالعه‌ی وضعیت پاسخی که زمین به منبع مصنوعی می‌دهد و به زمین اعمال می‌شوند، پرداخته می‌شود. بیشتر روش‌های رایج در ژئوفیزیک به غیر از روش‌هایی مانند گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی و بعضی روش‌ها همچون چاه‌پیمایی در این گروه جای دارند. از آن جمله می‌توان مطالعات لرزه‌نگاری، ژئوالکتریک، قطبش القایی (IP)، اکتشافات به روش الکترومغناطیس (EM) برخی از روش‌های چاه‌پیمایی و غیره را نام برد. علاوه بر روش‌هایی که در مطالعات ژئوفیزیکی ذخایر بزرگ زیرزمینی مانند مخازن عظیم نفت و گاز در ابعاد وسیع و اعماق زیاد به کار برده می‌شوند، در مطالعات مهندسی نیز که معمولاً هدف تشخیص لایه‌های زمین تا عمق‌های کمتر از ۵۰۰ متر است، از روش‌های ژئوفیزیکی استفاده می‌شود. این مطالعات شامل

بررسی لایه‌های زمین از نظر نحوه قرار گرفتن آن‌ها نسبت به یکدیگر، میزان ضخامت لایه‌ها و رسوبات آبرفتی، تشخیص توده‌ها و رگه‌های معدنی، تشخیص محل ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌ها، تعیین عمق و ابعاد حفره‌ها، برآورد میزان خوردگی خاک، تعیین ضرایب الاستیسیته لایه‌های سطحی و پارامترهای دینامیکی خاک، بررسی-های کمی و کیفی سفره‌های آب زیرزمینی، شناسایی جریان‌های آب زیرزمینی، مطالعه رفتار لایه‌های سطحی در مقابل زلزله‌ها به منظور طراحی سازه‌ها و مواردی از این قبیل می‌باشد. مهمترین روش‌های معمول در مهندسی ژئوفیزیک که از توانایی قابل توجهی در تشخیص ویژگی‌های لایه‌های زمین تا عمق‌های محدود برخوردارند، روش-های قطبش القایی (IP)، لرزه نگاری انکساری، روش لرزه‌ای درون چاهی، توموگرافی لرزه‌ای و روش مقاومت‌سنجی الکتریکی (ژئوالکتریک) می‌باشند [درزی حاجی، ۱۳۹۲] که در این فصل به توضیح و معرفی روش‌های قطبش القایی و مقاومت‌سنجی می‌پردازیم.

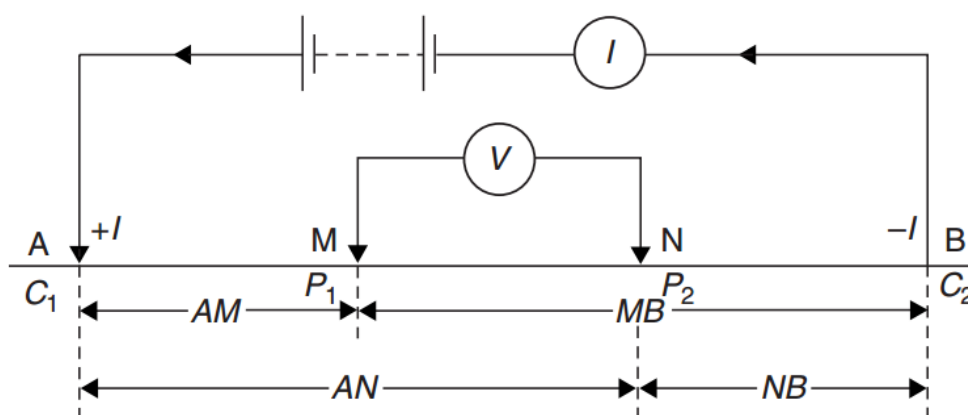
۲-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی

۲-۲-۱ مقدمه

روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ ابداع شدند؛ اما از دهه ۱۹۷۰ به بعد، به علت استفاده از پردازش‌های کامپیوتری در تجزیه و تحلیل داده‌های آن، کاربرد گسترده‌تری یافتند. در روش مقاومت ویژه الکتریکی با سنجش و مشخص کردن مقدار مقاومت مخصوص ظاهری سنگ‌ها می‌توان، در بعضی موارد عوامل زمین‌شناسی مانند گسل، ساختمان لایه‌های زیرین، ضخامت آبرفت و کنتاکت لایه‌ها و غیره را شناسایی کرد. مقاومت مخصوص ظاهری سنگ‌ها تابع وجود مواد هادی (آب) مواد رسی، کانی‌های فلزی، لایه‌ها و جنس آن‌ها و غیره هستند [Loke, 2004]. بنابراین می‌توان همزمان با اندازه‌گیری و مشخص بودن مقدار جریان و با در نظر گرفتن فواصل الکترودهای جریان و پتانسیل مقدار اختلاف پتانسیل بدست آمده را اندازه‌گیری کرد.

۲-۲-۲ اساس کار روش مقاومت ویژه الکتریکی

این روش جزو روش‌هایی است که از یک منبع الکتریکی مصنوعی برای فرستادن جریان به داخل زمین استفاده می‌کند. برای اجرا معمولاً از یک جریانی مستقیم DC (که متناوباً جهتش عکس می‌شود) و یا جریانی متناوب AC با فرکانس بسیار کم (معمول $<1\text{Hz}$)، به وسیله‌ی الکترودهای جریان (الکترودهای A و B) استفاده می‌شود و اختلاف پتانسیل را با یک جفت الکترودهای پتانسیل (الکترودهای M و N) اندازه‌گیری می‌نمایند (شکل ۲-۱) [کلاگری، ۱۳۸۹].



شکل ۲-۱: آرایه الکترودی کلی در بررسی‌های مقاومت ویژه الکتریکی [Reynolds, 2011].

شدت جریان الکتریکی در زمین بین دو الکترود جریان (I) بر حسب آمپر و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود پتانسیل (ΔV) بر حسب ولت با استفاده از دستگاه، اندازه‌گیری می‌شود و با به کارگیری رابطه (۲-۱):

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (K \text{ ضریب آرایه الکترودی است.}) \quad (۲-۱)$$

می‌توان مقاومت ویژه الکتریکی را بر حسب اهم‌متر محاسبه کرد [رمضی، ۱۳۹۸].

¹Electrodes Array Factor

K بر مبنای فواصل الکتروودی و همچنین محل قرارگیری الکترودها برای آرایشی که مورد استفاده قرار میگیرد شامل الکترودهای جریان A و B و الکترودهای پتانسیل M و N، با استفاده از رابطه (۲-۲) محاسبه می شود [Krish, 2009]:

$$K^{-1} = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (2-2)$$

اگر ρ در محیطی همگن و یا آیزوتروپ^۱، مورد اندازه گیری قرار گیرد آن را ρ_t یعنی رزستیویته واقعی^۲ می نامند. اما اگر در محیطی ناهمگن و غیرآیزوتروپ اندازه گیری صورت گیرد آن را ρ_a یعنی رزستیویته ظاهری^۳ می گویند [کلاگری، ۱۳۸۹]. لازم به ذکر می باشد که تنها در حالتی که زمین همگن است، مقاومت ویژه ظاهری برابر مقاومت ویژه واقعی است [Telford et al., 1990]. برداشت داده های مقاومت ویژه به صورت کلی، با هدف مدل سازی به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی خواهد بود [Loke, 1999]. این برداشت ها را در حالت کلی می توان به دو زیر مجموعه ی گمانه زنی^۴ و پروفیل زنی^۵ تقسیم کرد. هر گونه مطالعه در جهت عمق را گمانه زنی می گویند. در این گونه برداشت ها که گاه گمانه زنی الکتریکی قائم^۶ نامیده می شود، نقطه مورد مطالعه روی زمین یک نقطه ثابت است و مطالعات در جهت عمق انجام می شود [رمضی، ۱۳۹۸]. در هر کدام از مرحله ها با توجه به نوع آرایش الکترودها نسبت به مرکز آرایش جابه جا شده و در فاصله معین دورتری قرار می گیرند تا جریان به اعماق بیشتری فرستاده شود و از لایه هایی با عمق بیشتر بتواند اطلاعات لازم را بدست آورد. با ارزیابی و تحلیل هایی که روی این داده ها انجام می شود می توان ضخامت و مقاومت ویژه لایه های زیر سطحی در آن نقطه (محل سونداژ یا مرکز آرایش الکتروودی مورد استفاده) را مشخص کرد [Loke, 2004].

¹ Isotrope

² True Resistivity

³ Apparent Resistivity

⁴ Sounding

⁵ Profiling

⁶ Vertical electric sounding(VES)

روش دیگری که به، روش پروفیل زنی الکتریکی یا ترانسه زنی الکتریکی معروف است؛ برای شناسایی تغییرات مقاومت ویژه که در زیر سطح زمین اتفاق می افتد، مورد استفاده قرار می گیرد. در پروفیل زنی فواصلی که بین الکترودها وجود دارد (که در نتیجه عمق کاوش تقریباً ثابت می ماند) در عملیات برداشت کل یک پروفیل نیز کم و بیش ثابت نگه داشته می شود و کل آرایه الکترودی (کابل ها و الکترودها) بر روی یک مسیر مستقیم (طول پروفیل) از هر نقطه برداشت به نقطه برداشت بعدی منتقل می شود و اطلاعاتی از تغییرات جانبی مقاومت ویژه متناسب با عمق کاوش به دست می آید. از کاربردهای این روش که می توان به آن اشاره کرد اکتشاف گسل ها و دایک ها، حفرات، رودخانه های مدفون و دیگر ساختارهای قائم یا با شیب زیاد است [Loke, 2004].

۲-۲-۳ مواردی از کاربرد های روش مقاومت ویژه الکتریکی

از جمله شاخص ترین موارد استفاده ی روش مقاومت ویژه می توان به موارد زیر اشاره نمود [Knödel et al., 2007]

✓ آشکارسازی و شناسایی شکستگی ها و گسل ها

✓ اکتشاف پیکره های معدنی و زمین شناسی (برای اکتشاف پیکره هایی که مقاومت ویژه آن ها با

مقاومت ویژه سنگ درونگیر تفاوت درخور توجهی دارد، کاربرد زیادی دارد)

✓ مطالعات علوم مهندسی (تشخیص ضخامت آبرفت، عمق سطح سفره آبدار، عمق سنگ های بستر،

شناسایی لایه های رسی)

✓ مطالعه منابع ژئوترمال (به کمک ترسیم نقشه های مقاومت ویژه می توان خط سیر گسل را که به صورت

معمول در امتداد آن ها چشمه های آبگرم و آبفشان ها قرار دارند، مشخص نمود)

✓ مطالعات زیست محیطی (تعیین عمق و ضخامت باطله های مدفون، شناسایی آلودگی های زیر سطحی

آب و خاک)

✓ تعیین ویژگی‌های پروفیل خاک در بررسی‌های کشاورزی (برای برآورد ویژگی‌های هندسی مانند

ضخامت و شکل سه‌بعدی و ویژگی‌های فیزیکی خاک)

۲-۲-۴ مزایا و معایب روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

به صورت کلی این روش با وجود مزیت‌هایی که دارا می‌باشد دارای محدودیت‌هایی از قرار زیر است [Mooney
, 1998 ; Kearey et al., 2009]

۱- تحلیل و تفسیرها تا حدودی دارای ابهام می‌باشند و بنابراین کنترل‌های مستقل ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی برای
تعبیر و تفسیر یافته‌های مقاومت‌ویژه ضروری می‌باشند.

۲- توپوگرافی و اثرات تغییرات مقاومت‌ویژه در نزدیکی سطح زمین احتمال دارد اثرات تغییرات مقاومت‌ویژه سنگ-
های زیر سطح زمین را پوشش دهد.

۳- پاسخ این روش اغلب به ساختارهای زمین‌شناسی ساده محدود می‌شود و در مناطقی که پیچیدگی ساختاری
وجود دارد تفسیر داده‌ها با مشکل مواجه می‌شود.

۴- عمق نفوذ این روش دارای محدودیت است. این به خاطر آن است که در تزریق جریان الکتریکی نیز مشکلات
عملی (مثل گستردن کابل‌های طویل در روی زمین) پیش می‌آید. حداکثر عمقی که عملاً مورد تجسس قرار
می‌گیرد حدود ۱۰۰۰ متر می‌باشد.

۵- دقت تخمین عمقی که در این روش وجود دارد نسبت به روش‌های لرزه‌ای و اکتشافی مستقیم به نسبت کم‌تر
است.

۶- تفاسیر صرفاً به شکل‌های ساختمانی ساده‌ای که در زیر سطح زمین وجود دارد؛ محدود می‌شود. هر انحرافی
که از این وضعیت‌های ساده رخ دهد احتمال دارد تعبیر و تفسیر را غیرممکن کند.

از مزایای روش مقاومت‌ویژه در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی و یا روش‌های اکتشافی مستقیم می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [Mooney, 1980 ; Donald, 1990 ; Tezel , 2002]:

۱- روشی نسبتاً سریع و آسان از نظر برداشت داده می‌باشد.

۲- در اکتشاف لایه‌هایی که در عمق کم تشکیل شده‌اند یا ناپیوستگی‌های قائمی که دارای اختلاف مقاومت‌ویژه قابل توجهی با محیط اطراف خود هستند، کارایی خوبی دارد.

۳- این روش انعطاف‌پذیری بالایی دارد. همچنین در عملیات صحرایی هم در مرحله پی‌جویی و هم در مرحله اکتشاف صورت می‌گیرد.

۴- تئوری ساده و روانی دارد.

۲-۳ روش قطبش‌القایی (IP)

۲-۳-۱ مقدمه

پدیده IP توسط شلومبرژه در سال ۱۹۱۳ کشف شد؛ اما استفاده عملی از این روش در مطالعات اکتشافی، به دلیل مسائل تکنیکی و دستگاهی، به اواخر سال ۱۹۴۰ باز می‌گردد [Seigel et al., 2007].

شلومبرژه در حین اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه متوجه شد که پس از قطع جریان، اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده توسط دو الکترود پتانسیل فوراً صفر نمی‌شود بلکه بعد از قطع جریان، ابتدا یک افت ناگهانی نشان می‌دهد سپس به تدریج و در طی یک زمان معین به سمت صفر میل می‌کند. وی این اختلاف پتانسیل را قطبش تحریک شده^۱ نامید [کلاگری، ۱۳۸۹]. دلیل توسعه روش IP پاسخ خوب این روش برای کانی‌های رسانی فلزی پراکنده در اکتشاف فلزات پایه می‌باشد. این روش یک واکنش به زمین القا می‌کند؛ که این واکنش به توزیع و طبیعت نوع دانه‌بندی کانی بستگی دارد و در حالتی که کانی به صورت پراکنده باشد، نسبت به حالت توده‌ای آن موثرتر

¹ Provoked polarization

می‌باشد. وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده در این روش بسیار شبیه به وسایل مورد استفاده در روش مقاومت ویژه الکتریکی البته با دقت بیشتر می‌باشد [Reynolds, 1997].

۲-۳-۲ اساس و منبع IP

وقتی که از چهار الکتروود (دو الکتروود پتانسیل و دو الکتروود جریان) در اندازه‌گیری مقاومت ویژه استفاده می‌شود اگر جریان به صورت غیر مترقبه قطع شود ولتاژ بدست آمده بین دو الکتروود پتانسیل سریعاً صفر نمی‌شود. پس از آنکه جریان قطع می‌شود، ولتاژ به صورت ناگهانی یک افت اولیه از خود نشان می‌دهد و بعد به صورت تدریجی پس از گذشت چند ثانیه به صفر نزدیک می‌شود [کلاگری، ۱۳۸۹]. علت این اتفاق ذخیره‌ی موقت بار توسط زمین و قطبش یافتن آن است. زمانی که تخلیه اتفاق می‌افتد؛ معمولاً می‌تواند در حد چند ثانیه و حتی چند دقیقه باشد. حال اگر جریان را دوباره وصل کنیم، اختلاف پتانسیلی که بدست می‌آید، بعد از آنکه یک افزایش اولیه از خود نشان می‌دهد؛ با گذشت یک بازه زمانی یکسان، به بیشترین مقدار خود می‌رسد [Telford et al., 1990]. تجربه آزمایشگاهی نشان داده است که انرژی‌های الکتریکی که در داخل سنگ‌ها وجود دارد، امر ذخیره شدن آن‌ها توسط فرایندهای الکتروشیمیایی انجام می‌شود و این عمل معمولاً به دو صورت انجام می‌پذیرد [کلاگری، ۱۳۸۹].

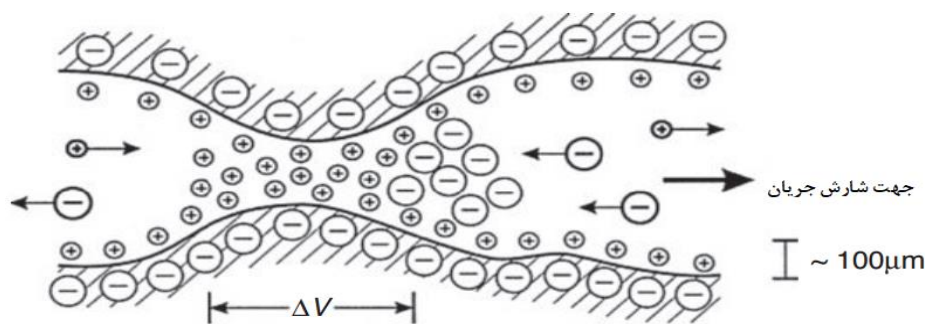
این فرایند ذخیره شدن انرژی شیمیایی حاکی از دو عامل زیر است:

اولین عامل قطبش‌غشایی یا الکترولیتی نام دارد. این قطبش در سنگ‌های فاقد کانی‌های فلزی و همچنین در پیکره‌های کوچک و یک پارچه‌ای که خلل و فرج آن‌ها در حدی کوچک است که بارهای الکتریکی امکان قطبیدگی ندارند؛ اتفاق می‌افتد. دومین عامل قطبش الکتروودی یا ولتاژ اضافی نام دارد. معمولاً این قطبش بزرگتر از قطبش زمینه می‌باشد و وابسته به حضور کانی‌های فلزی در سنگ است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های القایی معمولی نمی‌تواند اثرات ناشی از دو عامل مذکور را تفکیک کند [Telford et al., 1990].

در ادامه به توضیح این دو عامل می‌پردازیم:

الف) قطبش غشایی

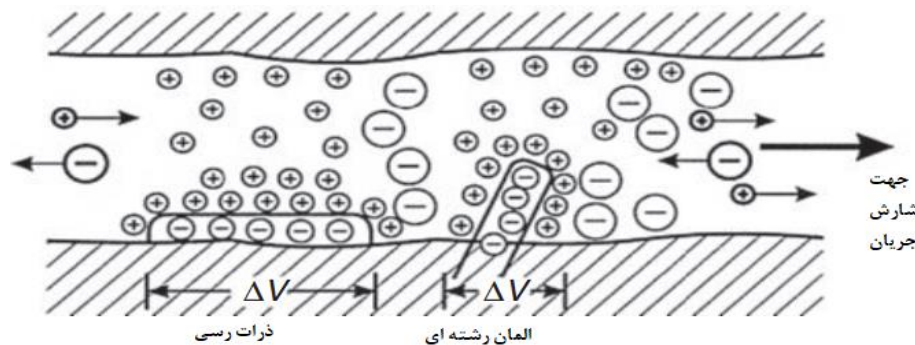
جریان الکتریکی از داخل بعضی سنگ‌ها به وسیله‌ی الکترولیت‌هایی که در داخل خلل و فرج آن‌ها وجود دارد؛ به وجود می‌آید. کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها در سطح تماس خود با فلوئید موجود در حفرات بار منفی دارند و بخاطر همین یون‌های مثبت را به طرف خود جذب می‌کنند. یون‌های مثبت در نزدیکی سطح در کانی‌ها (به فاصله‌ی یک دهم میکرون از سطح کانی‌ها به داخل فلوئید) متمرکز می‌شوند. در نتیجه، در مجاورت سطح کانی‌ها دو قشر از یون‌های مثبت و منفی به وجود می‌آیند. اگر این دو قشر در حدود قطر روزنه‌های ارتباطی حفرات ضخامت داشته باشد مانع از حرکت کردن یون‌ها (حاصله از جریان تزریقی) در فلوئید خواهد شد. بنابراین یون‌های مثبت و منفی در دو طرف سدّ ایجاد می‌شود، و در آنجا جمع می‌شود و باعث برهم‌زدن قشرهای مثبت و منفی در سطح کانی‌ها خواهد شد. حالا اگر به صورت ناکهانی ولتاژ تزریقی قطع شود بعد از مدت زمان کمی، یون‌ها دوباره به محل اولیه خود برگشته و باعث به وجود آمدن ولتاژ رو به زوال IP می‌شوند (شکل ۲-۲). این نوع IP به بهترین صورت در حضور کانی‌های رسی (که خصوصاً دارای فضاهای بسیار کوچک می‌باشند) انجام می‌شود. [کلاگری، ۱۳۸۹].



شکل ۲-۲: تنگ شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی و ایجاد قطبش غشایی [After Reynolds, 1997].

دومین دلیلی که باعث به وجود آمدن قطبش غشایی می‌شود مربوط به ذرات پراکنده رس یا کانی‌های رشته‌ای که باعث متمرکز شدن بارهای منفی می‌شوند، می‌باشد. در این صورت یون‌های مثبت به طرف بارهای منفی کشیده

شده و باعث تشکیل تمرکزی از ابر بارهای مثبت در داخل خلل و فرج ها می شود. در این صورت اگر جریان به این سنگ وصل شود بارهای منفی محبوس می شوند و فقط بارهای مثبت توانایی تحرک دارند؛ که این فرایند موجب می شود اختلاف پتانسیل در این قسمت به وجود آید. در آخر وقتی جریان قطع می شود و یون های مثبت و منفی به حالت اولیه خود برمی گردند باعث تشکیل پتانسیل IP می شوند. (شکل ۲-۳) [Reynolds, 2011].



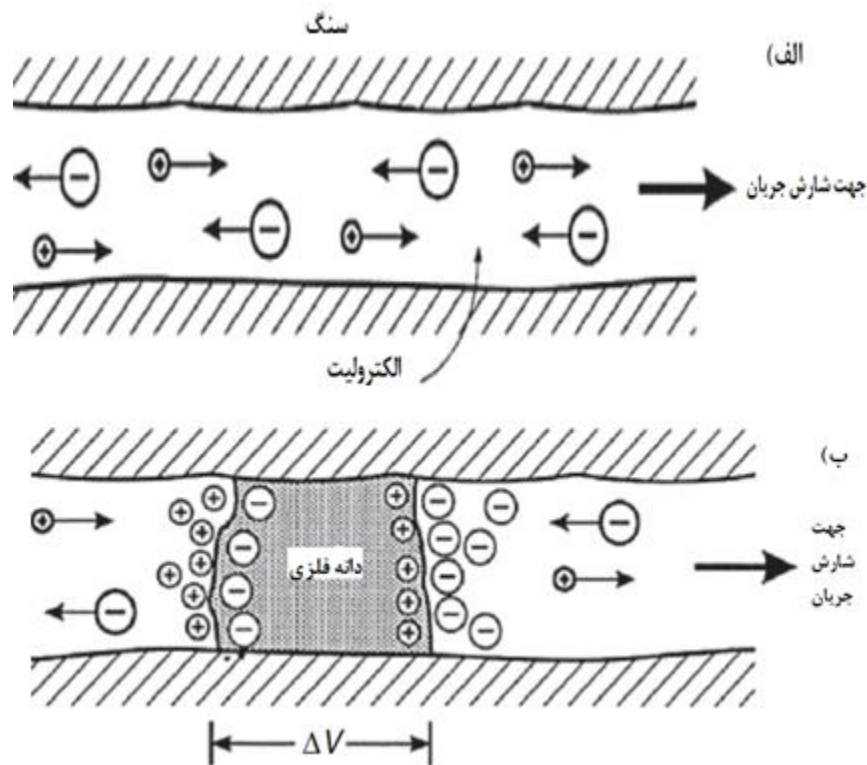
شکل ۲-۳: ایجاد قطبش غشایی به دلیل وجود بار منفی ذرات رسی و المان رشته ای موجود در دیواره کانال ارتباطی [After Reynolds, 2011]

ب) قطبش الکترودی

حضور کانی های رسانا در سنگ باعث تشکیل هدایت جریان الکتریکی به صورت الکترونیکی نیز می شود. (شکل ۲-۴)

۴-ب) سنگی را نشان می دهد که یک کانی رسانا در مسیر گذر جریان برق قرار می گیرد؛ و باعث بسته شدن حفره می شود. وقتی که جریان به داخل سنگ تزریق شود، ذرات رسانا هادی (به علت هدایت الکترونیکی) پلاریزه خواهند شد و بخاطر همین باعث جذب یون های مثبت و منفی موجود در فلوئید در اطراف خود خواهند شد) یون های مثبت برای گرفتن الکترون از ذره فلزی و یونهای منفی برای دادن الکترون به آن). معمولاً میزان سرعت هدایت الکترون ها از طریق ذره رسانا کمتر از سرعت تبادل الکترونیکی آن ها و ذره فلزی خواهد بود. در نتیجه در دو طرف ذره رسانا، یون های مثبت و منفی که هنوز بار خود را از دست نداده اند تجمع پیدا می کنند. زمانی که جریان ناگهان قطع شود، یون ها به آرامی پخش شده و به محل اولیه خود بازگشت می کنند و موجب به وجود آمدن ولتاژ ضعیف و رو به زوال IP می شوند. تمامی کانی هایی که توانایی هدایت خوبی از خود نشان می دهند مثل سولفات های فلزی، اکسیدها، گرافیت و غیره در تشکیل این نوع IP سهمیم هستند. شدت و بزرگی IP فلزی

(الکترودی) به مقدار ولتاژ تزریقی، نوع ماده معدنی، درصد ماده معدنی، اندازه دانه‌ها، تخلخل، مقاومت و نوع الکترولیت و مقاومت ویژه سنگ‌های دربرگیرنده بستگی دارد [کلاگری، ۱۳۸۹].



شکل ۲-۴: قطبش الکترودی، الف) شارش الکترولیتی، ب) ایجاد قطبش الکترودی با حضور یک دانه فلزی در داخل خلل و فرج یک سنگ [Reynolds, 2011].

۲-۳-۳ مبنای اندازه‌گیری IP

روش قطبش القایی IP در کاوش‌های معدنی، به ویژه در کانسارهای فلزی کاربرد گسترده ای دارد. در این روش هم از جریان مستقیم و هم از جریان متناوب استفاده می‌شود. [رمضی، ۱۳۹۸]. در روش قطبش القایی مانند روش مقاومت‌ویژه، جریان توسط دو الکتروود جریان به داخل زمین فرستاده می‌شود و بعد از آن اثر قطبش القایی با الکترودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری‌های قطبش القایی در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس انجام می‌شود. دستگاه‌های مربوط به هر کدام از این حوزه‌ها و نحوه‌ی پردازش داده‌ها با یکدیگر متفاوت است [Reynolds, 2011].

۱- اندازه‌گیری در حوزه‌ی زمان: در این روش ولتاژ اضافی با تبعیت از زمان، مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد.

۲- اندازه‌گیری در حوزه‌ی بسامد: مقاومت‌ویژظاهری در دو یا چند فرکانس مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد.

۳- روش IP طیفی: این روش هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه‌ی فرکانس قابل اندازه‌گیری می‌باشد. اختلاف فاز بین قسمت‌های حقیقی و موهومی ولتاژ، و دامنه در محدوده فرکانس ۰/۰۰۱ تا ۴۰۰۰ هرتز اندازه‌گیری می‌شود.

در پژوهش پیش رو از روش IP در حوزه‌ی زمان با هدف اکتشاف مس استفاده شده است. در ادامه به توضیح بیشتر پیرامون این موضوع پرداخته می‌شود.

الف) اندازه‌گیری IP در حوزه‌ی زمان

کلاً در این روش از جریان DC و یا AC با فرکانس خیلی کم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً جریان ارسالی را به مدت زمان ۱ تا ۵ دقیقه به داخل زمین ارسال می‌کنند تا اختلاف پتانسیل به یک حالت ثابت و پایدار برسد، بعد از آن جریان را به صورت ناگهانی قطع می‌کنند. در این حالت نحوه‌ی اندازه‌گیری به سه کمیت ذکر شده انجام می‌شود [کلاگری، ۱۳۸۹].

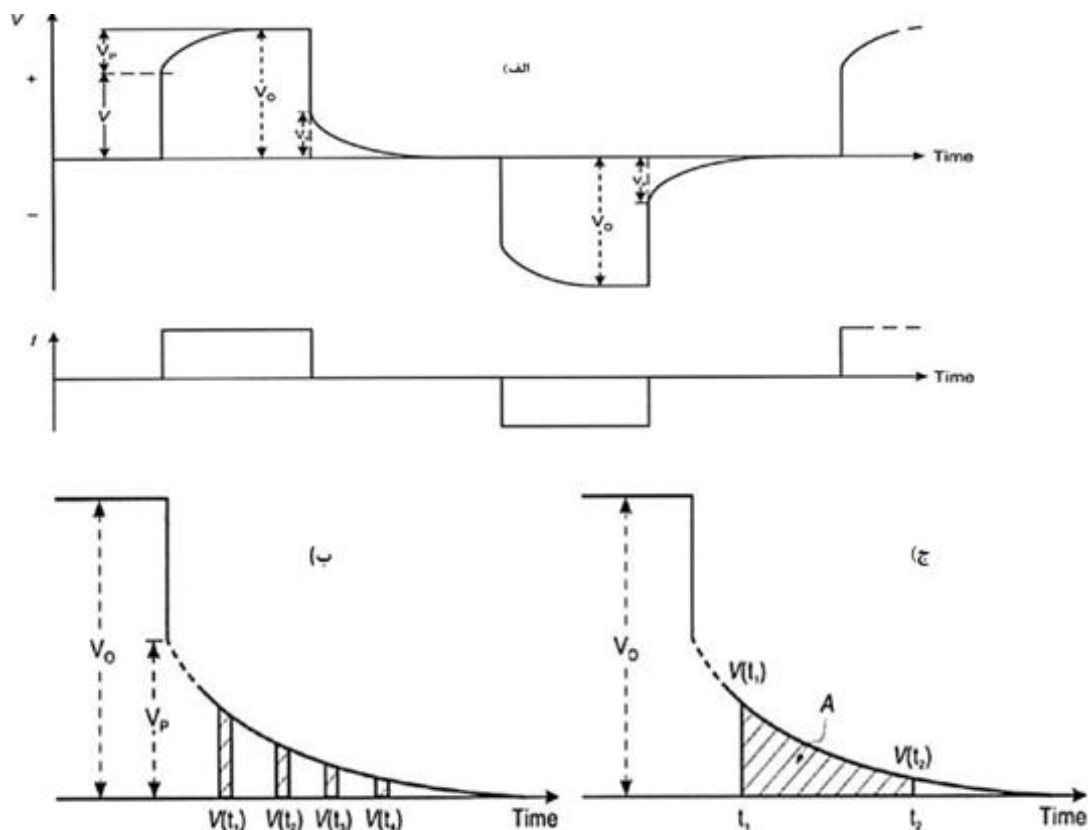
اولین کمیت اثر IP می‌باشد؛ که به صورت نسبت ولتاژ قطبش (V_P) که در زمان قطع جریان اندازه‌گیری می‌شود به ولتاژ مشاهده‌ای (V_0) در زمان وصل جریان را تعریف می‌کند. این کمیت قطبش‌پذیری نام دارد که بر حسب میلی‌ولت بر ولت، یا به صورت درصد بیان می‌شود. (رابطه ۲-۳)

$$M = V_P / V_0 \text{ (} mv/v \text{ or \%)} \quad (3-2)$$

در لحظه‌ای که جریان قطع می‌شود اندازه‌گیری پتانسیل ممکن نیست، زیرا رویدادها پس از قطع جریان بسیار زود گذرند بنابراین پس از آنکه جریان قطع شود، در زمانی ثابت (به طور معمول ۰/۵ ثانیه) اندازه‌گیری انجام

می‌شود [Telford et al., 1990]. علت ضرب رابطه (۲-۲) کوچک بودن این کسر است و در این صورت قطبش-پذیری بر حسب میلی‌ولت بر ولت بیان می‌شود [رمضی، ۱۳۹۸]. لازم به ذکر است که زمان t (زمان پس از قطع جریان) نیز می‌تواند بین ۱ تا ۱۰ ثانیه تغییر کند.

دومین کمیت انتگرال زمان واپاشی است که دستگاه‌ها IP تجارتي معمولاً پتانسیل را که در طول زمان معینی از واپاشی گذرا انتگرال‌گیری شده‌است، به گونه‌ای که در (شکل ۲-۴-ج) نشان داده شده، اندازه‌گیری می‌کنند. اگر زمان انتگرال‌گیری خیلی کوتاه باشد و اگر در چند نقطه از منحنی واپاشی اندازه‌گیری به عمل آمده باشد مقادیر انتگرال به طور موثر مقدار پتانسیل موجود در زمان‌های مختلف، یعنی $V(t_1)$ ، $V(t_2)$ ، $V(t_3)$ ،، $V(t_n)$ ، را خواهد داد. این عمل ادامه اندازه‌گیری در کمیت یک می‌باشد که از روی آن می‌توان شکل منحنی واپاشی را نیز به دست آورد [Telford et al., 1990].



شکل ۲-۵: اندازه‌گیری IP در حوزه‌ی زمان اندازه‌گیری IP در حوزه‌ی زمان، الف) منحنی تغییرات پتانسیل در حالت شارژ و تخلیه و تغییرات جریان ارسالی به زمین، ب) کمیت قطبش پذیری (V_p) در زمان قطع جریان و اندازه‌گیری‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، ج) روش‌های تعیین انتگرال زمانی و پاشی [Reynolds, 2011].

سومین کمیت بارپذیری می‌باشد که در این روش دستگاه اختلاف پتانسیل را به صورت اتوماتیک اندازه‌گیری می‌کند و در بازه‌های زمانی مختلف منحنی ولتاژ بر حسب زمان، ترسیم می‌کند و مقدار مساحت زیر منحنی (شکل ۲-۴) را در بازه‌های زمانی خاص با استفاده از رابطه (۲-۴)، به دست آورده و با میانگین‌گیری از مقادیر به دست آمده نتیجه را به صورت یک عدد نمایش می‌دهد؛ لازم به ذکر است که در پایان با تقسیم انتگرال بر V_0 ، مقدار بارپذیری ظاهری (M_a) بدست می‌آید که این عدد لایه مربوط به یک عمق خاص را نشان می‌دهد و بر حسب میلی‌ثانیه بیان می‌گردد. (رابطه ۲-۴) [Reynolds, 2011].

$$M_a = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \frac{A}{V_0} \quad (2-4)$$

در این رابطه، A سطح زیر منحنی تخلیه در فاصله زمانی t_1 تا t_2 می‌باشد.

اگر چه نوع و درجه‌ی کانی‌شدگی از سرشت منحنی‌های واپاشی قابل تشخیص نیست، ولی ممکن است جدول زیر در ارزیابی مقدماتی نتایج صحرایی مورد استفاده قرار گیرد. جدول (۱-۲) انواع کانی‌ها با یک درصد تراکم حجمی را با پاسخ‌های IP آن‌ها فهرست کرده است. طول زمانی موج جریان مربعی ۳ ثانیه و واپاشی در طول یک ثانیه انتگرال‌گیری شده است [Telford et al., 1990].

جدول (۱-۲) پاسخ‌های بارپذیری برای برخی از کانی‌های رسانا با یک درصد تراکم حجمی را نشان می‌دهد. این مقادیر برای دوره زمانی جریان اعمال شده موج مربعی ۳ ثانیه و زمان انتگرال‌گیری منحنی تخلیه ۱ ثانیه می‌باشد [Telford et al., 1990].

جدول ۱-۲: مقادیر بارپذیری برخی کانی‌ها [Telford et al., 1990]

کانی	بارپذیری (میلی ثانیه)	کانی	بارپذیری (میلی ثانیه)
پیریت	۱۳/۴	بورنیت	۶/۳
کالکوسیت	۱۳/۲	گالن	۳/۷
مس	۱۲/۳	مگنتیت	۲/۲
گرافیت	۱۱/۲	مالاکیت	۰/۲
کالکوپیریت	۹/۴	هماتیت	۰

۲-۳-۴ مزایا و معایب روش IP

از جمله مهم‌ترین مزایای این روش میتوان به موارد زیر اشاره کرد [Kearey et al., 2009; Telford et al., 1990]

۲-۳-۴-۱ مزیت‌ها

الف) روش IP به صورت گسترده‌ای در کشف مواد معدنی فلزی به ویژه اکتشاف کانی‌سازی های سولفیدی پراکنده کاربرد دارد. با توجه به این که سولفیدهای پراکنده در سنگ میزبان نارسا در مجموع دارای قابلیت رسانایی خوبی نیستند، و به خوبی با روش‌هایی مانند مقاومت‌ویژه الکتریکی و الکترومغناطیسی قابل تشخیص نمی‌باشند؛ در همین جهت روش IP روش ایده آلی برای تشخیص این ذخیره‌ها به شمار می‌رود.

ب) در صورت رسانا بودن لایه‌های سطحی، آشکارسازی لایه‌های عمیق تر طی برداشت‌های مقاومت ویژه و EM دچار مشکل می‌شود. در این موارد روش IP موفقیت بیشتری نسبت به روش‌های فوق دارد و کمتر تحت تاثیر روباره‌های رسانا قرار می‌گیرد.

ج) وجود پدیده قطبش غشایی، استفاده از روش IP در مطالعات آب‌های زیر زمینی و اکتشاف این ذخایر را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه کانی‌های رسی دارای قطبش غشایی نسبتاً بالایی هستند، لذا روش IP برای اکتشاف لایه‌های غیر قابل نفوذ رسی و سفره‌های آبدار بسیار مناسب است. به علاوه به کارگیری این روش در زون‌های برشی پر از آب قطبش القایی نسبتاً بالایی از خود نشان می‌دهد.

۲-۳-۴-۲ معایب و محدودیت‌ها

همچنین روش IP همانند روش مقاومت ویژه، معایب و محدودیت‌هایی دارد؛ که از آن جمله میتوان موارد زیر را نام برد [Kearey et al., 2009]:

الف) در کشف فلزات قطبش‌الکتروودی دارای اهمیت بالایی است؛ اما در برداشت‌های IP تفکیک دادن اثر قطبش القایی سطحی از حجمی امکان پذیر نیست. در نتیجه وجود قطبش‌القایی سطحی دلیلی بر کاهش کارایی برداشت IP در کشف مواد معدنی فلزی می‌شود و به عنوان نوفه زمین‌شناسی تشخیص داده خواهد شد.

ب) جریان‌های تلوریک در روش IP منجر به ایجاد بی‌هنجاری‌های کاذب می‌شود.

ج) تفسیر کمی که برای داده‌های IP انجام می‌شود خیلی پیچیده‌تر از روش مقاومت‌ویژه می‌باشد.

۲-۴ آرایه‌های الکتروودی مورد استفاده در برداشت‌های مقاومت‌ویژه

الکتریکی و IP

با توجه به شکل هندسی و یا قرارگیری الکتروودهای جریان و پتانسیل نسبت به یکدیگر یک آرایشی ایجاد می‌شود که به آن آرایه الکتروودی گفته می‌شود. اندازه‌گیری‌هایی که در IP انجام می‌شود همانند اندازه‌گیری‌های روش مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌باشد و به دو صورت سونداژزنی و پروفیل زنی انجام می‌گیرد [کلاگری، ۱۳۸۹]. برداشت‌هایی که برای روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP صورت می‌گیرد، می‌توان آرایه‌های الکتروودی مختلفی معرفی کرد؛ که هر کدام بر مبنای امتیازها، عیب‌ها و حساسیت‌های مخصوصی که هر کدام از روش‌ها دارند، به کار گرفته می‌شوند. به همین دلیل آرایه‌های الکتروودی متنوعی پیشنهاد شده است؛ که از این جمله می‌توان به آرایه‌های ونر^۱، شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی^۲، قطبی دوقطبی^۳، قطبی-قطبی و مستطیلی را اشاره کرد [Loke, 2004]. لازم به ذکر است که کاربرد آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی، ونر و شلومبرژه بیشتر می‌باشد. میزان جفت‌شدگی الکترومغناطیسی^۴ که بین الکتروودهای جریان و پتانسیل اتفاق می‌افتد، زمانی به کم‌ترین مقدار می‌رسد، که بیشتر از آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی در این روش استفاده شود [کلاگری، ۱۳۸۹].

۲-۴-۱ مقایسه بین آرایه‌های الکتروودی مختلف و انتخاب آرایه مناسب

موارد بسیاری در برگزیدن یک آرایش الکتروودی مطلوب موثر واقع می‌شود؛ از مهمترین آن‌ها می‌توان به نسبت سیگنال به نوفه، جفت‌شدگی الکترومغناطیسی، حساسیت به موقعیت جانبی، قابلیت تفکیک ساختارهای شیب‌دار، قدرت تفکیک‌پذیری ساختارهای افقی، عمق نفوذ، حساسیت به عمق بی‌هنجاری‌ها (عمق هدف)، حساسیت نسبت به شیب، حساسیت به ناهمگنی‌های سطحی در روش سونداژزنی، حساسیت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات پروفیل‌زنی، حساسیت به توپوگرافی سنگ بستر، حساسیت به اثرات جانبی، حساسیت به روباره هادی و حساسیت

Wenner

² Dipole-Dipole

³ Pole-Dipole

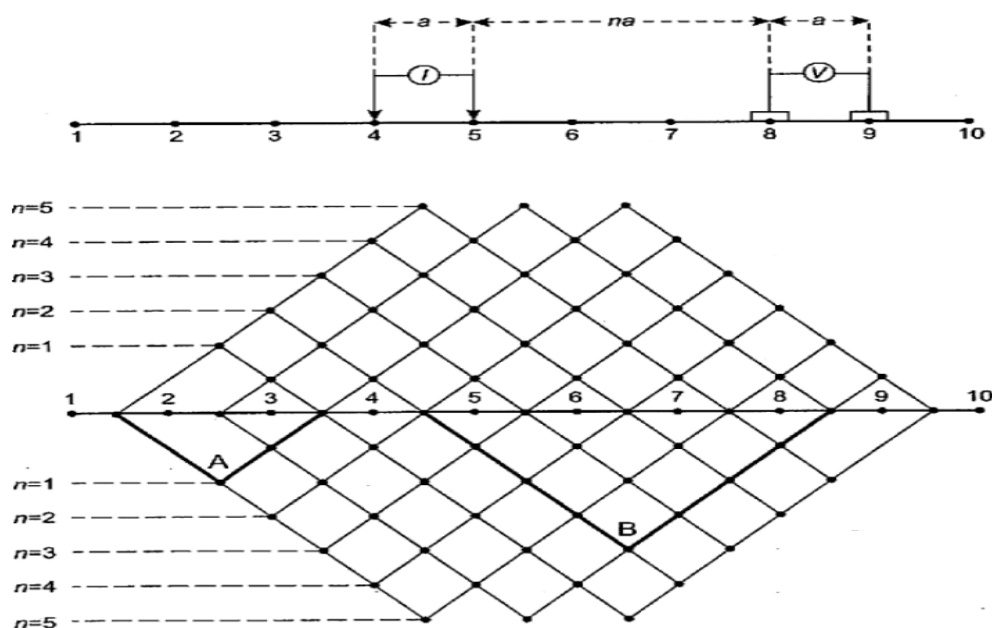
⁴ Electromagnetic coupling

توپوگرافی اشاره کرد [Ward,1990]. برداشت هایی که برای داده های IP صورت می گیرد، نیز همانند برداشت مقاومت ویژه الکتریکی انجام می شود، که شامل هر دو روش پروفیل زنی افقی و سونداژزنی قائم است؛ به این صورت که برداشت داده های IP، با وسایل و تجهیزات پیچیده تری نسبت به برداشت های مقاومت ویژه انجام می شود [Knödel et al.,2007].

در این مطالعه از آرایه دوقطبی-دوقطبی برای برداشت داده های IP استفاده شده است؛ بنابراین به توضیحاتی در پیرامون این آرایه پرداخته می شود:

۲-۴-۲ آرایه دوقطبی-دوقطبی

در این آرایه الکترودهای پتانسیل در خارج از حدفاصل الکترودهای جریان قرار می گیرند. از این نوع آرایه برای مطالعه و بررسی تغییرات و گسترش بی هنجاری در عمق و بدست آوردن شبه مقطعی از IP و مقاومت ویژه ظاهری در مسیر یک پروفیل استفاده می شود. در این نوع آرایه هر چهار الکترودهای A, B, M, N در امتداد یک پروفیل قرار داشته و عملاً فاصله الکترودهای فرستنده (AB) مساوی فاصله الکترودهای گیرنده MN برابر با a می باشد. در هر اندازه گیری الکترودهای AB ثابت بوده و الکترودهای MN در امتداد پروفیل به اندازه a حرکت می کند، در نتیجه اندازه گیری برای عمق های مختلف انجام می گیرد. فاصله بین نزدیک ترین الکترودهای جریان پتانسیل برابر na می باشد ($n=1,2,3,\dots$) و عمق هر اندازه گیری برابر $na/2$ خواهد بود و عدد اندازه گیری شده برای نقطه ای به میل تلاقی دو خط با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح زمین که از وسط AB, MN رسم شده نسبت داده می شود. به این ترتیب از مجموع نقاط اندازه گیری شده با این روش شبه مقطعی از شارژ پذیری و مقاومت ویژه ظاهری در امتداد یک پروفیل بدست خواهد آمد [Telford et al., 1990].



شکل ۲-۶: نمای کلی از برداشت دوقطبی-دوقطبی [Reynolds, 2011].

با ابداع آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی و موارد استعمال فراوان آن‌ها در آمریکا و شوروی سابق، مزایای آن‌ها نسبت به آرایش شلومبرژه آشکار گردید. این مزایا از قرار زیر هستند [کلاگری، ۱۳۸۹]:

- ✓ یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این آرایه جدا بودن کامل مدار جریان و ولتاژ و کاهش اثر جفت شدگی الکترو مغناطیسی، در برداشت‌های IP است.
- ✓ با فاصله‌های بسیار کم MN و AB این امکان وجود دارد اعماق زیاد را بررسی کنیم.
- ✓ فاصله‌های کم MN و AB دلیلی برکاسته شدن کار صحرایی و ازدیاد کارایی و راندمان کار می‌شوند.
- ✓ به علت فواصل کم MN و AB سیم‌های برق بسیار کوتاه بوده و مسائلی از قبیل نشت جریان از جانب سیم‌های لخت‌شده وجود نخواهد داشت.

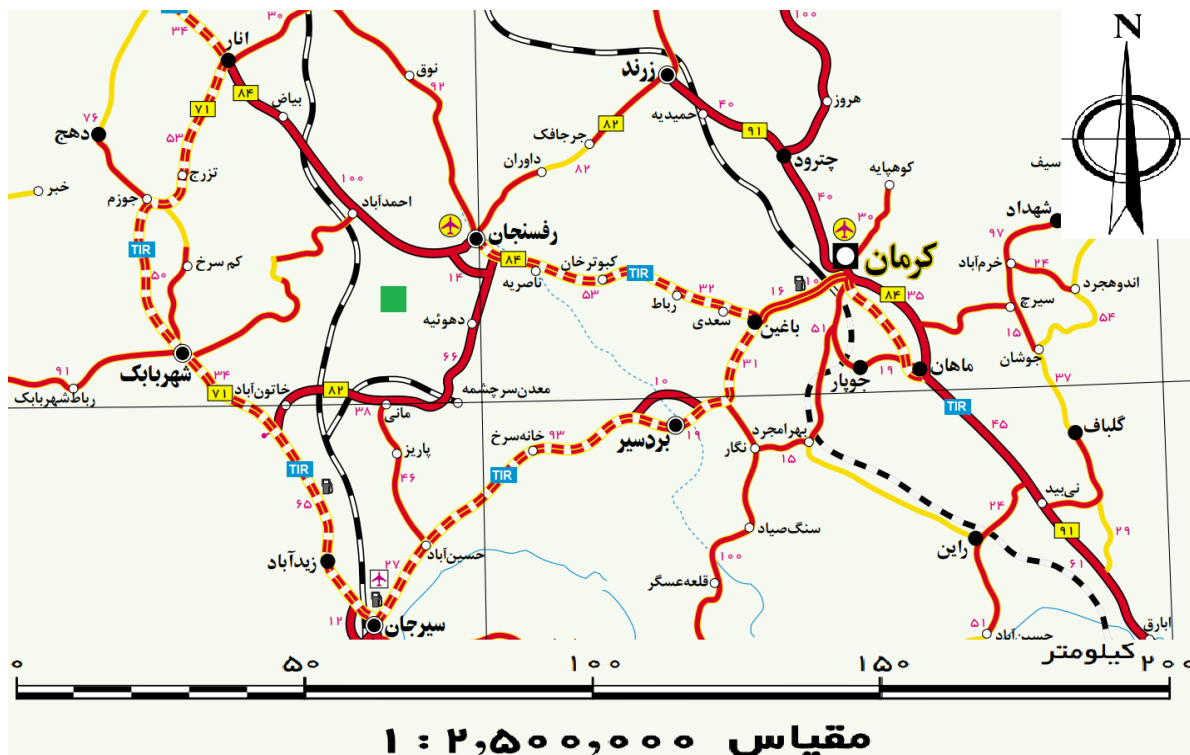
فصل ۳: موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

۳-۱ مقدمه

محدوده معدنی مس قانون در جنوب غرب شهر رفسنجان و در استان کرمان واقع شده است و از لحاظ زمین شناسی در ورقه ۱:۲۵۰۰۰۰ رفسنجان و زون ماگمایی ارومیه-دختر یا سهند بزمان قرار گرفته است. محدوده مورد مطالعه با وسعت تقریبی ۱۰ کیلومتر مربع در بازه طول شرقی $55^{\circ} 50'$ تا $55^{\circ} 52'$ و عرض شمالی $30^{\circ} 10'$ تا $38^{\circ} 12'$ واقع شده است. در اینجا کانی سازی های مس به شکل رگه ای و رگچه هایی که به صورت چند سانتی متری مالاکیت و به مقدار کمتر کالکوسیت در داخل درزه و شکاف های واحدهای آتشفشانی-آذرآواری ائوسن با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالت، تراکی بازالت و توف حضور دارند.

۳-۲ موقعیت و شرایط جغرافیایی

منطقه مورد مطالعه در استان کرمان و در ۲۳ کیلومتری جنوب غرب رفسنجان و در فاصله یک کیلومتری جنوب روستای ده ظهیر قرار دارد. میسرترین راهی که برای دسترسی به منطقه مورد مطالعه وجود دارد مسیر جاده شوسه ای است که از کیلومتر ۵ بزرگراه رفسنجان - انار جدا و به روستاهای شان آباد و ده ظهیر منتهی می شود؛ علاوه بر این از مسیر جاده های فرعی که از جاده آسفالته رفسنجان - سرچشمه جدا و به این روستاها منتهی می شوند نیز قابل دسترسی است (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱: نقشه‌ی مربوط به راهنمایی راه‌ها برای دسترسی به محدوده مورد مطالعه (منطقه مورد مطالعه با مربع سبز رنگ در جنوب غرب رفسنجان مشخص شده است) [نقشه راه‌ها، ۱۳۹۴].

از نظر ژئومورفولوژی، منطقه مورد مطالعه به صورت نسبتاً مرتفع می‌باشد که با حرکت به طرف شمال و شمال شرق به تدریج ملایم و پست می‌گردد (شکل ۳-۲). شرایط آب و هوایی در محدوده مورد مطالعه در فصل تابستان، گرم و خشک و در زمستان، سرد و خشک است. دما در تابستان حداکثر ۴۴ درجه سانتیگراد بالای صفر در زمستان حداقل ۸ درجه سانتیگراد زیر صفر است و متوسط بارندگی ۹۰ میلی‌متر در سال می‌باشد که بیانگر خشکی هوای آن است.



شکل ۳-۲: نمایی از توپوگرافی محدوده مورد مطالعه

پوشش گیاهی منطقه نسبتاً کم شامل بوته‌های کوتاه و درختچه‌های پراکنده مانند بادام کوهی ارچن می‌باشد. از حیوانات آن به کفتار، گرگ، روباه، آهو و خرگوش از پرندگان می‌توان به کبک و تیهو اشاره کرد. به دلیل خشکی منطقه، آبادی‌های محدود و پراکنده در آن دیده می‌شوند که منبع اصلی آب آشامیدنی و کشاورزی مردمان آن‌ها چاه و قنات می‌باشد. کشاورزی، دامداری و فرش‌بافی نیز در منطقه رواج دارد. محصولات اصلی کشاورزان یونجه، گندم، جو، پسته، بادام، انار و گلابی است [صدیقیان، ۱۳۸۷].

۳-۳ مطالعه‌ی زمین‌شناسی در مقیاس ناحیه‌ای

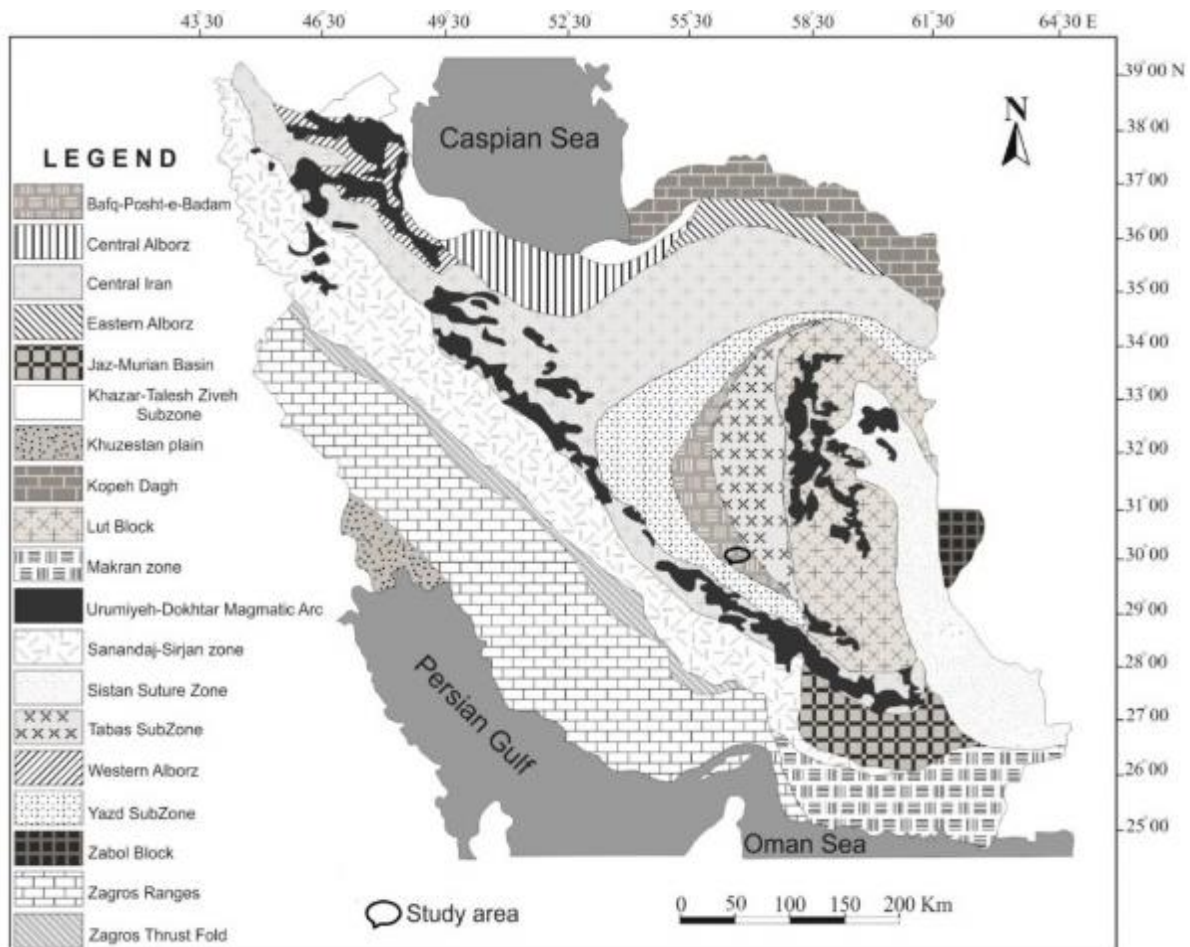
استان کرمان در جنوب‌شرقی ایران واقع شده است و می‌توان گفت یکی از شاخص‌ترین بخش‌های کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا است که ویژگی‌های منحصر به خود را داراست که آن را از سایر مناطق متفاوت کرده است. این بخش از کشور از نظر تقسیمات زمین‌شناسی، در زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد که کمربند ماگمایی ارومیه- دختر نیز در آن جای دارد (شکل ۳-۳). استان کرمان را می‌توان به دلیل تمایزهای مشخصی که در شرایط زمین‌شناسی، از نظر تکوین و تکاملی که در زمین‌شناختی وجود دارد، به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم بندی

می‌شود، بخش شمالی بیشتر واجد تشکیلات رسوبی پرکامبرین، پالئوزوئیک و مزوزوئیک می‌باشد و مراحل تکوین زمین‌شناسی را از پرکامبرین تا مزوزوئیک با فازهای کوهزایی کاتانگایی، کالدونین، سیمبرین پیشین و پسین طی نموده و سه زون ژئوتکنیکی لوت، طبس ایران مرکزی را در بر گرفته است و به طور کلی محیط یک منطقه پلاتفرمی را به نمایش گذاشته است. نیمه جنوبی استان که از ناحیه سنگی - زمین‌ساختی اساسی کمربند آتشفشانی - رسوبی دهج - ساردوئیه (بخش جنوب شرقی کمربند آتشفشانی ارومیه - دختر)، کمربند افیولیتی و افیولیت ملانژی شهربابک - بافت اسفندقه - کهنوج و در بخش جنوبی کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان - منوجان تشکیل یافته است، تحت تاثیر فازهای کوهزایی آلپی از موضوعی که مراحل تکامل زمین‌شناسی را طی نموده است [صالحی نژاد، ۱۳۹۹].

دیمیترویچ (۱۹۷۳) معتقد است که استان کرمان دارای پنج واحد ساختمانی می‌باشد که شامل:

۱- کمربند رفسنجان ۲- کمربند دهج - ساردوئیه ۳- کمربند آمیزه رنگین ۴- منطقه اسفندقه - سبزواران ۵- کمربند سیرجان

کمربند سیرجان در مقیاسی گسترده‌تر که به کمربند سنندج - سیرجان تعلق دارد. در مرز کمربند سیرجان و کمربند دهج ساردوئیه آمیزه رنگین قرار دارد. رشته کوه‌های دهج - ساردوئیه به حاشیه بلوک لوت یا جنوب غرب میکرو قاره ایران شرقی و مرکزی تعلق دارد.



شکل ۳-۳: نقشه تقسیم بندی ساختاری ایران که موقعیت محدوده قانون در جنوب شرقی ایران که با ستاره مشخص شده است.

منطقه اسفندقه - سبزواران به صورت تقریبی با کمر بند سیرجان شباهت دارد. هر دو واحد سنگ‌های دگرگون شده با سن نامعلوم دارند. همچنین سنگ‌هایی که دگرگون شده‌اند در طول دوره‌ی مزوزوئیک و گرانیت‌های قبل از ترشیری نیز در آن دیده می‌شود. امتداد ساختارهای اصلی در هر دو شبیه است. کمر بند آمیزه رنگین مرز ژئوتکتونیکی مهمی است که مناطق با تاریخچه زمین‌شناسی متفاوت تا اوایل ترشیری را از هم جدا می‌کند. این کمر بند یک کمپلکس افیولیتی آشفته است که در منطقه کرمان به صورت کمر بند باریکی از ورقه کمرو در شمال غرب تا کوه بحر آسمان در جنوب شرق ادامه می‌یابد و در آنجا به طور ناگهانی ناپدید می‌شود. کمر بند رفسنجان به وسیله گسل‌های ناحیه‌ای به بلوک‌های مراد، جوپار و گوگ تقسیم می‌شود. سن سنگ‌های این کمر بند از اواخر

پرکامبرین تا نئوژن تغییر می‌کند. جدایش این کمربند به بلوک‌های فوق بعد از تریاس اتفاق افتاده است که دارای منشأ زمین‌شناختی مشابهی تا آن زمان می‌باشد [سلامی شهید، ۱۳۹۰]

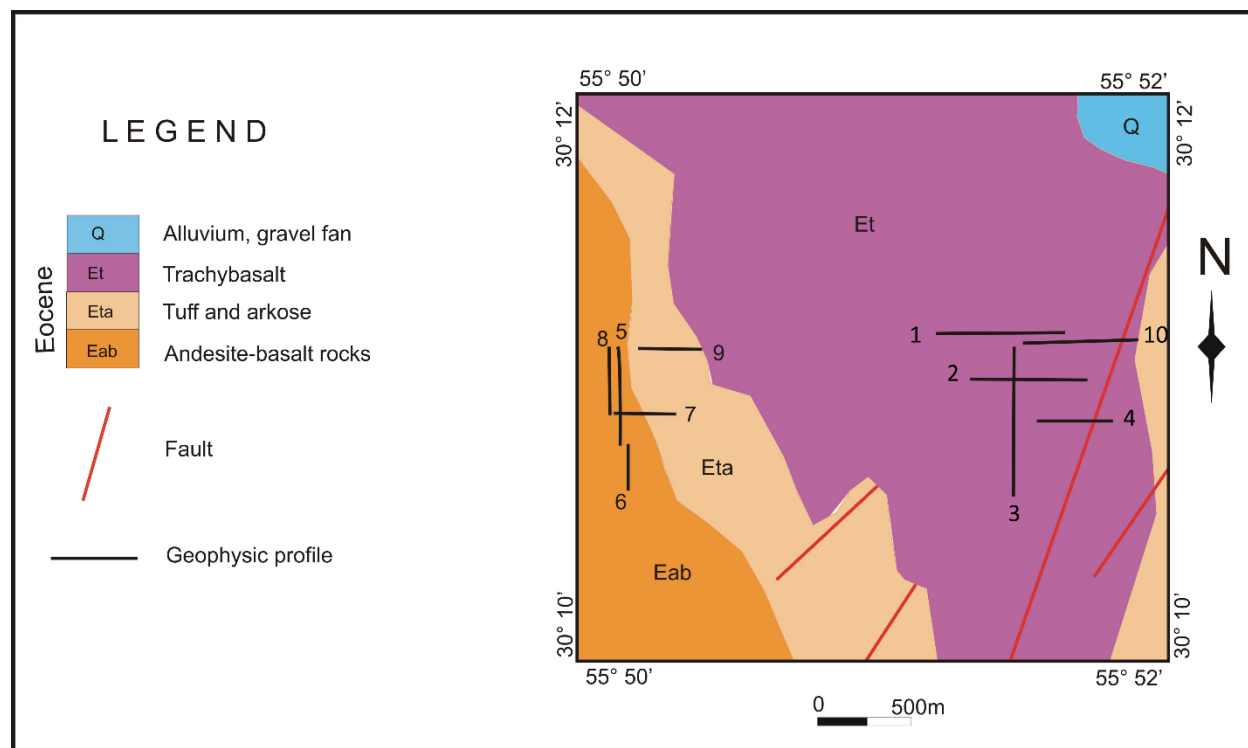
از نظر تقسیمات زمین‌ساختاری، محدوده مورد بررسی بخش کوچکی از نوار آتشفشانی ارومیه - دختر است. همزمان با رسوبگذاری سیلت، فوران‌های آتشفشانی به شکل گدازه با ترکیب بیشتر حد واسط و گاهی توف، سبب کنار هم قرار گرفتن این سنگ‌ها شده است. فعالیت‌های پلوتونیک پس از ائوسن باعث می‌شود سنگ‌هایی که از لحاظ عمقی نیمه‌عمیق هستند و در ترکیب خود داسیت دارند در میان واحدهای سنگی قدیمی‌تر به ویژه ائوسن نفوذ کرده که در قسمت‌های شمال باختر منطقه برونزد دارد. احتمال می‌رود فعالیت‌های گرمابی پس از آن که سنگ‌های نیمه عمیق نفوذ کردند، باعث می‌شود محلول‌های گرم و گاهی کانه‌دار در میان شکستگی‌های موجود در سایر واحدهای ولکانیکی منطقه نفوذ کرده باشد که در مواردی ذخایر قابل توجهی از کانسار مواد معدنی مختلف، به خصوص مس را تشکیل داده و همزمان حجم‌های بزرگی از سنگ‌های میزبان خود را آلت‌ر نموده‌اند. همین تکاپوهای زمین‌ساختی پس از ائوسن سبب ایجاد چین‌خوردگی‌های بزرگ و ساختمان‌های تاقدیس و ناودیس در سنگ‌های قدیمی‌تر شده است. سنگ‌های میوسن در منطقه رخنمون نداشته و نئوژن در محدوده مورد بررسی با کنگلومرای پلیوسن رخ می‌نماید. وجود توده‌های ماگمایی در اعماق سبب گرم شدن آب‌های جوی فرو رو در منطقه شده که چشمه آب گرم ده‌ظہیر در ارتباط با همین موضوع است [صالحی نژاد، ۱۳۹۹].

در پایان، فعالیت‌های کوهزایی معادل با فاز پاسادین موجب خروج از حالت افقی طبقات پلیوسن شده و مورفولوژی کنونی حاکم بر منطقه را ایجاد نموده است.

۳-۴ مطالعه زمین‌شناسی در مقیاس منطقه‌ای

منطقه مورد مطالعه بخش کوچکی از زون ماگمایی- آتشفشانی ارومیه - دختر در حاشیه جنوب باختری پهنه زمین‌ساختاری ایران مرکزی است. سنگ‌های رخنمون یافته در این محدوده بیشتر شامل سنگ‌های آتشفشانی-

آذرآواری با ترکیب غالب حدواسط تا بازیک آندزیت تا بازالت، توف و سنگ‌های تخریبی با ترکیب ماسه‌سنگ است (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴: نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده قانون برگرفته از [صالحی نژاد، ۱۳۹۷].

رسوبات تخریبی نفوژن و کواترنری جوان‌ترین واحدهای زمین‌شناسی گسترش یافته در محدوده مورد بررسی هستند. در زیر شرح هر یک از واحدهای زمین‌شناسی به ترتیب از قدیم به جدید آورده شده است.

- واحد آندزیت-بازالت E^{ab}

این واحد سنگی به گونه‌ای غیرقابل تفکیک و به صورت مجموعه درهم آمیخته آندزیت و بازالت و با گسترش محدوده در شمال غرب منطقه مشاهده می‌شود و میزبان کانی‌سازی مس می‌باشد (شکل ۳-۵). رنگ ظاهری سنگ‌های این واحدها خاکستری، قهوه‌ای تیره تا قرمز است و بلورهای پیروکسن و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از ریزبلورها به صورت ماکروسکوپی قابل تشخیص هستند. این مجموعه سنگی متحمل دگرسانی پروپیلیتیک و زئولیت-کربنات شده است.



شکل ۳-۵: نمایی از واحد E^{ab}

واحد توف - آرکوز E^{ta}

واحد سنگی توف با رنگ سبز و با ضخامتی برابر ۱۰۰ متر بر روی واحد ولکانیک آندزیت-بازالت قرار گرفته است و در شمال و غرب منطقه برونزد دارد و در وسعت بسیار کمی میزبان کانی‌سازی مس می‌باشد (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶: نمایی نزدیک از واحد توف E^{ta}

قطعات لیتیک و کریستال‌های موجود در زمینه‌ای از توف ریزدانه تا شیشه‌ای جای گرفته و مجموعاً سنگی با عنوان کریستال لیتیک توف را تشکیل داده است. ماسه سنگ ائوسن با ضخامت حدود ۳۰ متر در شمال شرق محدوده مشاهده می‌شود.

- واحد تراکی آندزیت E^t

این واحد در گستره به نسبت وسیعی خصوصاً با رنگ‌های سبز و خاکستری در محدوده مورد مطالعه رخنمون دارد. رنگ عمومی این واحد از قرمز تیره تا خاکستری، قهوه‌ای تیره و سبزه تیره متغیر است (شکل ۳-۷). این واحد متحمل دگرسانی‌های زئولیتی-کربناتی، سیلیسی، هماتیتی و پروپیلیتیک شده است و میزبان اصلی کانی سازی است. ترکیب غالب این واحد از تراکی آندزیت تا آندزیت تشکیل شده است و آثار مالاکیتی و همچنین رگه های با ارزش مس در این واحد مشاهده می‌شود.

در شمال باختر سینه کار معدن، این مجموعه سنگی با لایه‌هایی از توف سبز رنگ در تناوب است. در همین منطقه سنگ های این واحد بیشتر صخره‌ساز بوده و ضخامتی معادل ۱۰۰ متر از آن در معرض دید قرار دارد. وجود رگه و رگچه‌هایی از اکسید آهن و همچنین آلتراسیون پروپیلیتیک از نکات قابل ذکر در این واحد است.

۳-۵ دگرسانی‌های سنگ میزبان

واکنش بین محلول‌های گرمابی و کمرسنگ‌ها ممکن است به پیدایش کانی‌های جدید منجر شود؛ که در شرایط جدید پایدارترند. دگرسانی گرمابی می‌تواند توسط شدت و گسترش آن مشخص شود. شدت درجه‌ای است که کانی‌های اولیه مستعد تبدیل شدن به کانی‌های ثانویه هستند و گسترش وابسته به توزیع دگرسانی است؛ که بوسیله عوامل نفوذپذیری مانند گسل‌ها کنترل می‌شود. در اکتشاف کانسارهای مرتبط با سیالات هیدروترمال، تشخیص دگرسانی‌ها مهم است زیرا کانی‌های دگرسانی ارتباط زمانی و مکانی نزدیکی با زون کانی‌زایی دارند.

دگرسانی ناحیه‌ای در منطقه مورد مطالعه گسترش وسیعی دارد و شامل دگرسانی زئولیتی-کربناتی و پروپیلیتیک است؛ که در واحد آتشفشانی-آذرآواری مشاهده می‌شود (شکل ۳-۸ و ۳-۹). حفرات سنگ و شکستگی ها با کانی‌های زئولیت و کربنات پر شده است. دگرسانی پروپیلیتیک در بخش‌های جنوبی و به مقدار کم‌تری در بخش‌های شمالی محدوده مشاهده شده است.



شکل ۳-۷: دگرسانی ژئولیتی که حفرات سنگ میزبان بازالت را پر کرده است و رگچه کلسیتی که شکستگی سنگ میزبان را پر کرده است.



شکل ۳-۸: دگرسانی پروپیلیتیک در سنگ میزبان بازالتی که حاوی کانی های مس دار مانند مالاکیت است.

دگرسانی های با مقیاس محلی شامل دگرسانی هماتیتی و سیلیسی است که می تواند مرتبط با محلول های هیدروترمال تشکیل دهنده کانی سازی باشد. شکل ۳-۱۰ نمایی از دگرسانی هماتیتی را نشان می دهد و شکل ۳-۱۱ لکه های جاسپروئیدی در سنگ میزبان آتشفشانی را نشان می دهد.



شکل ۳-۹: نمایی از دگرسانی هماتیت در تراکی آندزیت

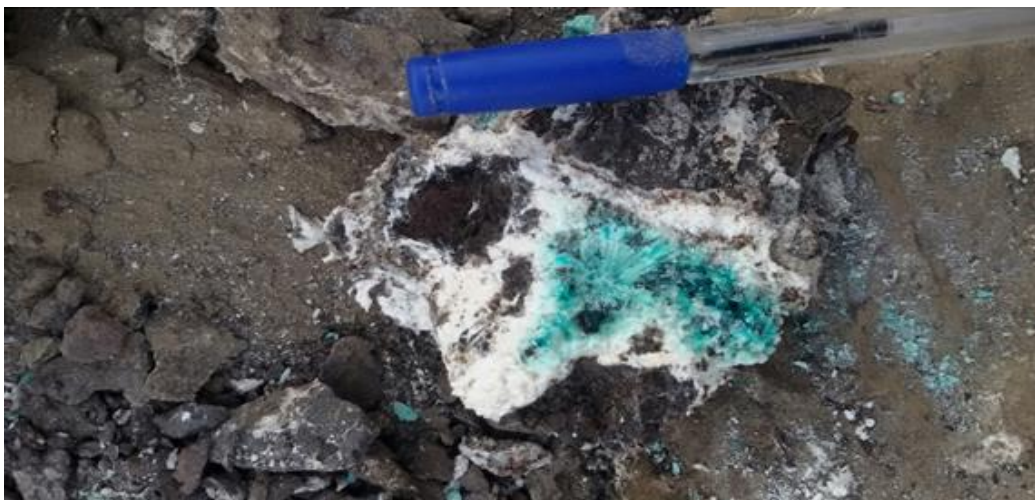


شکل ۳-۱۰: نمایی از دگرسانی سیلیسی (جاسپروئید)

۳-۶ کانی سازی

بر اساس مطالعات صحرایی کانی سازی در منطقه قانون به صورت پرکننده حفرات و شکستگی های موجود در سنگ میزبان تشکیل شده است. مس به صورت پراکنده در حفرات سنگ های آتشفشانی-آذرآواری (آندزیت، بازالت، تراکی آندزیت، توف و به مقدار ناچیز در ماسه سنگ ائوسن) نهشته شده است. سیالات داغ ضمن آن که در سنگ های آتشفشانی چرخش می کند، مس را از داخل حفرات و ساختار کانی ها شسته و به حالت رگه و رگچه ای و یا به صورت پراکنده در متن سنگ باقی گذاشته است. کانی سازی در سطح شامل مالاکیت، آزوریت، هماتیت و

کالکوسیت می باشد (شکل ۳-۱۲ و ۱۳). کانی سازی در عمق شامل ملاکیت، آزوریت، کالکوسیت، مس خالص و مقادیر کمی پیریت است (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۱: کانی سازی مس (ملاکیت) همراه با زئولیت در حفرات داخل سنگ میزبان آتشفشانی



شکل ۳-۱۲: کانی سازی ملاکیت، کالکوسیت و هماتیت در سنگ میزبان آتشفشانی



شکل ۳-۱۳: کانی‌سازی مس خالص همراه با رگچه‌های کلسیتی و زئولیتی در سنگ میزبان آندزیتی

مشخصات کانی‌سازی منطقه قانون با کانی‌سازی مس تیپ «مانتو» مشابهت‌های زیادی دارد. مشخصات کلی کانسارهای تیپ مانتو به شرح زیر است:

۱- کانی‌سازی که در منطقه اتفاق افتاده شامل مس طبیعی، کالکوسیت، دیژنیت و مالاکیت است؛ که همراه با نقره می‌باشد.

۲- سنگ میزبان این تیپ کانی‌سازی سنگ‌های آتشفشانی (بازالت و آندزیت)، شیل، توف، آهک و کنگلومرا است.

۳- کانی‌سازی در منطقه به صورت رگه‌ای و پراکنده تشکیل شده است.

۴- دگرسانی در دیواره رگه‌ها با آلبیتی‌شدن پلاژیوکلازها، کلسیتی‌شدن، کلریتی و اپیدوتی‌شدن و زئولیتی‌شدن همراه است.

۵- این نوع کانسارها در دمای کمتر از ۳۰۰ درجه و فشار پایین تشکیل می‌شود.

فصل ۴: برداشت، مدل سازی و تحلیل داده های مقاومت ویژه الکتریکی و IP

۴-۱ مقدمه

در یک پروژه اکتشافی مرحله برداشت داده‌های صحرایی، از جمله شاخص‌ترین مرحله‌هایی است، که به شمار می‌رود. در این مرحله سعی بر آن است تا داده‌ها، با کیفیتی مطلوب و با کم‌ترین پارازیت ممکن برداشت شوند؛ چون که اگر در غیر این صورت داده‌ها برداشت شوند؛ حتی پیچیده‌ترین و پیشرفته‌ترین روش‌های ارزیابی و تحلیل، استفاده‌چندانی نخواهند داشت. داده‌هایی که در این مرحله برداشت می‌شوند یک سری داده‌های خام هستند؛ که پارازیت‌های مختلفی دارند و اگر تحلیل‌ها به صورت مستقیم انجام شود؛ این داده‌ها توانایی نمایش هیچ گونه اطلاعاتی به صورت کمی در مورد عمق حقیقی، بعدها و یا توزیع مقاومت‌ویژه حقیقی در زیرزمین نخواهد داشت. بنابراین مشخص کردن یک رابطه بین داده‌های صحرایی به دست آمده و پراکنش خواص فیزیکی زمین و به عبارت دیگر، با تهیه ی یک مدل از داده‌های برداشت شده شرح رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری است. روابط فیزیکی توسط یک سری معادلات دیفرانسیلی و معادلات انتگرالی در مدل‌سازی ریاضی بیان می‌شوند؛ به نحوی که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود [Dey and Morrison, 1979].

در این فصل مطالبی در رابطه با مدل‌سازی و روشهای آن و ضرورت اجرای آن‌ها برای رسیدن به تفسیرهای ژئوفیزیکی ارائه خواهد شد.

۴-۲ روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی

مدل‌سازی ژئوفیزیکی شامل دو دسته از قرار زیر است:

۴-۲-۱ مدل‌سازی فیزیکی

در روش مدل‌سازی فیزیکی ساختار زمین در مقیاس آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌شود. این روش بسیار هزینه‌بر و وقتگیر می‌باشد. همچنین در شرایطی که به صورت کنترل‌شده در آزمایشگاه وجود دارد نمی‌تواند شرایط مناسبی

از زمین را که غیر قابل پیش بینی است؛ فراهم کند. با پیشرفتی که در علوم و تکنولوژی صورت گرفته، این روش جانشین مدل سازی عددی توسط برنامه های رایانه ای شده است [Dey and Morrison, 1979].

۴-۲-۲ مدل سازی عددی

وظیفه ای که یک ژئوفیزیکست دارد درک داده های جمع آوری شده و تحلیل آن ها به صورت یک مدل زمین شناسی قابل قبول، در حد توان روش های مختلف ژئوفیزیکی می باشد. برای آنکه این مبحث به درستی درک شود؛ مسائل را برای شاخه های مختلف ژئوفیزیک با کمک معادلات مربوطه حل می کنند. لذا مباحث تئوری مربوط به روش های مختلف ژئوفیزیکی که به ابزارهای مختلف ریاضی مجهز می باشند، مبنای حل مسائل پیشرو را تشکیل می دهد. مباحث تئوری مربوط به این روش ها برای درک رفتار داده های ژئوفیزیکی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [Ward, 1990]. به دلیل آن که علوم کامپیوتر، تکنولوژی نرم افزاری و روش های عددی در مدل سازی ریاضی با پیشرفت سریعی همراه بوده است، بهره گیری از تئوری وارون فراهم گردیده است. مدل سازی عددی ارتباط مستقیمی با درک طبیعت داده ژئوفیزیکی دارد و در آخر تصویری از داخل زمین به ما ارائه می دهد. در واقع هدف از این مدل سازی این است که مدلی از زمین بر اساس داده های صحرایی بازسازی شود. مدل سازی عددی به دو روش انجام می شود [Roy, 2008]:

الف - مدل سازی پیشرو (مستقیم)

در این مدل سازی برای ورودی یک مدل فرضی از زمین در نظر گرفته می شود که در مسیر همین فرایند با توجه به معادلاتی که در مسئله وجود دارد، جواب های مربوطه به این مدل ارزیابی می شود و تحت عنوان خروجی مدل شرح داده می شود. این امر با اصلاح مدل که با تغییر دادن پارامترها صورت می گیرد آنقدر انجام می شود تا جواب مدل با داده های صحرایی متناسب باشد؛ یعنی در واقع از مدل حاصل شده، داده ها بدست آید. این مدل سازی بر اساس آزمون و خطا صورت می گیرد. در مدل سازی مستقیم یک الگوی توزیع خاص برای اجزا زیر سطحی در نظر

گرفته می‌شود لذا در قدم اول فضایی که در زیر سطح وجود دارد به تعداد زیادی سلول تقسیم‌بندی می‌شود. بعد از آن جواب این مدل با توجه به آرایش الکترونی مورد نظر مورد محاسبه قرار گیرد [Dey and Morrison, 1979].

ب- مدل سازی وارون (معکوس)

در این مدل سازی سعی بر آن است تا بر اساس داده‌های برداشت‌شده، مدل برآورد شود. نظیر مدل سازی مستقیم، بقیه مراحل فرایند مدل سازی انجام می‌شود. تفاوتی که بین این مدل سازی و مدل سازی پیشرو وجود دارد در نحوه‌ی انتخاب مدل اولیه می‌باشد. به این نحو که مدلی که در این روش انتخاب می‌شود؛ فرایندش در روش معکوس کمی سخت‌تر است؛ ولی جواب‌هایی که نشان می‌دهد؛ به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. چون که مدل در روش وارون پیچیده‌تر است، زمانی که برای محاسبه پاسخ‌های مدل که لازم می‌باشد و حجم اشغالی بیشتر است [Loke and Barker, 1996].

برای حل چنین مسائلی روش‌های عددی زیادی وجود دارد؛ که می‌توان از جمله به روش کمترین مربعات، روش رگرسیون ریدج، روش‌های تصادفی، روش شبکه عصبی و غیره را نام برد [Roy, 2008].

در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی پارامترهایی که در مدل قرار دارند، مقادیر مقاومت‌ویژه سلول‌های مدل و داده‌ها، مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری برداشت‌شده هستند. رابطه ریاضی بین پارامترهای مدل پاسخ آن‌ها از روش‌های تفاضل محدود و یا اجزاء محدود فراهم می‌شوند. در همه‌ی روش‌های بهینه‌سازی، مدل اولیه را در یک فرایندی تکرارشونده به گونه‌ای بهبود پیدا می‌کند؛ تا اختلافی که بین داده‌های برداشت شده و پاسخ‌های مدل وجود دارد؛ کمینه شود. در اینجا داده‌های برداشت شده را با بردار ستونی y نمایش می‌دهند:

$$y = \text{col}(y_1, y_2, y_3 \dots y_m) \quad (۱-۴)$$

m تعداد قرائت‌ها می‌باشد. پاسخ‌های مدل (f) را نیز می‌توان به صورت مشابهی انجام داد:

$$f = \text{col}(f_1, f_2, f_3 \dots f_m) \quad (۲-۴)$$

پارامترهای مدل به صورت بردار زیر ارائه می‌شود:

$$q = \text{col} (q_1, q_2, q_3 \dots q_n) \quad (3-4)$$

که در اینجا n تعداد پارامترهای مدل وجود دارد. تفاوت بین داده‌های برداشت‌شده و پاسخ‌های بدست آمده از مدل با بردار تفاضل g که به صورت زیر می‌باشد محاسبه می‌شود:

$$g = y - f \quad (4-4)$$

در روش بهینه‌سازی کمترین-مربعات، بهینه‌سازی مدل اولیه به گونه‌ای انجام می‌شود که مجموع مربعات خطا (E) که تفاضل بین مقادیر به دست آمده از پاسخ‌های مدل و داده‌های برداشت‌شده می‌باشد کمینه می‌گردد:

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (5-4)$$

برای حداقل کردن خطا از معادله‌ی گوس-نیوتن استفاده می‌شود، به همین طریق پارامترهایی از مدل که باید تغییر پیدا کند تا مجموع مربعات خطا (E) کاهش پیدا یابد؛ مشخص شوند:

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (6-4)$$

Δq بردار تغییرات پارامترهای مدل و J ماتریس ژاکوبین (با اندازه $m \times n$) مشتقات جزئی است. عناصر ماتریس ژاکوبین به صورت $J_{ij} = \partial f_i / \partial q_j$ هستند که تغییر در i امین پاسخ مدل به دلیل تغییر در j امین پارامتر مدل می‌باشد. پس از محاسبه بردار تغییر پارامتر (Δq)، مدل جدید از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (7-4)$$

به دلیل کم و کاستی‌هایی که در معادله‌ی گوس-نیوتن وجود دارد، دلیلی بر آن است که از این روش کمتر استفاده شود و در عوض از مدل بهبودیافته آن با نام مارکوارت-لونیبرگ^۱ مورد استفاده قرار گیرد:

¹ Marquardt-Levenberg

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (۸-۴)$$

در معادله بالا J ماتریس ژاکوبین^۱ و λ فاکتور تعدیل^۲ است. این روش با نام رگرسیون ريج نیز رایج شده است. در معکوس سازی داده های سونداژ که مدل دارای لایه های کمتری است، این روش به خوبی پاسخ می دهد. ولی در وقتی که تعداد پارامترهای مدل زیاد باشند، مانند مدل های دو و سه بعدی، مدل تولید شده با روش رگرسیون ريج، توزیع مقاومت ویژه نامنظم همراه با مناطقی با مقاومت ویژه بسیار بالا یا پایین خواهد داشت. برای آن که این مشکل رفع شود معادله کمترین مربعات گوس- نیوتن بار دیگر به صورت معادله زیر بهینه شده، به طوری که تغییرات فضایی در پارامترهای مدل را کمینه می کند:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T - \lambda F q_k \quad (۹-۴)$$

$$F = a_x c_x^T c_x + a_y c_y^T c_y + a_z c_z^T c_z \quad (۱۰-۴)$$

c_x, c_y, c_z ماتریس های هموارسازی در جهات x, y, z هستند. a_x, a_y, a_z وزن های نسبی داده شده به فیلترهای هموارسازی در جهات ذکر شده می باشد. معادله (۱۰-۴) باعث کمینه شدن مربع تغییرات فضایی یا سختی مقادیر مقاومت ویژه مدل را نیز می شود، این همان روش بهینه سازی هموارسازی می باشد. روشی که ذکر شد مدلی است که با تغییراتی که به صورت تدریجی مقاومت ویژه اتفاق می افتد، تولید می شود. به کار بردن این روش وارون سازی برای منطقه هایی که تغییرات زمین شناسی در آن به صورت تدریجی می باشد؛ مناسب است. مناطقی که در زیر سطح به صورت درونی همگن هستند؛ ولی با محیط پیرامون خود دارای تفاوت می باشد و مرزهای تند دارند، بهینه شده معادله ذکر شده که به روش وارون سازی بلوکی شهرت دارد جواب های قابل قبول تری نشان می دهد که به صورت می توان نشان داد:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (۱۱-۴)$$

¹ Jacobwin

² Damping Factor

$$F = a_x c_x^T R_m c_x + a_y c_y^T R_m c_y + a_z c_z^T R_m c_z \quad (۴-۱۲)$$

در رابطه فوق R_d و R_m ماتریس های وزنی می باشد. سه روش برای ارزیابی مقاومت ویژه داریم: (۱) روش تحلیلی (۲) روش جزء مرزی^۱ (۳) روش های اجزاء محدود و تفاضل محدود. در میان این سه روش، روش تحلیلی از همه دقیق تر است. ولی کاربرد این روش محدود به چند شکل هندسی ساده می باشد که از جمله ی آن می توان به کره و استوانه اشاره کرد. روش جزء مرزی دارای انعطاف پذیری بیشتری می باشد؛ اما در این روش هم تعداد نواحی که دارای مقدار مقاومت ویژه متفاوتی دارند، محدود است. در علوم مهندسی و زیست محیطی می توان پراکنش مقاومت ویژه را در زیر سطح زمین به طور اختیاری فرض کرد. به همین علت روش های اجزاء محدود و تفاضل محدود تنها گزینه هایی هستند که کاربردی می باشند. این دو روش یاد شده این قابلیت را دارند که زیر سطح را به هزاران سلول که دارای مقاومت ویژه های مختلف هستند، تقسیم بندی کنند [Loke, 2004].

۴-۳ روش های عددی برای حل مسائل معکوس سازی

روش های عددی مختلفی برای حل این گونه مسائل وجود دارد. در میان آن ها روش کمترین مربعات به دلیل سادگی ریاضی از پرطرفدارترین این روش ها می باشد. همچنین به این دلیل که این روش در الگوریتم نرم افزاری که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته به کار برده شده است به توضیح آن پرداخته خواهد شد. در فرایند این مدل سازی قبل از هر چیزی به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل سازی نیاز می باشد [Loke and john, 2004].

مدل اولیه ذکر شده در نرم افزار RES2DINV یک مدل اولیه همگنی می باشد که با داده های مشاهده ای متناسب است به صورتی که به تغییرات شدید در مراحل تکرار منجر نشود. پس از آن که مدل اولیه تخمین زده شد باید

¹ Boundary element method

این مدل با هدف رسیدن به تطابق قابل قبول با داده‌های صحرایی تصحیح شود. که برای این منظور از روش‌های کمترین مربعات گوس- نیوتن^۱ و یا روش شبه نیوتن^۲ استفاده می‌شود.

۴-۳-۱ روش کمترین مربعات گوس- نیوتن

یکی از روش‌های معمولی که برای حل مسائل غیر خطی استفاده می‌شود، روش بهینه‌سازی گوس- نیوتن می‌باشد. این روش به صورت گسترده‌ای در حل مسائل وارون‌سازی از جمله در نرم‌افزار RES2DINV به کار برده می‌شود [Sasaki, 1992]. روش مدل‌سازی وارون کم‌ترین مربعات گوس- نیوتن شامل سه مرحله می‌باشد. اولین مرحله به این صورت است که مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری برای مدل به کار گرفته شده محاسبه می‌شود. این فرایند توسط روش اجزاء محدود^۳ یا روش تفاضل محدود^۴ انجام می‌شود. دومین مرحله ماتریس ژاکوبین (محاسبه ماتریس مشتقات جزئی مرتبه اول) محاسبه می‌شود. سومین مرحله حل سیستم معادلات خطی می‌باشد. مراحل ذکر شده به صورت تناوبی تکرار می‌شود؛ تا هم‌خوانی مناسبی بین مدل فرضی و مدل صحرایی ایجاد شود و یا برنامه به حداکثر تکرار تعریف شده خود برسد [Loke and Barker, 1996].

۴-۳-۲ روش شبه نیوتن

در روش گوس- نیوتن، باید در هر تکراری ماتریس ژاکوبین محاسبه شود اما روش شبه نیوتن از محاسبه‌ی دوباره‌ی ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به‌روزرسانی امتناع می‌کند. در واقع این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد، مشتقات جزئی می‌توانند به طور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن به عنوان مدل اولیه، محاسبه شوند [Loke and Barker, 1996].

¹ Gauss-Newton

² Quasi-Newton

³ Finite difference method

⁴ Finite element method

۴-۴ رویه معکوس سازی هموار دوبعدی به وسیله ی نرم افزار

RES2DINV

فرايند مدل سازی در اين نرم افزار مبتنی بر روش بهينه سازی کمترین مربعات خطا انجام می شود [Loke and Barker, 1996]. مدل دوبعدی استفاده شده به وسیله ی این برنامه، زیر سطح زمین را به تعدادی بلوک مستطیلی شکل تقسیم می کند. هدف این برنامه تعیین مقاومت ویژه بلوک های مستطیلی شکل است، که در نهایت مقاومت-ویژه ی ظاهری نسبت داده شده به این بلوک ها یک شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری ایجاد می کند که موافق با مقادیر اندازه گیری های واقعی است. معادله این روش عبارت است از [Loke, 2004] :

$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g \quad (۱۳-۴)$$

در این رابطه، λ فاکتور تعدیل، J ماتریس ژاکوبین، d بردار اغتشاش مدل و g بردار همگرای می باشد و F عبارت است از :

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (۱۴-۴)$$

سودمندی این روش در آن است که فاکتور تعدیل و هموارترین فیلترها می توانند خود را با انواع مختلف داده ها وفق دهند. در این رابطه، f_x فیلتر هموارساز افقی و f_z فیلتر هموارساز عمودی می باشد. می توان فاکتور تعدیل و فیلترهای هموارسازی را برای انواع مختلف داده ها تنظیم نمود. برای انجام محاسبات فوق از روش های تفاضل محدود یا اجزاء محدود استفاده می شود. برای فاکتور تعدیل ابتدا یک مقدار بزرگ انتخاب می شود (λ_0)، سپس بعد از هر مرحله تکرار این مقدار کاهش می یابد، تا به یک حد کمینه برسد (λ_m)، که معمولاً ۰/۱ مقدار اولیه می باشد:

$$F = \lambda_m = 0.1\lambda_0 \quad (۱۵-۴)$$

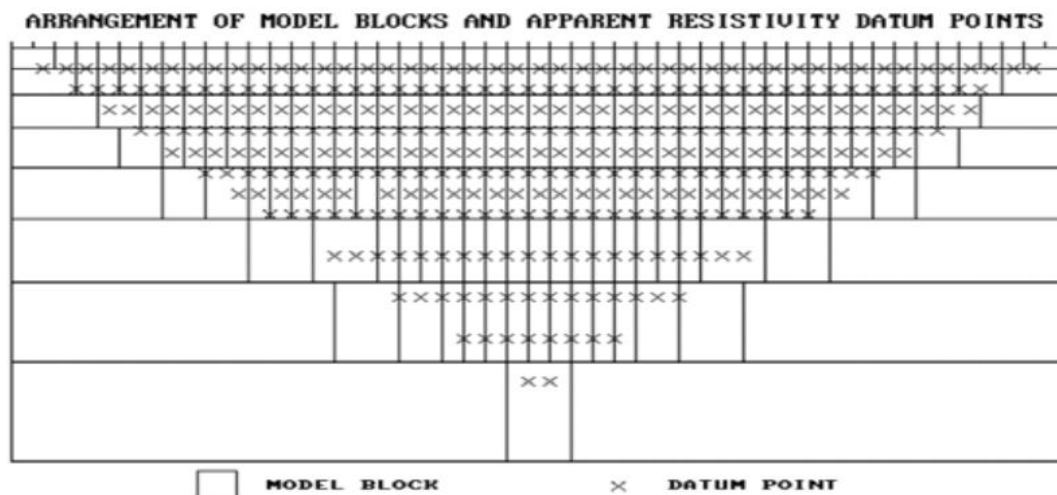
در این معادله λ_0 به سطح نوفه منطقه بستگی دارد. که هر چه سطح نوفه بیشتر باشد، مقدار اولیه فاکتور تعدیل هم بیشتر است. این نرم افزار سعی دارد به طور اساسی اختلاف بین مقدار مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسبه شده را کاهش دهد؛ که این اختلاف توسط خطای^۱ RMS بیان می شود که برنامه در هر مرحله تکرار، خطای RMS را محاسبه می کند. مقدار خطای جذر میانگین مربعات توسط معادله زیر تعریف می شود [Zohdy, 1989]

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_{0j} - \rho_{ej}}{\rho_{0j}} \right)^2}{N}} \quad (۱۶-۴)$$

در این رابطه ρ_{0j} ژ امین مقاومت ویژه مشاهده شده، ρ_{ej} ژ امین مقاومت ویژه محاسبه شده N تعدادها می باشد. با وجود این مدلی با کمترین خطای RMS که کاهش تغییرات غیر واقعی و بزرگتری را در مقادیر مقاومت ویژه مدل نشان دهد؛ همیشه الزاماً بهترین مدل از منظر زمین شناسی نیست. در حالت عمومی بهترین روش انتخاب مدل انتخاب در تکرارهایی است که خطای RMS به طور قابل توجهی تغییر نمی کند این حالت معمولاً بین تکرارهای ۳ تا ۵ اتفاق می افتد [Loke, 2004].

برای مدل سازی داده های IP و مقاومت ویژه از نرم افزار RES2DINV استفاده شده است. در نرم افزار RES2DINV مدل مورد استفاده به عنوان مدل اولیه شامل یک سری بلوک های مستطیلی دو بعدی خواهد بود که در شکل نشان داده شده است. در مدل مذکور تعداد بلوک ها با تعداد نقاط داده ها در شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری برابر می باشد و به یک شیوه مشابه منظم شده است. همچنین عمق مراکز بلوک ها در محاسبه عمق میانگین تحت بررسی برای بازه های الکترونی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [Loke and Lane, 2004].

¹ Root- Mean- Squared



شکل ۴-۱: مدل اولیه مورد استفاده در نرم افزار RES2DINV [Loke, 2004].

در نرم افزار RES2DINV مدل سازی معکوس، با روش اجزاء محدود و تفاضل محدود برای تعداد زیادی از داده های صحرائی قابل استفاده می باشد. روش اجزاء محدود برای زمین های دارای توپوگرافی، و روش تفاضل محدود برای زمین های بدون توپوگرافی استفاده می شود. هدف از وارون سازی داده های ژئوفیزیکی، ارائه مدلی می باشد که بیشترین تطابق را با داده های صحرائی داشته باشد. در حقیقت مدلی که به دست می آید بیانگر یک پاسخ ریاضی مطابق با ساختار زمین شناسی می باشد. در مراحل تکرار فرآیند وارون سازی، پارامترهای مدل به قدری تغییر می کنند تا بیشترین تطابق بین پاسخ مدل ارائه شده و داده های صحرائی حاصل شود. همچنین مدلی که به دست می آید باید با داده های زمین شناسی مطابقت داده شود؛ تا صحت و سقم آن نیز از نظر زمین شناسی مورد تایید قرار گیرد [Loke, 2004].

۴-۵ عملیات برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP و تجهیزات مورد

استفاده

۴-۵-۱ نحوه انجام عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت ویژه و IP

با توجه به مطالعات و مشاهدات اولیه زمین‌شناسی و همچنین شواهد کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP با هدف تشخیص نواحی بی‌هنجار و بررسی عمقی آن‌ها انجام شد. این برداشت‌ها به صورت ۱۰ پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی (۶ پروفیل شرقی-غربی و ۴ پروفیل شمالی-جنوبی) بر روی محدوده‌های بی‌هنجار به منظور بررسی عمقی کانی‌سازی با فواصل الکترودی ۲۰ و ۴۰ متر و فاکتور عددی (n) ۱ تا ۸ برداشت شد. داده‌های مربوط به توپوگرافی هم در امتداد هر پروفیل ثبت شده است. در مجموع ۸۳۶ ایستگاه برای هر روش مقاومت‌ویژه و IP با آرایه‌ی دوقطبی-دوقطبی برداشت گردید.

۴-۵-۲ تجهیزات و ابزار مورد استفاده در برداشت

در این عملیات برای برداشت مقاومت ویژه و IP، از دستگاه فرستنده GDD TXIII 1800W و دستگاه گیرنده GDD GRx8-32 ساخت کشور کانادا، ژنراتور ۶ کیلوواتی، قرقره‌های کابل‌ها و الکترودهای جریان و پتانسیل استفاده شد. دستگاه TXIII برای برداشت‌های حوزه زمان IP طراحی شده است و جریان مورد نیاز خود را از ژنراتور دریافت میکند (شکل ۴-۲-الف و ب). وظیفه دستگاه فرستنده به این صورت است که جریان الکتریکی ۱۲۰ ولت از موتور برق به جریان الکتریکی مستقیم مربعی تبدیل کرده و بعد از تقویت آن نهایتاً متناسب به تنظیمات زمانی ارسال می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲: تجهیزات و ابزار ارسال جریان؛ الف) دستگاه فرستنده جریان TXIII (ب) ژنراتور، دستگاه فرستنده جریان و قرقره‌های کابل‌های انتقال جریان

دستگاه گیرنده یک دستگاه سبک و قابل حمل است (شکل ۴-۳). این دستگاه دارای یک نمایشگر دستی است؛ که آن را می‌توان با کابل مخصوص و یا بلوتوث به گیرنده وصل کرد و بعد از آن تنظیمات اولیه مورد نیاز برداشت داده‌ها را برای دستگاه گیرنده تعریف کرد. همچنین نمایشگر این قابلیت را دارد که هم‌زمان با برداشت داده‌ها، اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین الکترودهای پتانسیل، میزان بارپذیری و مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و در نهایت شبه مقطع داده‌های برداشت شده را مشاهده نماید. این دستگاه می‌تواند ۵۱۲۰۰۰ قرائت به همراه

جزئیات کامل پارامترهای اندازه‌گیری شده را ذخیره‌سازی کند و به راحتی تمامی این اطلاعات را به حافظه خارجی از جمله فلش مموری انتقال دهد. در این پروژه، از کابل‌های دارای روکش عایق و مناسب به این دلیل که ایمنی کار حفظ شده و داده‌هایی با کیفیت مناسب برداشت شود.



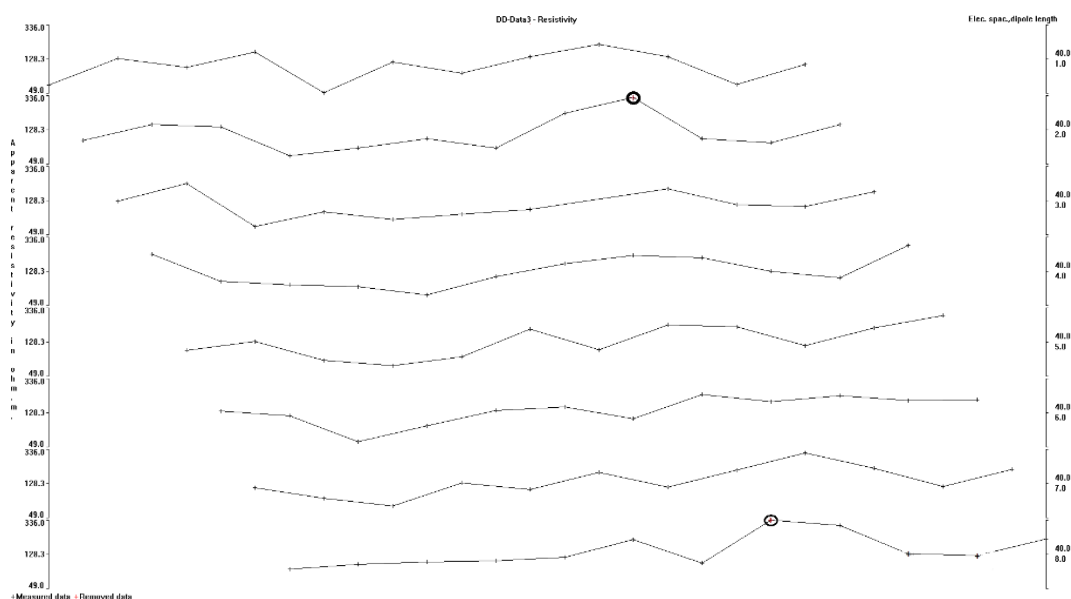
شکل ۴-۳: دستگاه گیرنده GRx8-32 به همراه نمایشگر دستی

لازم به ذکر است که برای انتقال جریان به جای الکترودهای فلزی از میخ‌های فلزی و یا از حلب‌های فلزی استفاده شده است. به علاوه برای اینکه جریان ارسالی به داخل زمین بهتر انتقال پیدا کند، مقدار حدود ۱۰ لیتر محلول آب نمک در محل تمامی الکترودهای جریان ریخته شد.

۴-۶ پردازش داده‌ها

این مرحله عمدتاً قبل از آنکه فرایند مدل‌سازی روی داده‌ها انجام شود، صورت می‌گیرد؛ البته در برخی موارد بعد از انجام مدل‌سازی با هدف افزایش دقت مدل خروجی لازم است پردازش‌هایی مانند حذف داده‌هایی که حاوی نوفه‌ی تصادفی می‌باشد اعمال شود. در منطقه مورد مطالعه در مجموع ۸۳۶ نقطه اندازه‌گیری برای هر روش

مقاومت‌ویژه و IP برداشت گردید؛ که با آرایه دوقطبی - دوقطبی اندازه‌گیری شده است. با هدف رسیدن به نتایج مطلوب و مدلی مناسب‌تر لازم می‌باشد که داده‌هایی که برداشت می‌شود قبل و یا در زمان انجام بررسی و مدل‌سازی پردازش شود. برای آن که مدلی مناسب و نزدیک به واقعیت داشته باشیم؛ باید داده‌های برداشت شده از کیفیت بالایی برخوردار باشند. در این میان نوفه‌ها باعث ایجاد تاثیر منفی بر روی کیفیت داده‌ها می‌شوند که دلیل آن می‌تواند نقصان در یکی از الکترودها، تماس ضعیف الکترودها با زمین به سبب خشکی خاک و یا اتصال کوتاه کابل‌ها به سبب وضعیت بسیار خیس زمین می‌باشد. معمولاً مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری نقاط داده‌ای اشتباه در مقایسه با نقاط داده‌ای مجاور خیلی بزرگتر یا خیلی کوچکتر است. بهترین روش برای رسیدگی به این قبیل نقاط اشتباه، از قلم انداختن آن‌ها می‌باشد؛ به طوری که هیچ تأثیری در مدل به‌دست‌آمده نداشته باشد. در نرم افزارهای مورد استفاده در این پژوهش این امکان وجود دارد که نوفه‌های قابل ملاحظه را حذف و یا کاهش داد. بدین منظور نوفه‌ها را قبل از شروع فرآیند مدل‌سازی دوبعدی می‌توان به صورت دستی از مجموعه داده‌ها حذف کنیم و یا تغییرات آن‌ها را نسبت به داده‌های مجاور هم کار کرد.



شکل ۴-۴: شیوه نشان دادن داده‌های مقاومت‌ویژه (در امتداد پروفیل DD-Data3) به منظور حذف یا کاهش قابل ملاحظه نوفه‌ها در نرم‌افزار Res2dinv

۷-۴ تحلیل و بررسی نتایج برداشت‌های ژئوفیزیکی در منطقه مورد

مطالعه

همانطوری که در ابتدای فصل گفته شد، برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در قالب ۱۰ پروفیل با استفاده از آرایه دو قطبی- دو قطبی انجام شد. جهت تفسیر بهتر پروفیل‌های ژئوفیزیک موقعیت این پروفیل‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه مشخص شد و موقعیت گسل‌ها و خطواره‌ها نیز بر روی تصویر مشخص گردید (شکل ۴-۵). در این تحقیق به تفسیر کمی مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون برای برداشت داده‌ها با آرایه دو قطبی-دو قطبی ارائه خواهد شد. وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP این امکان را ایجاد می‌کند که موقعیت دقیق بی‌هنجاری‌ها را تعیین کنیم. این روش وارون‌سازی مقادیر به صورت وارون‌سازی هموار به کمک نرم‌افزار RES2DINV انجام می‌شود.

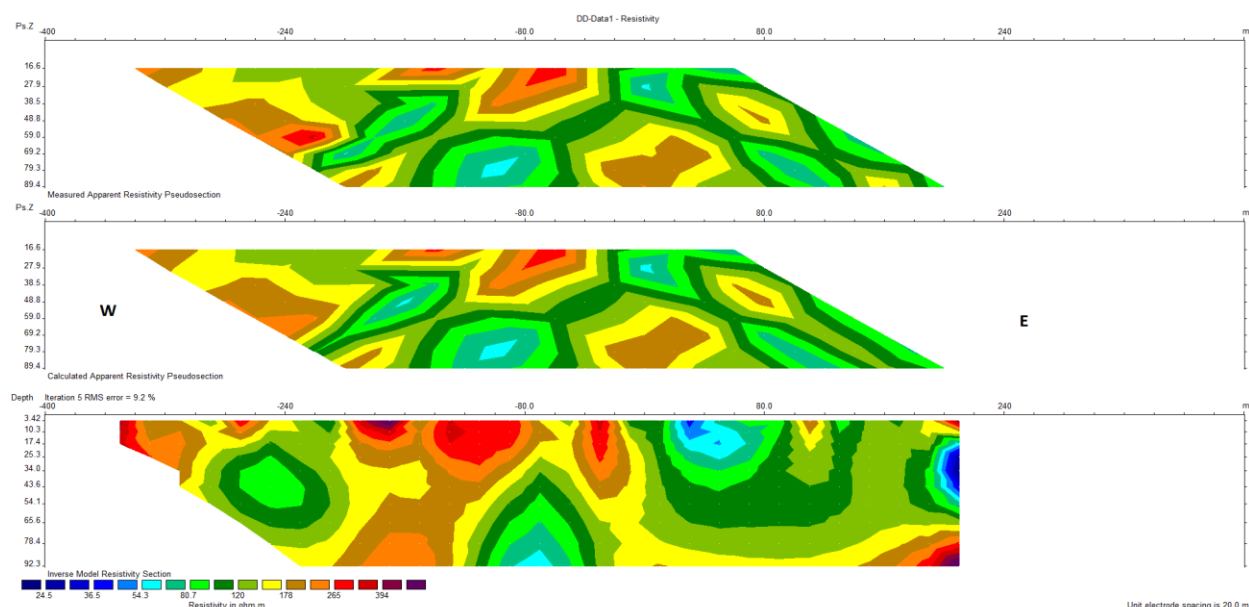
در آخر، مقطعی که از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و IP بدست می‌آید، در هر پروفیل به صورت جداگانه انجام می‌شود و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی تفسیرهای لازم ارائه خواهد شد.



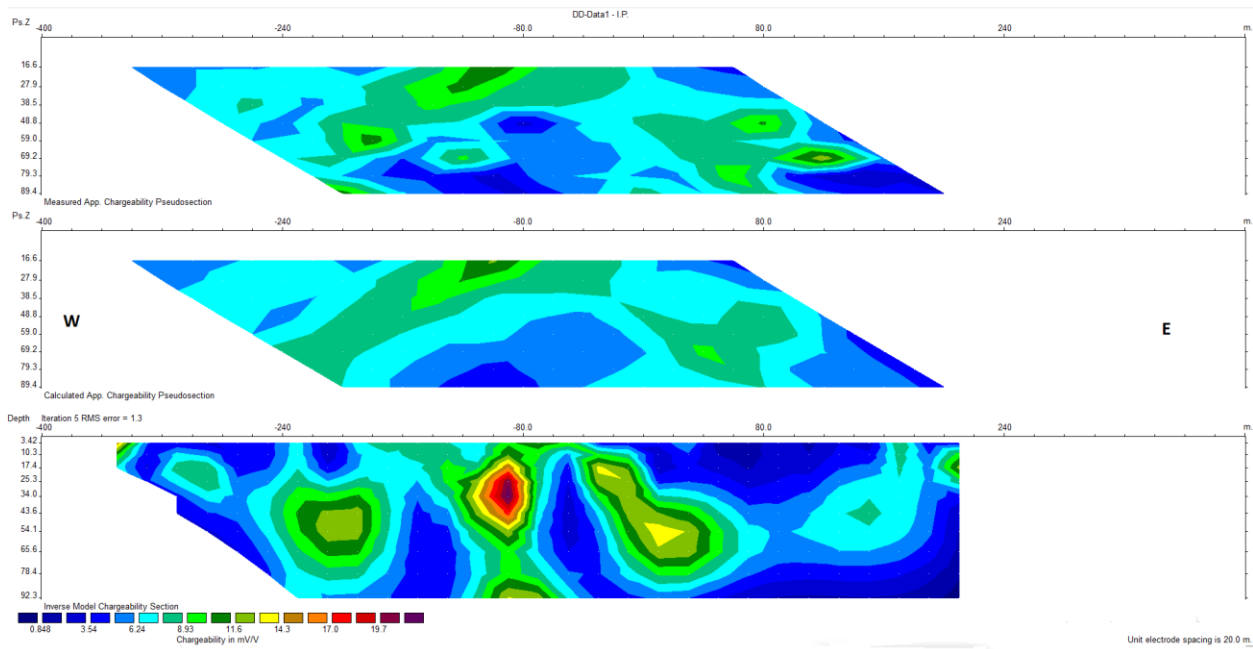
شکل ۴-۵: تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه همراه با محل شکستگی‌ها و خطواره‌ها

۴-۷-۱ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل DD-Data1

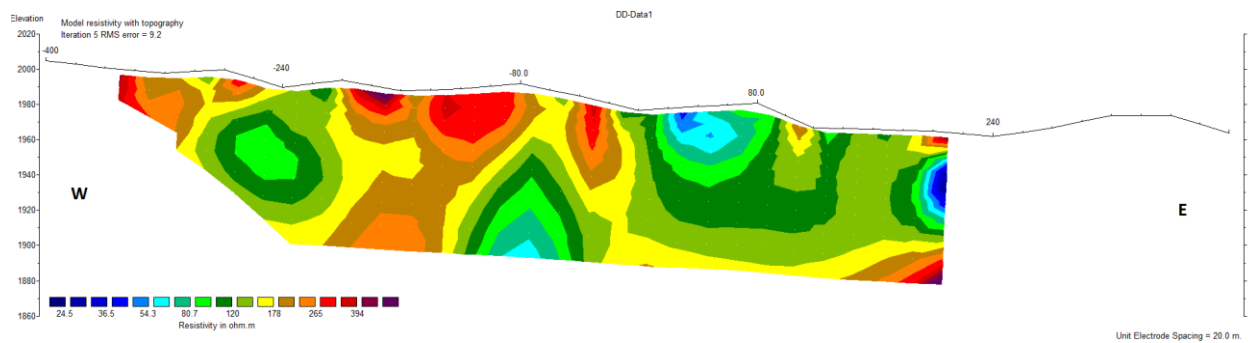
پروفیل DD-Data1 با طول ۷۹۹ متر، اولین پروفیل برداشت شده در در محدوده اکتشافی قانون روی واحد سنگی تراکی بازالیت می باشد. فاصله نقاط برداشت شده در امتداد همین پروفیل ۴۰ متر و از گام یک تا هشت بوده است و جمعاً شامل ۸۸ نقطه که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی ثانیه اندازه گیری شده است. شکل های (۴-۶) و (۴-۷) به ترتیب شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت-ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون مربوط به پروفیل DD-Data1 را نشان می دهد. لازم به ذکر می باشد؛ که برای پروفایل های بعدی به دلیل رعایت اختصار از نشان دادن شبه مقاطع صرف نظر شده است. همچنین مقطع های دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل به همراه توپوگرافی در شکل های (۴-۸) و (۴-۹) آورده شده است. خطای RMS ناشی از مدل سازی داده های این خط برداشت با تعداد ۵ مرحله تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه الکتریکی برابر با ۹/۲ درصد و برای مدل بارپذیری برابر با ۱/۴ درصد است.



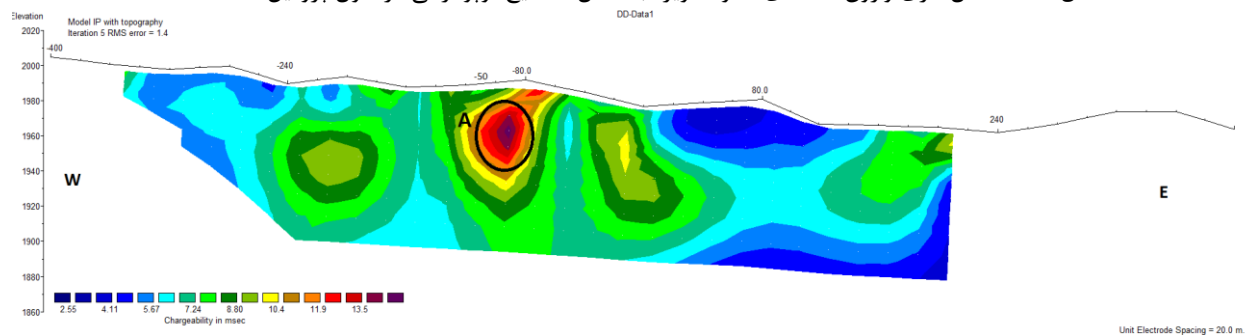
شکل ۴-۶: شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون در طول پروفیل DD-Data1



شکل ۴-۷: شبه مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون در طول پروفیل DD-Data1



شکل ۴-۸: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data1



شکل ۴-۹: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data1

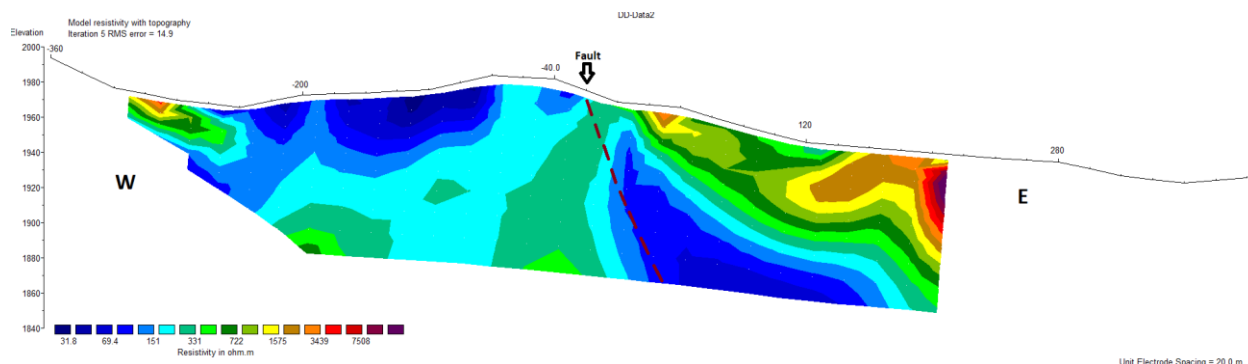
با توجه به موقعیت قرارگیری پروفیل DD-Data1 در نقشه زمین شناسی کانی های سازنده در واحد تراکی بازالتی شکل گرفته است. انتظار می رود زون هایی که دارای بی هنجاری دارای مناطقی با مقاومت ویژه متوسط تا بالا و با

بارپذیری نسبتاً بالا مشخص شوند. با توجه به اینکه مقاومت ویژه کانی‌های مس نسبتاً پایین می‌باشد؛ ولی نباید این انتظار را داشت که مناطق بی‌هنجار مقاومت ویژه پایینی داشته باشد چون در داخل رگه‌ها و رگچه‌ها در سنگ میزبان مقدار کانی‌های مس به آن صورت نیست که در پاسخ مقاومت ویژه موثر واقع شود، به همین علت مناطقی که مقاومت ویژه متوسط تا بالا و بارپذیری بالایی دارند، به عنوان بی‌هنجاری در نظر گرفته شده است. فاصله الکترودی نشان داده شده در این پروفیل ۲۰ متر می‌باشد علت اینکه فاصله الکترودی مورد استفاده در نرم‌افزار به ۲۰ متر کاهش پیدا کرده است مربوط به تغییرات شدید داده‌ها به ویژه در قسمت سطحی است. به این صورت که با کاهش فاصله الکترودی به نصف فاصله الکترودی سبب می‌شود که خطای RMS نسبت به حالتی که فاصله الکترودی ۴۰ متر است کاهش پیدا کند. این تغییر فاصله الکترودی برای تمامی پروفیل‌ها به دلایلی که در بالا گفته شده، صورت گرفته است. همانطور که در مقطع بدست آمده از مدل‌سازی وارون بارپذیری (شکل ۴-۹) مشاهده می‌شود یک زون (زون A) با بارپذیری نسبتاً بالا (در حدود ۱۳ میلی‌ثانیه) که در بین ایستگاه ۵۰- تا ۸۰- دیده می‌شود از عمق ۲۰ متری شروع شده و تا عمق ۶۰ متر ادامه دارد. حداکثر بارپذیری برای این بی‌هنجاری به عمق حدود ۳۰ متری در زیر ایستگاه ۷۰- مرتبط است؛ که به ۱۵ میلی‌ثانیه می‌رسد. مقادیر مقاومت ویژه برای این زون تا حدودی تعیین کننده بی‌هنجاری در این قسمت می‌باشد؛ زیرا همانطور که ذکر شد مناطقی که دارای مقاومت- ویژه متوسط به بالا می‌باشند می‌تواند وجود مناطق بی‌هنجاری را نشان دهد؛ که می‌تواند به کانی‌سازی پراکنده در سنگ میزبان با جنس تراکی‌بازالت مرتبط باشد. علت بارپذیری کمتر نواحی ایستگاه‌های صفر تا ۱۸۰ می‌تواند مربوط به آبرفت‌هایی باشد که بر روی واحد آندزیتی قرار گرفته است.

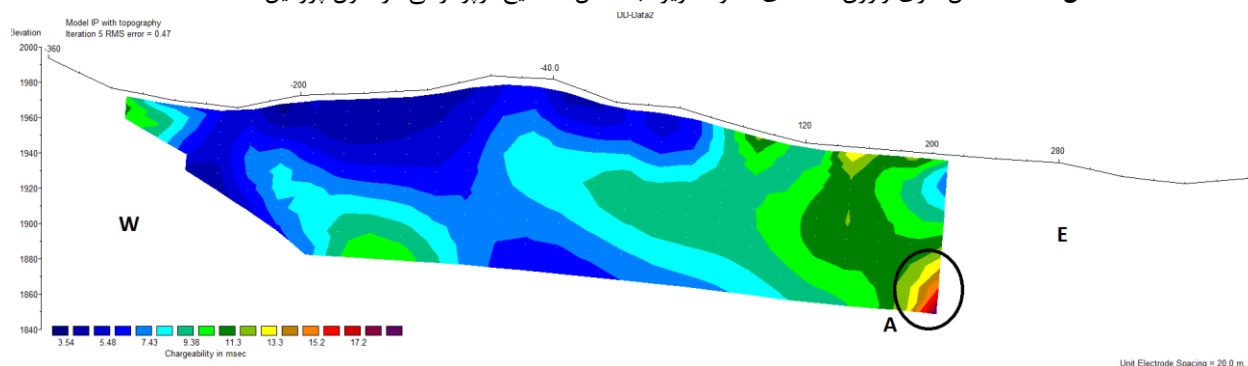
۴-۷-۲ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل DD-Data2

پروفیل DD-Data2 با طول ۷۶۰ متر و امتداد شرقی-غربی، با فاصله الکترودی ۴۰ متر و جمعاً شامل ۸۰ نقطه می‌باشد. شکل‌های (۴-۱۰) و (۴-۱۱) مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری بدست آمده از مدل‌سازی وارون برای این پروفیل به همراه توپوگرافی را نمایش می‌دهد. خطای RMS ناشی از مدل‌سازی داده‌های این خط

برداشت با تعداد ۵ مرحله تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه الکتریکی برابر ۱۴/۹ درصد و برای مدل بارپذیری برابر ۰/۴۷ درصد است.



شکل ۴-۱۰: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data2



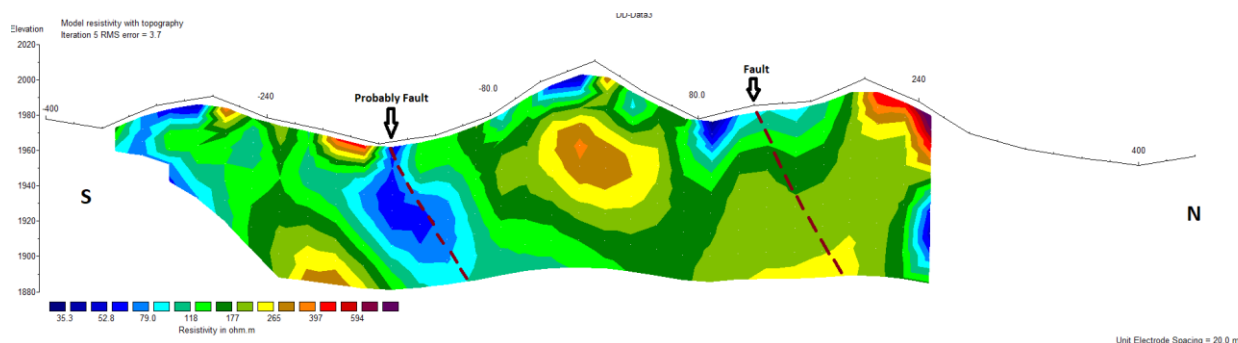
شکل ۴-۱۱: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data2

همانطور که از شکل های (۴-۱۰) و (۴-۱۱) ملاحظه می شود در نقشه بارپذیری این پروفیل یک بی هنجاری کوچکی (زون A) در زیر ایستگاه ۲۰۰ که بار پذیری آن به ۱۹ میلی ثانیه هم می رسد؛ از عمق ۶۰ متری شروع شده و تا عمق ۱۰۰ متری ادامه دارد. این بی هنجاری در مقطع مقاومت ویژه نیز دارای مقاومت ویژه نسبتاً پایین تا متوسط می باشد. با توجه به بارپذیری بالا و مقاومت ویژه نسبتاً پایین تا متوسط احتمال کانی سازی از نوع توده ای و یا همراه با دگرسانی بیشتری در این قسمت وجود دارد. لازم به ذکر است که با توجه به وجود این بی هنجاری در کناره مقطع نیاز به بررسی و اجرای برداشت بیشتر یا در محدوده وسیع تری در این قسمت می باشد. نواحی با

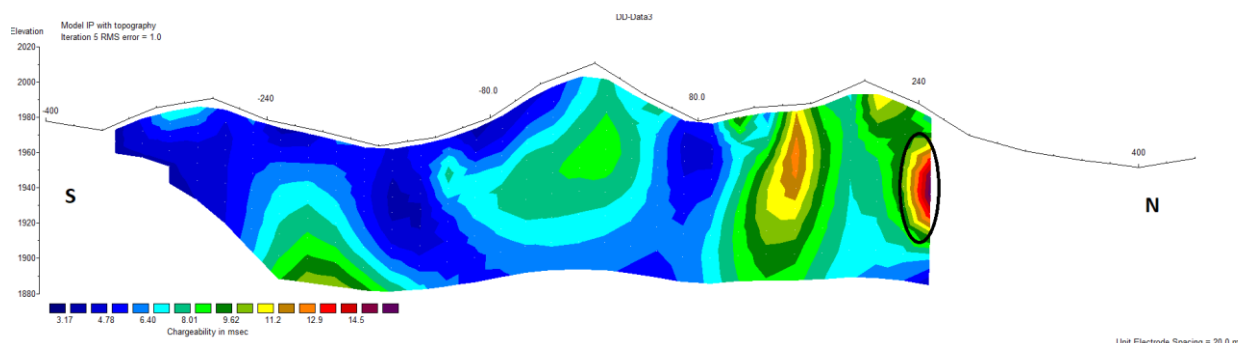
بارپذیری کم به دلیل آبرفتی بوده منطقه است که در مسیر آبراهه می باشد. از ایستگاه ۲۰- احتمال یک شکستگی یا گسل در منطقه وجود دارد که در شکل (۴-۵) نیز محل این خطواره مشخص شده است.

۴-۷-۳ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل DD-Data3

پروفیل DD-Data3 با طول ۸۲۹ متر و امتداد شمالی- جنوبی و فاصله الکترودی ۴۰ متری می باشد. این پروفیل جمعاً شامل ۹۷ نقطه است. شکل های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون برای این پروفیل به همراه توپوگرافی را نمایش می دهد. خطای RMS ناشی از مدل سازی داده های این خط برداشت با تعداد ۵ مرحله تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه الکتریکی برابر ۳/۷ درصد و برای مدل بارپذیری برابر ۱ درصد است.



شکل ۴-۱۲: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data3

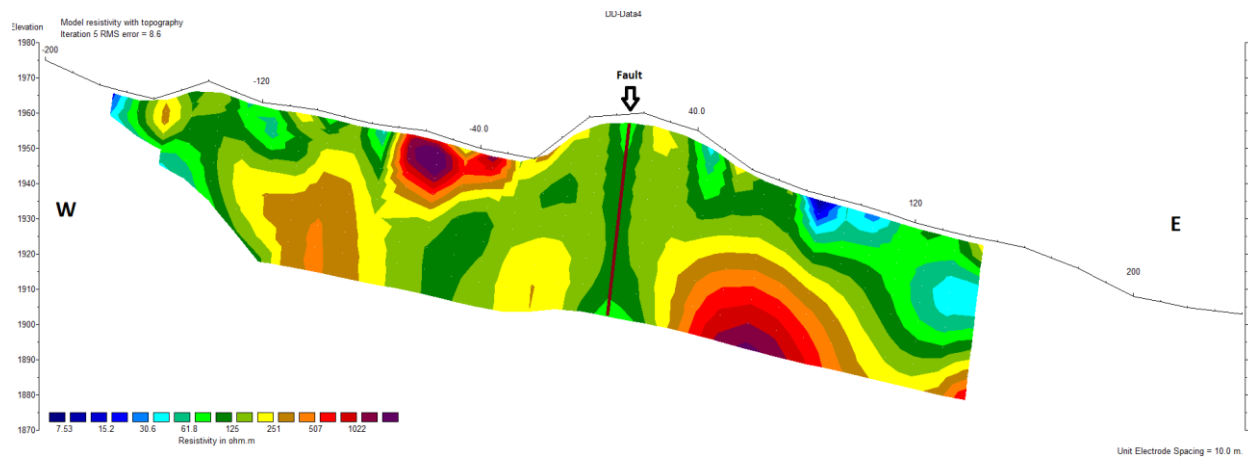


شکل ۴-۱۳: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data3

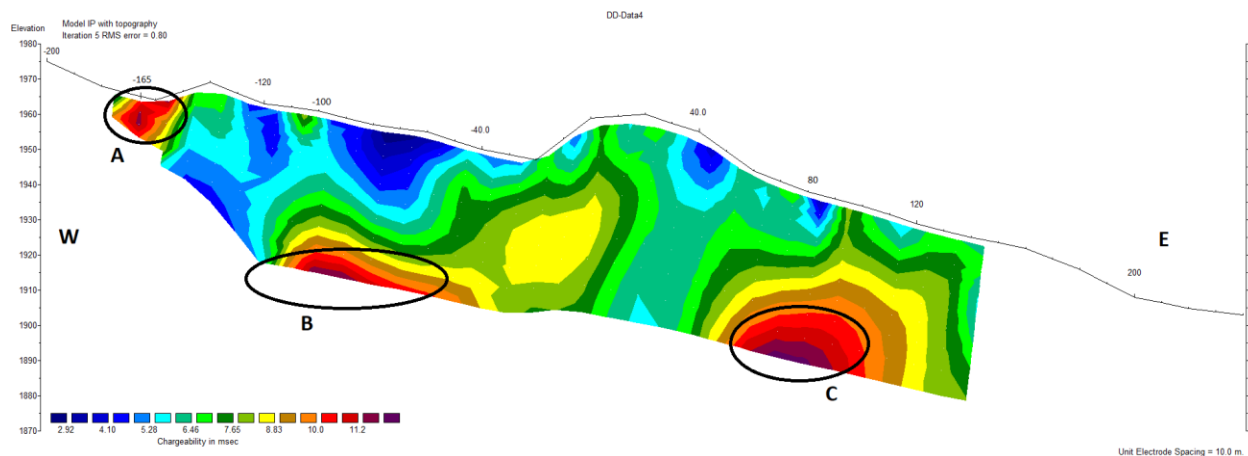
در شکل (۴-۱۳) همانطور که مشخص شده است یک بی‌هنجاری (زون A) با بار پذیری بالای ۱۴/۵۰ در زیر ایستگاه ۲۴۰ واقع شده است. که از عمق ۴۰ متری شروع شده و تا عمق ۸۰ متری ادامه دارد؛ بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون در زیر ایستگاه ۲۲۰ به ۱۶ میلی‌ثانیه می‌رسد. در مقطع مقاومت‌ویژه هم بی‌هنجاری ذکر شده دارای مقاومت‌ویژه پایینی می‌باشد که این نشان می‌دهد که احتمالاً بی‌هنجاری از نوع توده‌ای و یا همراه هوازدگی باشد. همچنین لازم به ذکر است؛ در مقطع مقاومت‌ویژه نیز در قسمت انتهایی پروفیل (از ایستگاه ۲۰۰ تا ایستگاه ۲۵۰) بی‌هنجاری دیده می‌شود که در مرکز آن مقدار مقاومت‌ویژه به ۶۰۰ اهم متر می‌رسد که احتمالاً می‌تواند به دلیل وجود سنگ‌های آهکی از جمله قلوه‌های کنگلومرایی و یا ماسه‌های آهکی در سطح زمین باشد. مقدار بارپذیری متوسط در این بی‌هنجاری تاییدی بر وجود سنگ‌های آهکی در بخش سطحی می‌باشد. به علاوه یک گسل احتمالی نیز بر اساس نتایجی که از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در امتداد این پروفیل بدست آمده؛ شناسایی شد. محل این گسل بر روی مدل مقاومت‌ویژه با خط‌چین مشخص شده است محل این گسل بر روی مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۱۲) با خط‌چین مشخص شده است همچنین در ایستگاه ۱۲۰ نیز محل یک شکستگی در روی تصویر ماهواره‌ای (شکل ۴-۵) دیده می‌شود.

۴-۷-۴ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل DD-Data4

پروفیل DD-Data4 با طول حدود ۴۴۵ متر و با فاصله‌ی الکترودی ۲۰ متر شامل ۱۰۴ نقطه می‌باشد و دارای امتداد شرقی- غربی است. در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) همانطور که مشاهده می‌شود خطای RMS ناشی از مدل‌سازی وارون برای داده‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری به ترتیب ۸/۶ و ۰/۸ در تکرار پنجم است. در نقشه‌ی بارپذیری (شکل ۴-۱۵) همانطور که مشخص شده است در قسمت‌های ابتدایی، مرکزی و انتهایی نواحی با بارپذیری بالاتری نسبت به سایر قسمت‌های پروفیل دیده می‌شود.



شکل ۴-۱۴: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data4



شکل ۴-۱۵: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data4

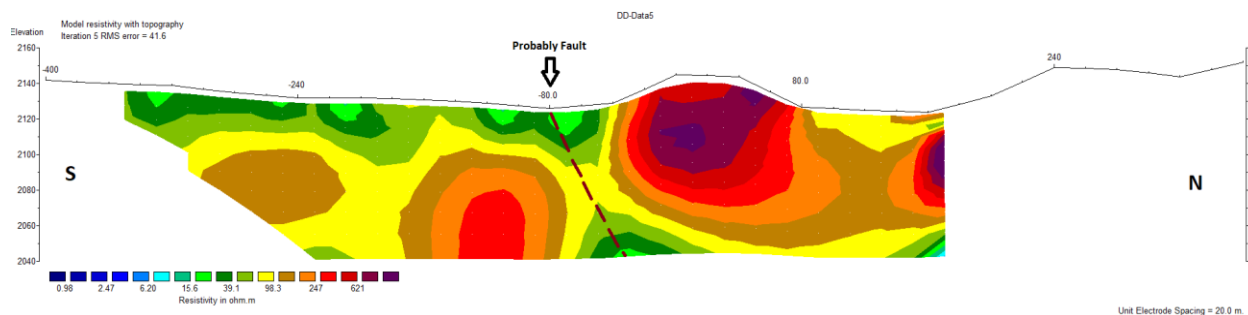
همانطور که در شکل (۴-۱۵) مشخص شده است در قسمت ابتدایی پروفیل بی هنجاری اول (زون A) با بارپذیری بیش از ۱۰ میلی ثانیه دیده می شود که از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۳۰ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بار پذیری در مرکز این زون با مقدار ۱۱/۵۰ یعنی در زیر ایستگاه ۱۶۵- واقع شده است. این بی هنجاری با مقادیر متوسط مقاومت ویژه مطابقت دارد زیرا که در سطح به دلیل شکستگی ها و هوازدگی های سنگ، مقاومت ویژه پایین تر نشان داده می شود و می تواند نشان دهنده کانی سازی توده ای و یا همراه با دگرسانی باشد. بی هنجاری دوم (زون B) با مقدار بارپذیری بیش از ۱۰ میلی ثانیه از عمق ۶۵ متری شروع شده و تا عمق ۷۰ متری ادامه دارد و در بین ایستگاه های ۶۰- تا ۱۱۰- واقع شده است. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون با مقدار بارپذیری ۱۱/۵۰

میلی ثانیه در زیر ایستگاه ۱۰۰- می باشد. این بی هنجاری مانند بی هنجاری اول با مقادیر مقاومت ویژه متوسط منطبق است با این تفاوت که این بی هنجاری در عمق بیشتر صورت گرفته و اینکه گسترش افقی بیشتری نسبت به بی هنجاری اول دارد در نتیجه احتمال کانی سازی در این بی هنجاری بیشتر است.

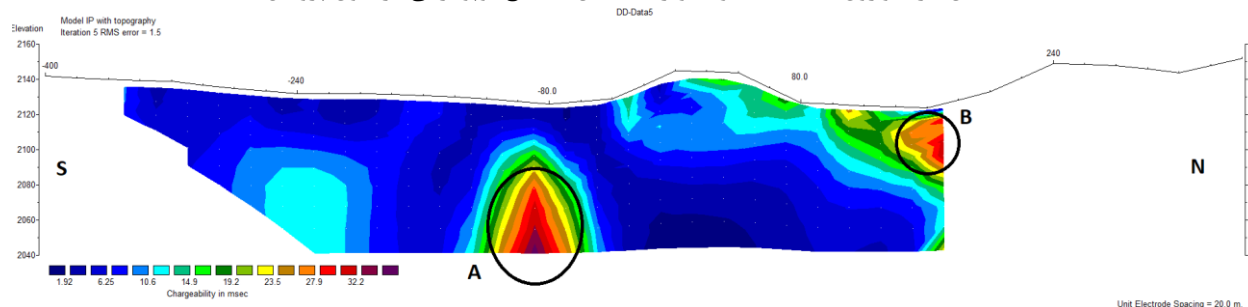
بی هنجاری سوم (زون C) با مقدار بارپذیری بیش از $10/50$ میلی ثانیه از عمق ۵۰ متری شروع شده و تا عمق ۷۰ متری ادامه دارد و در بین ایستگاه های ۶۰ تا ۱۰۰ شرقی واقع شده است. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون با مقدار بارپذیری ۱۲ میلی ثانیه در زیر ایستگاه ۸۰ می باشد. با توجه به اینکه زون نام برده در مقطع مقاومت ویژه دارای مقاومت ویژه بالایی می باشد میتواند ناشی از کانی سازی پراکنده در سنگ میزبان از جنس تراکی بازالت باشد. بی هنجاری سوم در مقایسه با بی هنجاری های قبل دارای مقدار مقاومت ویژه بیشتری نیز می باشد و این ناشی از آن است که عیار ماده معدنی در اندازه ای نبوده است که بتواند پاسخ مقاومت ویژه را کاهش دهد. همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری ایستگاه های برداشت ژئوفیزیکی در نقشه زمین شناسی و توپوگرافی منطقه و محل پروفیل DD-Data4 بر روی این نقشه یک گسل در نزدیکی ایستگاه ۱۰ شرقی وجود دارد که در مدل مقاومت ویژه هم نمایان شده است که می تواند به عنوان یک کانال هدایت محلول گرمایی در منطقه باشد.

۴-۷-۵ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل DD-Data5

پروفیل DD-Data5 با طول ۷۶۱ دارای امتداد شمالی- جنوبی بوده شامل ۸۰ نقطه می باشد. شکل های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) مدل سازی وارون دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود خطای RMS مقاومت ویژه برابر $41/6$ درصد و برای بارپذیری برابر $1/5$ درصد می باشد. اصلی ترین دلیل آن که خطای RMS برای مدل مقاومت ویژه بیشتر است؛ تغییرات زیادی است که در مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده در طول پروفیل DD-Data5 صورت گرفته است، همچنین خطای RMS کمتر که برای مدل بارپذیری ایجاد شده است به علت تغییرات کمتر بارپذیری اندازه گیری شده در طول این پروفیل می باشد.



شکل ۴-۱۶: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data5



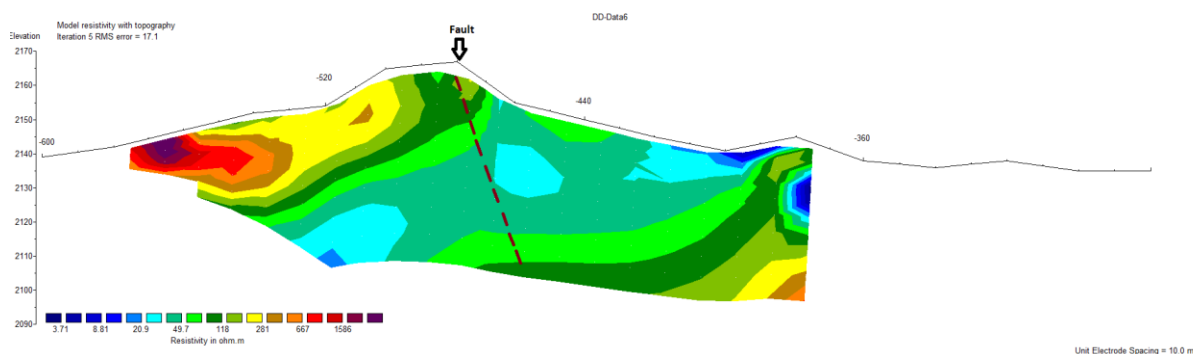
شکل ۴-۱۷: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data5

نتایجی که از مدل سازی وارون داده های بارپذیری بدست آمده به این صورت است که، زون های A و B به عنوان نواحی احتمالی بی هنجار مشخص شده اند (شکل ۴-۱۷). بی هنجاری A که دارای بارپذیری بیش از ۳۳ میلی ثانیه، از ایستگاه ۶۰ تا ۱۲۰- شمالی است؛ که از عمق ۶۰ متری شروع شده و تا عمق ۱۰۰ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این بی هنجاری در عمق حدود ۹۰ متری در زیر ایستگاه ۷۰- شمالی به ۳۶ میلی ثانیه می رسد. در مقطع مقاومت ویژه نیز این بی هنجاری دارای مقاومت ویژه بالا (بالای ۳۰۰ اهم متر) بوده که احتمالاً به خاطر ماهیت سنگ میزبان از جنس آندزیت و یا آندزیت بازالت در این قسمت باشد. به همین دلیل می توان نتیجه گرفت که کانی سازی بیشتر به حالت پراکنده و افشان صورت گرفته است. بی هنجاری B دارای مقدار بارپذیری بیش از ۲۸ میلی ثانیه، از ایستگاه ۱۴۰ تا ۱۷۰ شمالی است؛ که از عمق ۲۰ متری شروع شده و تا عمق ۵۰ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این بی هنجاری در عمق ۴۰ متری در زیر ایستگاه ۱۷۰ در کناره ی مقطع به ۳۲ میلی ثانیه می رسد. در مقطع مقاومت ویژه نیز این بی هنجاری همانند بی هنجاری قبل دارای مقاومت ویژه بالا (بالای ۶۰۰ اهم متر) بوده که احتمالاً به دلیل سنگ میزبان از جنس آندزیت و یا

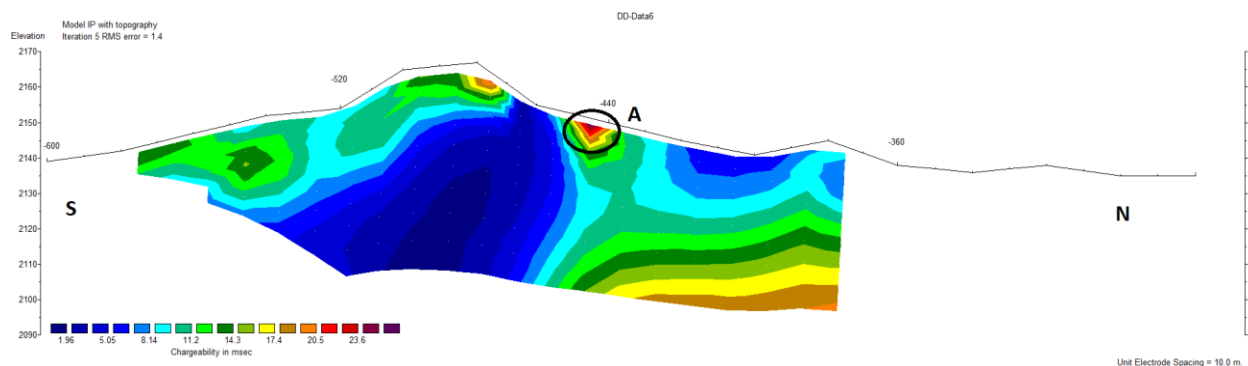
آندزیت بازالت باشد. برای قیاس بی‌هنجاری B نسبت به بی‌هنجاری A امکان دارد به دلیل مقاومت‌ویژه کمتر کانی‌سازی که در بی‌هنجاری A اتفاق افتاده است، با عیار بالاتر به صورت پراکنده در سنگ میزبان از جنس آندزیت بازالت صورت گرفته باشد. بر مبنای نتایجی که از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه حاصل شده است، یک گسل احتمالی در نزدیکی ایستگاه ۸۰- قابل رویت است؛ که محل آن بر روی مدل مقاومت‌ویژه با خط‌چین مشخص شده است و می‌تواند در ارتباط با با کانی‌سازی باشد. همچنین قرارگیری زون بی‌هنجاری A در نزدیکی گسل احتمالی، احتمال گسترش این زون را در اعماق بیش از ۱۰۰ متر وجود دارد.

۴-۷-۶ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل DD-Data6

پروفیل DD-Data6 با طول ۳۲۰ متر دارای امتداد شمالی-جنوبی می‌باشد. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۵۵ است. شکل‌های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) مدل‌سازی وارون دوبعدی مقاومت-ویژه و بارپذیری را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود خطای RMS مقاومت‌ویژه برابر ۱۷/۱ و برای بارپذیری برابر ۱/۴ می‌باشد.



شکل ۴-۱۸: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data6

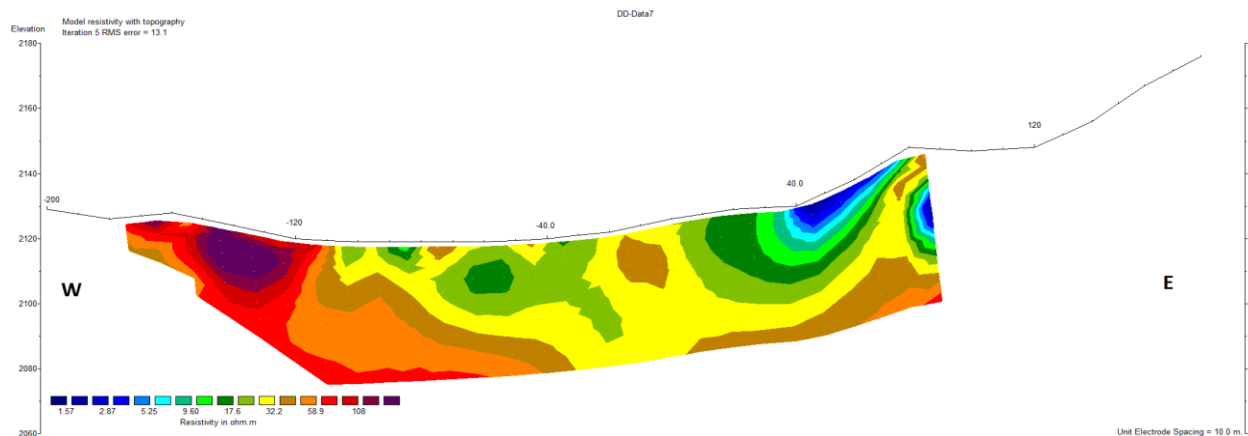


شکل ۴-۱۹: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data6

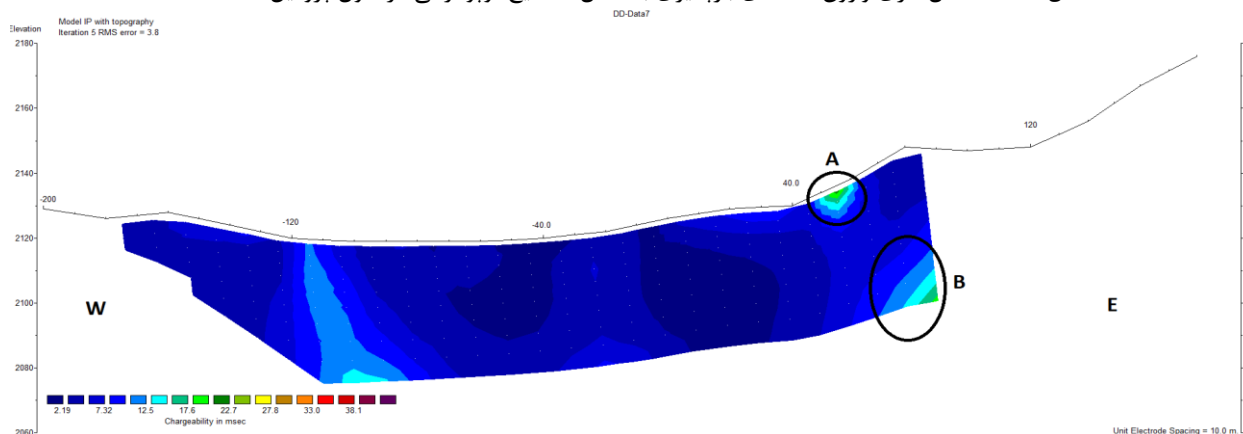
با توجه به نتایجی که از مدل سازی وارون داده های بارپذیری برداشت می شود، زون A به عنوان نواحی احتمالی بی هنجار نشان می دهد. بی هنجاری A با بارپذیری بیش از ۲۰ میلی ثانیه، از ایستگاه ۴۵۰- تا ۴۴۰- شمالی واقع شده است؛ که از سطح زمین تا عمق ۱۰ متری ادامه دارد. بالاترین مقداری که برای بارپذیری در این زون وجود دارد در مرکز آن در عمق حدود ۲ متری در زیر ایستگاه ۴۴۵- شمالی به ۲۵ میلی ثانیه ثبت شده است. در مقطع مقاومت ویژه نیز این بی هنجاری دارای مقاومت ویژه متوسط (در حدود ۹۰ اهم متر) بوده که احتمالاً دلیلی بر وجود دگرسانی های هماتیتی باشد. احتمال می رود که در این زون گستردگی و عیار ماده معدنی به صورتی نبوده است که پاسخ مقاومت ویژه کاهش دهد؛ به همین دلیل کانی سازی که در این زون اتفاق افتاده اکثراً به صورت سولفیدی پراکنده صورت گرفته است. با توجه به عکس ماهواره ای (شکل ۴-۵) در قسمت وسط پروفیل نیز یک شکستگی در منطقه مشاهده می شود.

۴-۷-۷ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل DD-Data7

پروفیل DD-Data7 با طول ۳۸۰ متر دارای امتداد شرقی-غربی می باشد. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۷۷ نقطه است. شکل های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) مدل سازی وارون دوبعدی مقاومت-ویژه و بارپذیری را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود خطای RMS مقاومت ویژه برابر ۱۳/۱ و برای بارپذیری برابر ۳/۸ می باشد.



شکل ۴-۲۰: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data7



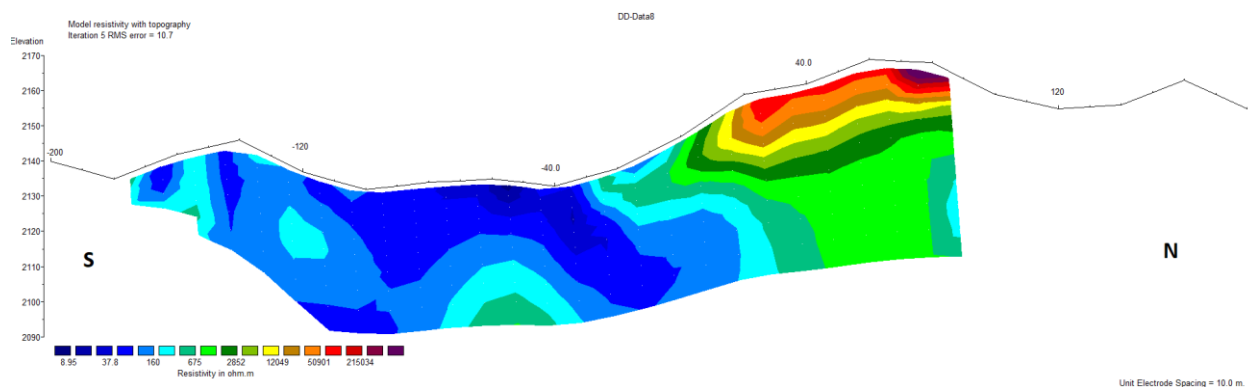
شکل ۴-۲۱: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data7

نتایجی که از مدل سازی وارون داده های بارپذیری حاصل شده است، زون های A و B به عنوان نواحی احتمالی بی هنجار نشان می دهد. بی هنجاری A با بارپذیری بیش از ۱۲ میلی ثانیه، از ایستگاه ۵۰ تا ۶۰ شمالی واقع شده است؛ که از سطح زمین تا عمق ۱۰ متری ادامه دارد. بارپذیری در مرکز این زون بیشترین مقدار را دارد که در عمق حدود ۲ متری در زیر ایستگاه ۵۵ شرقی به ۲۳ میلی ثانیه می رسد. در مقطع مقاومت ویژه نیز این بی هنجاری به دلیل آنکه در سطح هوازدگی و شکستگی سنگ ها به مراتب بیشتر از نواحی عمق می باشد دارای مقاومت ویژه پایین (در حدود ۴ اهم متر) است؛ که می تواند ناشی از کانی سازی فلزی متراکم در سنگ میزبان همراه دگرسانی صورت گرفته باشد و اگر بی هنجاری بدون کانی سازی بود می تواند ناشی از رسوبات دانه ریز از نوع رسی باشد. بی هنجاری B با بارپذیری بیش از ۱۳ میلی ثانیه، از ایستگاه ۵۰ تا ۶۰ شمالی واقع شده است؛ که از سطح زمین تا

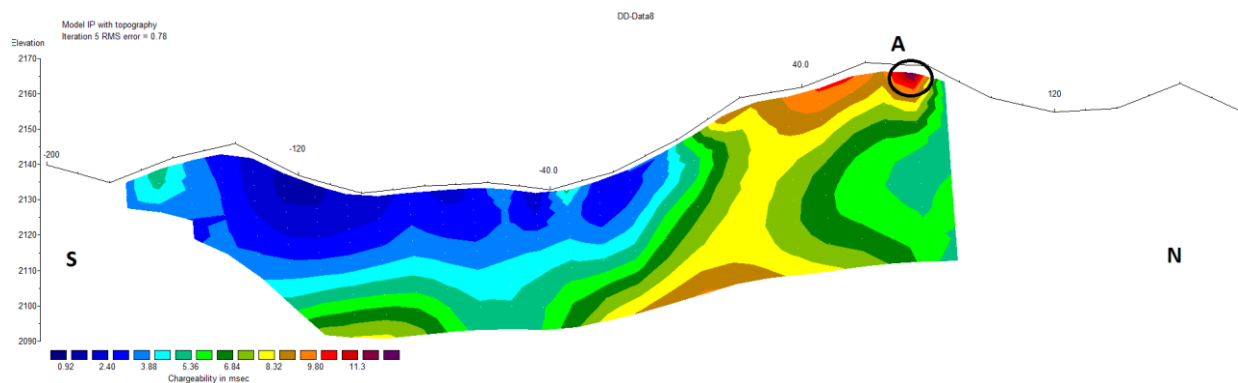
عمق ۱۰ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون در عمق حدود ۲ متری در زیر ایستگاه ۵۵ شمالی به ۱۸ میلی‌ثانیه می‌رسد. در مقطع مقاومت‌ویژه نیز این بی‌هنجاری به این علت که در عمق صورت گرفته و اینکه در عمق به دلیل آنکه سنگ کمتر هوازده شده و به صورت یکپاچه می‌باشد مقاومت‌ویژه به صورت متوسط به بالا (در حدود ۷۰ اهم‌متر) بوده که احتمال می‌رود به دلیل آن است که کانی‌سازی فلزی پراکنده در سنگ میزبان از جنس آندزیت و یا آندزیت بازالت صورت گرفته باشد.

۴-۷-۸ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل DD-Data8

پروفیل DD-Data8 با طول ۳۸۰ متر دارای امتداد شمالی-جنوبی می‌باشد. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۸۰ نقطه است. شکل‌های (۴-۲۲) و (۴-۲۳) مدل‌سازی وارون دوبعدی مقاومت-ویژه و بارپذیری را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود خطای RMS مقاومت‌ویژه برابر ۱۲/۸ و برای بارپذیری برابر ۰/۸۰ می‌باشد.



شکل ۴-۲۲: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data8

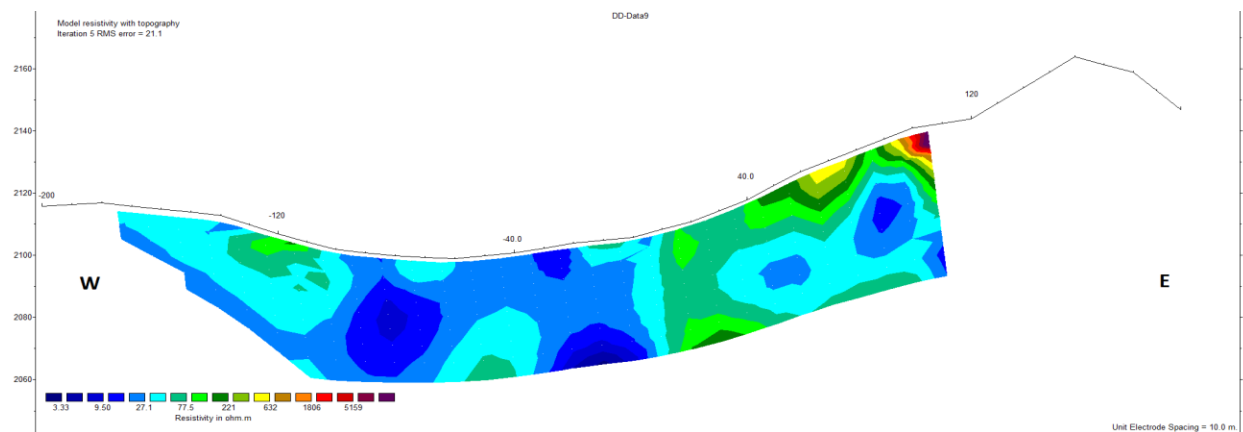


شکل ۴-۲۳: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data8

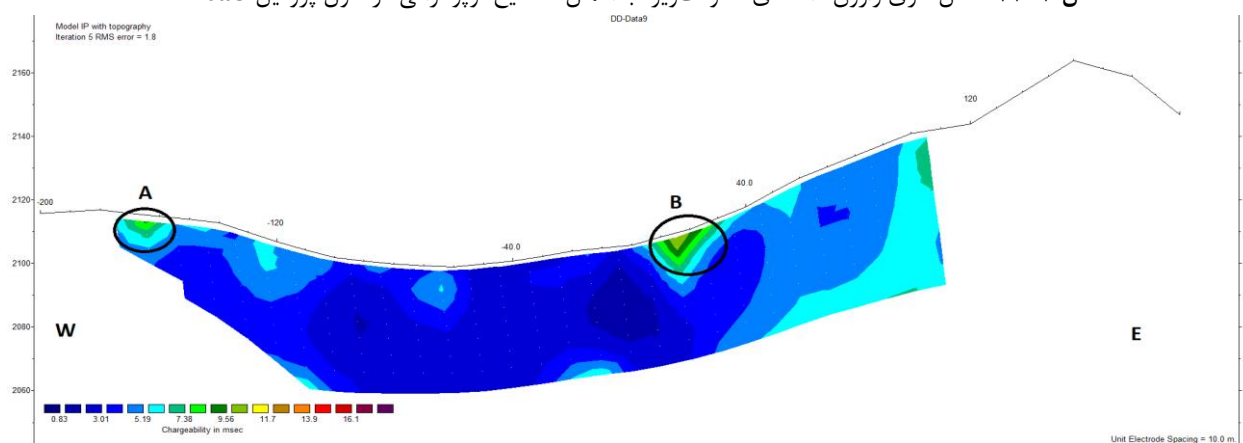
نتایج مدل سازی وارون داده های بارپذیری، زون A را به عنوان نواحی احتمالی بی هنجار نشان می دهد. بی هنجاری A با بارپذیری بیش از ۸ میلی ثانیه، از ایستگاه ۸۰ تا ۹۰ شمالی واقع شده است؛ که از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۶ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون در عمق حدود ۳ متری در زیر ایستگاه ۶۰ شمالی به حدود ۱۲ میلی ثانیه می رسد. در مقطع مقاومت ویژه نیز این بی هنجاری دارای مقاومت ویژه بالایی (بالای ۲۱۵۰۰۰) بوده که می تواند ناشی از کانی سازی فلزی پراکنده در سنگ میزبان از جنس آندزیت در روی سطح زمین باشد. همچنین بارپذیری کم در منطقه ناشی از رسوبات آبرفتی است که پروفیل ۸ روی آن زده شده است.

۴-۷-۹ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل DD-Data9

پروفیل DD-Data9 با طول ۴۰۳ متر دارای امتداد شرقی-غربی می باشد. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۸۷ نقطه که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی ثانیه اندازه گیری شده است. شکل های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) مدل سازی وارون دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود خطای RMS مقاومت ویژه برابر ۲۱/۱ و برای بارپذیری برابر ۱/۸ می باشد.



شکل ۴-۲۴: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data9



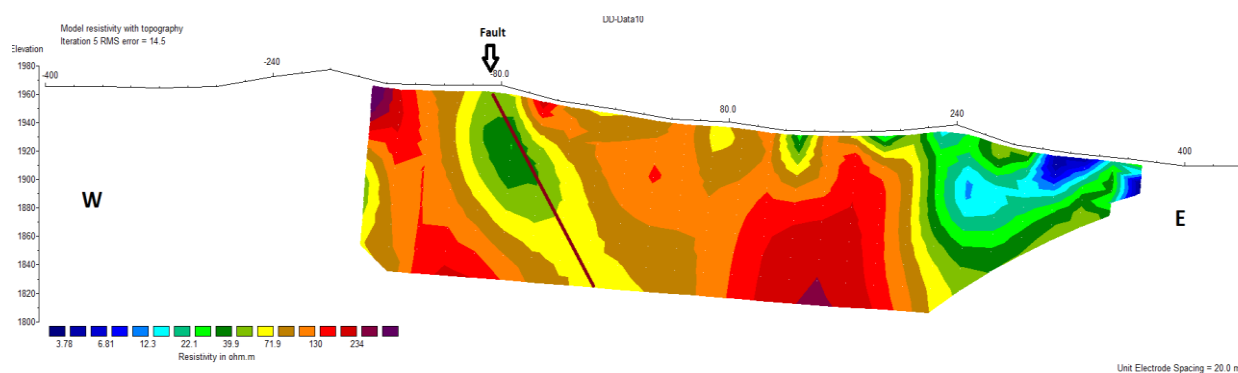
شکل ۴-۲۵: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data9

نتایج مدل سازی وارون داده های بارپذیری، زون A و B را به عنوان نواحی احتمالی بی هنجار نشان می دهد. بی-هنجاری A با بارپذیری بیش از ۷ میلی ثانیه، از ایستگاه ۱۷۰- تا ۱۶۰- غربی واقع شده است؛ که از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۱۰ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون در نزدیکی سطح زمین در زیر ایستگاه ۱۶۵- غربی به حدود ۹/۵۰ میلی ثانیه می رسد. در مقطع مقاومت ویژه نیز این بی هنجاری به دلیل دگرسانی ها و شکستگی های موجود در سطح زمین دارای مقاومت ویژه پایین (در حدود ۵۲ اهم متر) بوده که می تواند ناشی از کانی سازی فلزی متراکم در سنگ میزبان و دگرسانی های موجود در منطقه باشد. بی هنجاری B با بارپذیری بیش از ۹ میلی ثانیه، از ایستگاه ۴۰ تا ۸۰ شمالی واقع شده است؛ که از سطح زمین تا عمق ۱۰ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون در نزدیکی سطح زمین در زیر ایستگاه ۱۶۵- غربی به حدود

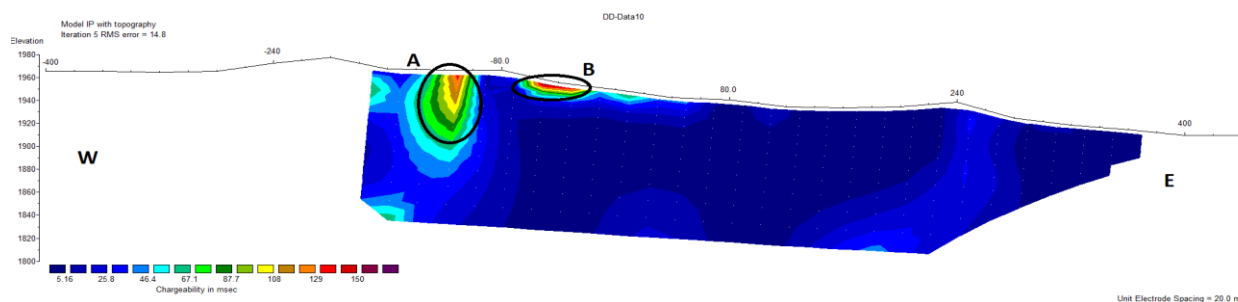
۹/۵۰ میلی ثانیه می‌رسد. در مقطع مقاومت‌ویژه نیز این بی‌هنجاری با مقاومت‌ویژه متوسط (در حدود ۱۴۰ اهم‌متر) مطابقت داشته که می‌تواند ناشی از کانی‌سازی فلزی متراکم یا توده‌ای در سنگ میزبان و وجود دگرسانی‌های موجود در منطقه باشد. بار پذیری پایین در این پروفیل مربوط به رسوبات آبرفتی است زیرا این پروفیل بر روی مسیر آبراهه زده شده است.

۴-۷-۱۰ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل DD-Data10

پروفیل DD-Data10 با طول ۸۰۰ متر دارای امتداد شرقی-غربی می‌باشد. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۴۰ متر است و جمعاً شامل ۸۸ نقطه است. شکل‌های (۴-۲۶) و (۴-۲۷) مدل‌سازی وارون دوبعدی مقاومت-ویژه و بارپذیری را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود خطای RMS مقاومت‌ویژه برابر ۱۴/۵ و برای بارپذیری برابر ۱۴/۸ می‌باشد.



شکل ۴-۲۶: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data10



شکل ۴-۲۷: مدل‌سازی وارون داده‌های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD-Data10

نتایج مدل سازی وارون داده های بارپذیری، زون A و B را به عنوان نواحی احتمالی بی هنجار نشان می دهد. بی- هنجاری A با بارپذیری بیش از ۷۰ میلی ثانیه، از ایستگاه ۱۰۰- تا ۱۳۰- غربی واقع شده است؛ که از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۶۰ متری ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون در نزدیکی سطح زمین در زیر ایستگاه ۱۶۵- غربی به حدود ۹/۵۰ میلی ثانیه می رسد. در مقطع مقاومت ویژه نیز این بی هنجاری با مقاومت- ویژه بالا (در حدود ۱۳۰ اهم متر) مطابقت داشته که از اهمیت این بی هنجاری و عیار مرتبط با کانی سازی می کاهد. این آنومالی می تواند در ارتباط با کانی سازی فلزی پراکنده در سنگ میزبان و وجود دگرسانی های موجود در منطقه باشد. در سطح زمین علاوه بر بی هنجاری A بی هنجاری کوچکی به نام B با بارپذیری بیش از ۸۷ میلی ثانیه، از ایستگاه ۶۰- تا ۲۰- غربی واقع شده است؛ که از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۵ متری ادامه دارد. این بی هنجاری در مقطع مقاومت ویژه با مقادیر مقاومت ویژه بالا (در حدود ۲۳۴ اهم متر) مطابقت دارد که از اهمیت آن کاسته می شود زیرا عیار ماده معدنی اندازه ای نبوده که پاسخ مقاومت ویژه را کاهش دهد. در مقایسه دو بی هنجاری A و B بی هنجاری A گسترش عمقی بیشتر و مقاومت ویژه کمتری نسبت به بی هنجاری B دارد؛ پس به همین دلیل عیار و گستردگی ماده معدنی به صورت پراکنده در بی هنجاری A بیشتر می باشد. همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری ایستگاه های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین شناسی و توپوگرافی منطقه و محل پروفیل DD-Data10 بر روی این نقشه یک گسل در نزدیکی ایستگاه ۸۰- شرقی وجود دارد که در مدل مقاومت ویژه هم نمایان شده است. که ممکن است در ارتباط با کانی سازی باشد.

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات دورسنجی، ژئوفیزیک و نیز پیمایش های سطحی صورت گرفته به نظر می‌رسد این محدوده دارای پتانسیل مناسبی برای اکتشاف کانسار مس محسوب می‌گردد. در این پژوهش برداشت‌هایی ژئوفیزیکی که انجام شده استاز طریق روش‌های مقاومت‌ویژه و IP بوده که با هدف اکتشاف ذخایر مس در منطقه جنوب‌غرب رفسنجان توسط شرکت مهندسی امید انجام گرفته است. توسط نرم افزار RES2DINV مدل‌سازی وارون داده‌های صحرایی برداشت شده با آرایش دوقطبی-دوقطبی انجام شده است و مقاطعی که به دست آمده با هدف تخمین گستره‌ی کانی‌سازی فلزی مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته است. اطلاعاتی که از زمین‌شناسی بدست آمده در دیگر مراحل اکتشاف انجام شده و همچنین نتایج حاصل شده از آن که تا اندازه‌ای در دسترس می‌باشد، برای تفسیر و بررسی مقاطع حاصل از مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده با هدف انجام دقیق‌تر و مناسب‌تر مرحله های بعدی اکتشاف در ادامه ارائه می‌شوند.

(۱) به کار بردن روش های ژئوفیزیکی از جمله روش‌هایی مانند مقاومت ویژه و IP با آرایه دوقطبی-دوقطبی برای کاوش نواحی در عمق مناطق امیدبخش مفید و کاربردی واقع شده و در شناسایی زون های بی-هنجاری احتمالی مرتبط با کانی‌سازی موثر بوده است. با مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل‌سازی حاصل از این دو روش برای نواحی بی‌هنجاری انجام شده است، در مورد عیار و نوع کانی‌سازی (توده‌ای یا پراکنده) می‌توان اظهار نظر نمود.

(۲) به کار بردن روش‌های مقاومت‌ویژه و IP با هدف تجسس زون‌های کانی‌سازی شده تا حد بسیاری می‌تواند بسیار تاثیر گذار باشد اما در برخی موارد برای آن که موقعیت دقیق این زون‌ها را به خصوص در شرایط زمین‌شناسی پیچیده تعیین کنیم؛ ابهاماتی ایجاد می‌کند. به همین خاطر باید از اطلاعاتی نظیر زمین‌شناسی و داده‌های حفاری مورد نیاز به صورت کمکی استفاده کنیم.

۳) نتایجی که از مدل سازی وارون دوبعدی داده های مقاومت ویژه بدست آمده است، گسل های موجود در نقشه زمین شناسی منطقه و چند گسل احتمالی پنهان که مربوط به بی هجاری ها می باشد را آشکار کرده است؛ با اینکه در پیدا کردن موقعیت دقیق این ساختارها و تشخیص همه ی آن ها موثر واقع نشده است. با توجه به ارتباط نزدیک کانی سازی با ساختارهای گسلی و شکستگی ها، تشخیص دقیق این ساختارها از اهمیت بالایی برخوردار است.

۵-۲ پیشنهادات

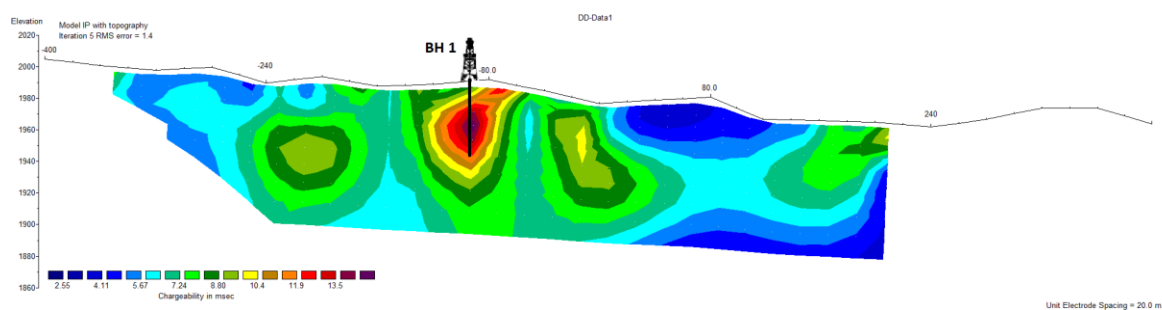
با نتایجی که از مطالعات صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه و تحلیل آن ها بدست آمده است نکات زیر برای کار های بیشتری در رابطه با این پروژه توصیه می شوند:

۱) پیشنهاد می گردد برای آنکه به اطلاعات جامع تر و دقیق تری از محدوده مورد مطالعه دست پیدا کنیم، از روش های دیگری مانند روش SIP به صورت تکمیلی استفاده شود. این روش توانایی جدا کردن کانی های رسی و پیریت از سایر کانی های سولفیدی را داراست. لازم به ذکر است که این تکنیک جدا کردن با استفاده از روش هایی که در این تحقیق به کار رفته؛ شدنی نمی باشد و نیز احتمال این وجود دارد که کانی های رسی حضور داشته و پیریت با کانی های هدف همراه باشد و حتی میتوان گفت بودن پیریت به تنهایی باعث به وجود آمدن بی هجاری های کاذب می شود، بخاطر همین مسائل روش SIP می تواند پارامتر بسیار مهمی در انتخاب نقاط حفاری باشد.

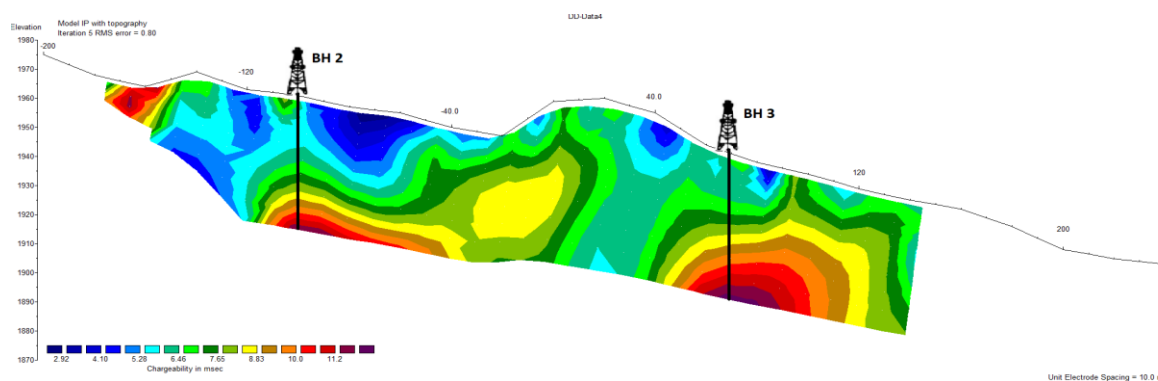
۲) پیشنهاد می شود در محیط هایی که دارای ساختار زمین شناسی پیچیده می باشند؛ عملیات ژئوفیزیکی با فواصل الکترودی کوچک (۵ متر) با هدف برداشت اطلاعات بیشتر و مدل سازی دقیق تر انجام شود.

(۳) پیشنهاد می‌گردد در برداشت‌هایی که با روش‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی صورت گرفته است، از آرایش الکتروودی مستطیلی با هدف شناسایی محدوده کانی‌سازی و تجسس در مشخص کردن موقعیت بی‌هنجاری احتمالی، استفاده شود.

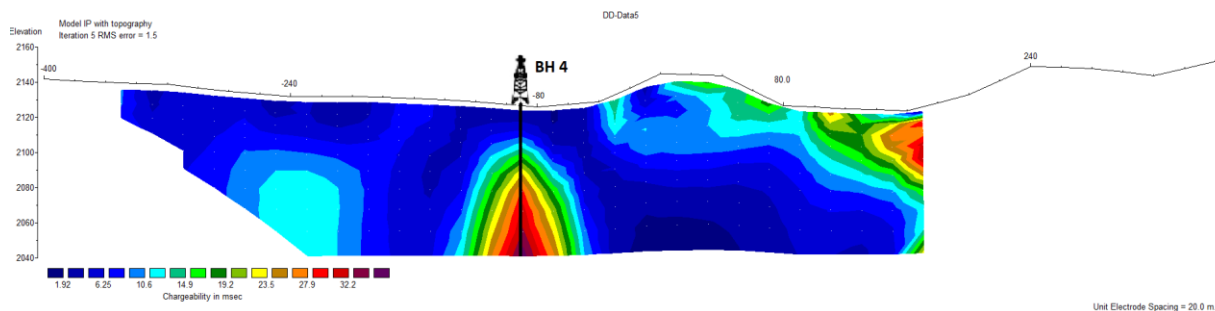
(۴) در آخر، با استفاده از اطلاعاتی که از موقعیت بی‌هنجاری‌های زیرسطحی حاصل از مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و IP وجود دارد پروفیل‌های DD-Data1، DD-Data4، DD-Data5، نقاطی برای حفاری بر روی پروفیل‌های ذکر شده با مختصات و مشخصات ارائه شده در جدول (۵-۱) پیشنهاد می‌شود (شکل‌های (۵-۱) تا (۵-۴)). لازم به ذکر می‌باشد؛ که همه‌ی گمانه‌های حفاری که پیشنهاد شده باید از نوع قائم باشد. همچنین نقاط پیشنهادی مشخص شده توسط کارفرما حفاری شده است و طبق بررسی‌های انجام شده کانی‌سازی مس حتی به صورت مس خالص (Native) در مغزه‌ها دیده می‌شود.



شکل ۵-۱: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD-Data1 همراه با موقعیت گمانه پیشنهادی.



شکل ۵-۲: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD-Data4 همراه با موقعیت گمانه‌های پیشنهادی.



شکل ۳-۵: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD-Data5 همراه با موقعیت گمانه پیشنهادی.

جدول ۱-۵: مشخصات نقاط پیشنهادی برای حفاری های اکتشافی

عنوان پروفیل برداشت	گمانه پیشنهادی	عمق حفاری (m)	موقعیت جغرافیایی (UTM)	مشخصات گمانه های اکتشافی
DD-Data1	BH 1	60	X=390640 Y=3341240	X=390644 Y=3341288
DD-Data4	BH 2	70	X=390950 Y=3340760	X=390660 Y=3340700
DD-Data4	BH 3	70	X=390980 Y=3340760	X=391121 Y=3339584
DD-Data5	BH 4	100	X=388020 Y=3340760	X=388163 Y=3340825

منابع و مأخذ

منابع

- ابراهیمی، س، عرب امیری، ع، بیاری، ه، (۱۳۹۷)، "شواهد کانی سازی مس نوع مانتو در منطقه اسمانو بر اساس ویژگی های کانی شناسی، دگرسانی و میانبر های سیال"، پژوهش های دانش زمین، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دوره ۹، شماره ۴، ص ۶۷.
- استکی، م، (۱۳۹۰)، پایان نامه 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 زیرسطحی ساختگاه سد"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- درزی حاجی، ن، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: "شناسایی گسل های کواترنری با استفاده از تغییرات سطح آب زیرزمینی شمال کلاته خان"، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود.
- ربیعی صادق آبادی، آ، عرب امیری، ع، کامکار روحانی، ا، و ابراهیمی، س، (۱۳۹۶ الف). مطالعات پتروگرافی، دگرسانی، کانه زایی کانسار سرب و روی چومالو، نهمین همایش ملی انجمن زمین شناسی اقتصادی، بیرجند، دانشگاه بیرجند.
- رمضی، ح. ر. (۱۳۹۸) "روش های ژئوالکتریکی کاربردی"، چاپ دوم، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران).
- سلامی شهید، ا، (۱۳۹۰)، پایان نامه ارشد: "مقایسه داده های AST-07XT و AST-07 استر در تعیین کانی شناسی، دگرسانی ها و باطله های معدنی مس پرفیری سرچشمه کرمان"، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز.

صالحی نژاد، ح، احمدی پور ، ح، معین زاده، ح، مرادیان، ع، (۱۳۹۷) "کاربرد شیمی کانی ها در تشخیص شرایط تبلور و محیط زمین ساختی سنگ های دیابازیک منطقه ده ظهیر (غرب رفسنجان)" ، **مجله ی بلور شناسی و کانی شناسی ایران**، سال ۲۷، شماره ۴، ص ۸۰۹.

صالحی نژاد، ح، (۱۳۹۹)، رساله دکترا: "ژئوشیمی و پتروژنز سنگ های نفوذی از راویز تا ده ظهیر در غرب شهرستان رفسنجان (استان کرمان)"، دانشکده علوم بخش زمین شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

صدیقیان، س، (۱۳۸۷) ، پایان نامه ارشد: "پترولوژی ، ژئوشیمی ، ساخت و منشاء جریان های گدازه ای طاقدیس شان آباد، جنوب غرب رفسنجان"، دانشکده علوم بخش زمین شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

قربانی، م . (۱۳۹۷) اکتشاف مس منطقه عباس آباد با مغناطیس سنجی، قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی، **مجموعه مقالات هفدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران**، ص ۹۲۶

قنبری، ه، (۱۳۹۶)، پایان نامه ارشد: "مطالعات زمین شناسی و ژئوفیزیکی کانی سازی مس شریف آباد به روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه جهت تعیین نقاط حفاری، شمال غرب بردسکن"، دانشکده معدن، نفت، ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

موسوی، ح، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی و تفسیر داده های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه به منظور اکتشاف ذخایر مس در منطقه هفت کوه کرمان"، دانشکده معدن، نفت، ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کلاگری، ع، (۱۳۸۹) " **اصول اکتشافات ژئوفیزیکی** ". تبریز، انتشارات دانشگاه تبریز.

محمد زاده، م.، ناصری، آ. و، انصاری، س. (۱۳۹۵) "انطباق پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی برای اکتشاف مس و عناصر همراه در منطقه صاحب دیوان مشگین شهر"، **مجله علوم زمین**، ص ۲۴۷.

محمدی ویژه، م. و. (1392). "مدل سازی و تفسیر داده های قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی به منظور

اکتشاف ذخایر پلی متال در منطقه کبودان"، *مجله اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع*

زیر زمینی، ص ۷۶۵.

مهدوی، ف. (۱۳۸۳). "روش های الکتریکی در اکتشافات ژئوفیزیکی حوضه های رسوبی". تهران:

انتشارات دانشگاه تهران.

وزارت راه و ترابری، (۱۳۹۴)، سازمان نقشه برداری کشور، گزارش نقشه راهها، تهران.

Best, M., Fage, I., & Daigle, R. (2015). "Integrating high resolution resistivity/IP surveying and core measurements over nine known mineral deposits: Yukon, Canada". Near Surface Asia Pacific Conference (p. 48). Waikoloa: Hawaii.

Dey, A., & Morrison, H. (1979). Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped Two Dimensional Structures. **Geophysical Prospecting**, 1, 27, pp.106-136.

Evrard, M., Pirard, E., & Nguyen, F. (2016). "Geophysical investigation of the Pb-Zn deposit of Lontzen, Belgium". Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (p. 378). Denver: Colorado.

Gurin G. V. Tarasov A. V. Il'in Y. T. Titov K. V., (2015), "Application of the Debye decomposition approach to analysis of induced-polarization profiling data (Julietta goldsilver deposit, Magadan Region)", **Russian Geology and Geophysics**, N 56, 1757–1771.

Kearey, p., Brooks, M., & Hill, L. (2002). **An Introduction to Geophysical Exploration**. Oxford: Vol. 1, Third Edition, Blackwell Science Ltd ,oxford,pp. 184.

Kirish, R. (2009). **Groundwater Geophysics**, Vol 1. Second Edition, springer, Heidelberg, pp. 85.

Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H. (2007). **Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies**. Vol.1, First Edition, springer, Heidelberg, pp.205.

- Loke, M.H. and Barker, R.D. (1995). "Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method". **Geophysical Prospecting**, 1, 44, PP. 131-152.
- Loke, M.H., (2004). "Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys". Geotomo Software.
- Mooney, H.M., (1980). "**Handbook of Engineering Geophysics: Electrical Resistivity**", Vol.2, Bison Instruments, Minneapolis, USA, pp. 3-28.
- Reynolds, J. (2011). "**An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**". Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 289-402.
- Roy, K.K., (2008). "**Potential Theory in Applied Geophysics**". Springer, Heidelberg, pp. 651.
- Sasaki, Y. (1992). "Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation". **Geophysical Prospecting**, 4, 40, pp.453-463.
- Seigel, H., Parasnis, D., & Vozzof, K. (2007). "The early history of the induced polarization method" *The Leading Edge*, 26, pp. 312-321.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). "**Applied Geophysics**", Vol 1, second edition, Cambridge University Press, UK, PP.578-596.

Abstract

Identifying and determining the depth and location of mineralization is one of the most important goals of exploration work that can be achieved by using different geophysical methods. The geoelectric method, which includes IP and resistivity, is one of the best methods for detecting sulfide mineralization. Qanun exploration area in the southwest of Rafsanjan city has shown evidence of sulfide copper mineralization on the surface. The area is structurally located in the magmatic zone of Urmia Dokhtar and the host rocks of mineralization are Eocene pyroclastic volcanic rocks with a combination of andesite to andesite basalt, trachy basalt and tuff. Mineralization is observed sporadically within the cavities and veinlet in the host rock and includes the minerals chalcocite, malachite and pure copper.

According to initial geological studies and study of mineralization areas in the region, with the aim of discovering the deep and lateral areas of anomalies, IP and resistivity data acquisition were designed in the form of 10 profiles with dipole-dipole array and electrode distances of 20 and 40 meters. after acquisition, the data were processed by two-dimensional (2D) smooth inversion by RES2DINV software and finally modeling was performed. Then the results of modeling were interpreted using geological surface outcrop information. Studies show that anomalies areas with high chargeability and medium to high resistivity values have been consistent with mineralization. According to geophysical and geological studies, 4 points were proposed for drilling and determination of mineralization depth.

Keywords: Manto type copper, Induced Polarization (IP), Electrical Resistivity, Dipole-dipole array, Qanun, Rafsanjan.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.sc. Thesis in Mineral Exploration

**Exploration of copper resources using geological and
geophysical data in the west of Rafsanjan area**

By: Seyed Ali Hoseini

Supervisor:

Dr. Alireza Arab-Amiri

Dr. Susan Ebrahimi

October 2021

