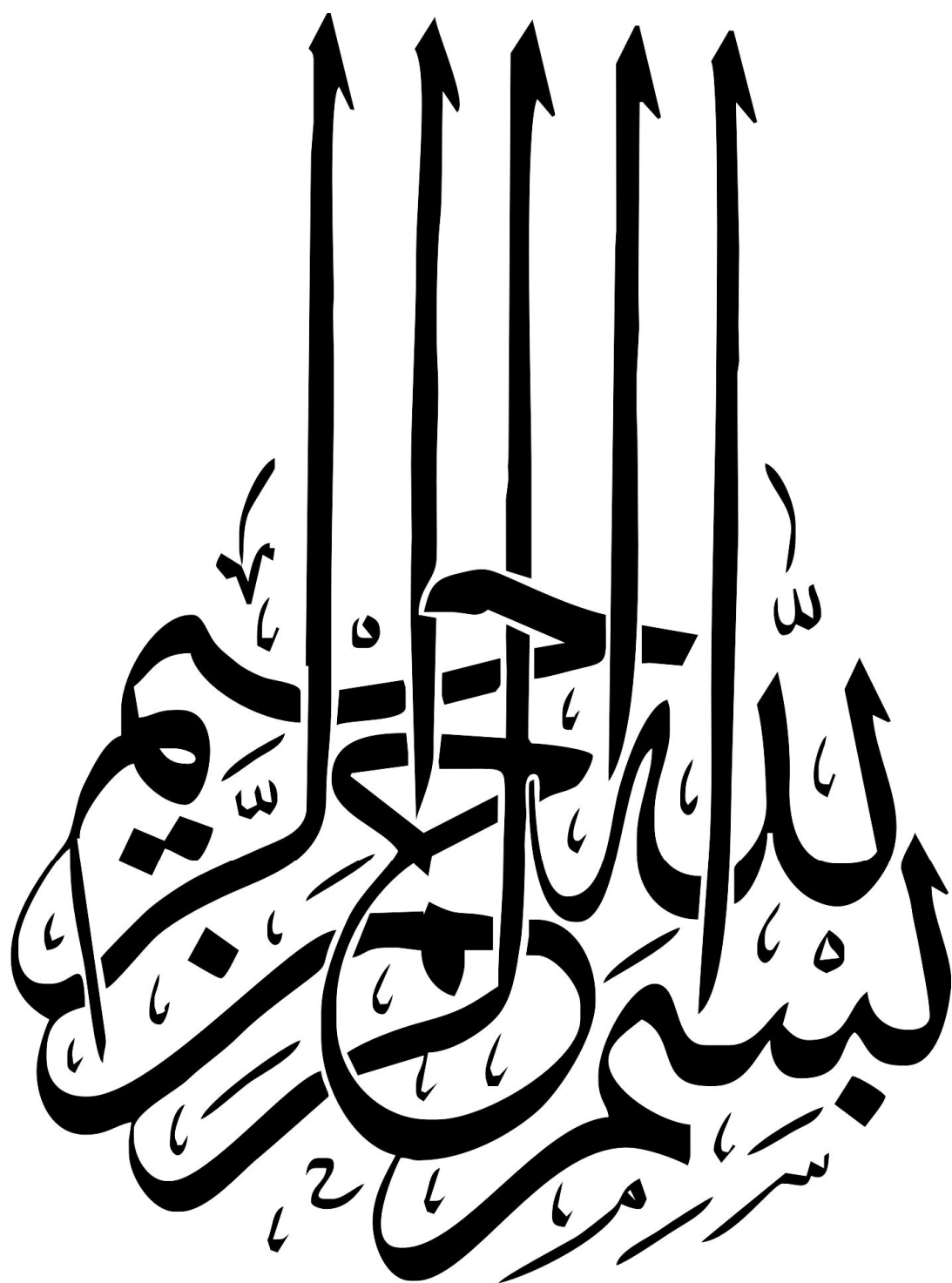






دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک

برداشت، مدل سازی و تفسیر داده های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه به منظور اکتشاف مس در منطقه اردستان اصفهان

نگارنده:

سجاد رادسر

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور:

مهندس حسن ریاحی

بهمن ۱۳۹۶

تقديم به

پدر، مادر، خواهران و برادران عزيزم

تقدیر و تشکر

سرآغاز، حمد و سپاس پروردگار کریم را که یاری بخش این بنده حقیر بود. بر خود لازم می‌دانم از کلیه کسانی که بنده را در تدوین و نگارش این پایان نامه یاری نمودند صمیمانه تشکر نمایم. به خصوص از اساتید فرزانه جناب آقای دکتر عرب امیری و جناب آقای دکتر کامکار روحانی که کلیه مراحل انجام این پژوهش با خوشروئی، یاری و راهنمایی نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین مراتب سپاس گذاری خود را از جنای مهندس ریاحی بخاطر تجارب ارزشمندشان اعلام می‌نمایم.

در پایان از آقایان دکتر نجاتی و دکتر آقاجانی به عنوان اساتید داور، که در سرانجام رساندن این پایان نامه نقش به‌سزایی داشته‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب سجاد رادسر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه برداشت، مدل سازی و تفسیر داده های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه به منظور اکتشاف مس در منطقه اردستان اصفهان تحت راهنمایی دکتر علیرضا عرب امیری و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی متعهد می شوم.

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

امضای دانشجو

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.

چکیده

یکی از مراحل مهم در اکتشاف ذخایر معدنی، شناسایی مناطق هدف است. روش‌های قطبش یا پلاریزا سیون القایی (IP) و مقاومت‌ویژه، روش‌های مناسبی به منظور پی‌جویی و اکتشاف کانی‌سازی سولفیدی می‌باشند. ماده معدنی اصلی در محدوده اکتشافی مورد مطالعه، مس است که به صورت اکسید و سولفید در منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است. هدف از انجام این پژوهش، تعیین محدوده‌های کانی‌سازی مس با استفاده از مدل‌سازی وارون داده‌های IP و مقاومت‌ویژه است. با توجه به شواهد کانی‌سازی در محدوده اکتشافی داوران واقع در شهرستان اردستان، ابتدا پی‌جویی به روش‌های مقاومت‌ویژه و IP با آرایش مستطیلی انجام شد؛ سپس به منظور بررسی مناطق امیدبخش در نقشه هم‌مقدار مستطیلی، چهار پروفیل دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی ۲۰ متر طراحی و اجرا گردید تا روند بی‌هنجاری‌های احتمالی در عمق بررسی شود. به منظور تعیین مقاومت‌ویژه حقیقی ساختارهای زیرسطحی و تفسیر نتایج، مدل‌سازی دوبعدی با نرم‌افزارهای RES2DINV و ZondRes2d و به منظور دستیابی به تصویر دقیق از کانی‌سازی زیرسطحی، مدل‌سازی سه‌بعدی توسط نرم‌افزار RES3DINV انجام شد و در نهایت نتایج حاصل از این مدل‌سازی با نرم‌افزار Voxler به نمایش درآمد. روند عمومی واحدهای لیتولوژی و همچنین کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی به صورت تقریبی شمال غرب-جنوب شرق بوده است. کانی‌سازی در واحد آندزیتی و دگرسان شده شکل گرفته است که در اکثر مناطق با بارپذیری بالا و همچنین مقاومت ویژه متوسط تا نسبتاً بالا همراه بوده و بدین ترتیب شناسایی شده است. با استفاده از نتایج حاصل از تفسیر نقشه‌های هم‌مقدار IP و مقاومت‌ویژه آرایش مستطیلی، مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی، مناطق کانی‌سازی در منطقه شناسایی و بر اساس این نتایج، دو محل مناسب برای حفاری به منظور دستیابی به کانی‌سازی مس در عمق پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: پلاریزا سیون القایی، مقاومت‌ویژه الکتریکی، مدل‌سازی وارون، آرایه مستطیلی، آرایه دوقطبی-دوقطبی، اردستان.

فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ مروری بر مطالعات انجام شده.....	۲
۳-۱ اهداف و ضرورت تحقیق.....	۴
۴-۱ روش انجام تحقیق.....	۵
۵-۱ ساختار پایان نامه.....	۶
فصل دوم.....	۷
تئوری روش مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی (IP).....	۷
۱-۲ مقدمه.....	۸
۲-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی.....	۸
۳-۲ روش های اندازه گیری مقاومت ویژه.....	۱۳
۱-۳-۲ سونداژزنی مقاومت ویژه.....	۱۴
۲-۳-۲ پروفیل زنی مقاومت ویژه.....	۱۴
۴-۲ روش قطبش القایی (IP).....	۱۵
۵-۲ عوامل مؤثر بر مقدار IP.....	۱۹
۶-۲ طراحی برداشت.....	۲۲
۷-۲ برداشت با آرایش دوقطبی-دوقطبی.....	۲۳
۸-۲ آرایش مستطیلی.....	۲۵
۹-۲ مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و IP در منطقه مورد مطالعه.....	۲۷
۱-۹-۲ روش های مدل سازی ژئوفیزیکی.....	۲۷

۱۰-۲	روش‌های عددی برای حل مسائل وارون‌سازی.....	۳۲
۱-۱۰-۲	روش کمترین مربعات گوس - نیوتن.....	۳۳
۲-۱۰-۲	روش شبه‌نیوتن.....	۳۳
	فصل سوم.....	۳۷
	موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.....	۳۷
۱-۳	موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.....	۳۸
۲-۳	زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه.....	۳۹
۱-۲-۳	زمین‌شناسی عمومی.....	۳۹
۲-۲-۳	زمین‌شناسی ساختمانی.....	۴۰
۳-۲-۳	زمین‌شناسی اقتصادی.....	۴۳
۳-۳	واحدهای زمین‌شناسی موجود در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مورد مطالعه.....	۴۵
۴-۳	دگرسانی.....	۵۰
۵-۳	برداشت داده‌ها.....	۵۰
	فصل چهارم.....	۵۳
	بررسی‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در منطقه مورد مطالعه.....	۵۳
۱-۴	مقدمه.....	۵۴
۲-۴	وارون‌سازی هموار دو بعدی به وسیله نرم‌افزار Res2dinv.....	۵۴
۳-۴	نرم‌افزار ZondRes2d.....	۵۷
۴-۴	عملیات برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP.....	۵۸
۵-۴	تجهیزات برداشت.....	۵۹
۶-۴	نحوه انجام عملیات صحرایی در منطقه.....	۶۰
۷-۴	نتایج برداشت شبکه با آرایش مستطیلی.....	۶۳
۸-۴	مدل‌سازی وارون دوبعدی و تفسیر مقاطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های IP و مقاومت ویژه.....	۶۵

۶۶.....	۱-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل DD50E
۷۱.....	۲-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی DD100E
۷۴.....	۳-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی DD150E
۷۷.....	۴-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی DD150W
۸۰.....	۹-۴ مدل سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP
۸۲.....	۱۰-۴ وارون سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP در منطقه مورد مطالعه
۸۷.....	فصل پنجم
۸۸.....	۱-۵ نتیجه گیری
۸۹.....	۲-۵ پیشنهادات
۹۳.....	منابع و مآخذ

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی..... ۱۰
- شکل ۲-۲ مقادیر مقاومت ویژه برخی از سنگ ها و کانی های متداول..... ۱۳
- شکل ۳-۲ اندازه گیری IP در روش حوزه زمان..... ۱۶
- شکل ۴-۲ افزایش زمان شارژ (a تا c)، که در پی آن فرکانس اندازه گیری کاهش و اثر ولتاژ اضافی افزایش می یابد (V_{pa} تا V_{pc}) در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس پایین (در c)، بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالا (در a) می باشد..... ۱۷
- شکل ۵-۲ اثر قطبش القایی غشایی و الکترودی. الف) توزیع نرمال یونها در ماسه سنگ متخلخل، ب) پلاریزاسیون غشایی در ماسه سنگ متخلخل ناشی از یک ولتاژ dc اعمال شده، ج) جریان الکترولیتی در حفره بالایی و قطبش الکترودی در حفره پایینی..... ۲۲
- شکل ۶-۲ نمای کلی از شبکه برداشت دوقطبی-دوقطبی..... ۲۵
- شکل ۷-۲ نمای کلی از شبکه برداشت مستطیلی..... ۲۶
- شکل ۱-۳ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و راه های دسترسی به آن..... ۳۸
- شکل ۲-۳ شمایی از رخنمون کانی سازی در سطح در منطقه مورد مطالعه..... ۴۰
- شکل ۳-۳ نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده مورد مطالعه به همراه پروفیل های ژئوفیزیکی..... ۴۲
- شکل ۴-۳ شکل شماتیکی از نقاط برداشت شده..... ۵۲
- شکل ۵-۳: موقعیت ایستگاه های برداشت ژئوفیزیکی بر روی تصویر ماهواره ای محدوده مورد مطالعه..... ۵۲
- شکل ۱-۴: مدل اولیه مورد استفاده در نرم افزار Res2dinv..... ۵۶
- شکل ۲-۴: تصویر امتداد یکی از پروفیل های برداشت شده..... ۵۸
- شکل ۳-۴: تصویر فرستنده مدل TX III مورد استفاده..... ۵۹
- شکل ۴-۴: تصویر مجموعه دستگاه گیرنده و پردازشگر PDA..... ۶۰

- شکل ۴-۵: تصویر موقعیت پروفیل‌ها و شبکه مستطیلی برداشت و همچنین موقعیت رخنمون مشاهده شده در سطح زمین..... ۶۲
- شکل ۴-۶: تصویر الکتروود غیرپلاریزه پتانسیل بر روی یکی از نقاط برداشت..... ۶۲
- شکل ۴-۷: نقشه هم‌مقدار مربوط به داده‌های مقاومت‌ویژه آرایه مستطیلی..... ۶۴
- شکل ۴-۸: نقشه هم‌مقدار مربوط به داده‌های بارپذیری آرایه مستطیلی..... ۶۵
- شکل ۴-۹: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD50E..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD50E..... ۶۹
- شکل ۴-۱۱: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD50E..... ۷۰
- شکل ۴-۱۲: نتایج مدل‌سازی وارون مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری با نرم‌افزار ZondRes2d در طول پروفیل DD50E..... ۷۰
- شکل ۴-۱۳: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD100E..... ۷۲
- شکل ۴-۱۴: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD100E..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD100E..... ۷۳
- شکل ۴-۱۶: مدل‌سازی وارون داده‌های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD100E..... ۷۳
- شکل ۴-۱۷: نتایج مدل‌سازی وارون مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری با نرم‌افزار ZondRes2d در طول پروفیل DD100E..... ۷۳
- شکل ۴-۱۸: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD150E..... ۷۵

شکل ۴-۱۹ شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل

DD150E.....۷۵

شکل ۴-۲۰: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل

DD150E.....۷۶

شکل ۴-۲۱: مدل‌سازی وارون داده‌های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل

DD150E.....۷۶

شکل ۴-۱۹: مدل‌سازی وارون مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری با نرم‌افزار ZondRes2d در طول

پروفیل DD150E.....۷۶

شکل ۴-۲۰: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل

DD150W.....۷۸

شکل ۴-۲۴: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل

DD150W.....۷۸

شکل ۴-۲۱: مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل

DD150W.....۷۹

شکل ۴-۲۲: مدل‌سازی وارون داده‌های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل

DD150W.....۷۹

شکل ۴-۲۳: مدل‌سازی وارون مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری با نرم‌افزار ZondRes2d در طول پروفیل

DD150W.....۷۹

شکل ۴-۲۴: مدل سه‌بعدی زیر سطح زمین که توسط نرم‌افزار Res3dinv به تعدادی لایه و بلوک‌های

مکعبی شکل با مقادیر مقاومت‌ویژه متفاوت تقسیم می‌شود.....۸۱

شکل ۴-۲۹: مقاطع افقی حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه.....۸۳

شکل ۴-۳۰: مقاطع افقی حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP.....۸۳

شکل ۴-۳۱: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP در منطقه مورد مطالعه با نرم‌افزار

Voxler.....۸۵

شکل ۴-۳۲: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه در منطقه مورد مطالعه با نرم‌افزار

Voxler.....۸۵

- شکل ۴-۲۵ نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP به ازای IP بالای ۷ میلی‌ثانیه در منطقه مورد مطالعه با نرم‌افزار Voxler.....:۸۶
- شکل ۴-۲۶ نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه به ازای مقاومت‌ویژه بالای ۳۰۰ اهم‌متر در منطقه مورد مطالعه با نرم‌افزار Voxler.....:۸۶
- شکل ۵-۱: نقطه حفاری پیشنهادی بروی مقطع DD50E.....:۹۱
- شکل ۱۵-۲: نقطه حفاری پیشنهادی بروی پروفیل DD150W.....:۹۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها..... ۱۲

جدول ۱-۳: مختصات جغرافیایی گوشه‌های محدوده مورد مطالعه..... ۳۹

جدول ۱-۵: مختصات نقاط حفاری پیشنهادی ۹۰

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه صرفاً با به کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی سطحی، نمی‌توان به منابع مدفون دست یافت؛ بلکه باید از روش‌های مکمل مانند ژئوفیزیک اکتشافی نیز بهره برد. این روش‌ها ارزان و نسبتاً قابل اعتماد هستند [عرب امیری و فتحیان پور، ۱۳۷۹]. یکی از روش‌های مهم ژئوفیزیکی که به منظور کاهش ریسک عملیات اکتشافی و هزینه‌های حفاری به کار می‌رود، مدل‌سازی‌های پرقدرت و پرسرعت وارون‌سازی می‌باشد. وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، یک روش مدل‌سازی است و از مهم‌ترین مراحل در تفسیر کمی داده‌های حاصل از این روش می‌باشد. مشکل اصلی این روش، عدم یکتایی پاسخ‌های آن‌هاست [Fedi and Rapolla, 1999].

روش‌های ژئوالکتریکی یکی از مهم‌ترین زیر مجموعه‌ی روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی هستند؛ که بر مبنای مطالعه میدان‌های الکتریکی زمین یا ویژگی‌های الکتریکی پیکره‌های زمین‌شناسی و معدنی استوارند. قطبش‌القایی^۱ (IP) یکی از روش‌های معمول و کارآمد در تشخیص کانی‌های سولفیدی و فلزی است. اندازه‌گیری‌های IP معمولاً در حوزه زمان یا فرکانس صورت می‌گیرد و بارپذیری، معمول‌ترین متغیر در اندازه‌گیری حوزه زمان محسوب می‌شود. از آن‌جا که مقاومت‌ویژه نیز از ویژگی‌های ذاتی سنگ‌ها و سازندهای مختلف به شمار می‌رود و در شناخت وضعیت ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مورد نیاز است، به‌عنوان روش مکمل IP در اکتشاف ذخایر فلزی به کار گرفته می‌شود [Mikhail, 1994].

^۱ Induced Polarization (IP)

۲-۱ مروری بر مطالعات انجام شده

آزمایش‌های صحرایی کنراد شلومبرژه^۱ در سال ۱۹۱۲ منجر به ابداع روش مقاومت‌سنجی و انتشار نتیجه تحقیقاتش در سال ۱۹۲۰ سبب افزایش کاربردهای اقتصادی این روش شد. در پی آن، استفاده از این روش در سال ۱۹۲۳ منجر به کشف گاز در کشور رومانی گردید و همچنین با استفاده از این روش، گنبد‌های نمکی فرانسه در سال ۱۹۲۶ کشف شد [مهدوی، ۱۳۸۳].

پدیده IP نیز اولین بار توسط کنراد شلومبرژه در اوایل قرن بیستم ابلاغ شد. این روش در اواخر سال ۱۹۴۰ به‌طور گسترده برای اکتشاف ذخایر سولفیدی افشان به کار گرفته شد. تا سال ۱۹۵۰، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از این روش در حوزه زمان^۲ صورت می‌گرفت [Seigel, 1959]. در دهه ۱۹۶۰، از این روش به‌طور گسترده در اکتشافات ژئوفیزیکی مواد معدنی و فلزات پایه مدفون در زیر سطح زمین استفاده شده است.

اکادا^۳ (۱۹۹۵) در منطقه هیشی‌کاری در ژاپن با استفاده از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه موفق به اکتشاف کانسار سولفیدی رگه‌ای و کانی‌سازی اپی‌ترمال شد. در این مورد پاسخ IP شواهد قابل اعتمادتری نسبت به مقاومت‌ویژه و روش گرانی‌سنجی استفاده شده ارائه داد. یوچیدا^۴ و همکاران (۲۰۱۵) در ایالت نیشی‌یاما^۵ ژاپن، به‌منظور دستیابی به اطلاعات جزئی‌تر از ساختارهای مقاومت‌ویژه الکتریکی مخازن زمین‌گرمایی (ژئوترمال) در سه بعد و انتخاب نقاط بهینه جهت حفاری و ایجاد چاه‌های تولید، برای اولین بار در منطقه مذکور توانستند با استفاده از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، به تصاویر واضحی از کلاهای رسی با مقاومت‌ویژه پایین و مخازن زمین‌گرمایی با مقاومت‌ویژه بالا دست‌یافته و مرزهای با تباین مقاومت‌ویژه الکتریکی را از یکدیگر تفکیک نمایند. همچنین، این

^۱ Schlumberger

^۲ Time domain

^۳ Okada

^۴ Uchida

^۵ Nishayama

تفسیرها با نتایج داده‌های گمانه‌ها سازگاری بالایی نشان داد. اکتشاف کانسار طلا و نقره در منطقه جولیتا^۱ واقع در کمر بند Chukotka-Okhots در روسیه با استفاده از روش IP در حوزه زمان (۲۰۱۵) نیز نمونه دیگری از فعالیت‌های جدید در حوزه برداشت‌های IP و مقاومت‌ویژه است [Gurin, 2015].

در ایران از سال ۱۳۴۲ شمسی از روش‌های الکتریکی به‌خصوص مقاومت‌ویژه در مقیاس وسیعی برای مطالعات هیدروژئولوژی استفاده شد و به تدریج جای خود را در مطالعات معدنی نیز باز کرد. به‌طور مثال می‌توان به اکتشاف ژئوفیزیکی کانی‌سازی مس - طلا پورفیری ماهرآباد شرق ایران [ملک‌زاده شفارودی و همکاران، ۱۳۸۸]، تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی و مطالعات ژئوفیزیکی IP و مقاومت‌ویژه کانسار ماهور - شمال غرب ده‌سلم [گورابجیری پور و مباشری، ۱۳۹۳]، اکتشاف مس در اندیس معدنی قلعه‌گنج [شمس‌الدینی نژاد، ۱۳۹۲] و مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت‌ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران [فتحی بایزیدآباد و همکاران، ۱۳۹۶] اشاره کرد.

۳-۱ اهداف و ضرورت تحقیق

همان‌گونه که مواد معدنی تشکیل‌دهنده اقتصاد و صنعت هر جامعه می‌باشند، اجرای پروژه‌های اکتشافی از دیرباز به صورت سنتی و عملیات صحرایی مداوم، مرسوم بوده و امروزه در راستای پیشرفت تکنولوژی، دقت و قدرت دستگاه‌های اندازه‌گیری به‌صورت چشم‌گیری افزایش یافته‌اند. فلز مس، یک فلز گرانبه‌است؛ که از هزاران سال پیش مورد توجه قرار گرفته و به فراخور شرایط و امکانات هر دوره مورد اکتشاف و بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در ایران نیز قدیمی‌ترین تمدن‌ها خبر از توجه ویژه به بهره‌برداری و استفاده از فلزات پایه به‌ویژه مس می‌دهد. هم‌زمان با صنعتی شدن کشورها و افزایش چشمگیر بازار تقاضا برای فلزات پایه از جمله مس، نیاز به بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته جهت اکتشاف و استخراج این فلزات بیشتر شده است. در ایران نیز با توجه به شناسایی وجود پتانسیل‌های بسیار خوب

^۱ Julietta

در مورد ذخایر زیرزمینی مس، نیاز به استفاده از روش‌های نوین اکتشاف احساس شد.

با توجه به این که هدف اصلی از یک پروژه اکتشافی، تعیین مشخصات و ویژگی‌های کانسار مورد نظر با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن می‌باشد، لذا طراحی بهینه یک پروژه اکتشافی بسیار حائز اهمیت است. تمامی پروژه‌های اکتشافی در نهایت به حفاری مستقیم جهت دستیابی به هدف منجر می‌شوند، در حالی که روش‌های حفاری جزء گران‌ترین روش‌های اکتشافی هستند؛ لذا ضروری است تا با بهره‌گیری از روش‌های ارزان‌قیمت نظیر روش‌های ژئوفیزیکی، خطای احتمالی این روش‌ها به کمترین مقدار ممکن برسد [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰]. در این تحقیق، هدف آن است که با استفاده از روش‌های ژئوالکتریکی مقاومت‌ویژه و IP، که جزء روش‌های نسبتاً ارزان‌قیمت ژئوفیزیکی می‌باشند و همچنین مدل‌سازی داده‌های برداشت شده، بهترین مکان‌ها جهت حفاری با حداقل تعداد گمانه‌های اکتشافی مورد نیاز تعیین شوند. به همین منظور در ابتدا جهت تعیین و بررسی احتمال وجود بی‌هنجاری، نقشه‌های بارپذیری و مقاومت‌ویژه در محدوده با استفاده از آرایش مستطیلی تهیه گردید و نهایتاً به بررسی اکتشافی بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در عمق با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی پرداخته شد.

۴-۱ روش انجام تحقیق

با توجه به وجود رخنمون کانی‌سازی مس در محدوده، برداشت داده‌های IP و مقاومت‌ویژه به دلیل توانایی آرایش مستطیلی در پی‌جویی و آرایش دوقطبی-دوقطبی در بررسی گسترش عمقی و تغییرات جانبی در محدوده‌ی مورد نظر صورت گرفت.

در این راستا یک بازدید به همراه کارفرمای محترم در محدوده انجام شد و پس از بررسی موارد لازم و با هماهنگی شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید و اینجانب طراحی شبکه‌ی برداشت انجام شد. در فاز اول، ابتدا آرایش مستطیلی جهت تعیین گسترش روند بی‌هنجاری صورت گرفت. در این آرایش، طول خط جریان برابر ۸۰۰ متر در نظر گرفته شد. با توجه به رخنمون‌های سطح زمین و

گسترش بی‌هنجاری‌های به‌دست آمده از شبکه‌های مستطیلی، چهار پروفیل با استفاده از آرایش دوقطبی - دوقطبی در جهت شمال شرق - جنوب غرب، عمود بر امتداد رخنمون موجود در منطقه برداشت شد (تعداد نقاط برداشت شده ۶۲۰ نقطه می‌باشد). داده‌های ژئوالکتریک برداشت شده، پس از ورود به نرم‌افزار Res2dinv و ZondRes2d و انجام تصحیحات اولیه (تصحیح توپوگرافی و حذف نوفه‌های سیستماتیک) به روش وارون‌سازی کمترین مربعات، مدل‌سازی شده و نتایج حاصل به‌صورت مقاطع دوبعدی ارائه شد. همچنین برای نمایش بهتر مدل‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار Voxler استفاده گردید. براساس این نتایج، محل‌های مناسب برای انجام حفاری‌های اکتشافی معرفی و پیشنهاد خواهند شد.

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

پژوهش حاضر مشتمل بر پنج فصل می‌باشد؛ که فصل جاری به بیان مقدمه، مروری بر مطالعات صورت گرفته، ضرورت و روش تحقیق می‌پردازد. در فصل دوم به اصول و تئوری روش‌های مقاومت‌ویژه و IP، کاربردها، معایب و مزایای آن‌ها اشاره شده است. در فصل سوم شرح زمین‌شناسی منطقه و موقعیت جغرافیایی محدوده مورد نظر آمده است. در فصل چهارم به تفسیر و مدل‌سازی داده‌های مذکور پرداخته شد و در نهایت در فصل آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم ارائه می‌شود.

فصل دوم

تئوری روش مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی (IP)

۱-۲ مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی هستند که در پی جویی منابع معدنی کارایی بالایی دارند. تقریباً در تمامی مراحل اکتشاف از این روش‌ها که ارزان، قابل اعتماد و در بسیاری موارد باعث کاهش ریسک‌های بزرگ سرمایه‌گذاری می‌گردند، بهره گرفته می‌شود [Gautneb and Tveten, 2000].

از روش‌های ژئوفیزیکی که برای اکتشاف کانسارها به کار می‌رود می‌توان به روش‌های مغناطیس‌سنجی، روش‌های الکتریکی، الکترومغناطیس، ثقل‌سنجی و لرزه‌نگاری اشاره نمود. انتخاب روش یا روش‌هایی برای تعیین محل یک کانسار، با طبیعت کانی‌های موجود در آن کانسار و سنگ‌های اطراف آن سر و کار دارد [اکریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۷]. از جمله روش‌های مورد استفاده در این پژوهش روش مقاومت‌ویژه الکتریکی^۱ و همچنین قطبش‌القایی^۲ (IP) می‌باشد؛ که به منظور شناسایی محدوده‌های کانی‌سازی مس در منطقه مورد مطالعه، مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲ روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ ابداع شدند، اما از دهه ۱۹۷۰ و خصوصاً به دلیل دسترسی به کامپیوتر برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای پیدا کردند. این روش‌ها به‌طور مؤثری در اکتشاف منابع آب زیرزمینی، انواع آلودگی آب‌های زیرزمینی، بررسی مسائل مهندسی برای تعیین محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها و مناطق خردشده، درز و شکاف‌ها، مناطق یخ‌زده، چاه‌های معدنی، در بررسی‌های باستان‌شناسی برای تعیین گسترش فضای بقایای ساختارهای مدفون قدیمی، علاوه

^۱ Resistivity

^۲ Induced Polarization (IP)

بر کاربردهای متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰].

در روش‌های مقاومت‌ویژه، جریان الکتریکی به‌صورت مصنوعی به داخل زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل ایجادشده در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور، معمولاً از چهار الکترود استفاده می‌گردد که از دوتای آن‌ها برای فرستادن جریان الکتریکی و از دوتای دیگر، برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل استفاده می‌شود. انحراف از الگوی اختلاف پتانسیل‌هایی که برای زمین همگن انتظار می‌رود، اطلاعاتی را در مورد ویژگی‌های الکتریکی و ناهمگنی‌های موجود در زیر سطح زمین فراهم می‌نماید [Keary et al, 2002]. در صورت غیر همگن^۱ و غیر همسانگرد^۲ بودن زمین، داده‌های حاصل از این روش، نشان‌دهنده‌ی مقادیر مقاومت‌ویژه‌های واقعی زمین نیستند؛ بلکه این مقادیر نشان‌دهنده‌ی مقاومت‌ویژه‌های ظاهری زیر سطح زمین می‌باشند.

مقاومت‌ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین را نشان می‌دهد. در مورد رسانایی مواد با مقاومت الکتریکی R ، طول L و سطح مقطع A در زیر سطح زمین، رابطه (۱-۲) برقرار است:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (۱-۲)$$

بر اساس قانون اهم معادله اخیر به شکل زیر در می‌آید:

$$\rho = \frac{\Delta V \cdot A}{I \cdot L} \quad (۲-۲)$$

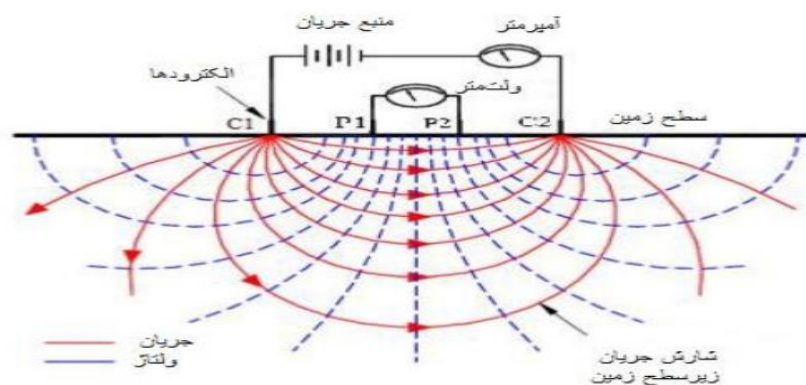
که در این رابطه، ρ مقاومت‌ویژه الکتریکی، I شدت جریان الکتریکی، ΔV اختلاف پتانسیل الکتریکی و

^۱ Inhomogeneous

^۲ Anisotropy

L طول یک استوانه فرضی می‌باشد. این رابطه برای تعیین مقاومت ویژه یک محیط همگن^۱ و همسانگرد^۲ مناسب می‌باشد، اما برای یک محیط ناهمگن و ناهمسانگرد باید مقاومت ویژه را در هر نقطه تعیین نمود [Ozebo et al, 2008].

در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از یک آرایش چهار الکترودی نشان داده شده است. در این شکل الکترودهای C₁ و C₂ نشان‌دهنده الکترودهای جریان و الکترودهای P₁ و P₂ پتانسیل می‌باشند. در این آرایش چهار الکترودی، اختلاف پتانسیل الکترودی ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، طبق رابطه‌ی (۲-۳) محاسبه می‌شود:



شکل ۱-۲: نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی [After Corvallis, 2000].

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{rc_1p_1} - \frac{1}{rc_2p_1} - \frac{1}{rc_1p_2} + \frac{1}{rc_2p_2} \right) \quad (۲-۳)$$

که در آن ΔV برابر اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، rc_1p_1 فاصله بین الکترودهای C₁ و P₁، rc_2p_1 فاصله بین الکترودهای C₂ و P₁، rc_1p_2 فاصله بین الکترودهای C₁ و P₂ و rc_2p_2 فاصله بین الکترودهای C₂ و P₂ می‌باشد.

^۱ Homogeneous

^۲ Isotrop

برداشت‌های صحرایی بر روی زمین‌های غیرهمگن که مقاومت‌ویژه الکتریکی آن‌ها در سه جهت محورهای مختصات متغیر است، صورت می‌گیرد و هدف از این برداشت‌ها به‌دست آوردن اندازه‌ی مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی زمین می‌باشد. بعد از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در اثر تزریق جریان الکتریکی به شدت I در زمین می‌توان اندازه‌ی مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری زمین را طبق رابطه (۴-۲) محاسبه نمود [Loke, 2004]:

$$\rho_{\alpha} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4-2)$$

که در این رابطه ρ_{α} مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری زمین و K ضریب هندسی برای آرایش مورد استفاده نامیده می‌شود و طبق رابطه‌ی (۵-۲) به‌دست می‌آید.

$$K = \left(\frac{1}{rc_1p_1} - \frac{1}{rc_2p_1} - \frac{1}{rc_1p_2} + \frac{1}{rc_2p_2} \right) \quad (5-2)$$

ضریب هندسی، بستگی به چگونگی موقعیت هندسی قرارگیری چهار الکترود در هر آرایش دارد. دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه، معمولاً مقدار مقاومت زمین (R) را اندازه‌گیری می‌کنند. رابطه‌ی بین مقاومت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری به‌صورت رابطه‌ی (۶-۲) تعریف می‌شود [Loke, 2004; Reynolds, 1997].

$$\rho_{\alpha} = KR \quad (6-2)$$

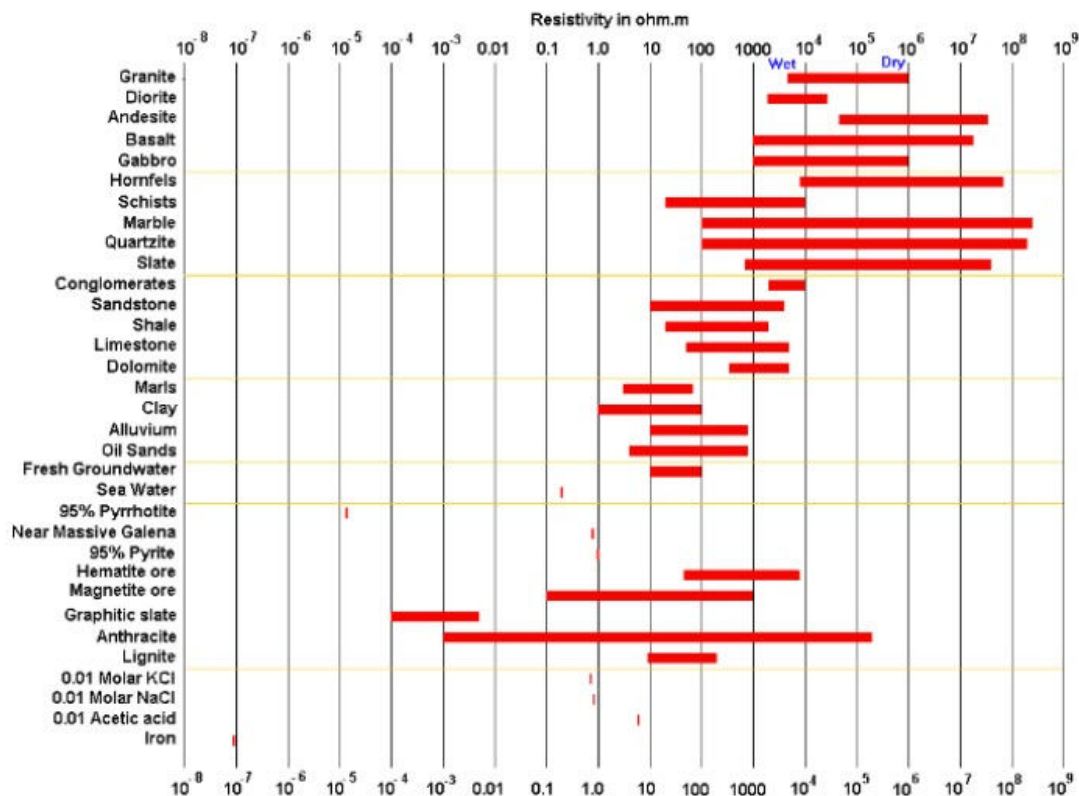
۱-۲-۲ تقسیم‌بندی مواد مختلف از لحاظ مقاومت‌ویژه الکتریکی

به‌منظور برقراری تناظر بین مقادیر مقاومت‌ویژه و ساختارهای زمین‌شناسی، آگاهی از مقادیر مقاومت‌ویژه مربوط به انواع مختلف مواد زیرسطحی و زمین‌شناسی مناطق مورد مطالعه، الزامی است. به‌طور کلی، مقاومت‌ویژه سنگ‌ها عمدتاً به میزان خردشدگی، درصد تخلخل و درصد شکستگی‌های موجود در سنگ بستگی دارد. سنگ‌های رسوبی که عمدتاً متخلخل و دارای اشباع‌شدگی آب بالاتری می‌باشند، معمولاً از

مقاومت ویژه ی کمتری برخوردارند. خاک های رسی معمولاً مقاومت ویژه پایین تری نسبت به خاک های ماسه-ای دارند. اما نکته قابل توجه، هم پوشانی مقادیر مقاومت ویژه ی سنگ ها و خاک ها می باشد. این امر به این دلیل است که مقاومت ویژه الکتریکی سنگ و یا نمونه ی خاک به عوامل دیگری مثل تخلخل، اشباع آب و غلظت نمک های غیر محلول نیز وابسته است [کلاگری، ۱۳۷۱]. جدول (۱-۲) و شکل (۲-۲) مقادیر مقاومت-ویژه چند نوع سنگ و کانی را نشان می دهند.

جدول ۱-۲: مقاومت ویژه بعضی از سنگ ها، کانی ها و مواد معدنی متداول [After Loke, 1999].

ماده مورد نظر	مقاومت ویژه $[\Omega m]$	ماده مورد نظر	مقاومت ویژه $[\Omega m]$
ماسه سنگ	$۸ - ۴ \times ۱۰^۳$	سنگ آهک	$۵۰ - ۴ \times ۱۰^۲$
ماسه سست	$۵۰۰ - ۵ \times ۱۰^۲$	رس	$۱ - ۱۰۰$
شیل	$۲۰ - ۲ \times ۱۰^۳$	اسلیت	$۶ \times ۱۰^۲ - ۴ \times ۱۰^۷$
آب زیرزمینی	$۱۰ - ۱۰۰$	آب دریا	$۰/۲$
کوارتزیت	$۱۰^۲ - ۲ \times ۱۰^۸$	گرانیت	$۵ \times ۱۰^۳ - ۱۰^۶$
بازالت	$۱۰^۳ - ۱۰^۶$	گابرو	$۱۰^۳ - ۵ \times ۱۰^۵$



شکل ۲-۲: مقادیر مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها و کانی‌های متداول [Loke, 2004].

۳-۲ روش‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه

در حالت کلی داده‌های مقاومت ویژه با اهداف مدل‌سازی به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی برداشت می‌شوند [Loke, 1999]. این برداشتها به دو شکل عمده انجام می‌گیرد. یکی از این روش‌ها، روش گمانه‌زنی یا سونداژزنی الکتریکی^۱ که سونداژ الکتریکی قائم (VES)^۲ نیز نامیده می‌شود؛ که در آن یک نقطه به صورت عمقی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع در این برداشتها، یک خط پروفیل از تعدادی سونداژ الکتریکی تشکیل شده؛ و در نتیجه می‌توانند به صورت دو بعدی نیز تفسیر شوند

^۱ Electrical sounding

^۲ Vertical electric sounding

[Molano et al, 1990]. برای اجرای این روش، معمولاً از آرایش شلومبرژه^۱ استفاده می‌گردد. روش دوم، روش ترانشه‌زنی یا پروفیل‌زنی^۲ می‌باشد؛ که برای تشخیص تغییرات جانبی مقادیر مقاومت‌ویژه زیر سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد [Loke, 2004].

۱-۳-۲ سونداژزنی مقاومت‌ویژه

در روش سونداژزنی، تغییرات عمقی و یا قائم مقاومت‌ویژه مورد بررسی قرار می‌گیرد [Loke, 2004]. در این روش موقعیت مرکز آرایش ثابت مانده و در هر مرحله بسته به نوع آرایش، الکترودها نسبت به مرکز آرایش جا به جا شده و در فاصله مشخص دورتری قرار می‌گیرند. با انجام این عمل، جریان به اعماق پایین‌تر نفوذ کرده و می‌توان اطلاعاتی از لایه‌های عمیق‌تر به‌دست آورد. بدین ترتیب، برای هر طول آرایش یک مقاومت‌ویژه ظاهری برای زمین در آن نقطه به دست می‌آید؛ که با پردازش و تفسیر این داده‌ها، می‌توان ضخامت و مقاومت‌ویژه لایه‌های زیر سطح زمین در آن نقطه (محل سونداژ یا مرکز آرایش الکترودی مورد استفاده) را تعیین نمود.

۲-۳-۲ پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه

در روش پروفیل‌زنی، تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه زیرسطحی در طول یک خط پروفیل بررسی می‌شوند. در این روش، فاصله میان الکترودهای جریان و پتانسیل ثابت باقی مانده ولی موقعیت مرکز آرایش با جا به جایی الکترودها در هر مرحله تغییر می‌کند. به این ترتیب می‌توان تغییرات جانبی لایه‌ها را در یک عمق معین بررسی کرد [Loke, 2004].

^۱ Schlumberger

^۲ Profiling

۴-۲ روش قطبش القایی (IP)

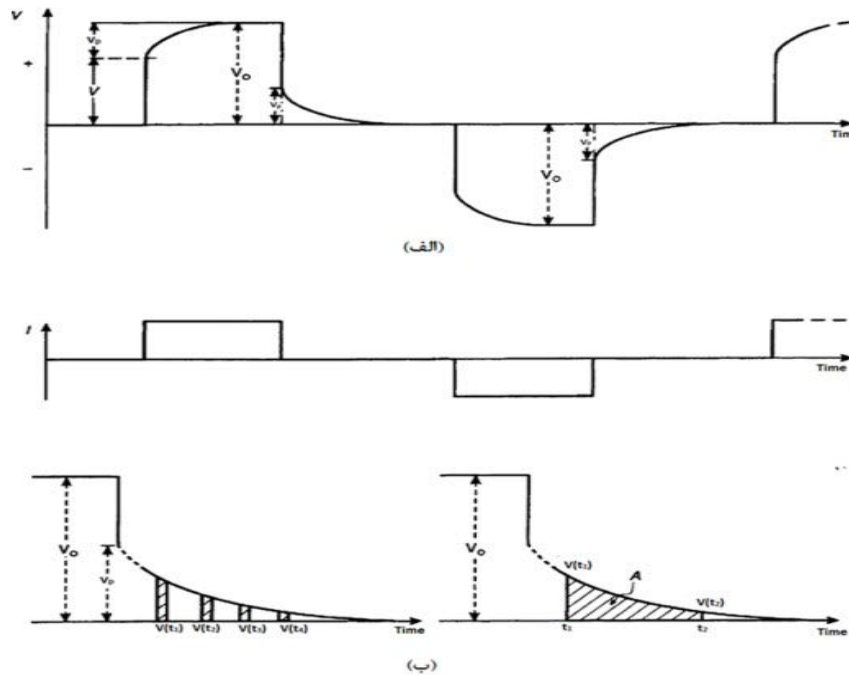
توجه به خاصیت IP زمین با برادران شلومبرژه آغاز شد. آن‌ها مشاهده کردند که پس از قطع جریان در روش‌های مقاومت‌ویژه، ولتاژ برداشتی ناگهان به صفر نمی‌رسد؛ بلکه در طول زمانی محدود، به صفر نزدیک می‌گردد. این پدیده بر اثر ذخیره‌سازی انرژی در زمان وصل جریان، به شکل‌های مختلف مکانیکی، الکتریکی و به‌ویژه شیمیایی رخ می‌دهد. IP تابعی از ویژگی‌های خازنی سنگ در فرکانس پایین است؛ که از فرآیندهای پخش قطبش در مرزهای بین دانه‌های کانی و سیالات موجود در خلل و فرج سنگ‌ها حاصل می‌گردد [Slater, 2002].

۱-۴-۲ روش‌های اندازه‌گیری IP

در روش IP، مشابه با روش مقاومت‌ویژه یک آرایه الکترودی استاندارد (شامل دو الکتروود جریان و دو الکتروود غیرپلاریزه پتانسیل) مورد استفاده قرار می‌گیرد [Telford et al, 1990]. پدیده IP را می‌توان هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس اندازه‌گیری کرد.

• اندازه‌گیری در حوزه زمان

هنگام اندازه‌گیری IP، جریان مستقیم (DC) طی مدت کوتاهی به زمین تزریق می‌شود. اگر پس از شارژ شدن زمین جریان را قطع کنند، ولتاژ اضافی (V_p) ایجاد شده بعد از زمان کوتاهی به مقدار صفر می‌رسد (شکل ۲-۳) [Reynolds, 1997]. پتانسیل حالت شارژ زمین (V_0) دو قسمت است: یکی پتانسیل حقیقی مربوط به جریان تزریق شده و دیگری ولتاژ اضافی که از اثر قطبش زمین ایجاد شده است. پس از قطع کردن جریان، ولتاژ زمین ابتدا به میزان V به صورت لحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند (شکل ۲-۳). در ادامه ولتاژ اضافی به صورت منحنی تخلیه می‌شود و به صفر می‌رسد. معمولاً اندازه‌گیری پتانسیل، روی منحنی زوال و در زمان کوتاهی پس از قطع جریان انجام می‌گیرد [انوروزی، ۱۳۹۲].



شکل ۳-۲: اندازه‌گیری IP در روش حوزه زمان، الف) منحنی تغییرات پتانسیل در حالت شارژ و تخلیه و تغییرات جریان تزریقی، ب) پارامتر قطبش ظاهری (سمت چپ) و بارپذیری (سمت راست) [Reynolds, 1997].

- **قطبش پذیری:** اگر اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده در زمان t (پس از قطع جریان) برابر ΔV_t باشد، نسبت این اختلاف پتانسیل به مقدار اختلاف پتانسیل در حالت شارژ (V_0) را IP یا قطبش‌پذیری ظاهری (ρ_α) می‌نامند [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰؛ نوروزی، ۱۳۹۲].

$$\rho_\alpha = \frac{\Delta V_t}{V_0} \quad (7-2)$$

اگر ΔV بر حسب میلی‌ولت و V بر حسب ولت باشد واحد قطبش‌پذیری ظاهری، میلی‌ولت بر ولت می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱].

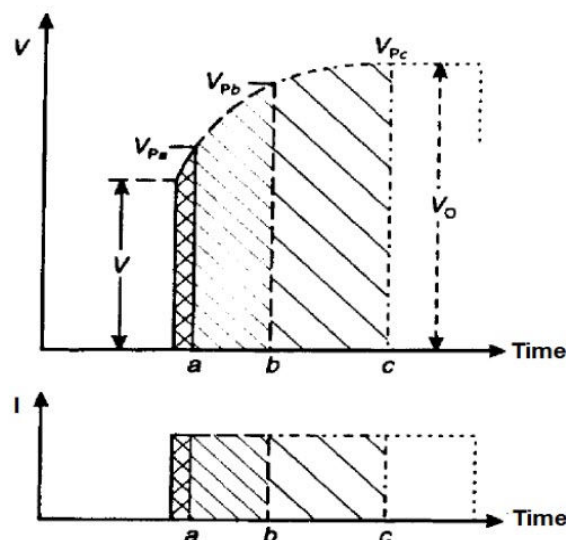
- **بارپذیری:** در بعضی مواقع، انتگرال زمانی نرمالیزه که نشان‌دهنده مساحت زیر منحنی زوال بین زمان‌های t_1 و t_2 بعد از قطع جریان می‌باشد، برای بیان IP مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامتر، بارپذیری ظاهری نامیده شده و با $(M_{t_1, t_2}^T)_a$ نشان داده می‌شود، بنابراین:

$$(M_{t_1, t_2}^T)_a = \left(\frac{1}{V}\right) \int_{t_1}^{t_2} \Delta V_{IP} dt \quad (۸-۲)$$

در صورتی که اگر ΔV بر حسب میلی‌ولت، V بر حسب ولت و زمان بر حسب ثانیه اندازه‌گیری شود، واحد بارپذیری میلی‌ولت ثانیه بر ولت (mVsV^{-1}) و یا میلی‌ثانیه (ms) می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱].

• اندازه‌گیری در حوزه فرکانس

در مطالعات حوزه فرکانس (فرکانس متغیر) قطبش‌القایی، مقاومت‌ویژه ظاهری در دو فرکانس کمتر از ۱۰ هرتز (مانند ۰/۱ و ۵ هرتز یا ۰/۳ و ۲/۵ هرتز) با استفاده از همان آرایش الکترودی استفاده شده در روش‌های حوزه زمان و مقاومت‌ویژه DC اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت‌ویژه در فرکانس پایین (ρ_{a0}) بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالا (ρ_{a1}) است. برای یک زمان شارژ کوتاه، ولتاژ اضافی (V_{Pa}) اندازه‌گیری شده به‌طور بارزی کمتر از مقدار به‌دست آمده برای زمان شارژ طولانی‌تر (V_{Pb} و V_{Pc}) می‌باشد شکل (۲-۴) [Reynolds, 1997].



شکل ۲-۴: افزایش زمان شارژ (a تا c)، که در پی آن فرکانس اندازه‌گیری کاهش و اثر ولتاژ اضافی افزایش می‌یابد (V_{Pa} تا V_{Pc}) در نتیجه مقاومت‌ویژه ظاهری در فرکانس پایین (در c)، بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالا (در a) می‌باشد [Reynolds, 1997].

چون زمان واهلش برای اندازه گیری بسیار کوتاه است؛ به همین خاطر بزرگی کلی ولتاژ اندازه گیری شده در ارتباط با جریان اعمالی، مقدار مقاومت (R) را به دست می دهد؛ که با ضرب کردن آن در فاکتور هندسی مناسب مقدار مقاومت ویژه به دست می آید. اگر قطب های جریان عوض شود و قطع و وصل جریان با یک زمان تأخیر قابل مقایسه با زمان شارژ صورت گیرد؛ این همان به کار بردن سیگنال جریان متناوب در یک فرکانس داده شده می باشد. باید توجه نمود مقاومت ویژه در فرکانس پایین تر بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالاتر است.

دو مقدار مقاومت ویژه برای تعیین اثر فرکانس (FE، بدون واحد) استفاده می شود؛ که به طور جایگزین می تواند به عنوان درصد اثر فرکانس (PFE، واحد درصد) بیان شود.

اثر فرکانس:

$$FE = (\rho_{a0} - \rho_{a1}) / \rho_{a1} \quad (9-2)$$

که به ترتیب ρ_{a0} و ρ_{a1} مقاومت ویژه در فرکانس پایین و بالا می باشند و $\rho_{a0} > \rho_{a1}$

درصد اثر فرکانس:

$$PFE = 100FE \quad (10-2)$$

لازم به ذکر است که درصد اثر فرکانس (در حوزه فرکانس) در مقادیر ضعیف پلاریزه شوندگی یا در جایی که FE خیلی کوچکتر از ۱ باشد با بارپذیری در حوزه زمان هم ارز می شود.

مارشال^۱ و مادن^۲ (۱۹۵۹) با به کار بردن درصد اثر فرکانس، فاکتور فلزی (MF) را معرفی کردند (رابطه ۱۱-۲) [Marshall and Madden, 1959]. به نظر برخی ژئوفیزیکدانان، فاکتور فلزی جهت تعیین مناطق سولفیدهای پراکنده نسبت به داده‌های درصد اثر فرکانس کارایی بهتری دارد.

فاکتور فلزی:

$$MF = A(\rho_{\alpha 0} - \rho_{\alpha 1})/(\rho_{\alpha 0}\rho_{\alpha 1}), \quad (\text{Siemens/m}) \quad (11-2)$$

$$= A(\sigma_{\alpha 1} - \sigma_{\alpha 0})$$

$\rho_{\alpha 1}$ و $\rho_{\alpha 0}$ مقاومت ویژه‌های ظاهری و $\sigma_{\alpha 1}$ و $\sigma_{\alpha 0}$ رسانندگی‌های الکتریکی ظاهری هستند. در فرکانس-

های پایین و بالا به ترتیب، $\rho_{\alpha 1} > \rho_{\alpha 0}$ و $\sigma_{\alpha 1} < \sigma_{\alpha 0}$ و $A = 2\pi \times 10^5$

اگرچه نهشته‌های فلزی پراکنده را می‌توان توسط داده‌های IP آشکارسازی کرد، با این حال بارپذیری، اثر فرکانس و فاکتور فلزی علامت خوبی از میزان کانی‌زایی ناشی از منشأ پاسخ IP نمی‌دهد. بنابراین استفاده از روش‌های با جزئیات بیشتر نظیر IP طیفی ضروری است؛ تا تخمین‌های به‌دست آمده بدون ابهام باشد [Reynolds, 1997].

۵-۲ عوامل مؤثر بر مقدار IP

عواملی که بر اندازه‌گیری‌های IP اثر می‌گذارند عبارتند از [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰]:

❖ نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که کانی‌های دارای قابلیت هدایت الکترونیکی، IP قوی‌تری نسبت به کانی‌هایی که دارای قابلیت هدایت الکترولیتی هستند (مانند مالاکیت)؛ ایجاد می‌کنند. البته موارد استثنایی هم وجود دارد. مثلاً اسفالریت در حالی که دارای هدایت الکتریکی فلزی

^۱ Marshall

^۲ Madden

است؛ IP ضعیفی از خود نشان می‌دهد.

❖ عمق کانی‌سازی نیز در کاوش توده‌های معدنی به روش IP بسیار مؤثر است. اگر توده معدنی نسبتاً کوچک و عمیق باشد، ممکن است IP اندازه‌گیری شده، آنقدر ضعیف باشد؛ که نتوان کانسار را از سنگ دربرگیرنده تفکیک کرد.

❖ عیار ماده معدنی نیز بر پاسخ IP اثر می‌گذارد. با افزایش عیار مواد معدنی شدت IP افزایش می‌یابد.

❖ پدیده IP به سطح ایجاد شده توسط دانه‌های ماده معدنی بستگی دارد. هرچقدر ماده معدنی دانه ریزتر باشد، IP حاصل بزرگتر می‌باشد (منظور حالت پورفیری است). البته این نکته را باید مدنظر قرار داد؛ که در صورتی که اندازه دانه‌بندی از یک حدی کوچکتر شود، شدت IP به جای افزایش، کاهش می‌یابد.

❖ مقاومت‌ویژه سنگ‌های دربرگیرنده کانسار نیز بر پاسخ IP اثر می‌گذارد؛ که این تأثیر، به اختلاف مقاومت‌ویژه بین کانسار و سنگ میزبان بستگی دارد. با افزایش مقاومت‌ویژه سنگ‌های دربرگیرنده کانسار نسبت به مقاومت‌ویژه کانسار، مقدار جریان اولیه‌ای که وارد کانسار می‌شود؛ افزایش می‌یابد [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰].

۲-۵-۱ منشأ پدیده IP

علت دقیق ایجاد پدید IP مشخص نیست. اما دو سازوکار اصلی برای توجیه این پدیده عبارت‌اند از: قطبش الکترودی^۱ (فلزی) و قطبش الکترولیتی^۲ (غشایی) که هر دو با پدیده‌های الکتروشیمیایی در ارتباط هستند [نوروزی، ۱۳۹۲].

الف) قطبش الکترولیتی (غشایی)

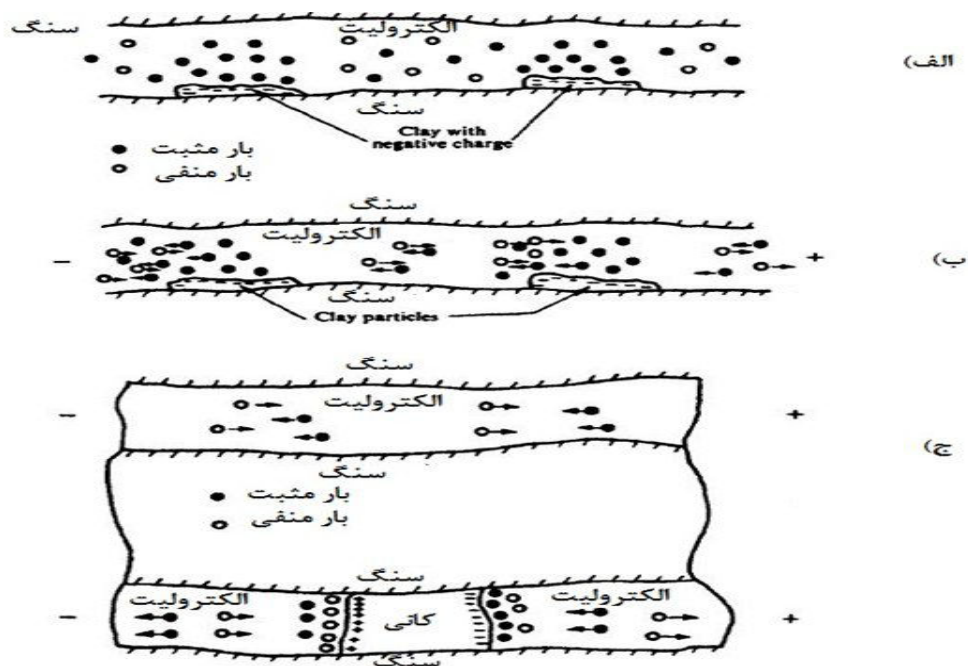
^۱ Electrode (Grain) polarization

^۲ Electrolytic (Membrane) polarization

رسانش الکترولیتی عامل غالب در بیشتر سنگ‌ها می‌باشد و وقتی فلزی وجود نداشته و فرکانس پایین است، این تنها شکل رسانش است که وجود دارد. لذا ساختار سنگ‌ها باید تا حدودی متخلخل باشد تا در جایی که کانی‌های فلزی وجود ندارد، شارش جریان را ممکن سازد. در اکثر کانی‌های سنگی مقداری بار منفی در سطح مشترک بین رویه سنگ و مایع داخل خلل و فرج وجود دارد. در نتیجه یون‌های مثبت به این خلل و فرج جذب شده و یون‌های منفی از آن دور می‌شوند. این تراکم یون ممکن است تا عمق حدود 10^{-6} سانتی‌متر در داخل مایع گسترش یابد. اگر این رقم حدود پهنای خلل و فرج باشد، وقتی که یک پتانسیل جریان مستقیم به دو سر آن وصل شود، یون‌های منفی در یک طرف آن جمع شده و از طرف دیگر دور می‌شوند. در نتیجه‌ی چنین توزیع قطبیده‌ای، جریان قطع می‌شود. با برقراری مجدد جریان، یون‌ها به وضعیت اولیه برمی‌گردند؛ در حالی که این عمل در زمانی معین صورت می‌گیرد (شکل ۲-۵) [Telford et al., 1990].

ب) قطبش الکترودی (فلزی)

این نوع قطبش هنگامی رخ می‌دهد که در داخل سنگ مواد فلزی وجود داشته و قسمتی از عبور جریان الکترولیتی و قسمتی دیگر الکترونی باشد؛ که سبب فعل و انفعال شیمیایی در سطح مشترک بین کانی و مایع می‌گردد. وقتی جریان عبور نماید، تبادل الکترون بین فلز و محلول یون‌ها در سطح مشترک صورت می‌پذیرد و عمل الکترولیز انجام می‌شود. در شیمی فیزیک این اثر به نام ولتاژ اضافی موسوم است. چون سرعت شارش جریان در الکترولیت خیلی کندتر از داخل فلز است، تجمع یون‌ها توسط ولتاژ خارجی صورت می‌گیرد و وقتی جریان قطع شود ولتاژ باقی‌مانده، با پخش یون‌ها به عقب و به طرف حالت تعادل اولیه آن‌ها، واپاشی می‌یابد (شکل ۲-۵) [Telford et al., 1990].



شکل ۲-۵: اثر قطبش القایی و الکترودی. الف) توزیع نرمال یون‌ها در ماسه سنگ متخلخل، ب) پلاریزاسیون غشایی در ماسه سنگ متخلخل ناشی از یک ولتاژ dc اعمال شده، ج) جریان الکترولیتی در حفره بالایی و قطبش الکترودی در حفره پایینی [After Telford et al, 1990].

۲-۶ طراحی برداشت

اولین قدم در طراحی یک برداشت ژئوفیزیکی، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به مطالعات انجام شده در منطقه و کلیه داده‌های ژئوفیزیکی موجود در رابطه با هدف مورد نظر است. قبل از انجام طراحی اولیه، کلیه مسائل و تقاضاهای موجود باید معرفی شوند. اطلاعات مربوط به هدف شامل اطلاعاتی در رابطه با نحوه دسترسی به منطقه، فاصله تا ساختمان‌های موجود، خطوط راه‌آهن، جاده‌ها، تأسیسات الکتریکی، توپوگرافی و همچنین موقعیت لوله‌ها، کابل‌ها و تأسیسات بشری می‌باشد. مهم‌تر از موارد بیان شده، دسترسی به نقشه‌ها، مقاطع و یا سایر مدارک گرافیکی مربوط به منطقه است. مقیاس آن‌ها باید به اندازه‌ای باشد که امکان وارد کردن دقیق اندازه‌گیری‌های انجام شده در هر ایستگاه باشد [کلاگری، ۱۳۷۱].

منطقه مورد مطالعه از نوفه‌های ساخت دست بشر مانند خطوط راه‌آهن، جاده‌ها، تأسیسات الکتریکی،

کابل‌ها و ... دور می‌باشد. همچنین توپوگرافی منطقه هموار بوده و نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ منطقه در دسترس می‌باشد. در این پروژه از روش ترکیبی سونداژ و پروفیل استفاده شده است. همچنین برای شناسایی روند کلی مناطق بی‌هنجاری از آرایش مستطیلی استفاده شد. بنابراین در ادامه مطلب آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی و مستطیلی بررسی می‌شوند.

۷-۲ برداشت با آرایش دوقطبی - دوقطبی

استفاده از انواع آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی در اکتشافات الکتریکی از سال ۱۹۵۰ گسترش زیادی پیدا کرده است. آرایش مورد استفاده در این تحقیق، آرایش دوقطبی-دوقطبی محوری می‌باشد. در این آرایش فاصله بین الکترودهای جریان و الکترودهای پتانسیل با یکدیگر برابر بوده و برابر a در نظر گرفته می‌شود. همچنین فاصله بین الکترودهای جریان و فاصله بین الکترودهای پتانسیل، ثابت است و از فاصله بین مراکز دوقطبی‌های یعنی d کوچکتر است [کلاگری، ۱۳۷۱].

همان‌گونه که در شکل (۶-۲) مشاهده می‌شود، فاصله بین الکترودهای جریان و پتانسیل از a تا na تغییر می‌کند؛ که n را بین ۱ تا ۸ در نظر می‌گیرند. زیرا به ازای مقادیر بزرگتر n ، پتانسیل برداشتی n در حد نوفه زمینه کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۶-۲) ابتدا تمام اندازه‌گیری‌ها برای $n=1$ انجام می‌شود و مقادیر پتانسیل برای نقاط ردیف اول به دست می‌آید. سپس با $n=2$ ردیف دوم پروفیل جاروب می‌شود و به همین ترتیب ردیف‌های بعدی با افزایش n برداشت می‌گردند [Loke, 2002]. پس از انجام عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها، شبه مقطع^۱ قائم که تصویری خام و تقریبی از زیر زمین ارائه می‌دهد، رسم می‌گردد. هر یک از مقادیر برداشتی، به نقطه وسط دوقطبی‌های جریان (C_1C_2) و دوقطبی‌های پتانسیل (P_1P_2) نسبت داده می‌شود؛ که عمق این نقطه از سطح زمین را می‌توان از محل تلاقی دو خطی که با زاویه ۴۵ درجه از

^۱ Pseudosection

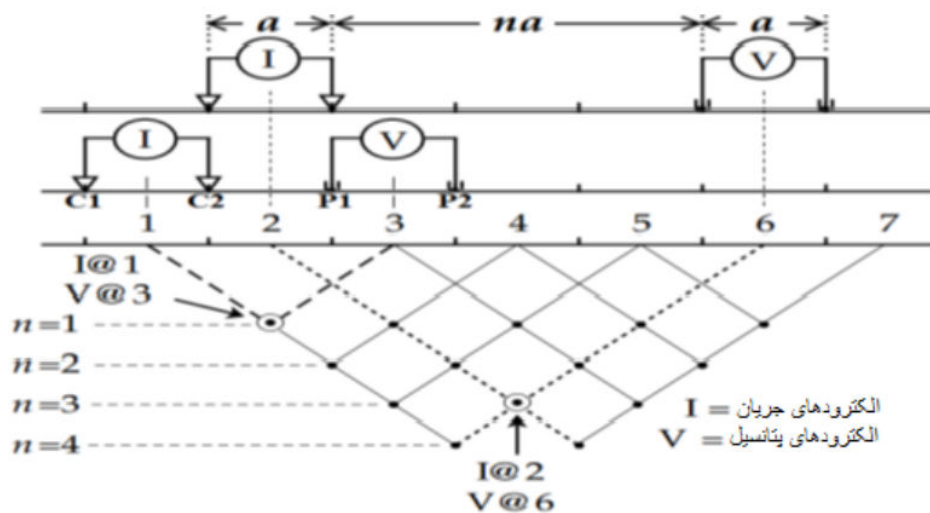
مراکز الکترودهای پتانسیل و جریان رسم می‌شوند به‌دست آورد [Milsom, 2007]. این نقاط فقط یک نقطه انتصابی برای رسم شبه‌مقطع اولیه‌اند و عمق واقعی بعد از تفسیر و وارون‌سازی به‌دست می‌آید. آرایش دوقطبی-دوقطبی که به دلیل جفت‌شدگی الکترومغناطیسی پایین کاربرد گسترده‌ای در برداشت‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی دو بعدی دارد، دارای بیشترین حساسیت در زیر الکترودهای جریان و پتانسیل است.

با افزایش n ، یعنی افزایش فاصله جدایش الکترودهای جریان و پتانسیل از یکدیگر نسبت به a ، تمرکز حساسیت در نواحی ذکر شده (اعماق مربوط به n های بالا) افزایش یافته و الگوی منحنی‌های تراز تقریباً عمودی می‌شود، به همین دلیل این آرایش به شدت به تغییرات افقی حساس است؛ ولی در مورد تغییرات عمودی ضعیف عمل می‌کند. آرایش دوقطبی-دوقطبی در شناسایی دایک، گسل و حفره بسیار مؤثر است، اما بر روی رسوبات لایه‌ای عملکرد ضعیفی از خود نشان می‌دهد [Loke, 2002]. در این آرایش، عمق اکتشاف میانگین، علاوه بر فاصله الکترودی (a) به فاکتور n نیز بستگی دارد و عموماً عمق نفوذ این آرایش از آرایش ونر کمتر است. برای مقادیر n بالا، تخمین عمق ساختارها با خطای زیاد همراه است. یکی از عیوب این آرایش قدرت سیگنال پایین برای مقادیر n بالاست. یک راه برای افزایش عمق نفوذ، افزایش a به جای n می‌باشد؛ ولی در این حالت تفکیک‌پذیری جانبی نیز کاهش می‌یابد [Loke, 2002].

به دلایل فوق استفاده از دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری با مدارهای حذف نوفه و دقت فراوان در برداشت‌های صحرائی به‌ویژه اتصال کامل الکترودها به زمین از شرایط جانبی کار با این روش می‌باشد. یادآوری این نکته ضروری است که برای جلوگیری از ورود نوفه باید الکترودهای پتانسیل، غیرقابل پلاریزه باشند.

در آرایش دوقطبی-دوقطبی، مقاومت‌ویژه ظاهری انتصابی به هر نقطه از شبه‌مقطع، بیشتر تحت تأثیر نواحی زیر دوقطبی‌ها و دیگر نواحی با حساسیت بالاست و کمترین اطلاعات را از نواحی اطراف نقطه ترسیمی

در این آرایش به دست می‌دهد. بنابراین شبه‌مقاطع‌ی که توسط این آرایش ترسیم می‌شوند، شباهت چندانی با توزیع واقعی مقاومت‌ویژه ندارند، لذا برای رسیدن به نتایج دقیق باید حتماً مدل‌سازی بر روی داده‌ها انجام شود [Loke, 2002].

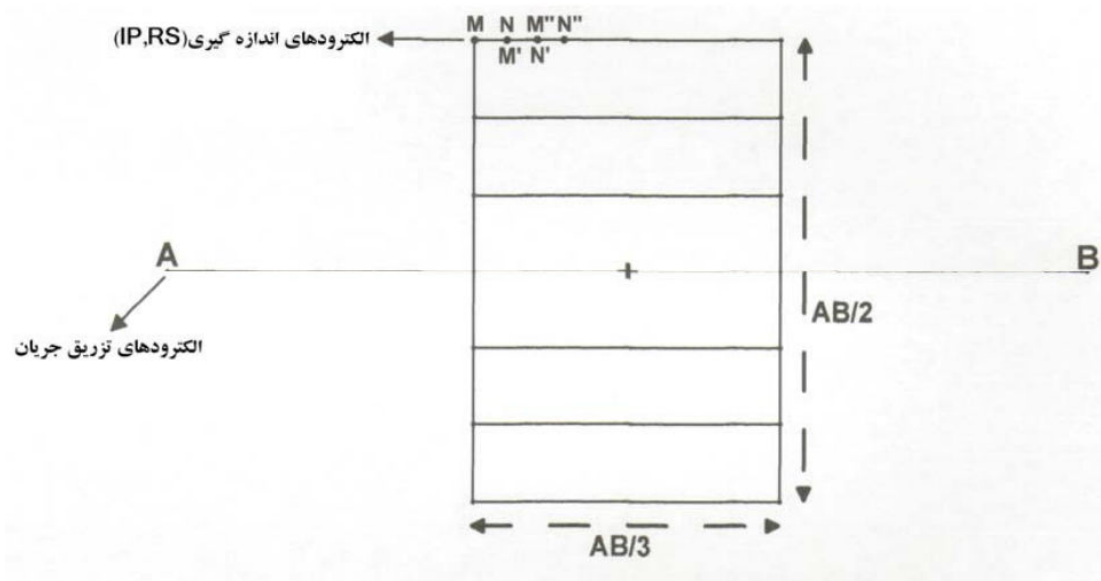


شکل ۲-۶: نمایش شماتیک از آرایه دوقطبی- دوقطبی و رسم شکل شبه‌مقطع [After Lowrie, 2007].

۸-۲ آرایش مستطیلی

در این آرایش، الکترودهای جریان (AB) با فاصله ثابت بر روی یک خط بر روی زمین پیاده می‌شوند. اندازه‌گیری‌ها با جا به جایی الکترودهای M و N در روی پروفیل‌هایی به موازات AB، انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷-۲) مشاهده می‌شود؛ این برداشتها در مستطیلی به پهنای $AB/3$ و به طول $AB/2$ صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های IP و مقاومت‌ویژه به مرکز MN نسبت داده می‌شوند.

عمق نفوذ جریان در این آرایش به فاصله AB بستگی داشته و به طور تجربی این عمق نفوذ را برابر $AB/4$ در نظر می‌گیرند. بعد از تکمیل برداشت یک مستطیل، AB را در امتداد قبلی به اندازه کمی کمتر از $AB/3$ جا به جا می‌کنند؛ به گونه‌ای که تعدادی از نقاط مستطیلی قبلی را نیز تحت پوشش قرار دهد.



شکل ۷-۲: نمای کلی از شبکه برداشت مستطیلی [After Loke, 2002].

برای محاسبه فاکتور هندسی (K) در آرایش مستطیلی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$K=2\pi/(1/AM-1/AN-1/BM+1/BN) \quad (۱۲-۲)$$

در این آرایش، نقاط اندازه‌گیری که در امتداد AB قرار دارند، دارای فاصله عمودی $y=0$ می‌باشند؛ مقادیر طول و عرض نقاط M و N و همچنین طول نقطه B نسبت به نقطه A تعیین شده و سپس با استفاده از رابطه (۱۲-۲) محاسبه می‌شود. برای راحتی کار می‌توان از جداولی که بر حسب مقادیر AB و MN، فاصله پروفیل‌ها و (x و y) نقاط برداشت است، نیز استفاده نمود [Loke, 2002].

از مزایای آرایش مستطیلی این است که در آن فقط جفت الکترودهای MN جا به جا می‌شوند. این موضوع باعث افزایش سرعت عملیات می‌شود. چون دیگر نیازی به جابه‌جا کردن الکترودهای جریان، ژنراتور و سایر دستگاه‌های حجیم فرستنده جریان نیست و فقط الکترودهای پتانسیل و پتانسیومتر متصل را باید جابه‌جا کرد. به علاوه شدت جریان به راحتی ثابت نگه داشته می‌شود [Loke, 2002].

در این آرایش، از خط جریان (AB) نسبتاً بزرگی استفاده می‌شود؛ تا زون مورد مطالعه دارای محدودیت نبوده و پروفیل‌ها کوتاه و ایستگاه‌های برداشت نزدیک به هم نباشند. ولی این مسأله سبب می‌شود تا نسبت L/I (L: نصف فاصله AB و I جریان) بزرگ‌تر شده و سیگنال ΔV_{IP} (ولتاژ IP) کوچک شود؛ که برای اندازه‌گیری دقیق نیاز به دستگاه فرستنده قوی و دستگاه گیرنده حساسی است [Loke, 2002].

خط فرستنده AB معمولاً عمود بر امتداد کانسار در نظر گرفته می‌شود. با این آرایش می‌توان کانی-سازی‌های رگه‌ای تقریباً عمودی و لایه‌های هادی تقریباً افقی را شناسایی نمود. به عبارت دیگر، این آرایش بیشتر برای تهیه نقشه هدایت الکتریکی کانسارهای فوق در عمق مشخص به کار می‌رود [Loke, 2002].

۹-۲ مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در منطقه مورد مطالعه

داده‌های برداشت‌شده در عملیات صحرایی در حقیقت یک‌سری داده‌های خام می‌باشند؛ که توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی این داده‌ها (به‌طور مستقیم) غیرممکن است. بنابراین تعیین رابطه بین داده‌های صحرایی به‌دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به عبارت دیگر، مدل‌سازی داده‌های برداشت‌شده برای توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری است. در مدل‌سازی ریاضی، روابط فیزیکی توسط یک‌سری معادلات دیفرانسیل و معادلات انتگرالی بیان می‌شوند، به‌گونه‌ای که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود [Dey and Morrison, 1997].

۱-۹-۲ روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی

مدل‌سازی ژئوفیزیکی به دو دسته کلی مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی تقسیم‌بندی می‌شود [کلاگری، ۱۳۷۱].

الف) مدل‌سازی فیزیکی

مدل‌سازی فیزیکی، شبیه‌سازی ساختار زمین در مقیاس آزمایشگاهی است. این روش مدل‌سازی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. همچنین شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی، به خوبی شرایط غیرقابل پیش‌بینی زمین را فراهم نمی‌کند. با پیشرفت علوم رایانه این روش عمده‌تأ جای خود را به مدل‌سازی عددی با برنامه‌های رایانه‌ای داده است [Dey and Morrison, 1997].

ب) مدل‌سازی عددی

وظیفه یک ژئوفیزیکست درک داده‌های جمع‌آوری‌شده در صحرا و تفسیر آن‌ها به صورت یک مدل زمین-شناسی قابل قبول، در حد توان روش‌های مختلف ژئوفیزیک برای انجام این وظیفه است. ژئوفیزیکست‌ها برای درک این موضوع مسائل پیشرو را برای شاخه‌های مختلف ژئوفیزیک با استفاده از معادلات مربوطه حل می‌کنند. بنابراین تئوری روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مجهز به ابزارهای مختلف ریاضی، مبنای حل مسائل پیشرو را تشکیل می‌دهد. تئوری این روش‌ها برای درک رفتار داده‌های ژئوفیزیکی از اهمیت شایانی برخوردار است [Ward, 1990].

به دلیل پیشرفت‌های خیلی سریع علوم رایانه، تکنولوژی نرم‌افزاری و روش‌های عددی در مدل‌سازی ریاضی، بهره‌گیری از تئوری وارون فراهم گردیده است. توسعه چشمگیر علوم و تکنولوژی در این زمینه در طی سه دهه گذشته، قدرت درک ژئوفیزیکست‌ها را از داخل زمین بهبود بخشیده است [Ward, 1990].

- **مدل‌سازی پیشرو (مستقیم):** در مدل‌سازی پیشرو ورودی فرآیند مدل‌سازی یک مدل آزمون (فرضی) از زمین می‌باشد و در طی فرآیند با توجه به معادلات حاکم بر مسئله، داده‌های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به عنوان خروجی مدل ارائه می‌شوند. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترها) آن قدر ادامه می‌یابد تا پاسخ مدل، برازش خوبی با داده‌های صحرایی پیدا کند؛ یعنی از مدل، داده‌ها به دست

می‌آیند. مدل‌سازی پیشرو بر مبنای آزمون و خطا انجام می‌شود. در این روش یک توزیع خاص برای اجزای زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شود؛ سپس پاسخ این مدل تحت آرایش الکترونی مورد نظر محاسبه می‌شود [Dey and Morrison, 1997].

- **مدل‌سازی وارون:** در مدل‌سازی وارون سعی می‌شود تا با توجه به داده‌های برداشت شده، مدل تخمین زده شود. بقیه مراحل مدل‌سازی وارون همانند مدل‌سازی پیشرو است. در واقع تفاوت مدل‌سازی وارون با مدل‌سازی پیشرو در نحوه انتخاب مدل اولیه است. انتخاب مدل در روش وارون کمی سخت‌تر است، ولی پاسخ‌های حاصل به واقعیت نزدیک‌تر است. همچنین تعداد تکرارها برای کاهش خطا کمتر می‌باشد. به دلیل پیچیده‌تر بودن مدل در روش وارون، زمان لازم برای محاسبه پاسخ‌های مدل و حجم اشغالی بیشتر است [Loke, 2004]. در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی پارامترهای مدل، مقادیر مقاومت‌ویژه سلول‌های مدل و داده‌ها، مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری برداشت شده هستند. رابطه ریاضی بین پارامترهای مدل و پاسخ آن‌ها از روش‌های تفاضل محدود^۱ [Hedlin and Constable, 1990] و یا اجزاء محدود^۲ [Okan, 2002] فراهم می‌شوند. در تمامی روش‌های بهینه‌سازی، مدل اولیه در فرآیندی تکرارشونده طوری بهبود می‌یابد تا اختلاف بین داده‌های برداشت شده (y) و پاسخ‌های مدل (f) کاسته شود.

$$y = col(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (۱۳-۲)$$

m تعداد قرائت‌ها است. پاسخ‌های مدل را می‌توان به طریق مشابهی نشان داد:

$$f = col(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (۱۴-۲)$$

پارامترهای مدل به صورت بردار زیر ارائه می‌شوند:

^۱ Finite-difference

^۲ Finite-element

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (15-2)$$

که n تعداد پارامترهای مدل است. تفاوت بین داده‌های برداشت‌شده و پاسخ‌های مدل از بردار تفاضل g که به صورت زیر است، محاسبه می‌شود.

$$g = y - f \quad (16-2)$$

در روش بهینه‌سازی کمترین مربعات، مدل اولیه طوری بهینه می‌شود که مجموع مربعات خطا (E)، که تفاضل بین مقادیر پاسخ‌های مدل و داده‌های برداشت‌شده است، کمینه می‌شود.

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (17-2)$$

برای کاهش خطا از معادله گوس - نیوتن استفاده می‌شود. بدین وسیله پارامترهایی از مدل که باید تغییر کند تا مجموع مربعات خطا (E) کاهش یابد، باید مشخص شوند [Loke and Barker, 1995]:

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (18-2)$$

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

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (19-2)$$

به دلیل کاستی‌های معادله گوس - نیوتن، این روش کمتر مورد استفاده قرار گرفته و در عوض از بهبودیافته آن با عنوان مارکوارت - لونبرگ^۱ استفاده می‌شود [Loke and Barker, 1995].

^۱ Marquardt-levenberg

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (20-2)$$

در معادله فوق J ماتریس ژاکوبین^۱ و λ فاکتور تعدیل^۲ است. این روش با عنوان رگرسیون ریج نیز شناخته شده است. این روش به خوبی پاسخ می‌دهد ولی در مواردی که پارامترهای مدل زیاد باشند، نظیر مدل‌های دو و سه بعدی، مدل تولیدشده با روش رگرسیون ریج، توزیع مقاومت ویژه نامنظم همراه با مناطقی با مقاومت ویژه بسیار بالا یا پایین خواهد داشت. برای رفع این مشکل معادله کمترین مربعات گوس - نیوتن بار دیگر به صورت معادله زیر بهینه شده، به طوری که تغییرات فضایی در پارامترهای مدل را کمینه می‌کند [Loke and Barker, 1995].

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T - \lambda F q_k \quad (21-2)$$

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (22-2)$$

C_x ، C_y و C_z ماتریس‌های هموارسازی در جهت‌های x ، y و z هستند. α_x ، α_y و α_z وزن‌های نسبی داده شده به فیلترهای هموارسازی در جهات ذکر شده می‌باشند. معادله (22-2)، مربع تغییرات فضایی یا سختی مقادیر مقاومت ویژه مدل را نیز کمینه می‌کند. در واقع این همان روش بهینه‌سازی هموارسازی است. روش مذکور مدلی با تغییرات تدریجی مقاومت ویژه تولید می‌کند. استفاده از این روش وارون‌سازی برای مناطقی مناسب است که تغییرات زمین‌شناسی آن‌ها به صورت تدریجی بوده و ناگهانی نباشد. در شرایطی که مناطق در زیر سطح به صورت درونی همگن هستند، ولی با محیط پیرامون خود متفاوت بوده و دارای مرزهای تند هستند، بهینه‌شده معادله فوق که به روش وارون‌سازی بلوکی معروف است، جواب‌های به مراتب

^۱ Jacobwin

^۲ Damping factor

قابل قبول تری می دهد که به صورت زیر است [Loke and Barker, 1995]:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (23-2)$$

$$F = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (24-2)$$

R_m و R_d ماتریس های وزنی هستند.

برای محاسبه مقاومت ویژه سه روش وجود دارد: روش تحلیلی، روش جز مرزی^۱ و روش اجزاء محدود و تفاضل محدود. روش تحلیلی دقیق ترین روش است ولی استفاده از این روش محدود به چند شکل هندسی ساده (کره و استوانه) است. روش جز مرزی از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار است اما در این روش نیز تعداد نواحی با مقدار مقاومت ویژه متفاوت محدود است (معمولاً کمتر از ۱۰ لایه). در بررسی های مهندسی و زیست محیطی می توان توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح را به صورت اختیاری در نظر گرفت. در نتیجه روش های اجزاء محدود و تفاضل محدود تنها گزینه های کاربردی هستند. دو روش مذکور می توانند زیر سطح را به هزاران سلول با مقاومت ویژه های متفاوت تقسیم کنند [Loke, 2004].

۲-۱۰ روش های عددی برای حل مسائل وارون سازی

از میان روش های عددی حل مسائل وارون سازی، روش کمترین مربعات به دلیل سادگی ریاضی، از پرتعدادترین روش ها است. همچنین به دلیل این که در الگوریتم یکی از نرم افزارهای مورد استفاده در این پایان نامه، این روش به کار برده شده است، به توضیح آن پرداخته می شود. در این مدل سازی قبل از هر چیز به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل سازی نیاز می باشد [Loke and Lane, 2004].

مدل اولیه در نرم افزار Res2dinv یک مدل همگن متناسب با داده های مشاهده ای است، به گونه ای که

^۱ Boundary element method

منجر به تغییرات شدید در مراحل تکرار نشود. پس از تخمین مدل اولیه نوبت به تصحیح این مدل با هدف رسیدن به تطابق قابل قبول با داده‌های صحرایی می‌رسد. برای این منظور دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارت‌اند از روش کمترین مربعات گوس - نیوتن^۱ و روش شبه‌نیوتن^۲.

۲-۱۰-۱ روش کمترین مربعات گوس - نیوتن

یکی از روش‌های معمول برای حل مسائل غیرخطی، روش بهینه‌سازی گوس - نیوتن می‌باشد. این روش به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل وارون‌سازی از جمله در نرم‌افزار Res2dinv به کار می‌رود [Sasaki, 1992]. روش مدل‌سازی وارون کمترین مربعات گوس - نیوتن در سه مرحله انجام می‌شود. مرحله اول، محاسبه مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری برای مدل به کار گرفته شده می‌باشد. این مرحله با استفاده از روش تفاضل محدود یا روش اجزاء محدود انجام می‌شود. مرحله دوم، محاسبه ماتریس ژاکوبین (ماتریس مشتقات جزئی مرتبه اول) می‌باشد. مرحله سوم حل سیستم معادلات خطی می‌باشد. این مراحل به‌صورت تناوبی تکرار می‌شوند تا همخوانی مناسبی بین مدل فرض شده با مدل صحرایی ایجاد شود و یا برنامه به حداکثر تکرار تعریف شده خود برسد [Loke and Lane, 2004].

از مزایای این روش مدل‌سازی، نزدیک بودن مدل ساخته‌شده به‌وسیله نرم‌افزار با مدل زمینی در همان تکرارهای اولیه می‌باشد. اما به دلیل محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار این روش زمان‌بر بوده و نیاز به حافظه زیادی برای مدل‌سازی دارد [Loke and Lane, 2004].

۲-۱۰-۲ روش شبه‌نیوتن

در روش گوس - نیوتن ماتریس ژاکوبین در هر بار تکرار محاسبه می‌شود [Loke and Lane, 2004].

^۱ Gauss- Newton

^۲ Quasi- Newton

روش شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین به‌وسیله استفاده از یک روش به‌روزرسانی اجتناب می‌کند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد، مشتقات جزئی می‌توانند به‌طور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن به‌عنوان مدل اولیه، محاسبه شوند. روش شبه‌نیوتن از معادله به‌روزرسانی زیر استفاده می‌کند:

$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^t \quad (25-2)$$

$$B_{i+1} u_i = \frac{\Delta y_i - B_i P_i}{P_i P_i^t} B_i + u_i P_i^t \quad (26-2)$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i \quad (27-2)$$

در روابط بالا y_i پاسخ مدل برای i امین تکرار، B_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای $i+1$ امین تکرار با استفاده از تقریب ماتریس ژاکوبین و P_i و B_i بردار انحراف پارامتر می‌باشند. لازم به ذکر است که روش‌های دیگری نیز برای روش شبه‌نیوتن وجود دارد. مدل‌سازی وارون شبه‌نیوتن در چهار گام اصلی انجام می‌شود. در گام اول پارامترهایی که فرآیند وارون‌سازی را کنترل می‌کنند، باید انتخاب شوند. میرایی اولیه، میرایی کمینه و همچنین ماکزیمم تعداد تکرارها برای این روش مدل‌سازی تعیین می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر 0.2 و 0.4 برای دو عامل میرایی اولیه و میرایی کمینه نتایج رضایت‌بخشی را برای اکثر داده‌های صحرایی ارائه می‌دهند [Loke and Lane, 2004].

بعضی معیارهای همگرایی مانند خطای RMS^۱ کمینه باید مشخص شود. برای داده‌های صحرایی که سطح دقیق نوفه در آن‌ها مشخص نیست، مناسب‌تر آن است که از تغییر در خطای RMS استفاده شود که این امر با ضابطه زیر تعریف می‌شود:

^۱ Root mean square

$$e_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{\varepsilon_i} \quad (28-2)$$

که ε_i و ε_{i+1} ، خطای RMS برای i امین و $i+1$ امین تکرار و e_i میزان خطای کمینه می‌باشد. به‌طور معمول فرآیند مدل‌سازی وارون زمانی که e_i کمتر از ۰/۰۵ است، متوقف می‌شود.

در گام دوم یک مدل زمین همگن به‌عنوان مدل اولیه برای اولین تکرار در نظر گرفته می‌شود. مقاومت‌ویژه این مدل متناسب با داده‌های صحرایی برداشت‌شده می‌باشد. لگاریتم مقاومت‌ویژه این مدل به‌وسیله میانگین گرفتن از لگاریتم‌های مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده f_i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f(x) = r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (29-2)$$

حال مقاومت‌ویژه ظاهری برای مدل جدید با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود. در این رابطه n تعداد نقاط داده‌ها است. در این مرحله ماتریس ژاکوبین B_0 محاسبه شده و در حافظه رایانه ذخیره می‌شود. معادله کمترین مربعات نیز برای تعیین بردار انحراف پارامتر P_0 حل می‌شود. ارزیابی مقاومت‌ویژه بلوک‌ها به‌وسیله رابطه (۴-۲۷) انجام می‌شود.

$$r_1 = r_0 + P_0 \quad (30-2)$$

در گام سوم روش به‌روزرسانی بیان‌شده در روش شبه‌نیوتن برای تقریب ماتریس ژاکوبین B_{i+1} برای تکرار بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور معمول اگر خطای RMS در تکرار قبلی کاهش پیدا کرده باشد، عامل میرایی نیز اگر هنوز بزرگ‌تر از λ_m در گام اول باشد، کاهش پیدا می‌کند. اگر خطای RMS از تکرار قبلی بزرگ‌تر باشد، جستجوی خطی با استفاده از درونیابی درجه دوم برای پیدا کردن اندازه گام بهینه برای بردار انحراف پارامتر P مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مورد معمولاً در یک مدل با یک خطای RMS کمتر رخ می‌دهد. اگر این روش بازهم مؤثر نباشد، عامل میرایی افزایش پیدا می‌کند و بردار P_1 دوباره

محاسبه می‌شود.

در گام چهارم بعد از آن یک مدل جدید به دست می‌آید؛ بردار انحراف پارامتر P_{i+1} ، با استفاده از ماتریس

ژاکوبین اندازه‌گیری شده و B_{i+1} اندازه‌گیری شده، محاسبه می‌شود. مراحل سوم و چهارم مرتباً تکرار

می‌شوند تا این که برنامه همگرا شود، یا این که به ماکزیمم تعداد تکرارها برسد

[Loke and Lane, 2004].

روش شبه‌نیوتن در مقایسه با روش گوس - نیوتن، روشی سریع‌تر است. زیرا ماتریس ژاکوبین در هر

تکرار محاسبه نمی‌شود. همچنین حافظه کمتری از رایانه را نیز اشغال می‌کند. این مزایا باعث شده تا در

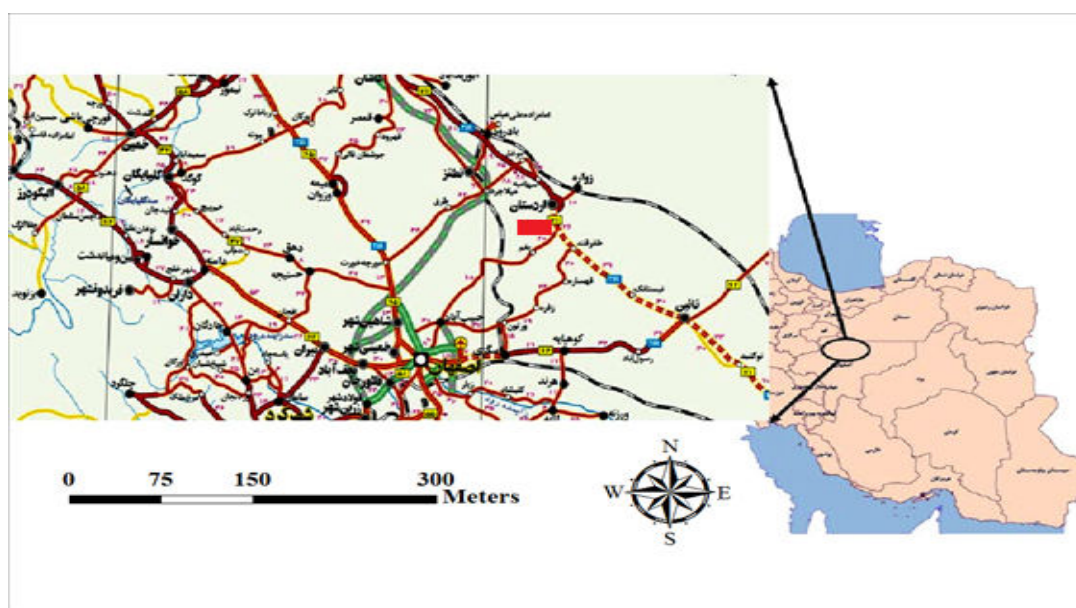
وارون‌سازی بیشتر روش شبه‌نیوتن استفاده شود [Loke and Lane, 2004].

فصل سوم

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

۱-۳ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد نظر از لحاظ تقسیمات کشوری در استان اصفهان و در جنوب شهرستان اردستان واقع شده است. مسیر دسترسی به محدوده از طریق جاده آسفalte قدیمی اردستان به روستای داوران در حدود ۱۴ کیلومتر می باشد. در شکل (۱-۳) موقعیت و راه های دسترسی به منطقه مورد مطالعه با مستطیل قرمز رنگ نشان داده شده است. آب و هوای منطقه به دلیل نزدیکی و مجاورت با کویر، معمولاً در تابستان گرم و خشک و در زمستان سرد است؛ در حالی که نواحی کوهستانی منطقه در تابستان آب و هوای نسبتاً معتدلی دارد. مختصات جغرافیایی گوشه های محدوده مورد مطالعه در جدول (۱-۳) آمده است.



شکل ۱-۳: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و راه های دسترسی به آن.

جدول ۱-۳: مختصات جغرافیایی گوشه‌های محدوده مورد مطالعه (UTM_ WGS 1984_Zone 39N).

X	Y
623135	3679873
622669	3680249
622879	3680497
622749	3680188

۲-۳ زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

۱-۲-۳ زمین‌شناسی عمومی

در بخش‌های جنوبی اردستان سنگ‌های آتشفشانی ائوسن دارای رخنمون خوبی هستند. بخش اندکی از این سنگ‌های آتشفشانی را سنگ‌های متعلق به سری ماگمایی شوشونیتی به خود اختصاص داده‌اند. کانی‌های سازنده سنگ‌های شوشونیتی، کلینوپیروکسین، اوژیت، آنالسیم، پلاژیوکلاز (لابرادوریت)، سانیدین، الیوین‌های کلریتی‌شده، آپاتیت، سلادونیت، پرهنیت، پومپلئیت، کلسیت، اپیدوت، ایلمنیت و مگنتیت می‌باشند. آنالسیم‌ها کانی‌هایی ثانویه بوده و از متاسوماتیسم لوسیت به‌دست آمده‌اند. تبدیل شدن بخش‌هایی از بلورهای سانیدین به آل بیت و آنورتوکلاز نیز به خوبی در منطقه مشخص است. برخی از بلورهای آنالسیم نیز تبدیل به آل بیت شده‌اند. از دید چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی در منطقه اردستان واحدهای مختلف آتشفشانی، آذرآواری و سنگ‌های نفوذی دیده می‌شود. این واحدها شامل تناوبی از توف، واحد توف و آذرآواری‌های ائوسن میانی، برش‌های فلسیک با آذرآواری‌های متوسط تا بازیک، مجموعه‌ای از واحد آندزیت، بازالت آندزیتی ائوسن بالایی، آندزیت-بازالت آندزیتی خاکستری تیره به همراه گدازه‌های ریولیتی-ریوداسیتی سفید رنگ و توف برشی است.

واحدهای لیتولوژی موجود در منطقه توده‌های آتشفشانی (آندزیت و بازالت)، ماسه‌سنگ و توف هستند.

کانی‌سازی به صورت مالاکیت، آزوریت، کالکوپیریت و کالکوسیت در واحدهای آذرین تشکیل شده است (شکل ۳-۲). روند عمومی واحدهای لیتولوژی و همچنین کانی‌سازی به صورت تقریباً شمال غرب - جنوب شرق است [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۸].



شکل ۳-۲: شمایی از رخنمون کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه.

۳-۲-۲ زمین‌شناسی ساختمانی

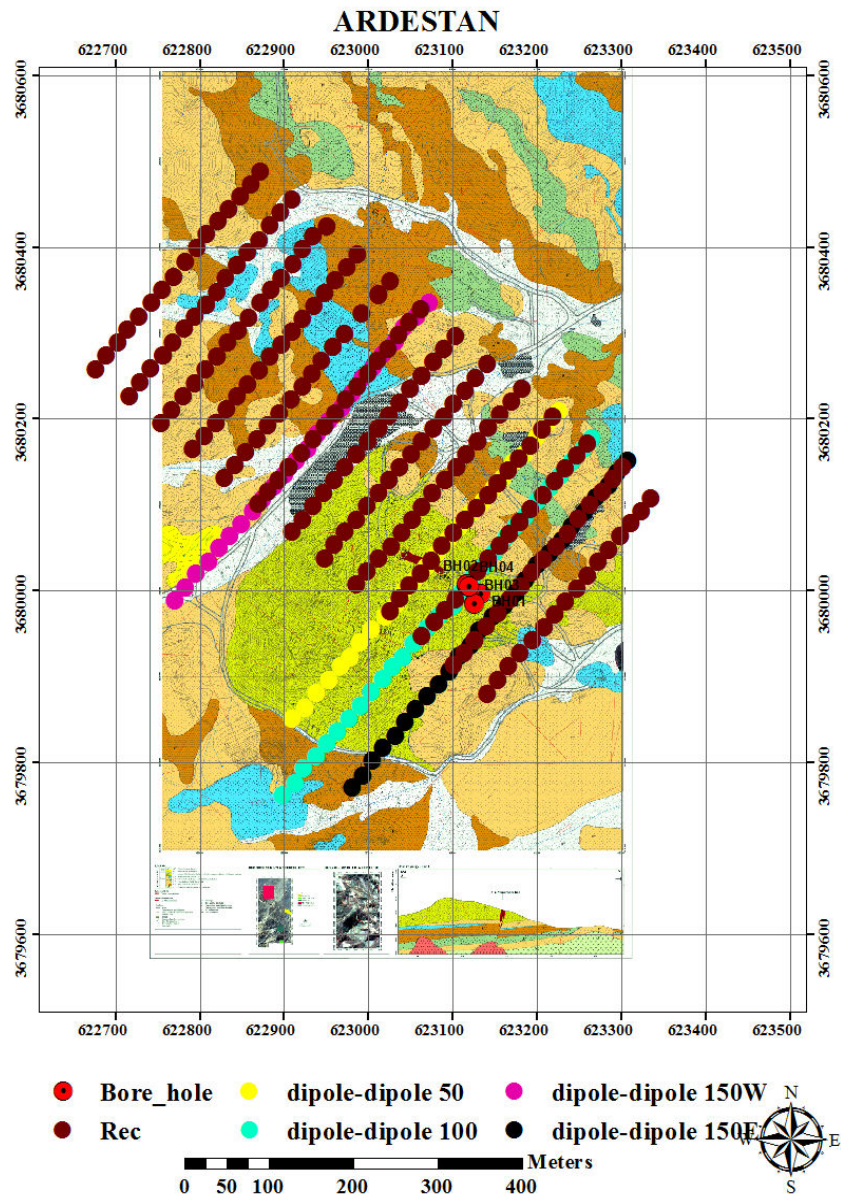
ورقه یکصد هزارم اردستان در حاشیه باختری زون ایران مرکزی، در زیر زون ارومیه - دختر قرار دارد. زیر زون ارومیه- دختر عمدتاً از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی - رسوبی وابسته به آن تشکیل شده است؛ که این سنگ‌ها عموماً به ترشیری تعلق داشته و توده‌های نفوذی متعددی با ترکیب متوسط تا بازیک در داخل آن‌ها نفوذ کرده‌اند. با توجه به نبود رسوبات مربوط به کربنیفر، احتمالاً واحدهای پرمین با ناپیوستگی در کنار ته‌نشست‌های دونین قرار می‌گیرند. البته رخنمون‌های دونین اغلب به صورت گسله کنار بقیه واحدها قرار گرفته است. ولی به هر حال هیچ نوع نشانه‌ای از ته‌نشست‌های کربنیفر در منطقه وجود ندارد و این

نبود را می‌توان احتمالاً به فاز هرسینین نسبت داد. بعد از تشکیل رسوبات مربوط به پرمین، یک فاز خشکی-زایی موجب بالآمدگی حوضه و ظهور ته‌نشست‌های تخریبی و آهن‌دار (Ferrogenous) سرخ‌شیلی می‌شود. حرکات سیم‌رین پیش‌بین در حد بین تریاس میانی و بالایی، منطقه را تحت تأثیر قرار داده و سازند نای‌بند متعلق به تریاس بالایی با یک کنگلومرای قاعده‌ای به‌صورت دگرشیب روی تریاس میانی (سازند شتری) می‌نشیند. گذر تریاس بالایی به ژوراسیک (سازند شمشک)، تدریجی است.

در حد فاصل ژوراسیک با کرتاسه، حرکات تکتونیکی سیم‌رین پسین موجب بالآمدگی و چین‌خوردگی رسوبات ژوراسیک شده و متعاقب آن فاز فرسایشی ناشی از این حرکات زمین‌ساختی رسوبات سرخ و آواری قاعده کرتاسه را به‌صورت دگرشیب روی لایه‌های قدیمی‌تر (سازند شمشک) قرار می‌دهد. ته‌نشست‌های مربوط به نئوکومین در منطقه شناخته نشده‌اند و شروع کرتاسه آغازی از آپسین - آلبین می‌باشد. با توجه به این‌که رسوبات مربوط به سنومانین تا کنیاسین در منطقه مشاهده نشده است، احتمالاً فاز اتریشین، محدوده مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است.

رسوبات پالئوسن در محدوده این ورقه وجود ندارد و ائوسن با یک کنگلومرای با ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر به‌طور دگرشیب و گاه گسله در مجاورت واحدهای کرتاسه قرار دارد. این دگرشیبی نشانگر حرکات شدید فاز کوهزایی لارامید می‌باشد که هم‌زمان در بیشتر نقاط ایران مؤثر بوده است [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۸].

در شکل (۲-۳) نقشه زمین‌شناسی ۱:۶۶۶۷ محدوده مورد مطالعه به همراه پروفیل‌های ژئوفیزیکی نشان داده شده است.



LEGEND

Cenozoic	Quaternary	Q^{al}	Q ^{al} : Alluvial channel deposits
		Q^t	Q ^t : Young & low level traces
	Eocene	E^t	E ^t : Mixture Of Volcanic Rocks Such As Basalt, Andesitic & Dacitic Tuff, Breccia Andesite
		E^{at}	E ^{at} : Andesite basalt, Andesite Tuff
		E^{ct}	E ^{ct} : Crystal Lithic Tuff, Rhyodacitic Tuff, Gray To Pinkish
		Est	E st : Gray Andesitic Tuff & Sandy Tuff
		E^{ra}	E ^{ra} : Red Andesite And Andesitic Tuff
		E^{pa}	E ^{pa} : Porphyritic andesite, dark to grey coloured

شکل ۳-۳: نقشه زمین‌شناسی ۱:۶۶۶۷ محدوده مورد مطالعه به همراه پروفیل‌های ژئوفیزیکی.

۳-۲-۳ زمین‌شناسی اقتصادی

معادن و کانسارهای شناخته شده مختلفی در منطقه وجود دارد که از جمله آنها می‌توان موارد زیر را

نام برد:

• معدن باریت کمشچه

در جنوب روستای کمشچه کانی‌سازی باریت به‌صورت رگه گرمابی در درون سنگ‌های دولومیتی قهوه‌ای تا زردرنگ سازند شتری و نایبند در هسته آنتی‌کلینال کمشچه انجام گرفته و کانه‌های آن شامل گالن - کالکوپیریت، پیریت، آزوریت، مالاکیت، سروزیت و کانی‌های غیرفلزی باریت و فلئورین با رنگ‌های سفید و زرد است. مقدار کانه‌های فلزی و فلئورین در آن ناچیز بوده و فقط باریت به‌عنوان ماده اصلی توسط شرکت ایران باریت استخراج می‌گردد. علاوه بر این نشانه‌های پراکنده باریت در سایر نقاط ورقه نیز قابل رویت می‌باشد. این معدن در غرب منطقه مورد مطالعه و غرب برگه یکصد هزار می‌باشد.

• معدن متروکه سرب جنوب خاوری حسن آباد

کانی‌سازی در سنگ‌های آهک ماسه‌ای دانه‌درشت کرتاسه پایین صورت گرفته و کانه اصلی آن گالن است که همراه با آن کانه‌های فرعی اسفالریت و پیریت و کالکوپیریت دیده می‌شود. این معدن فعلاً متروکه است و استخراجی در آن صورت نمی‌گیرد. اندیس‌هایی از سرب در دولومیت و آهک‌های سازند شتری و نایبند دیده شده است. کانی‌سازی در این معدن احتمالاً در ارتباط با فازهای آخر فعالیت ماگمایی است که باعث تشکیل توده‌های نفوذی در این منطقه شده است. این معدن در شمال غرب منطقه مورد مطالعه و غرب برگه یکصد هزار می‌باشد.

• معدن متروکه سرب فسخود

این معدن در ارتفاعات باختر روستای فسخود، در آهک‌های ماسه‌ای کرتاسه پایین قرار دارد. کانی‌سازی

در این معدن به صورت گالن می باشد. به علت زیرزمینی بودن این معدن اطلاعاتی از طول و عرض رگه و عیار و سایر مشخصات معدن در دست نیست. این معدن سالهاست که متروکه می باشد. این معدن در غرب منطقه مورد مطالعه و غرب برگه یکصد هزار می باشد.

• معدن منگنز شمال توتکان

در شمال روستای توتکان، در مسیر جاده اردستان - اصفهان، رگه ای با ترکیب داسیت - آندزیتی تیره رنگ به ضخامت تقریبی ۵ الی ۶ متر دیده می شود. این رگه با راستای N50، حدود ۱۰۰ متر گسترش دارد، که ماده معدنی منگنز در آن تجمع پیدا کرده است. ظاهراً ماده معدنی تماماً استخراج شده و معدن به صورت متروکه باقی مانده است.

• آهن

در جنوب روستای حسن آباد و در شمال خاوری عباس آباد چند رگه و رگچه کوچک از مگنتیت و الیژیست در داخل سنگ های ژوراسیک دیده می شود، که به نظر می رسد به علت کوچک و ناچیز بودن رگه ها از نظر اقتصادی قابل پیگیری نباشد.

• مس

در مسیر جاده اردستان به ظفرقند، در غرب کوه شهریار، اندیسی از ملاکیت و آزوریت به صورت آغشتگی در سنگ های ولکانیکی ائوسن بالا با ترکیب آندزیت و آندزیت - بازالت دیده می شود که فاقد ارزش اقتصادی است.

• تراورتن

در راستای گسل میلاجرد - زفره و در اطراف روستاهای میلاجرد - رنگان پهنه هایی از سنگ های آهکی

تراورتن دیده می‌شود، که دارای تخلخل زیاد بوده و از نظر کیفیت چندان مناسب نمی‌باشد [اسازمان زمین-شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۸].

۳-۳ واحدهای زمین‌شناسی موجود در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مورد مطالعه

• E_1^c

شامل ستبرایی حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر کنگلومرا با جورشدگی و گردشدگی نسبتاً خوب متشکل از قطعات آهکی کرتاسه و ژوراسیک و سیمان آهکی - رسی به رنگ قرمز، ماسه سنگ خاکستری تا قرمز رنگ دانه‌ریز تا دانه متوسط، سنگ آهک ماسه‌ای نومولیت‌دار همراه با سیلتستون که در راستای مجموعه گسل - های میلاجرد - زفره برونزد دارد.

• E_2^{vs}

این واحد شامل یک‌سری از سنگ‌های آذرآواری خاکستری تا خاکستری تیره همراه با گدازه‌های داسیت - آندزیتی و آندزیتی بنفش تا سبز متمایل به تیره می‌باشد که بیشتر در باختر گسل میلاجرد - زفره، در نیمه جنوبی ورقه، برونزد دارد و ضخامتی حدود ۵۰ تا ۱۷۰ متر را در بر می‌گیرد. این واحد به‌طور گسله بر روی واحد (E_1^c) جای می‌گیرد.

• E_2^{ig}

این واحد با ستبرای حدود ۴۰ تا ۵۰ متر از سنگ‌های ایگنیمبریتی تشکیل شده است، که در جنوب باختری روستای رنگان برونزد دارد و به‌طور هم‌شیب بر روی واحد کنگلومرائی E_1^c می‌نشیند.

• E_2^s

این واحد در جنوب باختری روستای رنگان رخنمون یافته و از ماسه سنگ‌های تیره تا خاکستری با سیمان سست و شیل‌های ماسه‌ای خاکستری رنگ تشکیل شده است. واحد مزبور ضخامت زیادی ندارد و

به‌طور هم‌شیب بر روی واحد E_2^{ig} قرار می‌گیرد.

• E_2^{br}

این واحد که در جنوب باختری روستای گل آباد برونزد دارد از برش‌های داسیت - اندزیتی قرمز رنگ و توف‌های داسیتی تشکیل شده و از ضخامت ناچیزی برخوردار است.

• E_2^{an}

این واحد از آندزیت و آندزیت - بازالت تیره تا خاکستری رنگ تشکیل شده است. واحد مذکور در جنوب باختری روستای گل آباد گسترش دارد و ضخامت آن از ۴۰ تا ۱۰۰ متر تغییر می‌کند.

• E_2^{vt}

این واحد به‌صورت تناوبی از سنگ‌های ولکانیکی و آذرآواری در بخش جنوبی ورقه، در خاور گسل میلاجرد - زفره، مورد بررسی قرار گرفته است. سنگ‌های این واحد با ترکیبی داسیت - آندزیت و به رنگ بنفش تا متمایل به قرمز مشخص می‌شوند. لایه‌ها شیب نسبتاً ملایمی دارند و ضخامت مجموعه بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر در نوسان است.

• E_2^{sh}

بخشی از واحد E_2^{vc} در باختر گسل میلاجرد - زفره از شیل‌های آهکی ورقه‌ای به رنگ خاکستری تا خاکستری متمایل به سفید تشکیل شده که ضخامت آن خیلی محدود است و در باختر گسل میلاجرد - زفره مشاهده می‌گردد.

• E_3^t

این واحد به‌صورت تناوبی از توف سنگ‌های داسیت آندزیتی، توف ماسه‌ای و آهک ماسه‌ای برونزد یافته است. گسترش این واحد به‌صورت محدود، در اطراف گسل میلاجرد - زفره مشاهده می‌شود، که به‌صورت

عادی و گاه گسله بر روی واحد ولکانیکی E_2^{vc} قرار می گیرد.

• E_3^{tr}

این واحد از سنگ‌های داسیتی به رنگ سفید تا خاکستری همراه با توف برش با ترکیب داسیت - آندزیتی تشکیل شده ولی گسترش و ضخامت محدودی دارد که در شمال باختری روستای و مکان مشاهده می گردد.

• E_4^{py}

این واحد ترادف نسبتاً ضخیمی از تناوب سنگ‌های آذرآواری را با ترکیب‌های مختلف توف سنگی، توف ماسه‌ای، توف برش، سیلتستون و ایگنیمبریت و تنوع رنگ از خاکستری، سفید تا قرمز، تشکیل داده است. در بین این ردیف سنگی گاه افق‌های روشن داسیتی بیوتیت‌دار دیده می‌شود. ردیف مذکور دارای لایه‌بندی نسبتاً خوبی است. شیب لایه‌ها کم است و از ۱۰ تا ۱۵ درجه تجاوز نمی‌کند. واحد E_5^{tb} به‌طور هم‌شیب روی این واحد قرار دارد. بخش‌هایی از این واحد، در شمال روستای علی آباد، از توف برش با ترکیب داسیتی تاربوداسیتی تشکیل شده است.

• E_4^{br}

همچنین گسترش خیلی محدودی از ایگنیمبریت با ترکیب داسیتی (E_4^{ig}) در خاور روستای و مکان و برونزد کمی از گدازه‌های آندزیتی تا آندزیت - بازالتی تیره رنگ در خاور روستای رنگان (E_4^v) دیده می‌شود.

• E_4^{lt}

این واحد از سنگ آهک ماسه‌ای توفی و نومولیت‌دار با لایه‌بندی نازک تا متوسط تشکیل شده؛ که در شمال باختری روستای رنگان برونزد محدودی دارد.

• E_5^{ln}

این واحد از آهک‌های ماسه‌ای نومولیت‌دار تیره تا خاکستری رنگ با لایه‌بندی منظم و توف ماسه‌ای سبز متمایل به خاکستری تشکیل شده است. ستبرای این واحد حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر می‌باشد که به‌طور هم‌شیب و پیوسته بر روی واحد E_4^{lt} می‌نشیند.

• E_5^{tb}

این واحد شامل سنگ‌های آذرآواری از جمله توف برش و توف ماسه‌ای به رنگ خاکستری تا سبز می‌باشد که از ضخامت چندان زیادی برخوردار نیست. گسترش این واحد در شمال و شمال باختری روستای توتکان و علی آباد قابل رویت است. این واحد به‌صورت هم‌شیب و ناپیوسته بر روی واحد E_4^{py} می‌نشیند.

• E^{ab}

این واحد که بخش وسیعی از ائوسن بالایی را در منطقه شامل می‌گردد، مجموعه‌ای از سنگ‌های آندزیتی تا آندزیت - بازالتی خاکستری تیره رنگ همراه با سنگ‌های آتشفشانی اسیدی (ریولیت و داسیت)، توف برش، ایگنیمبریت و سنگ‌های آذرآواری به رنگ خاکستری با لایه‌بندی نامنظم می‌باشد. ستبرای این واحد نسبت به واحدهای دیگر ائوسن قابل توجه بوده و برونزدهای وسیعی را در بخش‌های مرکزی ورقه تشکیل می‌دهد. این واحد در شمال و شمال باختری روستای علی آباد به‌طور هم‌شیب روی واحد E_5^{tb} قرار می‌گیرد.

• E_6^{py}

این واحد نیز بخشی از ائوسن بالا را دربر می‌گیرد که از انواع سنگ‌های آذرآواری از جمله توف برش و توف ماسه‌ای و به‌طور محلی گدازه‌های آندزیتی به رنگ تیره، تشکیل شده است. این واحد در جنوب روستاهای علی آباد و قهساره مشاهده می‌گردد.

• E_6^{pa}

این واحد که بخش‌های بالایی ائوسن فوقانی در منطقه می‌باشد، از سنگ‌های آندزیت پورفیری خاکستری متمایل به قهوه‌ای، با فنوکریست‌های درشت و زیبای پلاژیوکلاز، همراه با سنگ‌های داسیت - آندزیتی ریزبلور تشکیل شده است. گسترش این واحد در نیمه شمالی ورقه و در اطراف روستاهای گنیان، بینارد و کچوسنگ قابل رویت است.

• E_6^{ba}

در فوقانی‌ترین بخش از ائوسن بالا، ردیفی از سنگ‌ها دیده می‌شود که از گدازه‌های بازالتی تا آندزیت بازالتی کاملاً تیره رنگ تشکیل شده است. گسترش کمی از این واحد در کوه صفحه، در حاشیه جنوب خاوری ورقه، مشاهده می‌گردد.

• E_6^{da}

این واحد عمدتاً از داسیت و به‌طور محلی از ریوداسیت‌های خاکستری با فنوکریست‌های نسبتاً درشت پلاژیوکلاز تشکیل شده است. این واحد با گسترش نسبتاً زیاد در نیمه جنوب خاوری ورقه، به‌صورت گنبد مانند، بیرون‌زدگی دارد. بخش‌هایی از این واحد به‌صورت ریولیت تا ریوداسیت و توف ریولیتی (E_6^{tr}) تفکیک می‌شود. همچنین در شمال روستای گل آباد برونزادی از داسیت - ریوداسیت زرد تا خاکستری رنگ کمی دگرسان شده، همراه با توف ریولیتی دیده می‌شود.

• E_0^{da}

این واحد به‌صورت یک گنبد ولکانیکی، با گسترش نه چندان زیاد، با ترکیب ریوداسیت و تراکی آندزیت به رنگ خاکستری روشن تا تیره در خاور روستای اسفدان (واقع در شمال باختری ورقه) قابل رویت است.

• Q_1^t

این واحد شامل نهشته‌هایی است که معمولاً در دامنه کوه‌ها به صورت پادگانه‌های آبرفتی بلند و مخروط افکنه Q_1^t دیده می‌شوند. این نهشته‌ها بیشتر در اطراف اردستان و باختر گسل میلajرد - زفره گسترش دارند.

• Q_2^t

این نهشته‌ها معمولاً در سطوح مختلف توپوگرافی ولی در ترازهای پست‌تری نسبت به واحد Q_1^t آشکار می‌گردند و نهشته‌های مذکور شامل نهشته‌های مخروط افکنه‌ای Q_2^f و ته‌نشست‌های سخت‌نشده قله‌دار است. ستبرای این واحد متغیر است و گاه تا چند متر می‌رسد.

• Q^{al}

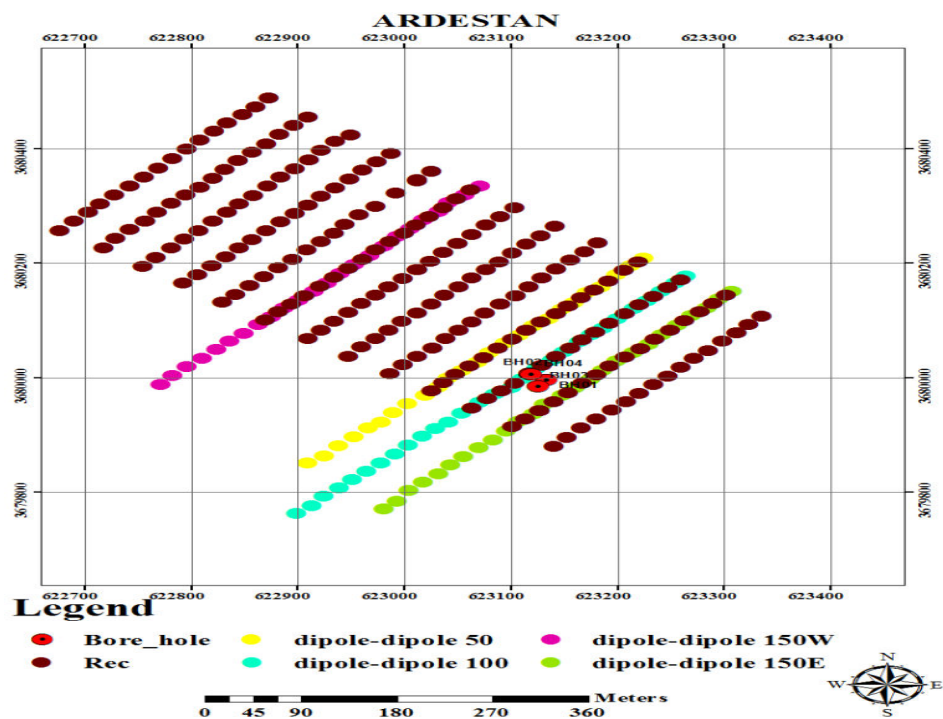
این نهشته‌ها بیشتر به صورت ریگ و ماسه‌های ریزدانه و عناصر درشت هستند که در اثر بارندگی‌های شدید و جریان سیلاب‌ها در بستر رودخانه‌های منطقه بر جای مانده‌اند [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۸].

۳-۴ دگرسانی

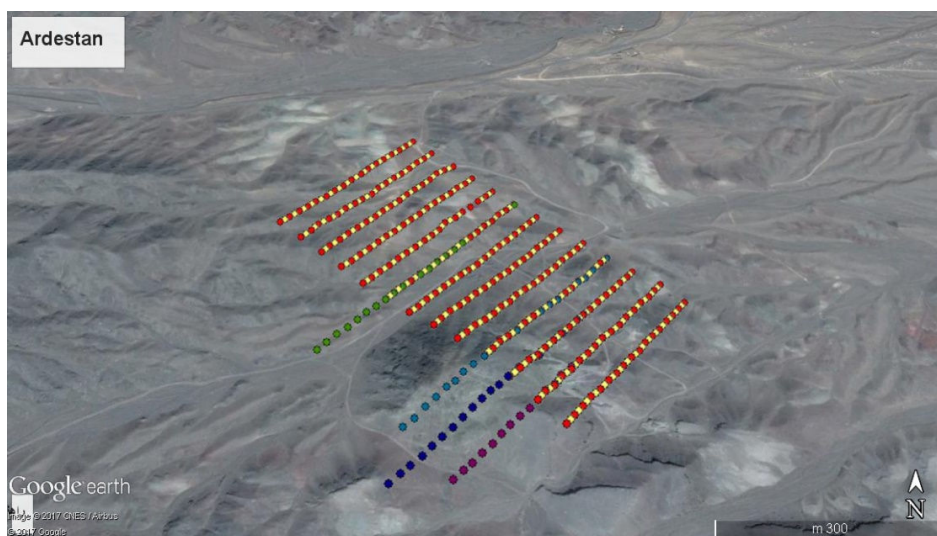
منطقه محدودی از سنگ‌های اسیدی با ترکیب ریولیتی تا ریوداسیتی دگرسان‌شده در باختر روستای گل‌آباد در حاشیه باختری منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود؛ که پدیده رسی شدن را تحمل نموده است. این نوع دگرسانی‌ها می‌تواند در اثر پدیده هیدروترمال ناشی از فعالیت ماگماهای اسیدی در منطقه باشد [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۸].

۵-۳ برداشت داده‌ها

کانی‌سازی در منطقه دارای روند تقریبی شمال غرب - جنوب شرق است. لذا ابتدا یک خط مبنا (Line Base) که نقطه مرکز آن (۰۰) به مختصات جغرافیایی $X=623084$, $Y=3680122$ می‌باشد، با همین امتداد که منطبق بر امتداد زون کانی‌سازی سطحی است با فواصل نقاط ۵۰ متر به طول ۶۰۰ متر با سنگ و رنگ مشخص گردید و سپس تعداد ۱۳ پروفیل عمود بر خط مبنا در جهت شمال شرق - جنوب غرب با طول ۱۶۰ متر در دو طرف خط مبنا نیز با سنگ و رنگ مشخص گردید. بدین ترتیب یک شبکه اکتشافی با وسعت تقریبی ۶۰۰×۳۲۰ متر تحت پوشش برداشت‌های IP و مقاومت‌ویژه قرار گرفت. در مرحله نخست محدوده به وسیله آرایش مستطیلی (Rectangle) با مشخصات $AB=800$ و $MN=20$ متر برای تعیین گسترش زون کانی‌سازی احتمالی برداشت گردید. تعداد ایستگاه‌های برداشت با این آرایش ۲۱۰ ایستگاه بوده است. در این برداشت‌ها یک روند بی‌هنجاری بارپذیری که تقریباً منطبق بر رخنمون ماده معدنی است، مشاهده می‌شود. این نتایج انگیزه بررسی وضعیت این بی‌هنجاری‌ها در عمق شد. لذا برای بررسی وضعیت زون کانی‌سازی احتمالی در عمق و با توجه به نتایج مرحله نخست و مشخص شدن گسترش زون‌های بی‌هنجاری بارپذیری و مقاومت‌ویژه در نقشه بارپذیری اقدام به برداشت تعداد ۴ پروفیل با آرایش دوقطبی - دوقطبی شد؛ که شامل شبه مقاطع 50E، 100E، 150E و 150W با فاصله الکترودی $AB=MN=20$ متر روی پروفیل‌های شبکه برداشت و با توجه به رخنمون زون کانی‌سازی سطحی و نقشه بارپذیری در این محدوده برای تعیین گسترش احتمالی زون کانی‌سازی در عمق برداشت گردید. در شکل‌های (۳-۴) و (۳-۵) موقعیت پروفیل‌ها و شبکه مستطیلی برداشت نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: شکل شماتیکی از نقاط برداشت شده.



شکل ۳-۵: موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی تصویر ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه.

فصل چهارم

بررسی‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی در منطقه مورد مطالعه

۴-۱ مقدمه

داده‌های برداشت‌شده یک‌سری داده‌های خام می‌باشند؛ که دارای نوفه‌های مختلفی هستند و تفسیر مستقیم آن‌ها نتایج مطلوبی در پی نخواهد داشت. به عبارت دیگر توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی این داده‌ها به طور مستقیم غیرممکن است. بنابراین تعیین رابطه بین داده‌های صحرایی به‌دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و همچنین مدل‌سازی داده‌های برداشت شده برای توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری است. در مدل‌سازی ریاضی، روابط فیزیکی توسط یک‌سری معادلات دیفرانسیلی و معادلات انتگرال بیان می‌شوند؛ به گونه‌ای که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود [Loke, 2004].

ساختارهای زمین‌شناسی در واقعیت سه‌بعدی هستند. بنابراین برداشت سه‌بعدی مقاومت‌ویژه الکتریکی همراه با مدل‌سازی سه‌بعدی می‌تواند نتایج با دقت بیشتر و قابل اطمینان‌تری خصوصاً در ناهمگنی‌های پیچیده زیرسطحی ارائه دهد. تصاویر سه‌بعدی مقاومت‌ویژه الکتریکی نسبت به تصاویر دو بعدی یا تصاویر شبه سه‌بعدی به‌دست آمده از وارون‌سازی‌های دو بعدی، بهتر است. در نتیجه برای به نقشه در آوردن صحیح بی‌هنجاری‌های زیر سطحی و توزیع فضایی این بی‌هنجاری‌ها، تصویربرداری سه‌بعدی مقاومت‌ویژه گزینه بهتری است [Aizbeokhai; 2009].

۴-۲ وارون‌سازی هموار دو بعدی به وسیله نرم‌افزار Res2dinv

در مدل‌سازی دوبعدی هموار، از روش بهینه‌یابی حداقل مربعات استفاده می‌شود و یک زمین تک لایه همگن به‌عنوان مدل اولیه در نظر گرفته می‌شود [Loke and Barker, 1996]. معادله این روش عبارت است از [Loke, 2004]:

$$(G^T G + \lambda F) d = G^T g \quad (1-4)$$

در این رابطه λ فاکتور تعدیل، G ماتریس ژاکوبین و d بردار آشفته‌گی مدل و g بردار همگرایی می‌باشد و F عبارت است از:

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (2-4)$$

در این رابطه f_x فیلتر هموارسازی افقی و f_z فیلتر هموارسازی عمودی می‌باشد. می‌توان فاکتور تعدیل و فیلترهای هموارسازی را برای انواع مختلف داده‌ها تنظیم نمود. برای انجام محاسبات فوق از روش‌های تفاضل محدود و یا اجزاء محدود استفاده می‌شود. در مناطقی که تصحیح توپوگرافی نیاز نیست، نرم‌افزار به‌طور پیش‌فرض از روش اجزاء محدود استفاده می‌کند. ابتدا فاکتور تعدیل، یک مقدار بزرگ انتخاب می‌شود (λ_0) سپس بعد از تکرار این مقدار کاهش می‌یابد تا به حد مینیمم برسد (λ_m) (که معمولاً 0.1 مقدار اولیه است).

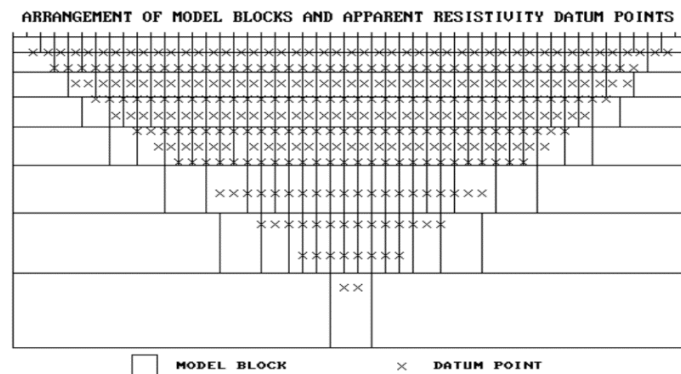
$$F = \lambda_m = 0.1 \lambda_0 \quad (3-4)$$

λ_0 به سطح نوفه منطقه بستگی دارد. هرچه سطح نوفه بیشتر باشد، مقدار اولیه فاکتور تعدیل هم بیشتر است. نرم‌افزار Res2dinv برای انجام مدل‌سازی، از روش کمترین مربعات به همراه روش عددی گوس - نیوتن یا شبه‌نیوتن استفاده می‌کند [Loke and Dahlin, 2002]. برنامه در هر بار تکرار، خطای RMS را محاسبه می‌کند و سعی در کاهش آن دارد. مقدار خطای جذر میانگین مربعات توسط معادله زیر تعریف می‌شود [Zohdy, 1989]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_{0j} - \rho_{ej}}{\rho_{0j}} \right)^2}{N}} \times 100 \quad (4-4)$$

که ρ_{0j} ، ρ_{ej} ، ρ_{ej} زامین مقاومت ویژه مشاهده شده، ρ_{ej} نیز زامین مقاومت ویژه محاسبه شده و N تعداد داده‌ها است. عموماً روشی که برای وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه دوبعدی و سه‌بعدی به کار می‌رود، بر مبنای روش بهینه کمترین مربعات تعمیم داده شده می‌باشد [Smith and Vozoff, 1984].

برای مدل‌سازی داده‌های IP و مقاومت ویژه از نرم‌افزار Res2dinv و ZondRes2d استفاده شد. در نرم‌افزار Res2dinv مدل استفاده شده به عنوان مدل اولیه شامل یک سری بلوک‌های مستطیلی دوبعدی می‌باشد که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. در این مدل تعداد بلوک‌ها با تعداد نقاط داده‌ها در شبه‌مقطع مقاومت-ویژه ظاهری برابر است و به یک شیوه مشابه منظم شده‌اند. همچنین عمق مراکز بلوک‌ها در محاسبه عمق میانگین تحت بررسی برای بازه‌های الکترودی مختلف مورد استفاده قرار گرفتند [Loke and Lane, 2004].



شکل ۴-۱: مدل اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار Res2dinv [Loke, 2004a].

این نرم‌افزار، مدل‌سازی مقاومت ویژه و IP را به‌طور هم‌زمان انجام می‌دهد. داده‌های IP و مقاومت ویژه حاصل از به‌کارگیری آرایش‌های ورنر، قطبی-قطبی، دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی در این نرم‌افزار قابل مدل‌سازی‌اند (امکان تعریف آرایش‌های غیرمرسوم دیگری نیز وجود دارد). در این نرم‌افزار مدل‌سازی

وارون با روش اجزاء محدود و تفاضل محدود برای تعداد زیادی از داده‌های صحرایی قابل انجام است. امکان تصحیح توپوگرافی روی شبکه نیز مقدور می‌باشد. هدف از وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، ارائه مدلی است که بیش‌ترین تطابق را با داده‌های صحرایی داشته باشد. در حقیقت مدل به‌دست آمده بیانگر یک پاسخ ریاضی مطابق با ساختار زمین‌شناسی می‌باشد.

پارامترهای مدل در مرحله تکرار در فرآیند وارون‌سازی، آن‌قدر تغییر می‌کنند تا بیش‌ترین تطابق بین پاسخ مدل ارائه شده و داده‌های صحرایی حاصل گردد. همچنین مدل به‌دست آمده باید با داده‌های زمین-شناسی تطبیق داده شود تا صحت آن نیز از نظر زمین‌شناسی مورد تأیید قرار گیرد [Loke, 2004b].

۳-۴ نرم افزار ZondRes2d

به‌منظور مقایسه مدل‌های به‌دست آمده حاصل از نرم‌افزار RES2DINV، از نرم‌افزار ZONDRES2D نیز استفاده شده است. این نرم‌افزار یک برنامه کامپیوتری برای مدل‌سازی داده‌های برداشت‌شده با استفاده از روش تصویرنگاری الکتریکی است. در این نرم‌افزار، روش اجزاء محدود به عنوان یک ابزار ریاضی جهت حل مسائل مستقیم استفاده می‌شود. همچنین وارون‌سازی داده‌ها با روش حداقل مربعات با قید نظم‌دهی، پایداری در حل مسائل را افزایش داده و امکان دستیابی به مقادیر مقاومت‌ویژه و توزیع پتانسیل هموارتر را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار از تمامی آرایش‌های الکترودی پشتیبانی می‌کند و امکان مدل‌سازی مستقیم و وارون برای داده‌های IP و مقاومت‌ویژه را دارد. در ضمن در این نرم‌افزار روش‌های مختلفی برای وارد کردن اطلاعات کمکی نظیر اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری و سایر روش‌های ژئوفیزیکی، برای اعتبارسنجی و تفسیر دقیق‌تر مدل‌های الکتریکی وجود دارد [Kaminsky, 2013].

۴-۴ عملیات برداشت داده‌های مقاومت ویژه و IP

به منظور انجام مطالعات ژئوفیزیک، کارشناسان شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم امید زمین، به منطقه اعزام شدند.

برای مشخص شدن روند عمومی زون‌های کانی‌سازی احتمالی ابتدا بر روی روند رخنمون یک شبکه برداشت ژئوفیزیک با آرایه مستطیلی برداشت شد. سپس با توجه به بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی به‌دست آمده، چهار پروفیل با آرایه دوقطبی- دوقطبی جهت بررسی عمقی برداشت شد.



شکل ۴-۲: تصویر امتداد یکی از پروفیل‌های برداشت‌شده.

۵-۴ تجهیزات برداشت

استفاده از وسایل و تجهیزات مناسب برای برداشت داده‌های صحرایی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ به‌خصوص در برداشت با استفاده از آرایش دوقطبی- دوقطبی که حساسیت بالایی دارد، استفاده از دستگاه‌ها و تجهیزات پیشرفته امری ضروری است.

۱-۵-۴ دستگاه‌های فرستنده و گیرنده

در این مطالعه از یک سیستم اندازه‌گیری بارپذیری ساخت شرکت GDD کانادا متشکل از یک دستگاه فرستنده جریان مدل TXIII با توان ۱۸۰۰ وات و یک دستگاه گیرنده مدل GRX8-32 و یک دستگاه مولد جریان الکتریسیته ژاپنی با توان ۵۰۰۰ وات استفاده شده است. سیستم مذکور با آخرین تکنولوژی روز دنیا مطابقت داشته و در سال ۲۰۱۲ ساخته شده است. وظیفه دستگاه فرستنده تبدیل جریان الکتریکی ۱۲۰ ولت از موتور برق به جریان الکتریکی مستقیم مربعی و سپس تقویت آن و نهایتاً ارسال آن متناسب به تنظیمات زمانی است.

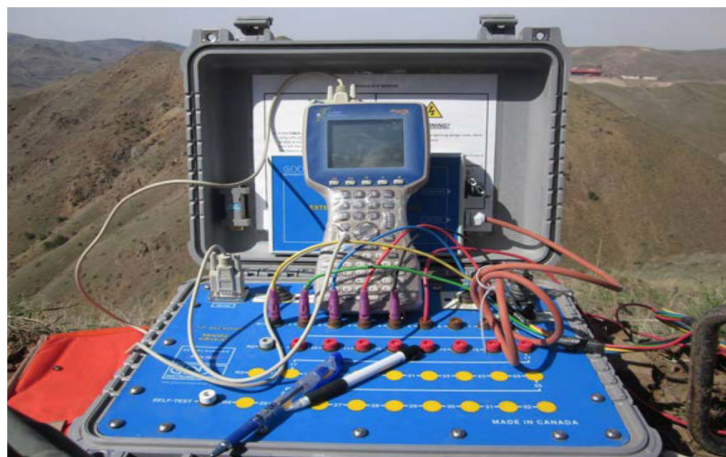


شکل ۴-۳: تصویر فرستنده مدل TX III مورد استفاده.

وظیفه دستگاه گیرنده دریافت کلیه اطلاعات مورد نیاز از الکترودهای پتانسیل نصب شده بر روی زمین است. این سیستم خود از دو دستگاه تشکیل شده است که دستگاه دریافت و دستگاه پردازش می‌باشند. دستگاه دریافت اطلاعات در هر لحظه می‌تواند از هفده الکتروود به طور همزمان اطلاعات را دریافت کند. بنابراین در هر لحظه اطلاعات شانزده کانال ثبت می‌گردد.

برای مثال اگر الکترودهای ۱ و ۲ و ۳ به این بخش اطلاعات برسانند، اطلاعات کانال ۱ (اطلاعات بین الکتروود ۱ و ۲) و کانال ۲ (اطلاعات بین الکتروود ۲ و ۳) به طور همزمان در حافظه ذخیره شود. به این ترتیب راندمان کار چندین برابر می‌شود.

دستگاه پردازش (PDA) دستگاه کوچک و پیشرفته‌ای است که از طریق بلوتوث یا کابل RZ232، اطلاعات گیرنده را دریافت نموده و پس از پردازش اولیه، اطلاعات را به صورت داده‌های رقومی در حافظه خود ذخیره می‌کند.



شکل ۴-۴: تصویر مجموعه دستگاه گیرنده و پردازشگر PDA.

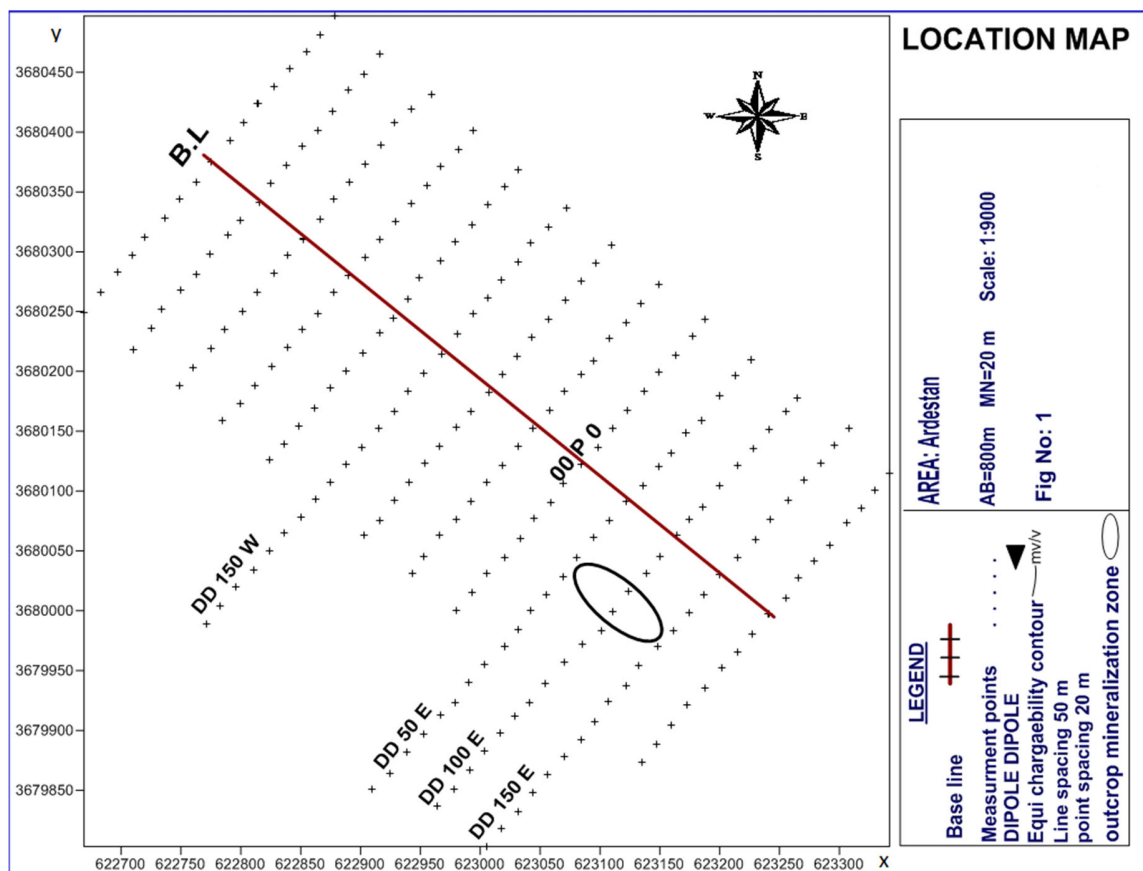
۴-۶ نحوه انجام عملیات صحرایی در منطقه

کانی‌سازی در منطقه دارای روند تقریبی شمال غرب - جنوب شرق است. لذا ابتدا یک خط مبنا

(Baseline) که منطبق بر امتداد زون کانی سازی سطحی می باشد با فواصل نقاط ۵۰ متر به طول ۶۰۰ متر با سنگ و رنگ مشخص گردید (شکل ۴-۵)، سپس تعداد ۱۳ پروفیل عمود بر خط مبنا در جهت شمال شرق- جنوب غرب با طول ۱۶۰ متر در دو طرف آن نیز با سنگ و رنگ مشخص گردید. بدین ترتیب یک شبکه اکتشافی با وسعت ۳۲۰×۶۰۰ متر تحت پوشش برداشت های مقاومت ویژه و IP قرار گرفت.

در مرحله نخست محدوده به وسیله آرایش مستطیلی با مشخصات $AB=800$ و $MN=20$ متر برای تعیین گسترش زون کانی سازی احتمالی برداشت گردید. تعداد ایستگاه های برداشت با این آرایش ۲۱۰ ایستگاه بوده است. در این برداشت ها یک روند بی هنجاری بارپذیری که تقریباً منطبق بر رخنمون ماده معدنی است، مشاهده می شود. این نتایج، انگیزه بررسی وضعیت این بی هنجاری ها در عمق شد.

لذا برای بررسی وضعیت زون کانی سازی احتمالی در عمق و با توجه به رخنمون مشاهده شده در سطح زمین و مشخص شدن گسترش زون های بی هنجاری بارپذیری و مقاومت ویژه اقدام به برداشت تعداد ۴ پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی شد؛ که شامل پروفیل های DD150E، DD100E، DD50E و DD150W با فاصله الکترودی $AB=MN=20$ متر می باشد که بر روی پروفیل های شبکه مستطیلی اجرا شد. موقعیت پروفیل ها و شبکه مستطیلی برداشت و همچنین رخنمون مشاهده شده در سطح زمین در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: تصویر موقعیت پروفیل‌ها و شبکه مستطیلی برداشت و همچنین موقعیت رخنمون مشاهده شده در سطح زمین.



شکل ۴-۶: تصویر الکتروود غیرپلاریزه پتانسیل بر روی یکی از نقاط برداشت.

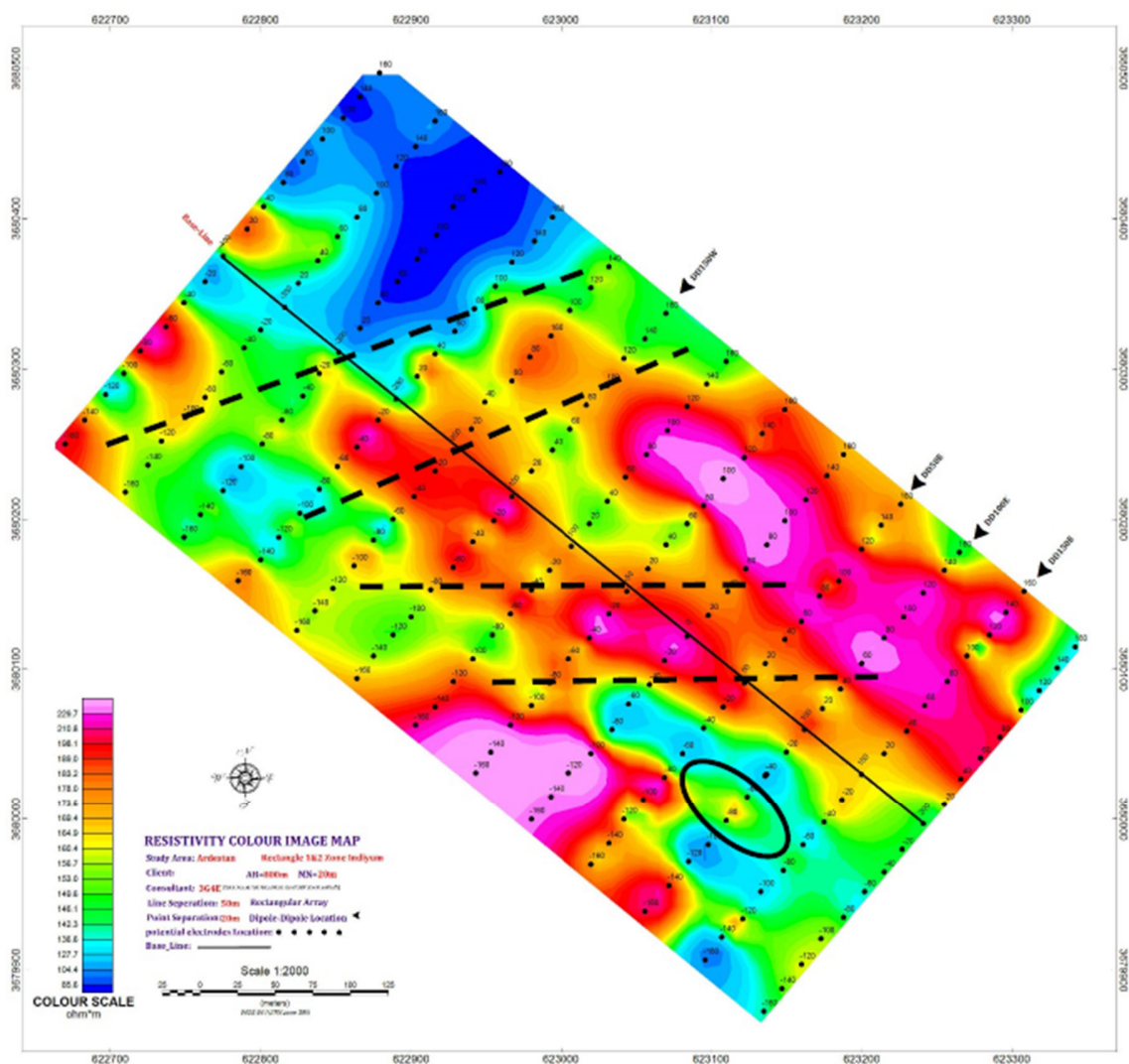
۷-۴ نتایج برداشت شبکه با آرایش مستطیلی

اطلاعات حاصل از هر روش ژئوفیزیکی باید به اطلاعات زمین‌شناسی برگردانده شود. بنابراین یک تعبیر و تفسیر کامل از یک طرف به تجربه کافی در مسائل ژئوفیزیک بستگی دارد و از طرف دیگر مستلزم آن است که اطلاعات جامعی از زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در دسترس باشد [Reynolds; 1997].

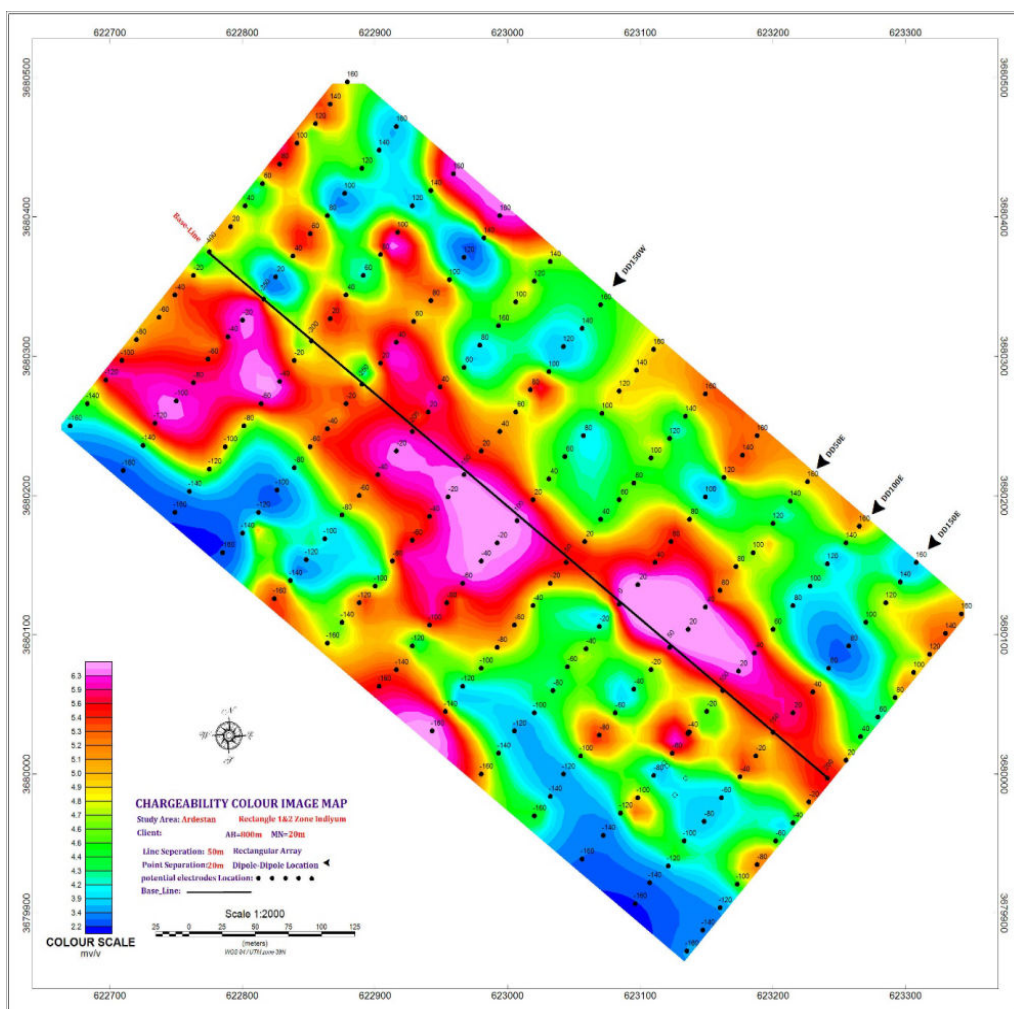
برداشت آرایه مستطیلی اولین برداشت منطقه مورد مطالعه است. نقشه‌های هم‌مقدار حاصل از داده‌های IP و مقاومت‌ویژه آرایه مستطیلی در شکل‌های (۷-۴ و ۸-۴) نشان داده شده است. منحنی‌های هم‌مقدار آبی تا صورتی رنگ روی نقشه هم‌مقدار مقاومت‌ویژه که بین ۵۰ تا بیش از ۲۵۰ اهم‌متر متغیر است، نشان دهنده پایین بودن مقادیر مقاومت‌ویژه در محدوده مطالعاتی می‌باشد. همچنین منحنی‌های هم‌مقدار آبی تا صورتی رنگ رسم شده روی نقشه بارپذیری، محدوده بین کمتر از ۲ تا بیشتر از ۶ میلی‌ولت برولت را نشان می‌دهد. در شکل (۸-۴) نقشه بارپذیری برای داده‌های برداشت شده با آرایه مستطیلی نشان داده شده است. در این محدوده حداقل شدت بارپذیری برداشت کمتر از ۲ و حداکثر شدت بارپذیری برداشت شده در مرکز زون‌های ناهنجاری در محدوده به بیشتر از ۶ میلی‌ثانیه می‌رسد. همان‌طور که در این نقشه ملاحظه می‌شود، یک زون ناهنجاری بارپذیری در مرکز شبکه با روند شمال غرب- جنوب شرق قابل مشاهده است؛ که امتداد آن تقریباً در تمام پروفیل‌های شبکه برداشت گسترش دارد و شدت آن کم و زیاد می‌شود که می‌توان گفت علت آن گسل‌خوردگی است. این زون در واحدهای سنگی نفوذی و کنتاکت‌ها مشاهده می‌شود.

تغییرات مقاومت‌ویژه ظاهری متأثر از مقاومت الکتریکی یا هدایت الکتریکی واحدهای سنگی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. واحدهای قابل مشاهده در محدوده‌هایی که برداشت ژئوفیزیکی انجام شده است، شامل آبرفت‌ها، آندزیت، ماسه‌سنگ و توف و زون دگرسان شده می‌باشد. کانی‌سازی در واحد آندزیتی و دگرسان شده شکل گرفته است. در شکل (۷-۴) نقشه مقاومت‌ویژه ظاهری برای این شبکه نشان داده شده است. در

این نقشه یک زون ناهنجاری با مقاومت ویژه بالا در شرق و غرب محدوده برداشت که در ارتباط با واحدهای آندزیتی است، مشاهده می‌شود. مقادیر پایین مقاومت ویژه در شمال نقشه در ارتباط با زون دگرسان شده (محدوده آبی رنگ)، رسوبات و آبرفت جوان با سن کواترنری می‌باشند. یکی از مهمترین قابلیت‌های نقشه مقاومت ویژه، تعیین روند عمومی واحدهای موجود در منطقه و تعیین گسل‌ها که معمولاً نقش مهمی در کنترل کانی‌سازی نیز دارند می‌باشد.



شکل ۴-۷: نقشه هم‌مقدار مربوط به داده‌های مقاومت ویژه آرایه مستطیلی.



شکل ۴-۸: نقشه هم‌مقدار مربوط به داده‌های بارپذیری آرایه مستطیلی

۴-۸ مدل‌سازی وارون دوبعدی و تفسیر مقاطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های IP و

مقاومت‌ویژه با نرم‌افزارهای Res2dinv و ZondRes2d

وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP، امکان تعیین موقعیت دقیق بی‌هنجاری‌ها را فراهم می‌کند. این کار با وارون‌سازی مقادیر به روش وارون‌سازی هموار به کمک نرم‌افزار Res2dinv انجام می‌شود. این نرم‌افزار با به حداقل رساندن خطای RMS (جذر میانگین مربعات خطا) بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر محاسبه‌شده به یک مدل فیزیکی از زمین می‌رسد؛ که با شرایط زمین‌شناسی انطباق دارد. این مدل‌ها در

واقع نمایش دوبعدی مقاومت ویژه و IP هستند.

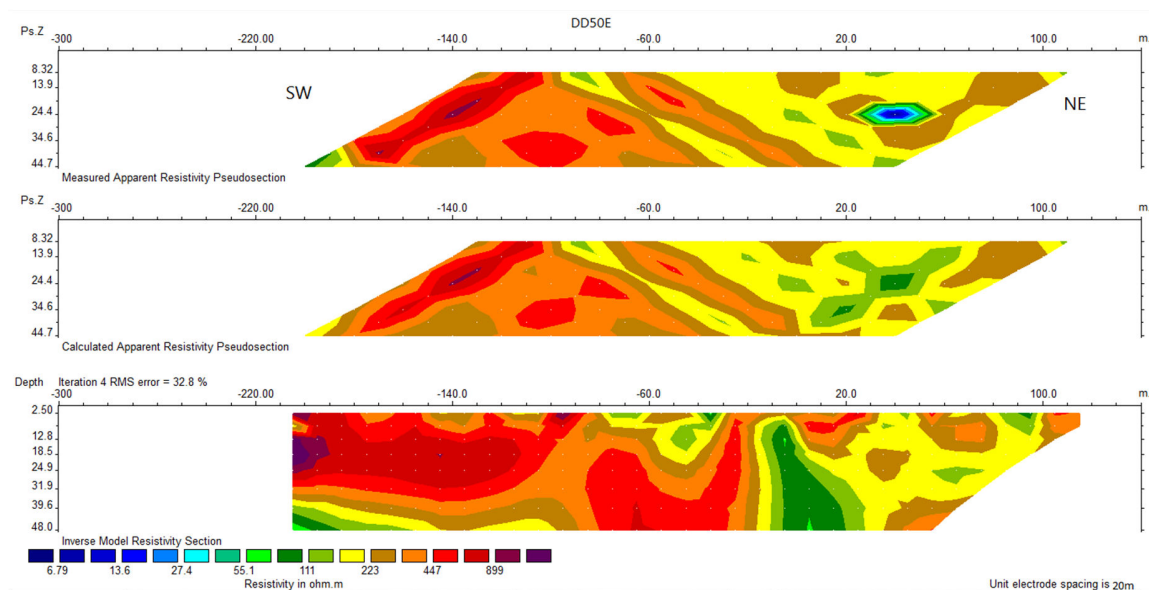
با توجه به رخنمون مشاهده شده در سطح زمین و با توجه به نتایج حاصل از نقشه خطوط هم‌مقدار بارپذیری و مقاومت ویژه محدوده بین نقطه‌ای به مختصات $X=623069$ و $Y=3680028$ تا نقطه‌ای به مختصات $X=623148$ و $Y=3679970$ (در سیستم متریک و زون ۴۹) را به عنوان منطقه امید بخش احتمالی انتخاب کرده و برای بررسی عمقی از آرایه دوقطبی- دوقطبی استفاده گردید. در مطالعه حاضر، تفسیر و مدل‌سازی وارون هموار داده‌های مقاومت ویژه و IP به همراه توپوگرافی، با استفاده از نرم‌افزار Res2dinv برای ۴ پروفیل صورت گرفت. همچنین به منظور مقایسه مدل‌های به دست آمده، از نرم‌افزار ZondRes2d استفاده شده است. داده‌های این پروفیل‌ها پس از ورود به نرم‌افزار و انجام تصحیحات اولیه از جمله تصحیح توپوگرافی و حذف داده‌های پرت، به روش وارون‌سازی کمترین مربعات، وارون‌سازی شده و نتایج حاصله به صورت مقاطع دوبعدی ارائه شدند.

۴-۸-۱ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل DD50E

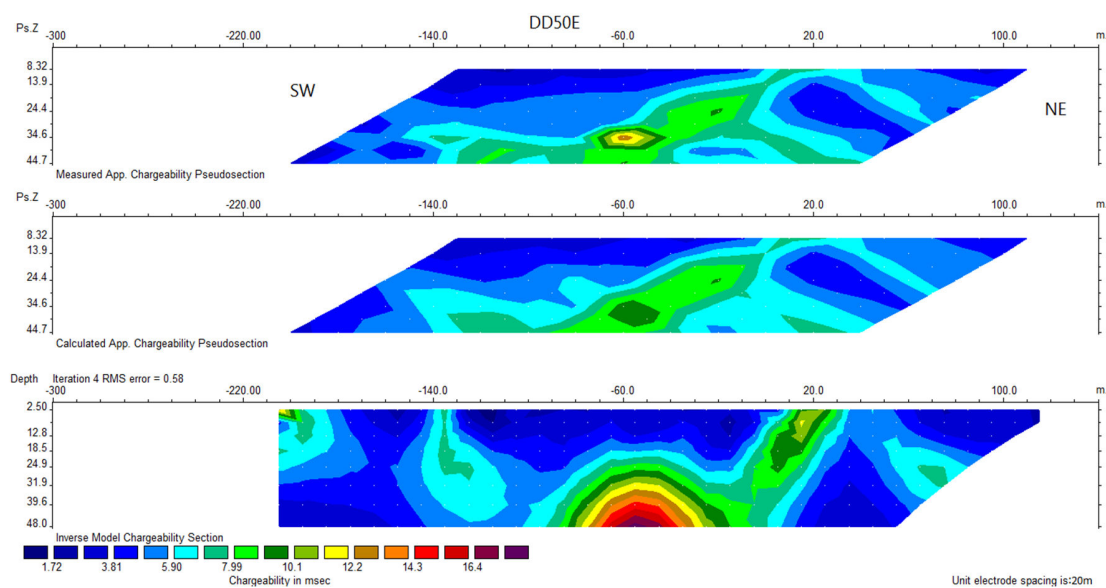
این پروفیل بر روی رخنمون ماده معدنی (به صورت ملاکیت و آزوریت) و همچنین بی‌هنجاری شبکه برداشت آرایش مستطیلی طراحی شد. آثار رخنمون ملاکیت و آزوریت در موقعیت ۶۰- تا ۸۰- متری این پروفیل و بی‌هنجاری شبکه برداشت سطحی، انگیزه اجرای این پروفیل بوده است. نقطه ابتدای آن با مختصات $X=623164$ و $Y=3880063$ می‌باشد. همچنین آرایه استفاده شده جهت برداشت این پروفیل آرایش دوقطبی- دوقطبی با فاصله الکترودی ۲۰ متر و از گام یک تا هشت بوده است. طول این پروفیل حدود ۳۶۰ متر می‌باشد. برای برداشت تمام پروفیل‌ها، الکترودهای جریان در جهت شمال شرق و الکترودهای پتانسیل در جهت جنوب غرب قرار گرفتند. شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) به ترتیب شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون مربوط به این پروفیل را نشان می‌دهند. همچنین مقاطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل با اعمال تصحیح

توپوگرافی به ترتیب با استفاده از نرم افزار Res2dinv و ZondRes2d در شکل های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نشان داده شده است. در منطقه مورد مطالعه واحدهای زمین شناسی موجود شامل آبرفت ها، آندزیت، ماسه سنگ، توف و زون آندزیتی دگرسان شده می باشد. با توجه به این که کانی های سازنده مس در واحد آندزیتی و دگرسان شده شکل گرفته است، انتظار می رود زون های بی هنجار به صورت مناطقی با مقاومت ویژه متوسط تا بالا و با بارپذیری نسبتاً بالا مشخص شوند. مقاومت ویژه کانی های مس نسبتاً پایین است؛ ولی نباید از مناطق بی هنجار انتظار مقاومت ویژه پایین داشت؛ زیرا مقدار کانی های مس که در داخل رگه ها و رگچه ها در سنگ میزبان قرار گرفته است به اندازه ای نیست که پاسخ مقاومت ویژه را تحت تأثیر قرار دهد، بنابراین مناطق با مقاومت ویژه متوسط تا بالا و بارپذیری بالا (مرکز پروفیل) به عنوان بی هنجاری در نظر گرفته شده اند. همان طور که مشاهده می شود در شکل (۴-۱۱) خطای RMS ناشی از مدل سازی برای داده های مقاومت ویژه و بارپذیری به ترتیب ۸/۳۲ درصد و ۵۸/۰ درصد در تکرار چهارم است. فاصله الکترودی نشان داده شده در این پروفیل ۱۰ متر است. علت این که فاصله الکترودی مورد استفاده در نرم افزار به ۱۰ متر کاهش یافته است، مربوط تغییرات شدید داده ها به ویژه در سطح می باشد. بدین صورت که با کاهش فاصله الکترودی به نصف فاصله الکترودی (۱۰ متر) سبب می شود که خطای RMS نسبت به حالتی که فاصله الکترودی ۲۰ متر باشد کاهش پیدا کند. این تغییر فاصله الکترودی برای تمام پروفیل ها به دلیل گفته شده در بالا، صورت گرفته است. همان طور که در مقطع حاصل از مدل سازی وارون بارپذیری (شکل ۴-۱۱) مشاهده می شود در ایستگاه ۶۰- یک زون بارپذیری نسبتاً بزرگ در مرکز مقطع دیده می شود که از عمق تقریبی ۲۰ متر شروع شده و تا عمق بیش از ۵۰ متر ادامه دارد؛ که دارای مقدار بارپذیری نسبتاً بالا می باشد که به بیش از ۱۶ میلی ثانیه می رسد و همچنین زون اکسیده (ایستگاه ۱۰ تا ۳۰) منطبق بر کانی سازی سطحی از نزدیک سطح زمین شروع شده و تا عمق تقریبی ۴۵ متری ادامه دارد. مقادیر مقاومت ویژه برای این دو زون تا حدودی تأیید کننده ی بی هنجاری در این قسمت ها می باشند؛ زیرا همان طور که گفته شد در

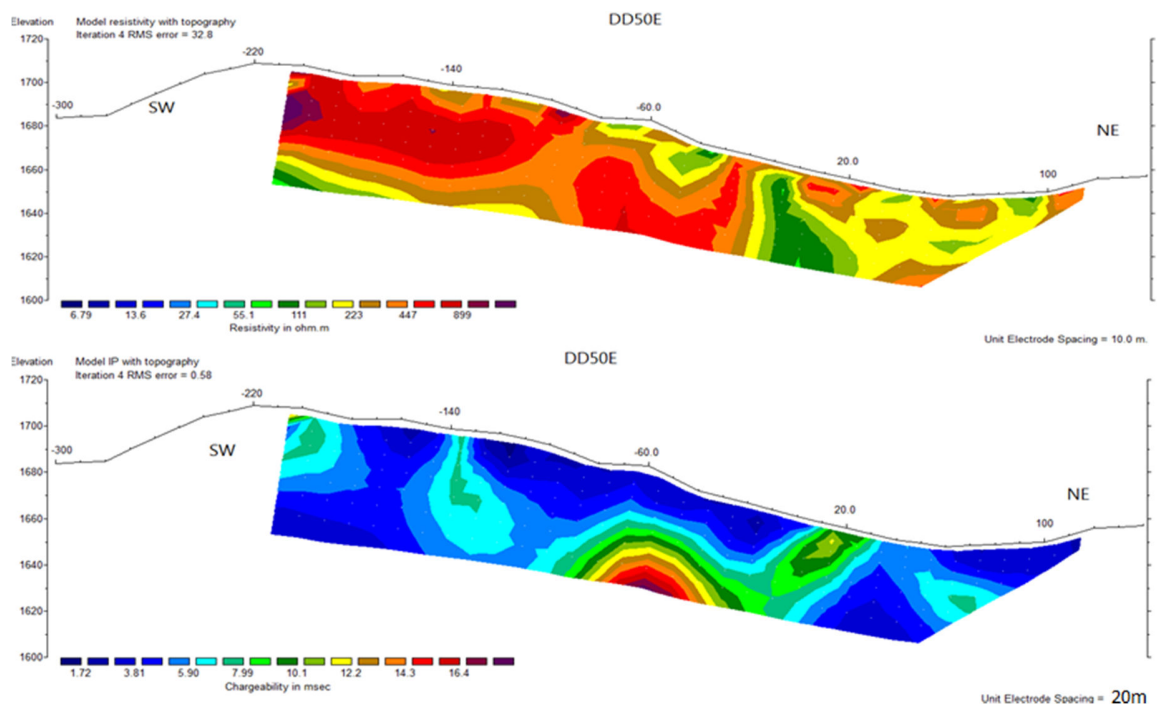
این منطقه، مقاومت ویژه متوسط رو به بالا می تواند نشان دهنده مناطق بی هنجاری باشد؛ که مربوط کانی- سازی پراکنده در سنگ میزبان با جنس آندزیت می باشد. در مقطع مقاومت ویژه این پروفیل در فاصله بین ۳۰- تا ۱۰- متری از ابتدای پروفیل برداشت، احتمال وجود یک گسل در منطقه وجود دارد که در محل بی هنجاری مشاهده شده در مقطع IP شکل (۴-۱۱) قرار می گیرد. با توجه به این که گسل ها کنترل کننده کانی سازی مس در منطقه بوده و معمولاً کانی سازی در گسل یا نزدیک به آن انجام شده احتمال وجود گسل در محل تقویت می شود. زون بی هنجار در زیر رخنمون کانی سازی مس مشاهده شده در سطح زمین قرار گرفته و می توان آن ها را به کانی زایی مس نسبت داد. مدل های دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از این پروفیل با استفاده از نرم افزار ZondRes2d تطابق نسبتاً بالایی با مدل های به دست آمده از نرم افزار Res2dinv دارد. همان طور که در شکل (۴-۱۱) و (۴-۱۲) مشاهده می شود، مناطق با بارپذیری بالا و مقاومت ویژه نسبتاً بالا تقریباً در مقاطع IP و مقاومت ویژه به دست آمده از هر دو نرم افزار تطابق خوبی باهم دارند. نکته قابل توجه در مقایسه مقاطع به دست آمده از هر دو نرم افزار این است که زون بی هنجار با بارپذیری بالا در مقطع به دست آمده از نرم افزار ZondRes2d گسترش جانبی و عمقی بیشتری پیدا کرده است. این امر به دلیل هموارسازی بیشتر داده ها در این نرم افزار نسبت به نرم افزار Res2dinv می باشد.



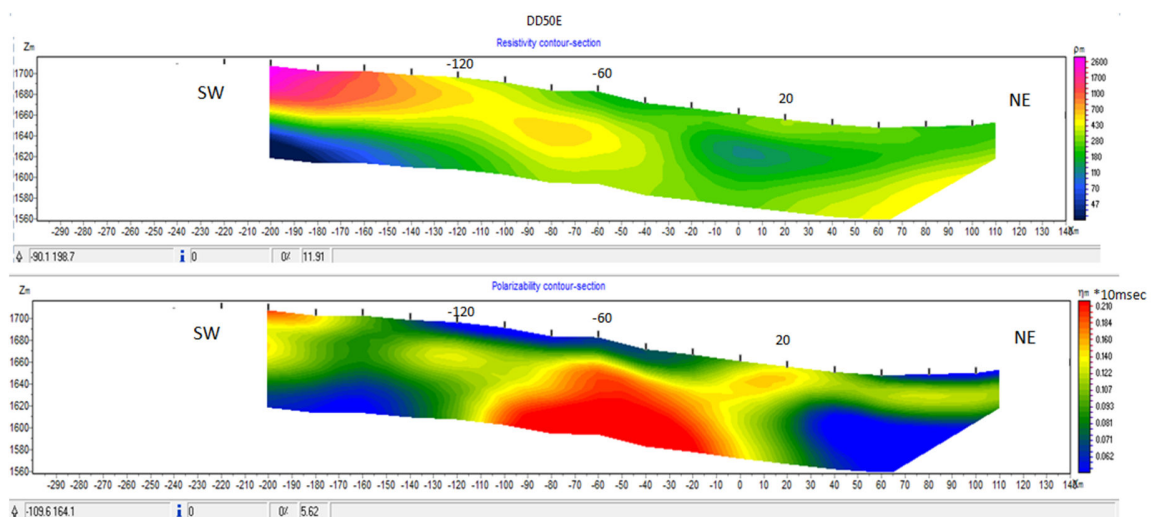
شکل ۴-۹: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD50E



شکل ۴-۱۰: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD50E



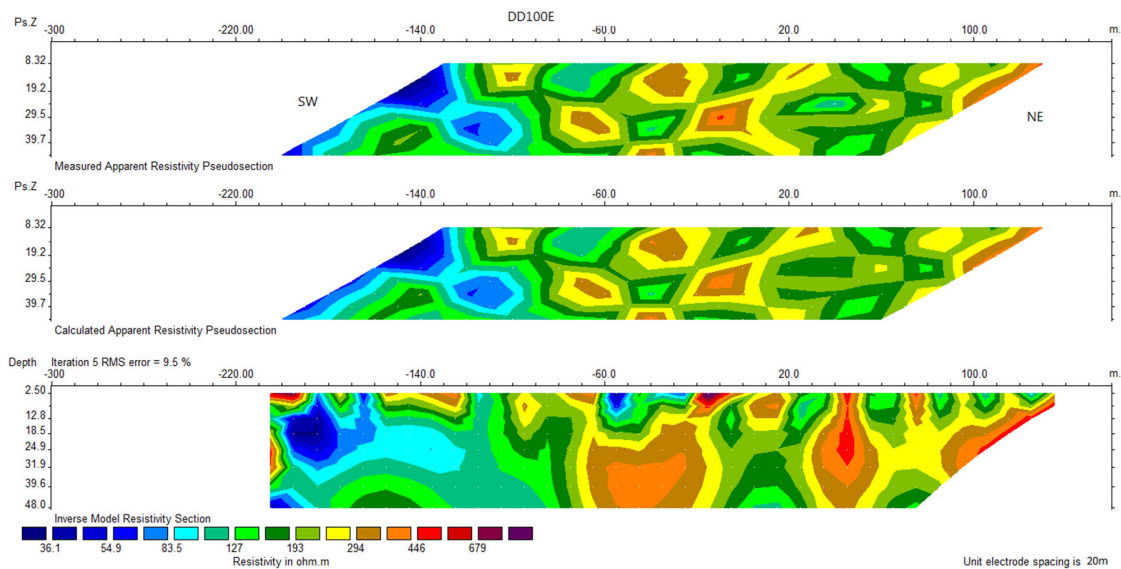
شکل ۴-۱۱: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه و بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD50E



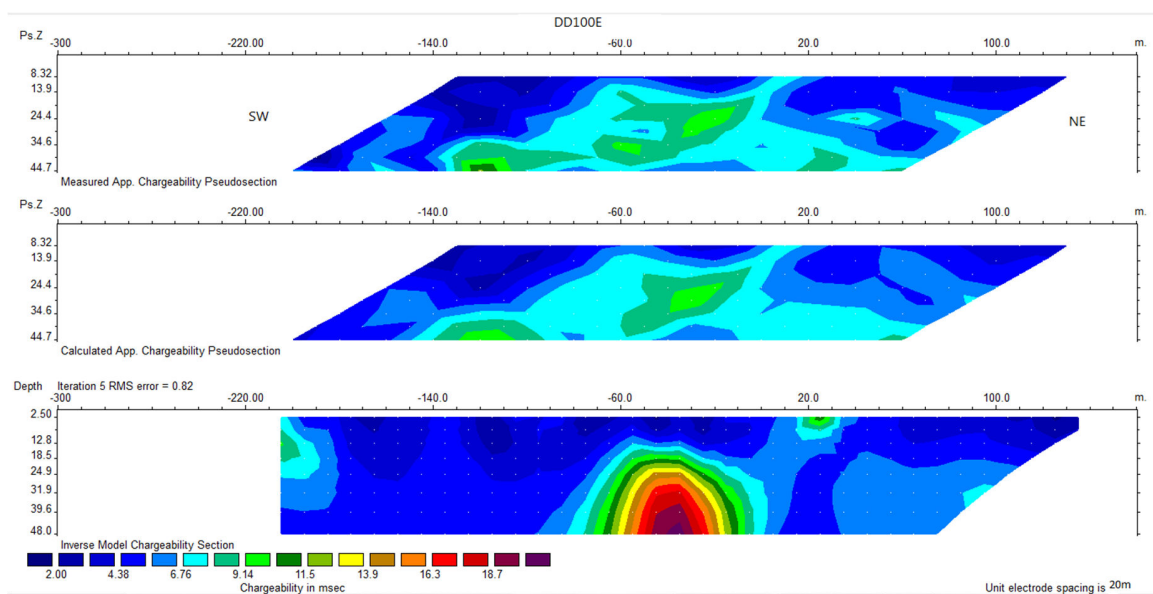
شکل ۴-۱۲: نتایج مدل سازی وارون مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری با نرم افزار ZondRes2d در طول پروفیل DD50E

۴-۸-۲ تفسیر نتایج مدل سازی DD100E

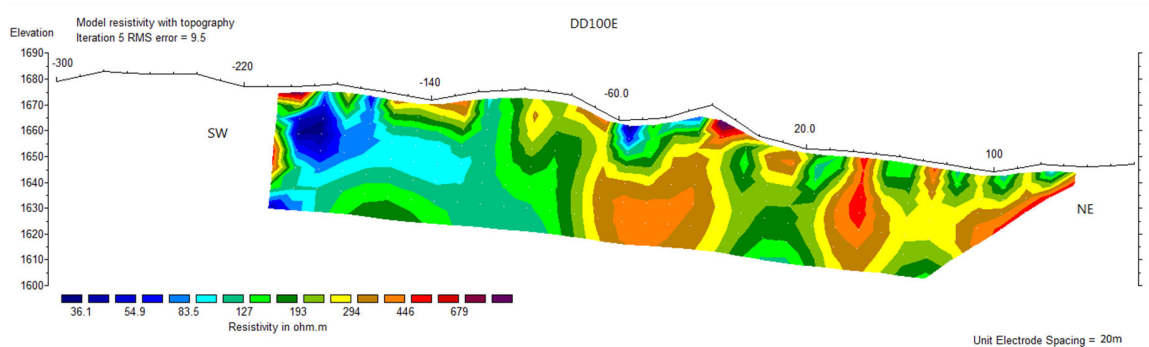
پروفیل DD100E با طول حدود ۳۴۰ متری در شرق پروفیل DD50E، به موازات آن و به فاصله ۵۰ متری از این پروفیل قرار گرفته است. الکترودهای جریان در شمال شرق و الکترودهای پتانسیل در جنوب غرب گسترده شده‌اند. در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای RMS ناشی از مدل سازی وارون هموار برای داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری به ترتیب ۹/۵ درصد و ۰/۸۲ درصد در تکرار پنجم است. بر طبق اعداد به دست آمده در اندازه گیری ها، بارپذیری زمینه بین ۲ تا ۶ میلی ثانیه می باشد. مقادیر بزرگتر بارپذیری در اعماق دیده می شود. البته لازم به ذکر است که منظور از بالا بودن بارپذیری در اعماق، بالاتر بودن بارپذیری نسبت به زمینه است، بنابراین بی‌هنجاری‌هایی که در اعماق زیاد وجود دارند از اهمیت بیشتری برخوردارند. همان گونه که در شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) مشاهده می‌شود، یک بی‌هنجاری قابل توجه در این ناحیه وجود دارد. تقریباً در مرکز این پروفیل (ایستگاه ۶۰-) یک زون با بارپذیری بالا و مقاومت ویژه نسبتاً بالا مشاهده می‌شود که احتمالاً مرتبط با واحد آندزیت و از نوع پراکنده می باشد. این بی‌هنجاری با نقشه هم مقدار بارپذیری به دست آمده از آرایه مستطیلی (شکل ۴-۸) نیز تطابق دارد که از عمق تقریبی ۲۰ متری شروع شده و تا عمق ۷۰ متری ادامه دارد. زون مشاهده شده دیگر، زون دگرسان شده (دگرسانی رسی) که منطبق بر کانی سازی سطحی در ایستگاه ۲۰ است، که از نزدیک سطح زمین شروع شده و تا عمق ۲۰ متری امتداد یافته است (دگرسانی رسی باعث کاهش مقاومت ویژه و افزایش IP می شود). همان طور که در مقطع بارپذیری از شکل (۴-۱۷) مشاهده می‌شود، یک زون بی‌هنجار در مرکز پروفیل مشاهده می‌شود که با مقطع بارپذیری در Res2Dinv مطابقت دارد؛ اما زون دگرسان شده منطبق بر سطح (ایستگاه ۲۰)، در شکل (۴-۱۶) را به وضوح نشان نمی‌دهد که علت این امر هموار سازی بیشتر مدل توسط این نرم افزار است؛ که باعث حذف بی‌هنجاری‌های کوچک می‌شوند.



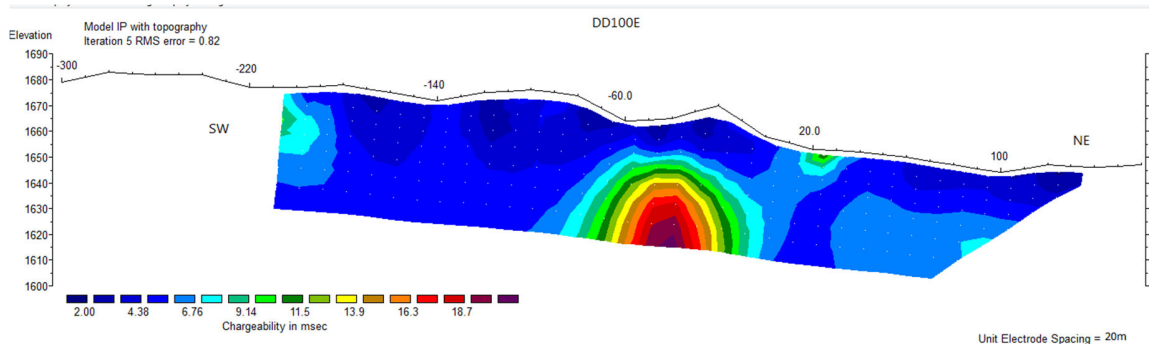
شکل ۴-۱۳: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD100E



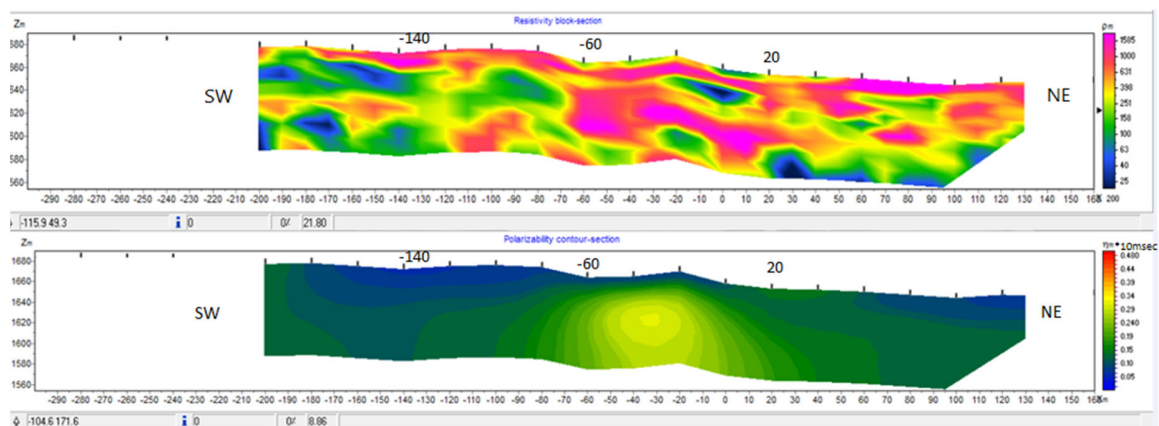
شکل ۴-۱۴: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD100E



شکل ۴-۱۵: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD100E



شکل ۴-۱۶: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD100E

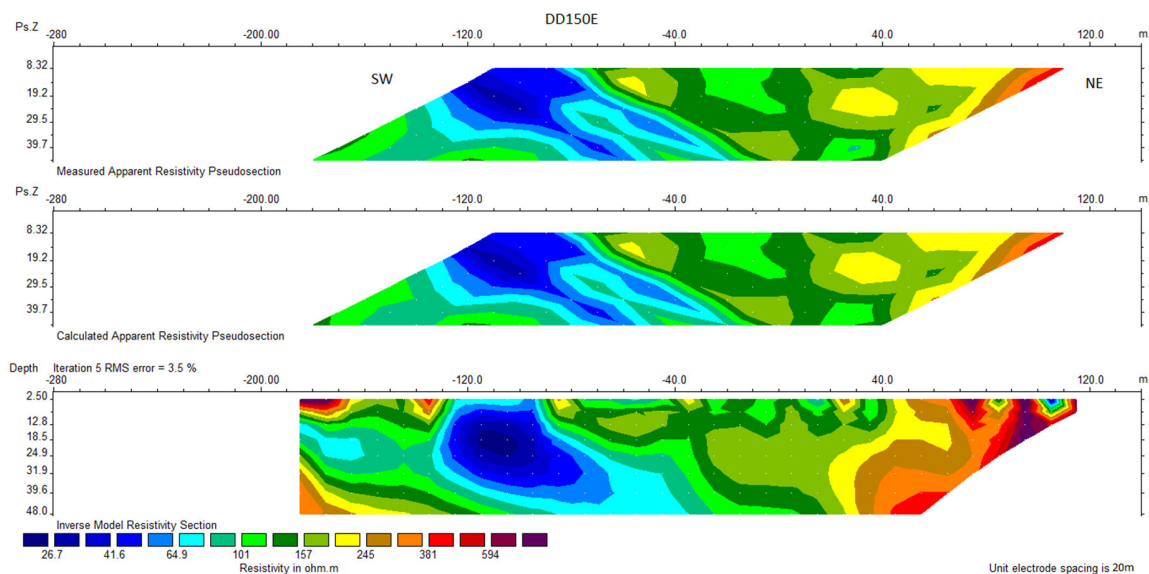


شکل ۴-۱۷: نتایج مدل سازی وارون مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری با نرم افزار ZondRes2d در طول پروفیل DD100E

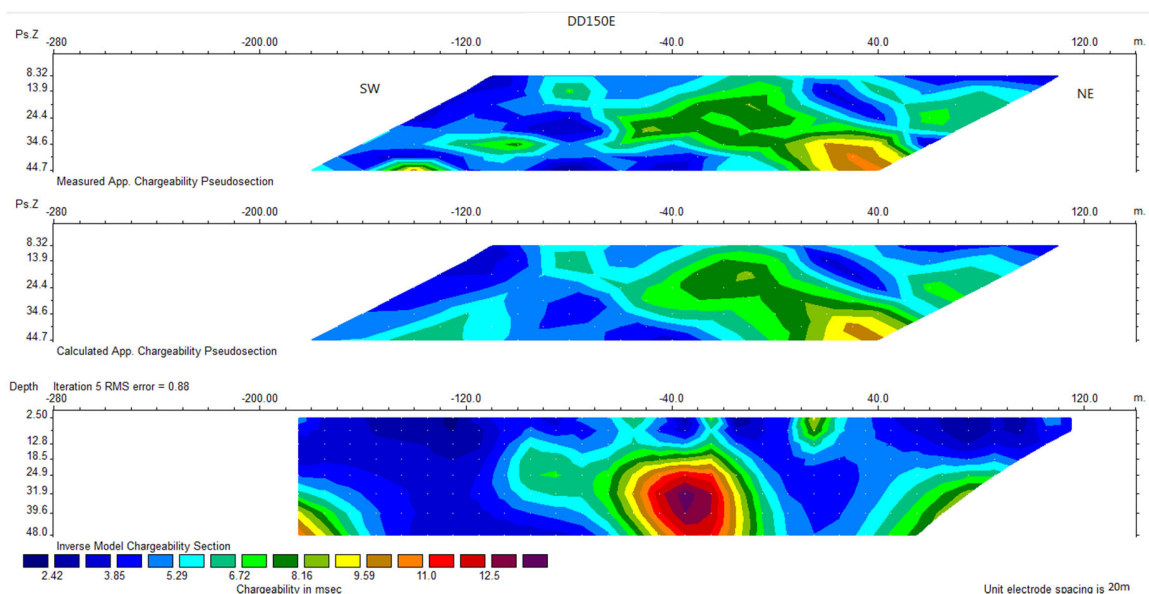
۴-۸-۳ تفسیر نتایج مدل سازی DD150E

پروفیل DD150E با طول تقریبی ۳۰۰ متر و فاصله الکترودی ۲۰ متر با امتداد شمال شرق- جنوب غرب به موازات دو پروفیل قبل (به فاصله ۵۰ متری از پروفیل DD100E) می باشد. این پروفیل شرقی ترین پروفیل برداشت است که به منظور کنترل بی هنجاری شبه مقطع DD100E و DD50E در شرق آن طراحی و اجرا شد. الکترودهای جریان در شمال شرق و الکترودهای پتانسیل در جنوب غرب گسترده شده اند. نتایج مدل سازی هموار با نرم افزار Res2Dinv بدون توپوگرافی به ترتیب برای داده های مقاومت ویژه و بارپذیری در شکل های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) آورده شده اند. همان طور که مشاهده می شود خطای RMS ناشی از مدل سازی وارون هموار برای داده های مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل DD150E به ترتیب ۳/۵ درصد و ۰/۸۸ درصد در تکرار پنجم است. همان طور که از شکل های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) مشاهده می شود در نقشه بارپذیری این پروفیل در قسمت های ابتدایی، مرکزی و انتهایی (در عمق) نواحی با بارپذیری بالاتری نسبت به سایر قسمت های پروفیل دیده می شود. قسمت های ابتدایی و انتهایی مقطع مقاومت ویژه دارای مقاومت ویژه نسبتاً بالایی است که در ارتباط با سنگ میزبان می باشد. با توجه به بارپذیری بالا و مقاومت ویژه نسبتاً بالا احتمال کانی سازی از نوع پراکنده در این قسمت ها وجود دارد، ضمن این که با توجه به وجود این بی هنجاری ها در کناره های مقطع نیاز به بررسی و اجرای برداشت بیشتر یا در محدوده وسیع تری در این قسمت ها می باشد. در ایستگاه ۴۰- یک زون تقریباً بزرگ با بارپذیری بالا (در حدود ۱۲ میلی ثانیه) مشاهده می شود. این بی هنجاری با بی هنجاری ثبت شده با آرایه مستطیلی منطبق است و از عمق حدوداً ۲۰ متری شروع شده و تا عمق حدوداً ۵۰ متری ادامه دارد. این بی هنجاری نسبت به سایر بی هنجاری های موجود بر روی این پروفیل وسیع تر و یا با گسترش جانبی و عمقی بیشتر بوده و با توجه به مقاومت ویژه پایین تر آن نسبت به سایر بی هنجاری ها در روی این پروفیل، احتمال داده می شود که این بی هنجاری ها بیشتر از نوع توده ای بوده تا پراکنده و یا با دگرسانی بیشتری همراه بوده باشد. مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی

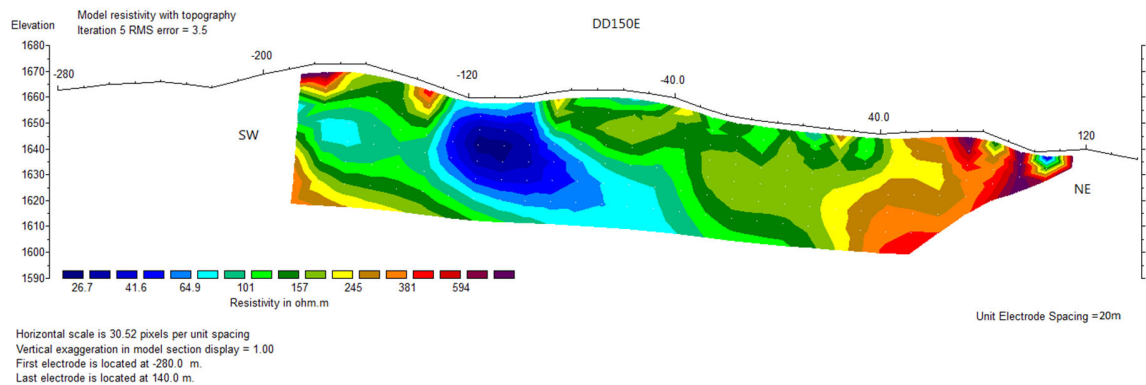
وارون هموار توسط نرم افزار ZondRes2d (شکل ۴-۲۲)، تطابق قابل ملاحظه‌ای با بی‌هنجاری‌های واقع در مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری شکل (۴-۲۱) دارد و به خوبی بی‌هنجاری‌های ابتدا، مرکز و انتهای پروفیل را با هموارسازی بیشتر نشان می‌دهد.



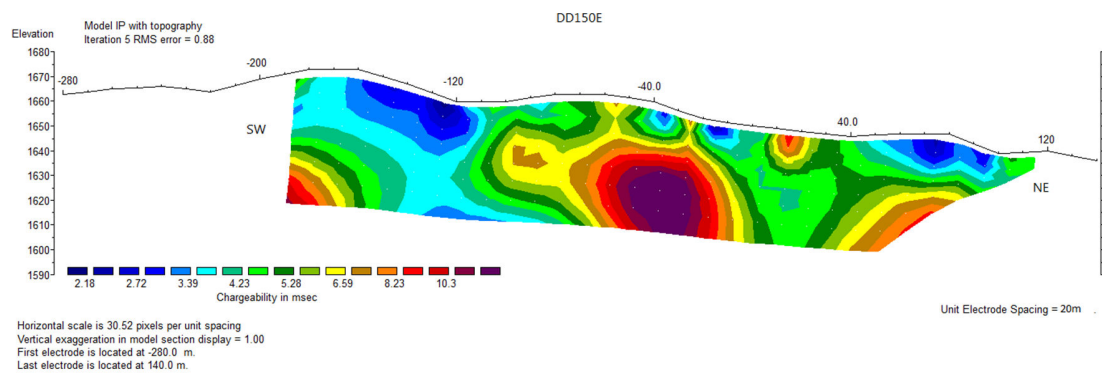
شکل ۴-۱۸: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD150E



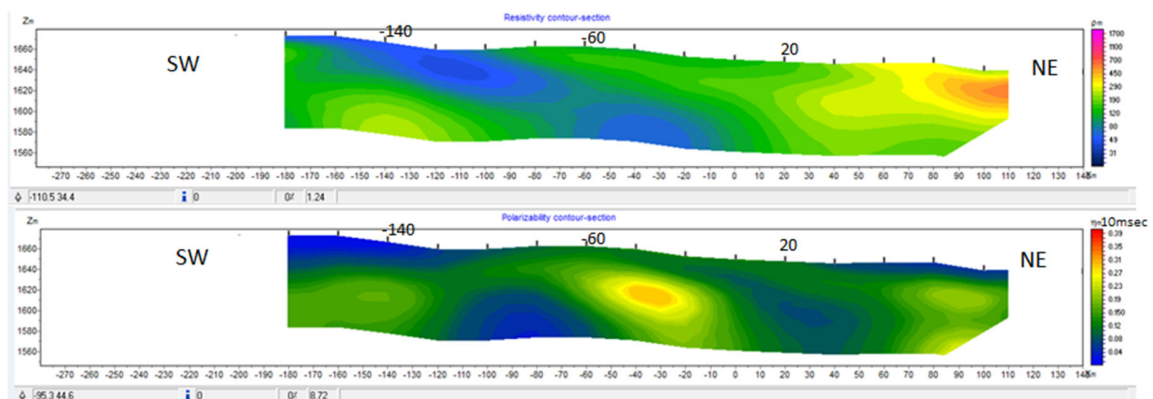
شکل ۴-۱۹: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD150E



شکل ۲۰-۴: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD150E



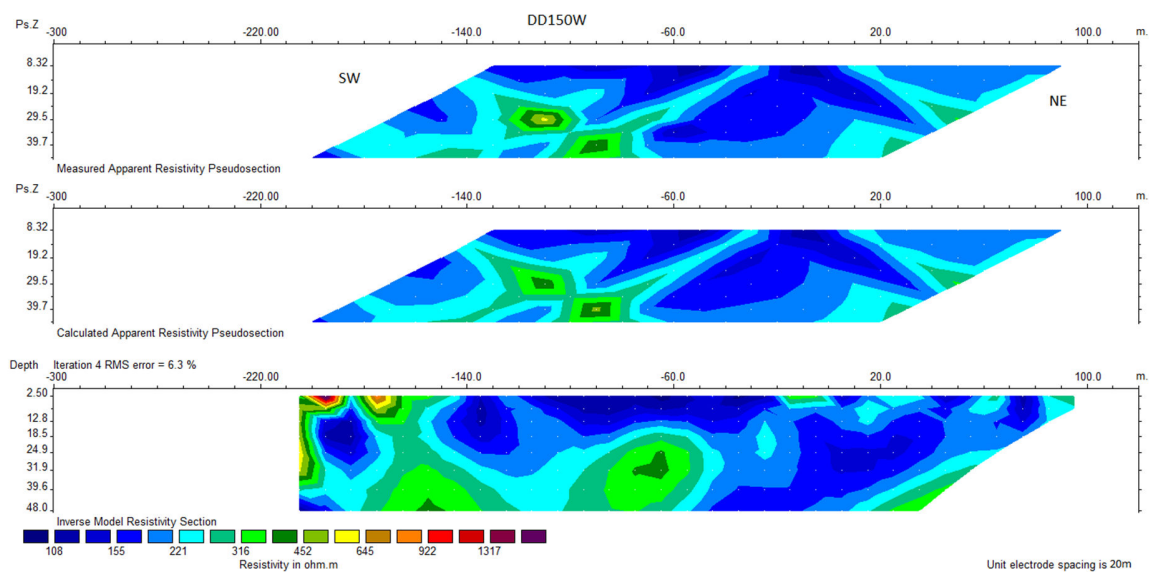
شکل ۲۱-۴: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD150E



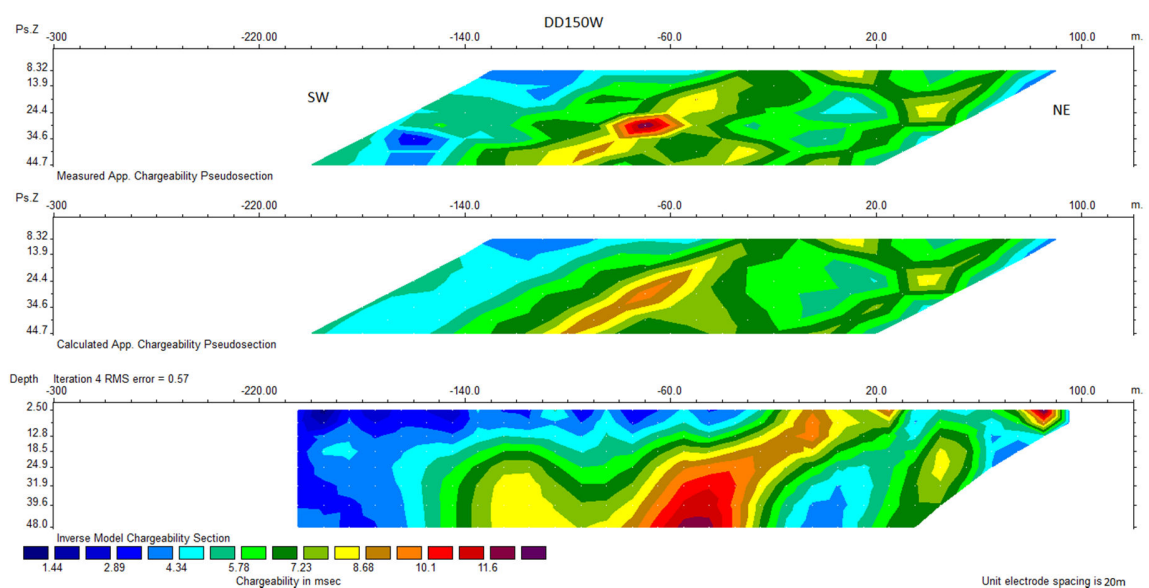
شکل ۲۲-۴: مدل سازی وارون مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری با نرم افزار ZondRes2d در طول پروفیل DD150E

۴-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی DD150W

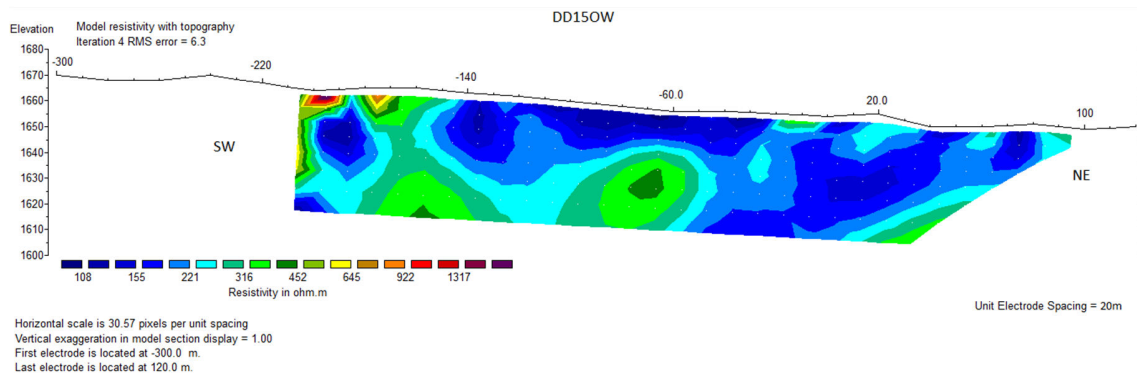
پروفیل DD150W با طول تقریبی ۳۰۰ متر در امتداد شمال شرق- جنوب غرب و با فاصله ۲۰۰ متری غرب پروفیل DD150E و موازی با پروفیل های دیگر می باشد. الکترودهای جریان در شمال شرق و الکترودهای پتانسیل در جنوب غرب گسترده شده اند. همان گونه که در شکل (۴-۲۳) و (۴-۲۴) مشاهده می شود مقدار RMS مقاومت ویژه و بارپذیری به ترتیب $6/3$ درصد و $0/57$ درصد در تکرار چهارم می باشد. بر روی نقشه بارپذیری آرایه مستطیلی در شکل (۴-۸) یک بی هنجاری در امتداد این پروفیل مشاهده می شود که منطبق بر بی هنجاری شبکه مستطیلی است، لذا جهت تعیین وضعیت عمق بی هنجاری در این امتداد، یک پروفیل با آرایه دوقطبی- دوقطبی اجرا شد. در مقطع مقاومت ویژه (۴-۲۵) زون هایی با مقاومت ویژه پایین در سطح مشاهده می شود که در ارتباط با رسوبات آبرفتی جوان (با سن کواترنری) در منطقه است. با توجه به شکل (۴-۲۶) به طور کلی یک زون اصلی کانی سازی در منطقه مشاهده می شود که از ایستگاه ۸۰- تا ایستگاه ۲۰ ادامه دارد. این بی هنجاری با گسترش شمال شرق در سطح زمین تا جنوب غرب در عمق دیده می شود. در فاصله ایستگاه ۸۰- تا ۲۰- گسترش کانی زایی عمقی بوده و از عمق تقریباً ۲۵ متری شروع شده و تا عمق ۵۰ متری ادامه دارد. در فاصله ایستگاه های ۲۰- تا ۲۰ این زون در سطح نیز ادامه پیدا می کند. یک بی هنجاری در انتهای پروفیل (ایستگاه ۸۰) در سطح زمین مشاهده می شود که به دلیل عدم مشاهده کانی سازی در این قسمت، به وجود رسوبات آبرفتی دانه ریز حاوی رس نسبت داده می شود که در مقطع بارپذیری حاصل از نرم افزار ZondRes2d، این بی هنجاری حذف شده است (رسوبات آبرفتی دانه ریز از نوع رسی باعث افزایش IP و کاهش مقاومت ویژه می شود). مدل های مقاومت ویژه و بارپذیری به دست آمده توسط نرم افزار ZondRes2d در شکل (۴-۲۷) نشان داده شده است. همان طور که پیش تر گفته شد به دلیل هموارسازی بیشتر، این مدل باعث شده تا زون های بی هنجار به دست آمده از مقطع بارپذیری در شکل (۴-۲۶) را به صورت کشیده و بزرگ تر نشان دهد، ولی به طور کلی تطابق نسبتاً خوبی دارد.



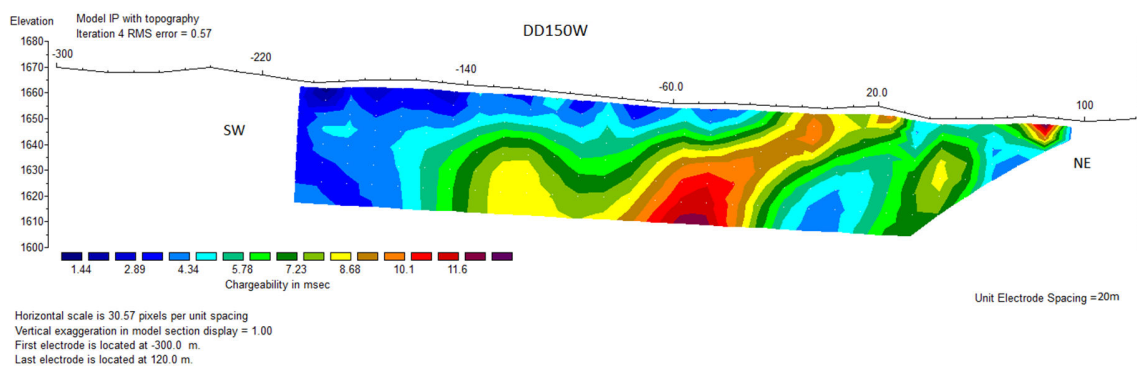
شکل ۴-۲۳: شبه‌مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD150W



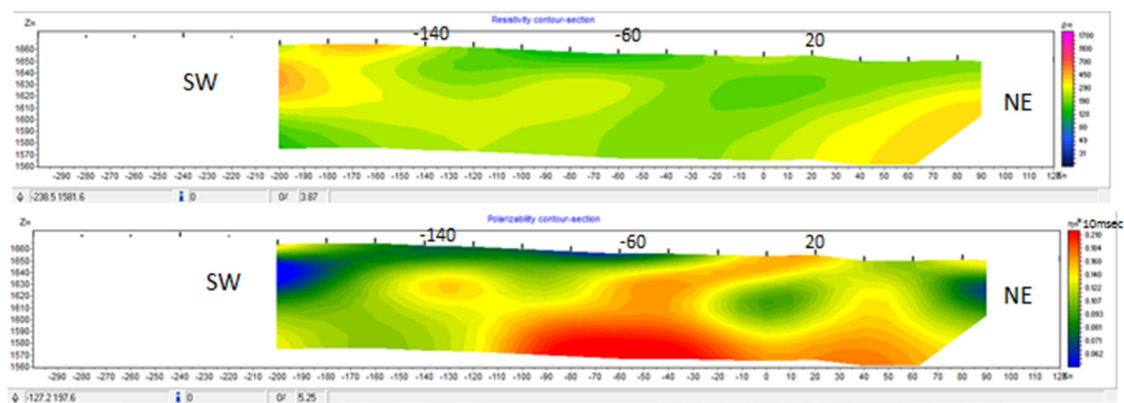
شکل ۴-۲۴: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD150W



شکل ۴-۲۵: مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD150W



شکل ۴-۲۶: مدل سازی وارون داده های بارپذیری با اعمال تصحیح توپوگرافی در طول پروفیل DD150W



شکل ۴-۲۷: مدل سازی وارون مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری با نرم افزار ZondRes2d در طول پروفیل DD150W

۹-۴ مدل سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP

در نرم افزار Res3dinv [Loke, 2002] به منظور مدل سازی وارون سه بعدی داده های مقاومت ویژه اندازه گیری شده از روش کمترین مربعات هموار مقید شده^۱ استفاده می شود. در این روش با فرض این که خطای داده های اندازه گیری شده در اختیار نباشد، دستگاه معادلات معمولی به صورت زیر بیان می شود.

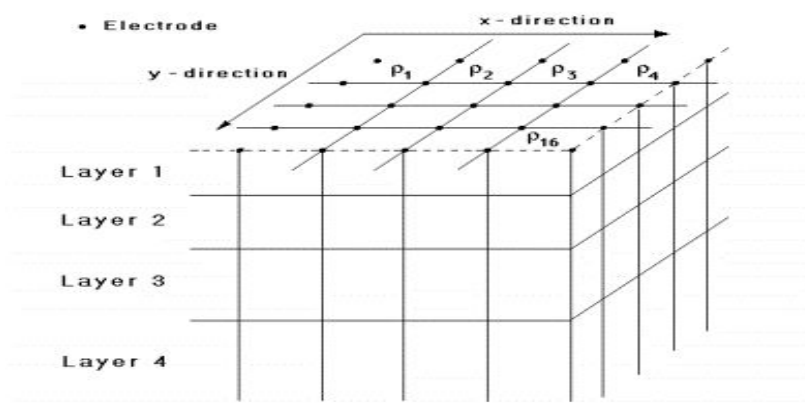
$$(J^T J + \lambda C^T C) \Delta p = J^T \Delta d \quad (۵-۴)$$

در این نرم افزار $C^T C$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$C^T C = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (۶-۴)$$

که f_x و f_z به ترتیب فیلتر هموار سازی افقی و عمودی در مدل سازی هستند. برای حل مسئله وارون سازی داده ها و پارامتری کردن مدل، ساختار زیر سطحی مدل مورد نظر مطابق شکل (۴-۲۸) به چندین لایه تقسیم بندی می شود و هر لایه نیز به تعدادی بلوک های (سلول های) مکعب مستطیل شکل که هریک از آن ها دارای مقاومت ویژه متفاوت ولی مجهول هستند تقسیم می شود. با تقسیم این سلول ها به اجزای کوچک تر، تعداد پارامترهای مدل و نیز زمان مورد نیاز برای وارون سازی این دسته از داده ها به نحو چشمگیری افزایش می یابد. در مدل سازی وارون هدف این است تا مقاومت ویژه هر یک از سلول های مدل به طریقی تعیین شوند که پاسخ مدل در تطابق خوبی با داده های اندازه گیری شده مقاومت ویژه باشد.

^۱ Smoothness constrained least squares



شکل ۴-۲۸: مدل سه بعدی زیر سطح زمین که توسط نرم افزار Res3dinv به تعدادی لایه و بلوک های مکعبی شکل با مقادیر مقاومت ویژه متفاوت تقسیم می شود [Loke, 2002].

این برنامه برای مدل سازی، روش کمترین مربعات و روش گوس - نیوتن را به کار می برد. محاسبات عددی در این نرم افزار با روش های تفاوت های محدود^۱ و اجزای محدود^۲ صورت می گیرد. در روش کمترین مجموع مربعات در هر بار تکرار، برخلاف روش گوس - نیوتن، ماتریس ژاکوبین ساخته نمی شود، بلکه ماتریس قبلی تصحیح می شود. این روش ده مرتبه سریع تر است و حافظه رایانه ای کمتری را برای محاسبات به خود اختصاص می دهد. در ضمن روش سنتی گوس - نیوتن را نیز می توان در این برنامه به کار برد؛ این روش دقیق تر است و برای نواحی ای که اختلاف مقاومت ویژه بین آن ها زیاد است، جواب بهتری می دهد. این برنامه این قابلیت را نیز دارد که دو یا سه تکرار اول را با روش گوس - نیوتن انجام دهد [Loke, 2002].

مدل سازی های سه بعدی به دو صورت میانگین سه بعدی داده های پروفیل های موازی و وارون سازی داده های برداشت سه بعدی امکان پذیر می باشند [Zhou et al, 2001]. در این مطالعه از روش اول استفاده شده است. استفاده از پروفیل های دوبعدی موازی در تولید یک مجموعه داده سه بعدی مقاومت ویژه و IP، روشی سریع

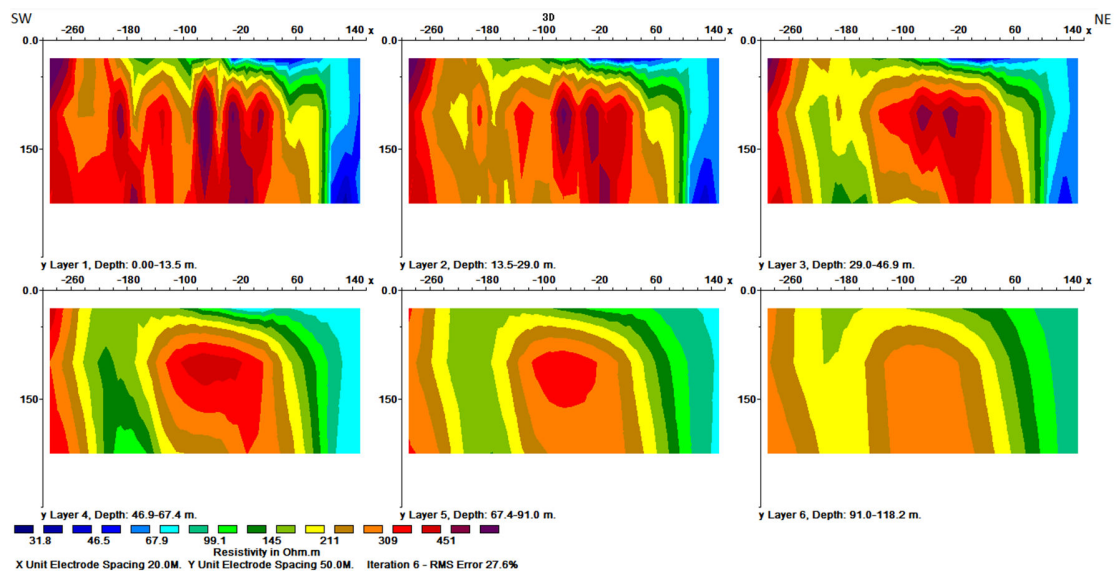
^۱ Finite-difference

^۲ Finite-element

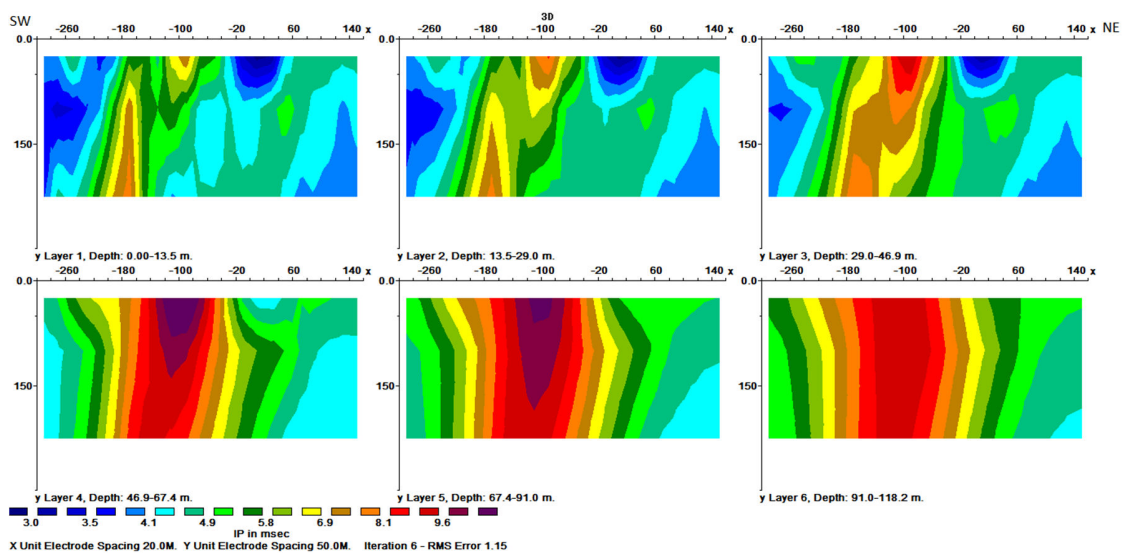
و مقرون به صرفه می باشد.

۴-۱۰ وارون سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP در منطقه مورد مطالعه

برداشت های دو بعدی مقاومت ویژه و IP با آرایش دوقطبی - دوقطبی در امتداد چهار پروفیل موازی با هم با فاصله الکترودی ۲۰ متر و فاصله پروفیلی ۵۰ و ۲۰۰ متر (فاصله بین پروفیل 50E و 150W)، از یکدیگر انجام شده است. داده های حاصل از این برداشت ها به وسیله نرم افزار Res2dinv و نرم افزار ZondRes2d مدل سازی وارون دوبعدی گردیدند. سپس پروفیل های دوبعدی به صورت یک فایل سه بعدی با نرم افزار Res2dinv با یکدیگر تلفیق شدند و نهایتاً یک مجموعه داده سه بعدی ایجاد شد. این مجموعه داده ها، به منظور مدل سازی وارون سه بعدی به نرم افزار Res3dinv فراخوانی شد. مقاطع حاصل از مدل سازی سه بعدی در شکل های (۴-۲۹) و (۴-۳۰) نشان داده شده است. در نهایت برای نمایش بهتر نتایج سه بعدی از نرم افزار Voxler استفاده شده و نتایج حاصله در شکل های (۴-۳۱) و (۴-۳۴) نشان داده شده است.



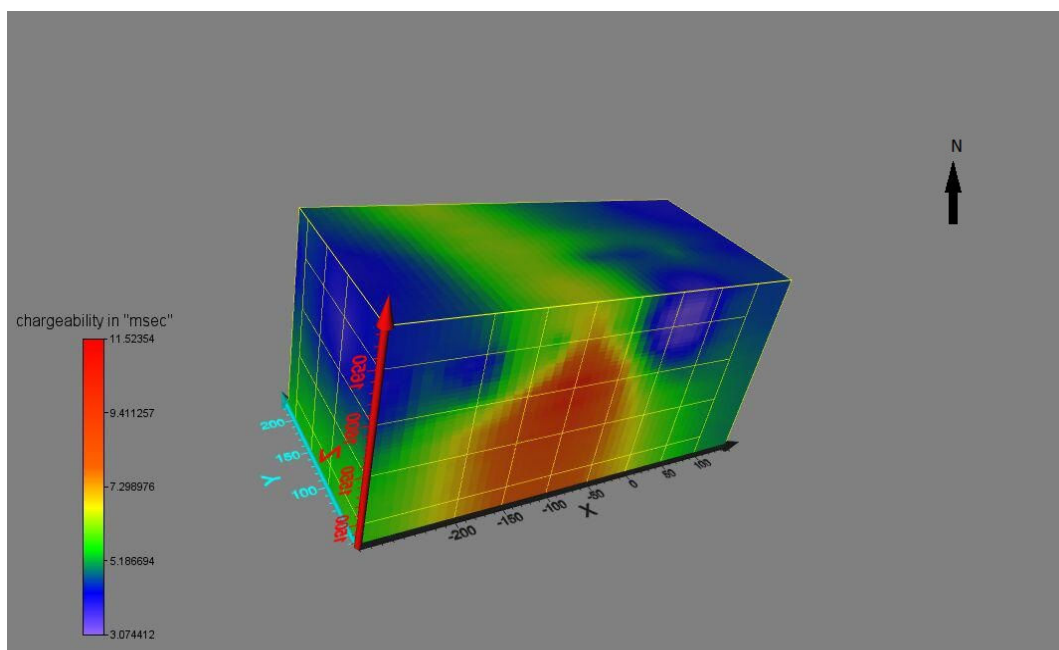
شکل ۲۹-۴: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه



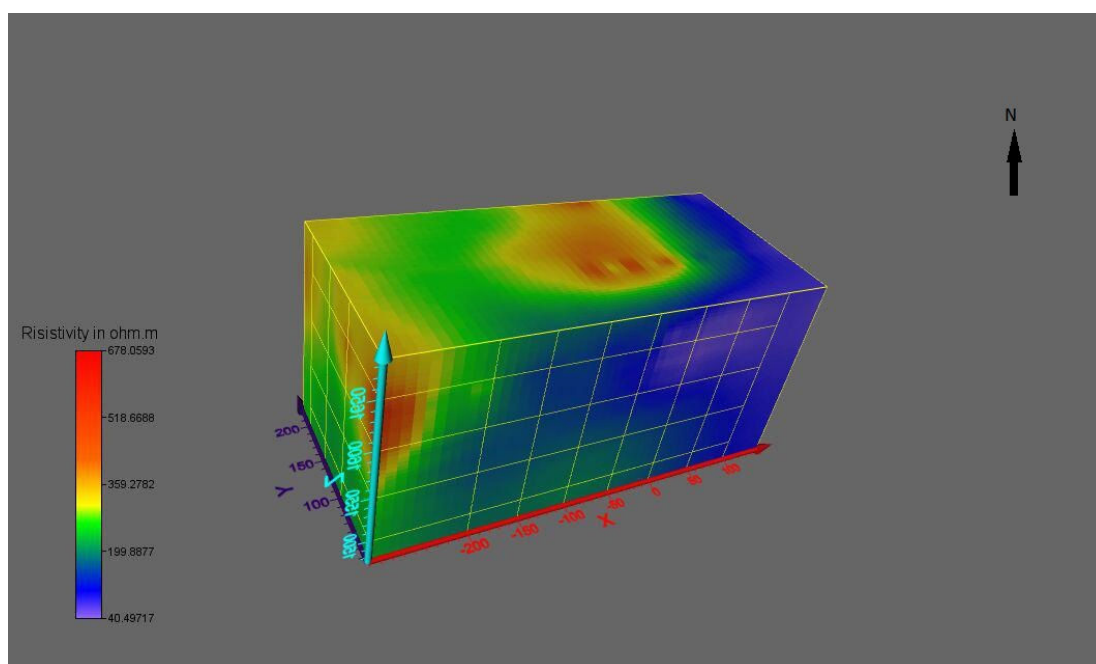
شکل ۳۰-۴: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی داده های IP

همان‌طور که در شکل (۴-۲۹) و (۴-۳۰) مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های اندازه‌گیری‌شده به صورت ۶ مقطع افقی مقاومت‌ویژه و IP در بازه‌های متفاوت عمقی (از سطح تا عمق ۱۱۸ متری) آورده شده است. با توجه به مقاطع به‌دست آمده در شکل (۴-۲۹) نواحی با مقاومت‌ویژه متوسط تا نسبتاً بالا، با رنگ قهوه‌ای تا بنفش نشان داده شده‌اند که در قسمت ابتدایی و مرکزی هر مقطع وجود دارند. در عمق کم، عمدتاً مقاومت‌ویژه بالایی قابل مشاهده است (به‌جز در بخش شمال شرقی) که رفته رفته با افزایش عمق مقاومت‌ویژه بخش‌های ابتدایی (ایستگاه ۲۰۰- تا ۱۰۰-) پروفیل‌ها به شدت کاهش یافته است و بخش میانی (ایستگاه ۱۰۰- تا ۲۰-) بر روی پروفیل‌ها مقاومت‌ویژه متوسط تا بالایی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۴-۳۰) می‌توان ملاحظه نمود که بخش‌های با مقادیر IP نسبتاً بالا اغلب بر روی مقاومت‌ویژه متوسط تا نسبتاً بالا منطبق هستند و این امر می‌تواند ناشی از کانی‌سازی پراکنده مس در این بخش‌ها باشد. همچنین با توجه به پیوستگی زون‌های بی‌هنجار هم به‌صورت جانبی هم عمقی، احتمال پیوستگی این بی‌هنجاری‌ها در فواصل بین پروفیل‌های برداشت شده و در عمق ۳۰ تا ۹۰ متری وجود دارد. با مقایسه مقاطع افقی مقاومت‌ویژه و IP می‌توان دریافت بخش‌هایی که بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط تا نسبتاً بالا دارند (با توجه به ماهیت ماده معدنی و سنگ میزبان) برهم منطبق بوده و احتمالاً جزو مناطق محتمل کانی‌سازی و اهداف اکتشافی به‌شمار می‌آیند که در مرکز مقاطع قابل مشاهده می‌باشد.

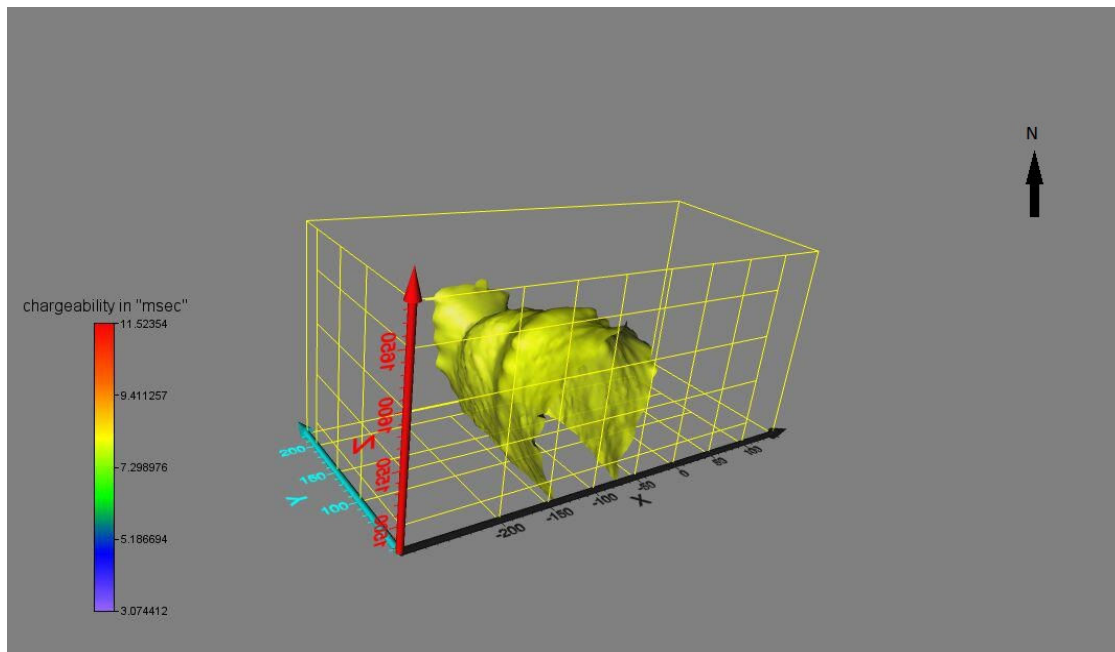
همان‌طور که در شکل‌های (۴-۳۱ و ۴-۳۲) دیده می‌شود، مقادیر IP و مقاومت‌ویژه به صورت سه بعدی به نمایش درآمدند؛ تا بتوان به درک بهتر و قابل فهم‌تری از توزیع فضایی کانی‌سازی در زیر سطح زمین دست یافت. شکل (۴-۳۳) مقادیر IP را از ۷ میلی‌ثانیه به بالا نشان می‌دهد؛ که مدل سه بعدی به نمایش درآمده تقریباً منطبق بر سه بعدی نمایش داده شده با مقادیر مقاومت‌ویژه متوسط تا نسبتاً بالا در شکل (۴-۳۴) می‌باشد و گسترش کانی‌سازی را به خوبی نشان می‌دهد.



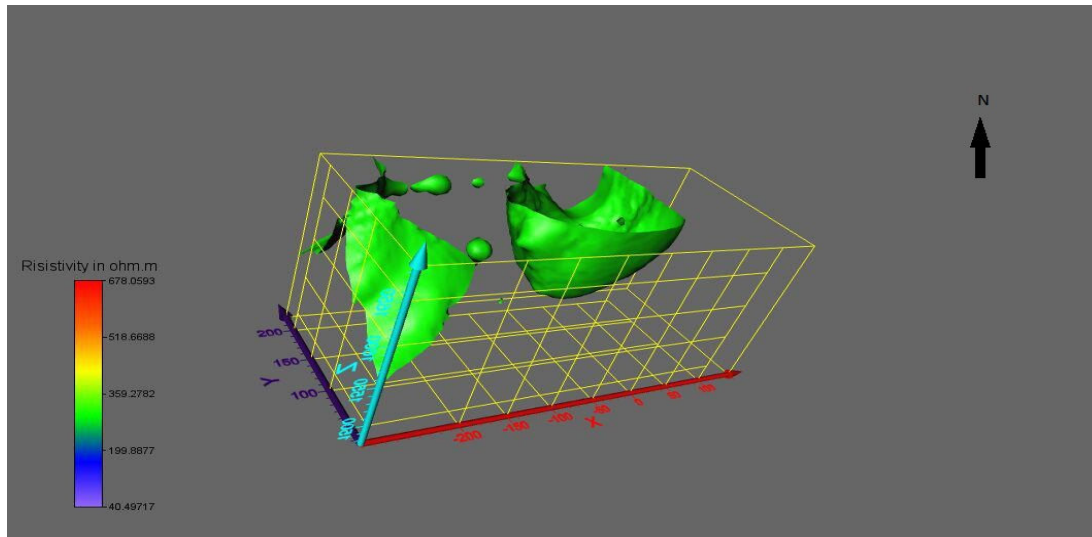
شکل ۴-۳۱: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده های IP در منطقه مورد مطالعه با نرم افزار Voxler.



شکل ۴-۳۱: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه در منطقه مورد مطالعه با نرم افزار Voxler.



شکل ۴-۳۳: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده های IP به ازای IP بالای ۷ میلی ثانیه در منطقه مورد مطالعه با نرم افزار Voxler.



شکل ۴-۳۴: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه به ازای مقاومت ویژه بالای ۳۰۰ اهم متر در منطقه مورد مطالعه با نرم افزار Voxler.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و IP به منظور پتانسیل‌یابی کانسارهای مس در منطقه اردستان انجام گرفته است. مدل‌سازی وارون هموار داده‌های صحرایی برداشت شده با آرایش دوقطبی- دوقطبی توسط نرم‌افزار Res2dinv انجام شد و مقاطع حاصل به منظور تخمین گسترش کانی‌سازی تفسیر شدند. به منظور تجزیه و تحلیل مقاطع حاصل از مدل‌سازی، از اطلاعات زمین-شناسی منطقه که اطلاعات چندان زیادی از آن در دسترس نبود (به جز نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی منطقه)، استفاده شده است. نتایج حاصل به منظور انجام مناسب‌تر و دقیق‌تر مراحل بعدی اکتشاف، در ادامه ارائه می‌گردند.

۱- به کارگیری روش مقاومت‌ویژه و IP با آرایه مستطیلی برای پی‌جویی نتیجه بخش بوده است. در این بررسی نواحی امید بخش با مقاومت‌ویژه متوسط تا نسبتاً بالا و IP بالا خود را نشان می‌دهد. پس از بررسی‌های عمقی با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی بر روی این نواحی، صحت وجود ذخایر تأیید شده است.

۲- نتایج مدل‌سازی انجام گرفته با استفاده از هر دو نرم‌افزار Res2dinv و ZondRes2d عمدتاً انطباق خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند.

۳- با وجود این که استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه و IP تا حدود زیادی برای شناسایی زون‌های کانی‌سازی شده می‌تواند مؤثر باشد اما در عین حال در مواردی قادر به تعیین دقیق موقعیت این زون‌ها به خصوص در شرایط زمین‌شناسی پیچیده (مانند وجود زون دگرسان شده) ابهام داشته و نیاز به استفاده از اطلاعات کمکی نظیر زمین‌شناسی و داده‌های حفاری است.

۴- در اکثر مقاطع به دست آمده از مدل‌سازی وارون داده‌های برداشت شده با آرایه دوقطبی - دوقطبی زون‌های کانه‌سازی احتمالی دارای مقاومت‌ویژه متوسط تا نسبتاً بالا و بارپذیری بالا می‌باشد که حاکی

از کانی سازی به صورت پراکنده می باشد.

۲-۵ پیشنهادات

در راستای به دست آوردن اطلاعات بیشتر و دقیق تر از منطقه مورد مطالعه و اکتشاف بهتر بی هنجاری های شناسایی شده در این پژوهش، پیشنهاداتی به شرح ذیل ارائه می گردد:

۱- باتوجه به فاصله زیاد بین پروفیل 50E و 150W از یکدیگر و خطای بالای مدل سازی سه بعدی پیشنهاد می شود حداقل دو پروفیل بین آنها با فواصل ۵۰ متر از یکدیگر طراحی و برداشت داده صورت گیرد. این کار به تعیین شکل بی هنجاری ها و بالاتر بردن دقت تفسیر کمک قابل توجهی خواهد کرد.

۲- پیشنهاد می شود در محیط هایی با ساختار زمین شناسی پیچیده (به طور مثال حضور زون دگرسان)، که روش مقاومت ویژه و IP ضعیف عمل می کنند، سعی شود عملیات ژئوفیزیکی با فواصل الکترودی کوچک (فاصله الکترودی ۵ متر) به منظور برداشت نقاط بیشتر و مدل سازی دقیق تر استفاده شود.

۳- با توجه به مقطع دوبعدی به دست آمده از وارون سازی داده های پروفیل DD150E احتمال وجود بی هنجاری در دو طرف این پروفیل می باشد. پیشنهاد می شود برای کسب اطلاعات بیشتر از این بی هنجاری ها، پروفیلی با در امتداد همین پروفیل طراحی و اجرا شود؛ تا وضعیت بی هنجاری در این پروفیل مشخص شود.

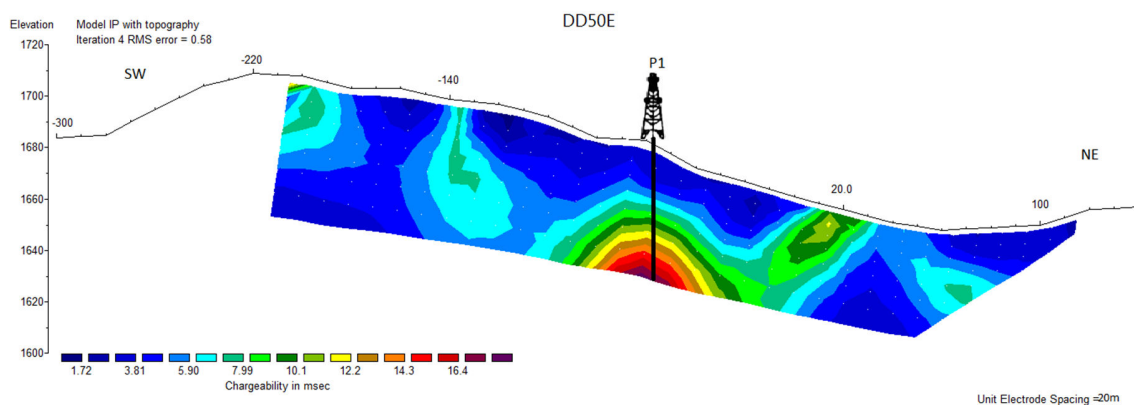
۴- با توجه به وجود دگرسانی های رسی که سبب بالا رفتن مقادیر IP در منطقه مورد مطالعه می شود و همچنین بالا بودن IP در مورد کانی سازی فلزی و عدم تفکیک این دو با روش IP معمولی، استفاده از روش SIP به منظور تشخیص دقیق تر کانی سازی فلزی و بافت آن پیشنهاد می شود.

۵- در نهایت با توجه به مدل سازی صورت گرفته و مقاطع مشاهده شده، دو گمانه P_1 و P_2 در منطقه جهت بررسی بی هنجاری های عمقی ژئوفیزیکی پیشنهاد می شود؛ که گمانه P_1 بر روی پروفیل

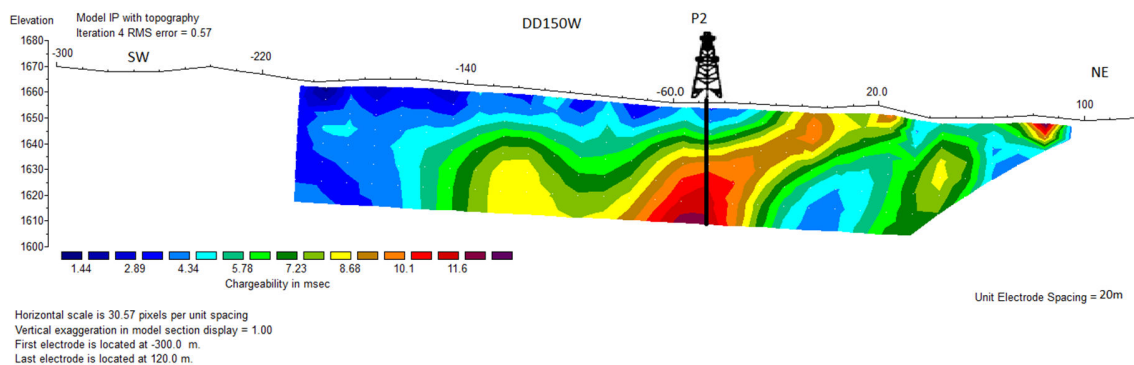
DD50E و گمانه P_2 بر روی پروفیل DD150W قرار گرفته است. در جدول (۱-۵) موقعیت حفاری‌های پیشنهادی، به همراه شیب، عمق و مختصات تقریبی محل حفاری آورده شده است. موقعیت این گمانه‌ها بر روی پروفیل‌های معرفی شده در شکل (۲-۵) و (۳-۵) مشاهده می‌شود.

جدول ۱-۵: مختصات نقاط حفاری پیشنهادی (سیستم متریک و زون ۴۹)

Name	Station	X	Y	Slope	Depth
P1	-60	623081	3680044	90	50
P2	-40	622940	3680183	90	70



شکل ۵-۱: نقطه حفاری پیشنهادی بر روی مقطع DD50E



شکل ۵-۲: نقطه حفاری پیشنهادی بر روی پروفیل DD150W

منابع و مأخذ

- حجت آ، رنجبر ح، (۱۳۹۰)، "اصول ژئوالکتریک کاربردی"، چاپ اول، انتشارات ستایش، تهران.
- شمس الدینی نژاد م، (۱۳۹۲) "اکتشافات ژئوفیزیکی به روش‌های IP و RS در اندیس معدنی قلعه گنج"، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی علوم زمین.
- عرب امیری ع. و فتحیان پور ن، (۱۳۷۹)، "تعیین مناطق کانی‌سازی با استفاده از پردازش داده‌های قطبش-القای طیفی و مقاومت‌سنجی تپه سرخ ایرانکوه"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۵۷، ص ۵۵.
- فتحی بایزیدآباد س. عرب امیری ع. کامکار روحانی ا. و علی مرادی ا، (۱۳۹۶)، "مطالعات سنجش از دور و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP و مقاومت‌ویژه در محدوده معدن طلای زرشوران، شمال غرب ایران"، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی.
- کلاگری عا، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز، ص ۱۸۰.
- کریم‌پور مح، ملک‌زاده آ، حیدریان م، (۱۳۸۷)، "اکتشاف ذخایر معدنی"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه اردستان، (۱۳۷۸)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- گورابجیری‌پور آ. و مباشری م، (۱۳۹۳)، "تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی و مطالعات ژئوفیزیکی IP/RS کانسار ماهور - شمال غرب ده‌سلم، بلوک لوت"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۲، ص ۳۰۷ تا ۳۲۵.
- مهدوی ف، (۱۳۸۳)، "روش‌های الکتریکی در اکتشاف ژئوفیزیکی حوضه‌های رسوبی عمیق"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

- ملک‌زاده شفارودی آ. حیدریان شهری م. کریم‌پور م. ح، (۱۳۸۸)، "کانی‌سازی و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP/RS و مغناطیس‌سنجی زمینی در محدوده MA_I و اطراف آن، منطقه اکتشافی مس - طلا پورفیری ماهرآباد، شرق ایران"، **مجله زمین‌شناسی اقتصادی**، شماره ۱، ص ۱ تا ۱۷.
- موسوی خ، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "مدل‌سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت‌ویژه به منظور اکتشاف ذخایر مس در منطقه هفت کوه کرمان"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- نوروزی غ، (۱۳۹۲)، "روش‌های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۳۷۵.
- Aizebeokhai A. P., (2009), "Geoelectrical resistivity imaging in environmental studies", ERTEP 2007, pp 297, Ghana, Africa.
- Dey A. and Morrison H. F., (1997), "Resistivity modeling for arbitrarily shaped three - dimensional structures", **Geophysics**, **44(4)**, 753-780.
- Fedi M. and Antonio R., (1999), "3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution", **Geophysics**, **V 64**, 452-60.
- Gautneb H. and Tveten E., (2000), "The geology, exploration and characterization of graphite deposits in the Jennestand area, Vesteralen, northern Norway", **Geological Survey of Norway**, **V 436**, 67-74.
- 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 gold-silver deposit, Magadan Region)", **Russian Geology and Geophysics**, **N 56**, 1757-1771.
- Kaminsky A., (2013), "Program for two - dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods", Saint - Petersburg.
- Kearey P. Brooks M. Hill L., (2002), "An introduction to geophysical exploration, third edition", **Blackwell Science Ltd, UK**, 281.
- Loke M. H. and Barker R. D., (1995), "Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections", **Geophysics**, **60 (6)**, 1682-1690.

- Loke M. H. and Barker R. D., (1996), "Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion", **Geophysical prospecting**, **44(3)**, 499-523.
- Loke, M. H., (1999), "Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys", pp 1-4
- Loke M. H. and Dahlin T., (2002), "A comparison of the Gauss - Newton and quasi - Newton methods in resistivity imaging inversion", **J. of Applied Geophysics**, **49(3)**, 149-162.
- Loke M. H., (2004a), "RES2DINV ver. 3.54 for Windows 98/Me/2000/NT/XP Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least squares method".
- Loke M. H., (2004b), "**2-D and 3-D electrical imaging surveys**", University of Alberta.
- Loke M. H. and Lane Jr. J. W., (2004), "Inversion of data from electrical resistivity imaging surveys in water - covered areas", **Exploration Geophysics**, **35(4)**, 266-271.
- Lowrie W., (2007), "**Fundamentals of geophysics**", Vol. 1, Second Edition, Cambridge University Press, UK.1, pp. 266.
- Milsom J., (2007), "**Field geophysics**", Vol. 1, Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, Oxford, pp.100.
- Mikhail Z. S., (1994), "The geoelectrical methods in geophysical exploration", **Elsevier**, **873**.
- Molano, E., Salamanca, M. and Van Overmeeren, A., (1990), "Numerical modeling of standard and continuous vertical electrical sounding" J. of. Geophysics Prospecting, 38, pp 705-718
- Okada, K., (1995). Geophysical exploration for epithermal gold deposits: Case studies from the Hishikari gold mine, Kagoshima, Japan, The Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists, 26, pp.78-83.
- Okan T., (2002), "Interpretation of field observation in induced polarization", international conference on earth science and electronic.
- Ozebo V. Odunaike R. Balogun A., (2008), "Identification of depth to top of Limestone body within a concession at ibese", **J. of Earth Sciences**, **V 3**, 99-107.
- Reynolds J. M., (1997), "**An introduction to applied and environmental geophysics**", John Wiley and Sona Ltd, Chichester, 418-459.
- Sasaki Y., (1992). "Resolution of resistivity tomography inferred from numerical

simulation”, **Geophysical prospecting**, **40(4)**, **453-463**.

- Scott W. J. Sellmann P. V. Hunter J. A., (1990), “Geophysics in the study of permafrost Geotechnical and Environmental Geophysics, Review and Tutorial”, **Society of Exploration Geophysics, Investigations in Geophysics**, **V 1, I 5**, **355–384**.
- Seigel H. O., (1959), “Mathematical formulation and type curves for induced polarization”, **Society of exploration geophysics**, **V 24, I 3**, **543-565**.
- Slater L. D. and Lesmes D., (2002), “IP interpretation in environmental investigations Geophysics”, **Society of Exploration Geophysics**, **67**, **77- 88**.
- Smith, N. and Vozoff, K., (1984), “ Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data”, **IEEE Trans. Geosc**, **22**, **21-28**.
- Telford W. W. M. and Sheriff R. E., (1990), “**Applied geophysics**”, Cambridge University Press, UK, **V I**, **340-380**.
- Uchida T. Takakura Sh. Ueda T. S. Abe Y., (2015), “Three _ dimensional resistivity structure of the Yanaizu-Nishiyama Geothermal Reservoir, Northern Japan”, **Proceedings Word Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April**.
- Ward S. H., (1990), “Resistivity and induced polarization method in geotechnical and environmental geophysics”, **Society of exploration geophysics**, **V I**, **147- 189**.
- Zhou Q. Y. Shimada J. Sato A., (2001), “Three - dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography”, **Water Resour, Res.** **37**, **273-285**.
- Zohdy, A.A.R., (1989), “ A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curve ”, **Geophysics**, **54**, **245-253**.

Abstract

One of the most important steps in exploration is target zone identification. Induced polarization (IP) and resistivity methods are two of the most proper methods for prospecting and exploration of sulfide minerals. The main mineral in the study area is copper, which exists as sulfide or oxide minerals. The ultimate goal of this research is to determine the mineralization zones by inverse modeling of IP and resistivity data. According to mineralization in the exploration area in Ardestan area. first, we carried out IP and resistivity surveys using rectangle array, and then in order to study prospect zones in contour maps , four dipole-dipole lines with 20 meters electrode spacing were designed and then, the IP and resistivity data were collected and analyzed to study the probable anomalies in depth. In order to obtain true chargeability and resistivity the subsurface structures and interpreting the results, two-dimensional (2D) IP and resistivity values and to determine sections from Res2dinv and ZondRes2d were software packages used in this study. To obtain the best subsurface mineralization, three-dimensional (3D) sections had been prepared by Res3dinv software. In the end, results from modeling were visualized via voxler. Typical lithological and mineralization trends are extended from northwest toward southeast. Mineralization has been taken place in andesite rocks and then, altered rocks which in most places showed high chargeability and even moderate to high resistivity. By comparing the contour maps of rectangle array and 2D and 3D sections, the mineralization zones were determined. Finally, two points for exploration drilling were proposed.

Keywords: Induced polarization (IP), Resistivity, Inversion modeling, Rectangle array, Dipole-dipole array, Ardestan.



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

MSc Thesis in Geoelectrics

**Acquisition, Modeling and interpretation of induced polarization
And resistivity for copper exploration in Ardestan area, Isfahan
Province**

By: Sajad Radsar

Supervisor

Dr Alireza Arab Amiri

Dr Abolghasem Kamkar Rohani

Advisor

Hasan Riahi

January 2018

