

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی در محدوده

معدن مس آسمانو، شهرستان میامی، استان سمنان

دانشجو:

ناصر صابری

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

تیر ۱۳۹۹

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای ناصر صابری با شماره دانشجویی ۹۷۱۰۲۵۴ رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک تحت عنوان مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی در محدوده معدن مس آسمانو، شهرستان میامی، استان سمنان که در تاریخ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه:.....)	<input type="checkbox"/> مردود
<input type="checkbox"/> نظری	<input checked="" type="checkbox"/> عملی
نوع تحقیق:	

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
		دکتر علیرضا عرب امیری	۱- استاد راهنمای اول
		دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
			۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
			۵- استاد ممتحن اول
			۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم اثر

تقدیم به پدر و مادر مهربانم که هر لحظه وجودم را از چشمه سار پر از عشق چشمانشان سیراب می‌کنند.

و نیز تقدیم به همسرم به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که زندگی شیرین، سرشار از سلامت

و امنیت و آرامش و آسایش برایم فراهم آورده است.

شکر و قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهنمایی اساتید بزرگ موفق به اتمام این پایان نامه شده‌ام، وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من یاری رسانده‌اند را به عمل آورم:

در آغاز از اساتید بزرگ و گران قدر خود، جناب آقای دکتر علیرضا عرب‌امیری و جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که راهنمایی این پایان نامه را برعهده داشته‌اند و در تمامی مراحل انجام آن بیش از انتظار به اینجانب یاری رسانده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از جناب آقای محمد محمدزاده مقدم که در تمامی مراحل پردازش داده‌ها به اینجانب کمک کرده‌اند و نیز از جناب آقای مهندس شهروز شفیع‌زاده مدیر شرکت کاویان گستر یزد بسیار ممنونم. از جناب آقای مهندس مهدی زارع به خاطر کمک‌ها و راهنمایی که به اینجانب داده‌اند خالصانه تشکر می‌کنم. از جناب آقای مهندس میعاد بادپا که در مرحله مدل‌سازی سه‌بعدی بنده را راهنمایی کرده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم و نیز از جناب آقای مهندس کارگر و جناب مهندس ابراهیمی از کارکنان معدن آسمانو و کارکنان دیگر معدن تشکر می‌کنم. از پرسنل کاروانسرای میاندشت که این مدت کمپ اکیپ ژئوفیزیک بود نهایت تشکر را دارم که همکاری لازم را برای رفاه اکیپ فراهم نمودند. از داوران محترم که داوری این پایان نامه را برعهده گرفته‌اند صمیمانه تشکر می‌کنم. در آخر برای تمامی دوستانی که در طی مراحل انجام پروژه بنده را یاری نموده‌اند، از خداوند متعال موفقیت، سربلندی و سلامتی را خواهانم.

تعمیرنامه

اینجانب ناصر صابری دانشجوی دوره کارشناسی‌ارشد رشته ژئوفیزیک (ژئوالکتریک) دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در محدوده معدن مس آسمانو، شهرستان میامی، استان سمنان تحت راهنمایی آقای دکتر علیرضا عرب‌امیری و آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood UniveReSity of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیر گذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجودات زنده (با بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

از مراحل مهم در اکتشاف ذخایر معدنی، شناسایی مناطق هدف است. روش‌های ژئوفیزیکی از روش‌های غیرمستقیم و غیرمخری می‌باشند که کارایی بالایی دارند و با هدف جستجوی ذخایر پنهان به کمک اندازه‌گیری یک پارامتر فیزیکی در سطح عمل می‌کنند و نسبت به روش‌های مستقیم اکتشافی مانند حفاری، هزینه کمتر و سرعت بالاتری نیز دارند. محدوده معدنی آسمانو در ۲۵ کیلومتری شرق شهر میامی در استان سمنان واقع شده است. سنگ میزبان کانی‌سازی، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن می‌باشد و از نظر زمین‌شناسی در قسمت غربی زون سبزوار و در زون متالوژنی ترود-عباس‌آباد قرار گرفته است. با توجه به شرایط زمین‌شناسی و مطالعات از قبل انجام شده، روش‌های مقاومت‌ویژه (ReS) و قطبش‌القایی (IP)، روش‌های مناسبی برای بررسی ویژگی‌های زمین‌ساختی و اکتشاف کانی‌سازی‌های سولفیدی مس می‌باشند. IP یکی از روش‌های مهم در اکتشاف کانی‌های سولفیدی و فلزی به‌خصوص سولفیدهای پراکنده می‌باشد که به همراه روش مقاومت‌ویژه به‌عنوان روش مکمل در این مطالعات استفاده شده است. این مطالعات محدوده وسیعی را در بر می‌گیرد که با ۳۲۶۶ اندازه‌گیری IP/ReS در امتداد ۱۳ پروفیل و با آرایه‌های الکترودی دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی در دو فاز شمالی و جنوبی محدوده معدن آسمانو انجام شد. نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی به‌وسیله نرم‌افزار RES2DINV مورد مدل‌سازی دوبعدی و تفسیر قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها، موقعیت‌هایی که دارای مقادیر بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط به بالا بودند به‌عنوان موقعیت‌های امیدبخش کانی‌سازی شناسایی شدند. از آن‌جا که با تفسیر سه‌بعدی می‌توان جواب‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را به‌دست آورد؛ مقاطع سه‌بعدی فاز جنوبی نیز با استفاده از نرم‌افزار RES3DINV مدل‌سازی شده و نتایج با استفاده از نرم‌افزار Voxler نمایش داده شده است. براساس این نتایج در فاز شمالی معدن با وجود سنگ‌های رسوبی و مقاومت‌ویژه پایین، شرایط زمین‌شناسی مناسبی برای کانی‌سازی مس وجود ندارد و تنها در راستای پروفیل شماره ۵، پیشنهاد حفاری امیدبخش داده شده است. برخلاف فاز شمالی، در فاز جنوبی بی‌هنجاری‌های

بیشتری تشخیص داده شده است که با وجود سنگ‌های آذرین آندزیتی که دارای مقاومت ویژه بالایی می‌باشند، در همان نقاط مقدار بارپذیری بالا بوده است که شرایط مناسبی برای کانی‌سازی مس سولفیدی به وجود آورده است. براساس این پژوهش، تعدادی نقاط حفاری در پروفیل‌های شماره ۱ تا ۴ پیشنهاد شد که پروفیل شماره ۱ اولویت بالاتری نسبت به پروفیل‌های دیگر دارد، همچنین در پروفیل شماره ۱۲ کمترین عمق حفاری با عمق ۴۰ متر و پروفیل شماره ۲ با عمق حفاری ۵۰ متر را می‌توان به‌عنوان مناطق امیدبخش برای حفاری پیشنهاد نمود. از نکات این پژوهش می‌توان به استفاده از پروفیل‌های متقاطع به‌منظور بررسی ضریب اطمینان داده‌ها، طول زیاد پروفیل‌ها، استفاده از الکترودهای قطبش‌ناپذیر دست‌ساز و بسیار مؤثر و عمق مطالعه بالا و استفاده از روش‌های ترکیبی داده‌برداری دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی اشاره نمود.

کلیدواژه: آسمانو، مقاومت ویژه الکتریکی، قطبش‌القایی، کانی‌سازی مس، مدل‌سازی وارون، آرایه

الکترودی دوقطبی - دوقطبی، آرایه الکترودی قطبی - دوقطبی

فهرست مطالب

ل	فهرست جداول
م	فهرست اشکال
۱.....	فصل اول: کلیات.....
۲.....	۱-۱ مقدمه.....
۳.....	۲-۱ مروری بر مطالعات قبلی و پژوهش‌های انجام شده اخیر.....
۵.....	۳-۱ اهمیت و ضرورت مطالعه.....
۶.....	۴-۱ اهداف پایان‌نامه.....
۶.....	۵-۱ روش تحقیق.....
۷.....	۶-۱ ساختار پایان‌نامه.....
۹.....	فصل دوم: مبانی روش مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در ژئوفیزیک اکتشافی.....
۱۰.....	۱-۲ مقدمه.....
۱۱.....	۲-۲ خواص الکتریکی سنگ‌ها.....
۱۱.....	۳-۲ مقاومت‌ویژه سنگ‌ها.....
۱۳.....	۴-۲ روش مقاومت‌ویژه.....
۱۴.....	۱-۴-۲ تفاوت مقاومت و مقاومت‌ویژه الکتریکی.....
۱۵.....	۲-۴-۲ اصول روش مقاومت‌ویژه.....
۱۸.....	۳-۴-۲ آرایه‌های الکترودی متداول.....
۱۹.....	۴-۴-۲ مزایای روش مقاومت‌ویژه.....
۲۰.....	۵-۲ روش قطبش‌القایی.....
۲۱.....	۱-۵-۲ مقایسه منحنی واپاشی IP با مدار R-C.....

۲۲	..... ۲-۵-۲ عوامل پدیدآورنده IP
۲۷	..... ۳-۵-۲ روش‌های اندازه‌گیری IP
۳۳	..... ۴-۵-۲ عوامل مؤثر بر پدیده IP
۳۳	..... ۵-۵-۲ منابع خطا در IP
۳۴	..... ۶-۵-۲ دلایل IP منفی در روش حوزه زمان
۳۴	..... ۶-۲ برداشت‌های ژئوالکتریکی
۳۵	..... ۱-۶-۲ آرایه‌های الکترودی مناسب
۳۹	..... ۷-۲ اثر توپوگرافی بر روی داده‌ها
۴۰	..... ۸-۲ روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی
۴۰	..... ۱-۸-۲ مدل‌سازی فیزیکی
۴۱	..... ۲-۸-۲ مدل‌سازی عددی
۴۵	..... ۹-۲ روش‌های عددی برای حل مسائل وارون‌سازی
۴۵	..... ۱-۹-۲ روش کمترین مربعات گوس- نیوتن
۴۶	..... ۲-۹-۲ روش شبه‌نیوتن
۴۹	..... فصل سوم: موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی منطقه و عملیات برداشت داده‌های صحرایی
۵۰	..... ۱-۳ مقدمه
۵۱	..... ۲-۳ زمین‌شناسی منطقه
۵۵	..... ۳-۳ تفکیک مناطق دگرسانی در منطقه
۵۶	..... ۴-۳ کانه‌زایی منطقه
۵۷	..... ۵-۳ دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده
۵۹	..... ۲-۵-۳ دستگاه فرستنده
۶۰	..... ۳-۵-۳ دستگاه گیرنده

۶۲	..... عملیات برداشت داده‌های صحرایی
۶۷	..... فصل چهارم: مدل‌سازی و تفسیر دوبعدی مقاطع مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی
۶۸	..... ۱-۴ مقدمه
۶۸	..... ۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP
۷۰	..... ۱-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.1
۷۵	..... ۲-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.2
۷۸	..... ۳-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.3
۸۱	..... ۴-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.4
۸۴	..... ۵-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.12
۸۷	..... ۶-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.5
۹۲	..... ۷-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.6
۹۴	..... ۸-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.7
۹۸	..... ۹-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.10
۱۰۰	..... ۱۰-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.11
۱۰۳	..... ۱۱-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.13
۱۰۶	..... ۳-۴ نمایش مدل‌سازی سه‌بعدی پروفیل‌های جنوبی
۱۱۱	..... فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۲	..... ۱-۵ مقدمه
۱۱۲	..... ۲-۵ موقعیت بی‌هنجاری‌ها در راستای پروفیل‌های برداشت‌شده
۱۱۳	..... ۳-۵ نتیجه‌گیری
۱۱۵	..... ۴-۵ پیشنهادات
۱۱۷	..... پیوست الف
۱۲۳	..... منابع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مقادیر بارپذیری کانی‌های مختلف ۳۱
- جدول ۱-۳: مشخصات فنی برداشتهای IP/ReS در محدوده معدن مس آسمانو. ۶۵
- جدول ۱-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.1 ۷۱
- جدول ۲-۴: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.1 ۷۵
- جدول ۳-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.2 ۷۶
- جدول ۴-۴: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.2 ۷۸
- جدول ۵-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.3 ۷۹
- جدول ۶-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.4 ۸۲
- جدول ۷-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.12 ۸۵
- جدول ۸-۴: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.12 ۸۷
- جدول ۹-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.5 ۸۹
- جدول ۱۰-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.6 ۹۳
- جدول ۱۱-۴: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.6 ۹۴
- جدول ۱۲-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.7 ۹۵
- جدول ۱۳-۴: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.7 ۹۷
- جدول ۱۴-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.10 ۹۹
- جدول ۱۵-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.11 ۱۰۱
- جدول ۱۶-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.13 ۱۰۴
- جدول ۱-۵: مشخصات گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی در معدن آسمانو. ۱۱۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: مقادیر مختلف مقاومت ویژه برای چند نمونه سنگ، کانی و خاک ۱۲
- شکل ۲-۲: نمایش مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی ۱۴
- شکل ۳-۲: شارش جریان از یک منبع نقطه‌ای جریان ۱۶
- شکل ۴-۲: آرایه چهار الکترودی که در آن الکترودهای پتانسیل بین الکترودهای جریان قرار دارند ۱۷
- شکل ۵-۲: آرایه‌های الکترودی متداول و فاکتور هندسی مربوط به آن‌ها در مطالعات مقاومت‌سنجی ۱۹
- شکل ۶-۲: مقایسه منحنی واپاشی در یک نمونه سنگ با مدار R-C ۲۲
- شکل ۷-۲: چگونگی گسترش قطبش‌غشایی ۲۴
- شکل ۸-۲: تغییر قطبیت ولتاژ با اغتشاش وارد شده به آن پس از تزریق دوباره جریان ۲۴
- شکل ۹-۲: قطبش الکترودی ۲۶
- شکل ۱۰-۲: اثر ماکروسکوپی قطبش دانه‌ها در بالای یک کانی‌سازی افشان ۲۷
- شکل ۱۱-۲: روش‌های مختلف اندازه‌گیری قطبش‌القایی در حوزه زمان ۲۹
- شکل ۱۲-۲: اندازه IP برحسب میلی‌ولت بر ولت برای تعدادی از سنگ‌ها و کانی‌ها ۳۱
- شکل ۱۳-۲: نمایش برداشت داده به دو روش سونداژزنی و پروفیل‌زنی ۳۵
- شکل ۱۴-۲: نمایشی از آرایه دوقطبی - دوقطبی و نمایش نقاط داده‌ای به صورت ترکیبی در دو بعد ۳۸
- شکل ۱۵-۲: نمایشی از آرایه قطبی - دوقطبی ۳۹
- شکل ۱۶-۲: اثر توپوگرافی بر خطوط جریان و پتانسیل ۴۰
- شکل ۱-۳: راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه ۵۱
- شکل ۲-۳: نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه ۵۲
- شکل ۳-۳: نقشه ساده شده تکتونیک ایران با زون‌های زمین‌ساختی گوناگون و توزیع مجموعه‌های ماگمایی سنوزوئیک ۵۳
- شکل ۴-۳: نقشه ساده شده زمین‌شناسی محدوده معدنی آسمانو ۵۵
- شکل ۵-۳: تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از دگرسانی‌های موجود در منطقه آسمانو ۵۶
- شکل ۶-۳: الف) رگچه‌های داربستی کالکوسیت و مالاکیت در سنگ میزبان پیروکسن آندزیت ب) نمونه‌ای از سنگ میزبان کانی‌سازی شده همراه با کالکوسیت، مالاکیت و مس طبیعی به صورت پرکننده حفرات ۵۷
- شکل ۷-۳: نمایش دستگاه فرستنده GDD Transmitter-TXII با توان ۵۰۰۰ وات (سمت راست) و دستگاه گیرنده GDD Receiver-GRX8 (سمت چپ) ۵۷
- شکل ۸-۳: نمایش دستگاه موتور برق ژاپنی با توان ۷۶۰۰ وات ۵۸
- شکل ۹-۳: نمایشی از کابل‌های ۲۰ رشته‌ای مخصوص برای برداشت‌های ۱۰ کاناله همزمان به همراه استفاده از الکترودهای غیر قطبش‌پذیر پتانسیل ۵۸

شکل ۳-۱۰: دستگاه پردازش (PDA) و گیرنده مدل GRx8 (عملیات صحرائی برداشت‌های IP/RES در محدوده معدن مس آسمانو). ۶۱

شکل ۳-۱۱: دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده (قرقره و کابل، بی‌سیم و ...) ۶۲

شکل ۳-۱۲: نقشه موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک IP/ReS منطقه آسمانو ۶۴

شکل ۴-۱: نمایشی از بلوک‌ها و مش‌بندی‌های استفاده شده در مدل‌سازی مستقیم ۶۹

شکل ۴-۲: الف) نمایشی از جهت شمال به جنوب پروفیل Pr.1 و عبور از کنار کانکس‌های موجود در منطقه، ب) نمایشی از جهت جنوب به شمال محدوده وسط پروفیل Pr.1 که از کنار ترانشه‌ها عبور کرده است. .. ۷۱

شکل ۴-۳: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل pr.1. ۷۲

شکل ۴-۴: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل pr.1 ۷۳

شکل ۴-۵: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری بدون توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.1 ۷۳

شکل ۴-۶: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.1 ۷۴

شکل ۴-۷: الف) نمایشی از آغستگی سنگ‌های رخنمون یافته سیلیسی شده و کانی‌سازی مس در محدوده پروفیل Pr.2، ب و ج) نمایشی از پروفیل Pr.2 و برونزدهای سنگی در حین عملیات صحرائی برداشت ژئوفیزیکی. ۷۶

شکل ۴-۸: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.2 ۷۷

شکل ۴-۹: الف) نمایشی از امتداد پروفیل Pr.3 و عبور از نمکزار، ب) نمایشی از سنگ‌های رخنمون یافته در محدوده پروفیل Pr.3 و کانی‌سازی مس. ۷۹

شکل ۴-۱۰: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.3 ۸۰

شکل ۴-۱۱: الف) نمایشی از انتهای غربی پروفیل Pr.4، ب) نمایشی از مسیر پروفیل Pr.4 (دید به سمت شرق) در حین عملیات صحرائی برداشت ژئوفیزیکی. ۸۲

شکل ۴-۱۲: الف) نمایشی از دید به شرق پروفیل Pr.4 و عبور از مجاورت کانکس‌های موجود در منطقه، ب) نمایشی از رخنمون‌های کانی‌سازی مس در محدوده پروفیل Pr.4 (عملیات صحرائی برداشت ژئوفیزیکی). ۸۲

شکل ۴-۱۳: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.4 ۸۳

شکل ۴-۱۴: الف) نمایشی از پروفیل Pr.12، ب) نمایشی از کانی‌سازی مس در محدوده پروفیل Pr.12 ۸۵

شکل ۴-۱۵: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.12 ۸۶

شکل ۴-۱۶: الف) عدم دسترسی آسان به محدوده پروفیل Pr.5، ب) نمایشی از سمت جنوب به شمال در فاصله حدود ۵۰۰ متری از ابتدای پروفیل Pr.5. ۸۸

شکل ۴-۱۷: نمایشی از پروفیل Pr.5 در فاصله ۸۵۰ متری از ابتدای آن، الف) دید به سمت جنوب، ب) دید به سمت شمال. ۸۸

شکل ۴-۱۸: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.5 با آرایه دوقطبی- دوقطبی ۹۰

- شکل ۴-۱۹: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.5 با آرایه قطبی-دوقطبی. ۹۰.....
- شکل ۴-۲۰: نمایی از اواسط پروفیل Pr.6، الف) دید به سمت شمال، ب) دید به سمت جنوب. ۹۲.....
- شکل ۴-۲۱: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.6. ۹۳.....
- شکل ۴-۲۲: نمایی از منطقه اطراف پروفیل Pr.7، الف) دید به سمت غرب، ب) دید به سمت شرق. ۹۵.....
- شکل ۴-۲۳: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.7. ۹۶.....
- شکل ۴-۲۴: نمایی از محدوده پروفیل Pr.10 و عدم دسترسی به آن و استفاده از خودرو آفریدی. ۹۸.....
- شکل ۴-۲۵: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.10. ۹۹.....
- شکل ۴-۲۶: نمایی از محدوده پروفیل Pr.11 و تجهیزات مورد استفاده. ۱۰۱.....
- شکل ۴-۲۷: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.11. ۱۰۲.....
- شکل ۴-۲۸: نمایی از توپوگرافی نسبتاً شدید در راستای پروفیل Pr.13. ۱۰۳.....
- شکل ۴-۲۹: نمایی از اطراف پروفیل Pr.13، الف) در محل تلاقی آن با پروفیل Pr.5 خرد شدگی و تشکیل واحدهای واریزه‌ای در سطح (دید به سمت شمال غرب)، ب) تجهیزات مورد استفاده در راستای این پروفیل (دید به سمت جنوب شرق). ۱۰۴.....
- شکل ۴-۳۰: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.13. ۱۰۵.....
- شکل ۴-۳۱: نمایشی از نمای سه بعدی مدل مربوط به مقاومت ویژه پروفیل‌های جنوبی. ۱۰۷.....
- شکل ۴-۳۲: نمایشی از نمای سه بعدی مدل مربوط به بارپذیری پروفیل‌های جنوبی. ۱۰۸.....
- شکل ۴-۳۳: نمایشی سه بعدی از مدل مقاومت ویژه (برش‌های موازی با محور Y). ۱۰۹.....
- شکل ۴-۳۴: نمایشی سه بعدی از مدل بارپذیری (برش‌های موازی با محور Y). ۱۰۹.....
- شکل ۵-۱: نمایش بی‌هنجاری‌ها و اولویت‌های حفاری بر روی هر پروفیل در محدوده معدن آسمانو. ۱۱۳.....

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

استخراج بیش از حد و فزاینده سوخت‌های فسیلی و کانی‌های اقتصادی از دل زمین در آینده نه‌چندان دور به دلیل کاهش این منابع، تهدیدی برای زندگی انسان‌ها محسوب می‌شود و نیاز به روش‌های جدیدی برای اکتشاف ذخایر جدید می‌باشد. اغلب صنایع به کانی‌های اقتصادی به‌عنوان مواد اولیه نیاز شدیدی دارند [کلاگری، ۱۳۷۱]. همچنین امروزه بیشتر منابع سطحی اکتشاف شده‌اند و برای اکتشاف منابع عمیق‌تر تنها با به‌کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی سطحی نمی‌توان منابع معدنی را جستجو نمود. روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی می‌باشند که در پی‌جویی و اکتشاف منابع کارایی بالایی دارند و با به‌کارگیری این علم، اطلاعات بسیار مهم و ارزشمندی را با هزینه و زمان کمتر و تقریباً قابل اعتمادتری می‌توان به‌دست آورد [Telford et al., 1990]. ژئوفیزیک سطحی به سه روش هوایی، زمینی و دریایی انجام می‌گیرد که شامل روش‌هایی مانند گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، لرزه‌ای، رادیو اکتیو^۱، حرارت‌سنجی و ژئوالکتریک می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱]. اکتشافات مواد معدنی به دو طریق مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌گیرد. روش‌هایی که مستقیم به ماده معدنی دسترسی داشته باشند روش‌های مستقیم، مانند حفاری و به روش‌هایی که با اندازه‌گیری یک ویژگی فیزیکی در سطح زمین به وجود ماده معدنی در زیر سطح زمین پی‌می‌برند و براساس شواهد و اندازه‌گیری‌ها به اکتشاف ماده معدنی می‌پردازند، مانند روش‌های ژئوشیمی و ژئوفیزیک، روش‌های غیرمستقیم می‌گویند [نوروزی، ۱۳۹۲]. روش‌های ژئوالکتریک یکی از مهم‌ترین روش‌های غیرمستقیم می‌باشند که بر مبنای اختلاف خواص الکتریکی مواد می‌تواند ساختارهای زیر سطح زمین را از هم تفکیک کند، همچنین غیرمخرب و با کارایی بالا می‌باشند که می‌توانند اطلاعات وسیعی از محدوده مورد مطالعه را در اختیار ما قرار دهند. این روش‌ها شامل اندازه‌گیری پارامترهای مقاومت‌ویژه، قطبش‌القایی (IP)^۲ و ثابت‌دی‌الکتریک می‌باشند که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه می‌توان روش مناسب و کارآمد را

۱- Radioactive

۲- Induced polarization

انتخاب کرد. این روش‌ها مبتنی بر مطالعه میدان‌های الکتریکی زمین یا مشخصه‌های الکتریکی ساختارهای زمین‌شناسی و معدنی می‌باشند [Mikhail, 1994]. روش IP از با ارزش‌ترین روش‌های بررسی مناطق کانی‌سازی و سولفیدی پراکنده می‌باشد. برداشت IP را می‌توان با فرستادن جریان الکتریکی به وسیله دو الکتروود به داخل زمین و اندازه‌گیری پتانسیل باقیمانده پس از قطع جریان به وسیله دو الکتروود دیگر بررسی کرد [Telford et al., 1990]. روش مقاومت ویژه به عنوان روش مکمل در این پژوهش به همراه روش IP استفاده شده است. با اندازه‌گیری مقدار مقاومت ویژه ظاهری^۱ سنگ‌ها می‌توان در برخی عوامل زمین‌شناسی مانند گسل، ساختمان لایه‌های زیرین، ضخامت آبرفت و مرز لایه‌ها و غیره را مشخص نمود. مقاومت ویژه ظاهری سنگ‌ها تابعی از عواملی چون وجود مواد رسانا، مواد رسی، کانی‌های فلزی، لایه‌ها و جنس آن‌ها و غیره می‌باشد [Loke, 2004]. در این پژوهش با توجه به مطالعات از قبل انجام شده کانسار هدف اکتشافی از نوع رگه‌ای، سولفیدی و پراکنده می‌باشد که با توجه به این مطالعات، روش‌های مقاومت ویژه و قطبش‌القایی در حوزه زمان با آرایه‌های دوقطبی- دوقطبی^۲ و قطبی- دوقطبی^۳ به صورت هم‌زمان به کار گرفته شد. در این پژوهش از روش‌های نوین مدل‌سازی و تفسیر، شامل مدل‌سازی با روش کمترین مربعات^۴، همچنین مدل‌سازی سه‌بعدی و تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی با مدل‌های ژئوفیزیکی استفاده شده است.

۲-۱ مروری بر مطالعات قبلی و پژوهش‌های انجام شده اخیر

استفاده از روش مقاومت ویژه در سال ۱۹۲۰ توسط برادران شلومبرژه^۵ مورد استفاده قرار گرفت و به کارگیری روش IP برای اکتشاف منابع سولفیدی به صورت گسترده در سال ۱۹۵۰ در حوزه زمان

۱- Apparent resistivity

۲- Dipole- dipole array

۳- Pole- dipole array

۴- Least square

۵- Schlumberger

شروع شد [Telford et al., 1990]. روش IP اولین بار در اواخر دهه ۱۹۴۰ برای اکتشاف توده‌های کانسنگی و علاوه بر آن برای سولفیدهای پراکنده مورد استفاده قرار گرفت که برای اکتشاف کانی‌های فلزی جلادار سولفیدی پراکنده و کانی‌های رسی و زئولیتی بسیار مناسب است و کاربرد وسیعی در اکتشاف فلزات پایه دارد. این روش در آشکارسازی بی‌هنجاری‌های سولفیدی پراکنده نسبت به سولفیدهای توده‌ای مناسب‌تر می‌باشد [Okan, 2002]. وقتی که جریان الکتریکی وادار به حرکت در زمین به‌وسیله الکترودهای منبع و مخزن می‌شود، ممکن است در مکان‌های مختلف تمرکز بارهای الکتریکی ایجاد شود که پس از قطع جریان ورودی، این بارها به توزیع اولیه خود در زمین برمی‌گردند، در مدت زمانی که تمرکز بارها از بین می‌رود پتانسیل الکتریکی تداوم می‌یابد که این اتفاق پتانسیل القایی نام دارد [Reynolds, 1997]. روش‌های الکتریکی، روش‌های متنوعی هستند که تنوع این روش‌ها امکان کاربرد آن‌ها را در مطالعات گوناگون مانند اکتشاف معدن، هیدروژئولوژی، ژئوتکنیک، زیست محیطی، مهندسی و مطالعات باستان‌شناسی فراهم نموده است [Moony, 1980]. در آمریکا هم‌زمان، ونر^۱ و افراد دیگری اولین مطالعات الکتریکی را انجام دادند. استفاده گسترده‌تر این روش از دهه ۱۹۷۰ به دلیل دسترسی به کامپیوتر برای پردازش و تحلیل داده‌ها شروع شد. بعضی از این روش‌ها قدمت زیادی در مطالعه سنگ‌های زیرسطحی زمین دارند [Reynolds, 1997]. در ایران از سال ۱۳۴۲ شمسی از روش‌های الکتریکی به‌خصوص روش مقاومت‌ویژه در مقیاس وسیعی برای مطالعات هیدروژئولوژی استفاده شد و به تدریج جای خود را در مطالعات معدنی باز کرد. وجود کانی‌سازی نوع مانتو اولین بار توسط سامانی (۱۳۸۱) در محدوده ترود-عباس‌آباد و قم-ساوه گزارش شده است. تعداد زیادی ذخایر و آثار معدنی فلزات پایه و گران‌بها در محدوده ترود گزارش شده که می‌توان به کانسار رگه‌ای طلای باغو [رشیدنژاد عمران، ۱۳۷۱]، ذخیره اپی‌ترمال طلا و فلزات پایه گندی و ابوالحسنی [شمعانیان و همکاران، ۲۰۰۴]، کانسار پلی‌متال مس-سرب-روی چاه‌موسی و قله‌کفتران [امام‌جمعه و همکاران، ۱۳۸۶] و کانسار ماسیوسولفاید مس-نقره گرمابی پایین [طاشی و همکاران، ۱۳۹۶] در شمال شرق

۱- Wenner

اشاره کرد، همچنین می‌توان به کانسارهای مس افشان (نوع مانتو) در محدوده معدنی عباس‌آباد (معدن بزرگ، لب‌کال، آسیا دیو، دامن‌جلا) [صالحی و همکاران، ۱۳۹۴]، کانسار مس ورزک-قائن [علیزاده و همکاران، ۱۳۹۲]، کانسار مس چشمه‌گز [مهوشی و ملک‌زاده، ۱۳۹۵]، کانسار مس گرماب [عادل‌پور و همکاران، ۱۳۹۵] و کانی‌سازی مس چغندرسر [توسلی و لطفی، ۱۳۸۶] در شرق و شمال‌شرق ایران اشاره نمود. ذخایر این نوع کانی‌سازی که در بالاترین ردیف آتشفشانی ائوسن واقع شده است [سامانی، ۱۳۸۱]، با عناوین گوناگونی مانند ماسیوسولفاید [لطفی و نوروزی، ۱۳۸۰]، رگه‌ای و گرمابی [علی‌نیا و دهقان‌نژاد، ۱۳۸۳] معرفی شده‌اند. اغلب این ذخایر به دلیل عدم شناخت صحیح از مدل کانی‌سازی به صورت متروکه رها شده‌اند، لذا شناخت این نوع ماده معدنی در مناطق مرکزی، شرق و شمال شرق ایران می‌تواند چشم‌انداز نوینی را در اکتشاف مس داشته باشد [سامانی، ۱۳۸۱]. اکتشاف ژئوفیزیکی کانسار مس خونیک در خراسان جنوبی با استفاده از روش‌های ژئوالکتریکی مقاومت‌ویژه [مه‌دوی، ۱۳۸۳]، اکتشاف مس در اندیس معدنی قلعه‌گنج [شمس‌الدینی‌نژاد، ۱۳۹۲] و کانی‌سازی مس معدن آسمانو که در زمینه سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده است و در گروه کانی‌سازی‌های مس چینه‌کران (مس نوع مانتو) محسوب می‌شود [ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷]، که مشاهدات میدانی و نمونه‌برداری از رخنمون‌های سطحی به‌منظور شناخت کانی‌سازی، همچنین زدن ترانشه‌هایی در محدوده معدن و انجام عملیات ژئوفیزیکی با طراحی تعدادی پروفیل اندک و برداشت داده به روش مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی از فعالیت‌هایی می‌باشد که از پیش در محدوده معدن آسمانو انجام شده است.

۱-۳ اهمیت و ضرورت مطالعه

مواد معدنی زیربنای اقتصاد و صنعت هر جامعه را تشکیل می‌دهد. معدن پایه صنعت است و مواد و محصولات معدنی در بخش‌های خودرو و ساختمان‌سازی و غیره کاربرد دارد و قوت یافتن این بخش به معنی استحکام زیرساخت‌های سایر صنایع است. بشر از آغاز آفرینش خود و در طول تاریخ، برحسب نیازمندی‌ها و شناخت از مواد معدنی استفاده کرده است. اکنون نیز انسان از تمام مواد معدنی به

حالت‌های گوناگون بهره‌برداری می‌نماید. با توجه به نقش مواد معدنی در تأمین نیازهای اولیه صنایع مختلف، جستجوی آن‌ها با روش‌های کارآمد ضروری به نظر می‌رسد. از آن‌جا که جمعیت انسان‌ها در حال افزایش است و میزان مواد معدنی هم پیوسته افزایش می‌یابد، نیاز به علم معدن‌کاری بیشتر احساس می‌شود و در پی این نیاز، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام می‌شود که این شاخه از علم رشد فزاینده‌ای داشته است.

۴-۱ اهداف پایان‌نامه

با توجه به مطالعاتی که از قبل در محدوده مورد مطالعه انجام شده، کانی‌سازی مس به اثبات رسیده است. لذا به‌منظور اکتشاف ارزان و سریع مناطق مستعد کانی‌سازی مس و با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و همراهی کانی‌های سولفیدی و فلزی خاص محدوده معدن آسمانو به همراه مس، می‌توان از اکتشافات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و IP بهره برد. از نکات اصلی پژوهش حاصل شدن داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP با کمترین درصد خطا و نوفه^۱ به‌وسیله تجهیزات پیشرفته و به‌کارگرفتن افراد متخصص و کارآمد است. در نهایت به‌وسیله نرم‌افزارهای مربوط به مدل‌سازی و تفسیر محل‌های دقیق، شیب و امتداد کانی‌سازی مس باید در عمق شناسایی و بهترین نتایج حاصل شود تا در مراحل بعدی اکتشاف این نتایج مفید و کاربردی باشند.

۵-۱ روش تحقیق

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی محدوده معدن آسمانو، بازدید اولیه برای شناسایی و طراحی پروفیل‌ها با همکاری شرکت زمین‌کاوغستر انجام شده است. با توجه به مطالعات انجام شده، روش‌های مقاومت‌ویژه و IP، به‌عنوان روش‌های مناسبی برای بررسی ویژگی‌های زمین‌ساختی و اکتشاف کانی‌سازی‌های

۱- Noise

سولفیدی مس پیشنهاد شدند. IP یکی از روش‌های مهم در اکتشاف کانی‌های سولفیدی و فلزی به‌خصوص سولفیدهای پراکنده می‌باشد و به همراه روش مقاومت‌ویژه (به‌عنوان روش مکمل) در این مطالعات استفاده شده است. این مطالعات محدوده وسیعی را شامل می‌شود، که با ۳۲۶۶ اندازه‌گیری داده مقاومت‌ویژه و IP در امتداد ۱۳ پروفیل و با آرایه‌های الکترودی دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی در دو فاز شمالی و جنوبی محدوده معدن آسمانو انجام پذیرفت. در پژوهش‌های مشابه معمولاً به دلیل حساسیت و نوفه بسیار بالای داده‌های IP، این داده‌ها از کیفیت مطلوبی برخوردار نبوده و امکان بروز بی‌هنجاری‌های کاذب وجود دارد. تفسیر یک‌پارچه داده‌های مقاومت‌ویژه و IP و اطلاعات زمین‌شناسی از دیگر موارد مهم در یک پژوهش موفق است. در این پژوهش از تجهیزات ژئوفیزیکی پیشرفته در مرحله برداشت (دستگاه فرستنده GDD500w، گیرنده GDD ده کاناله و موتور برق با حداکثر خروجی ۶/۵ کیلوولت آمپر)، استفاده شده است و نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی به‌وسیله نرم‌افزار RES2DINV مورد مدل‌سازی دوبعدی و تفسیر قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها، موقعیت‌هایی که دارای مقادیر بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط به بالا بودند، به‌عنوان موقعیت‌های امیدبخش کانی‌سازی شناسایی شدند. از آن‌جا که با تفسیر سه‌بعدی می‌توان جواب‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را به‌دست آورد، مقاطع سه‌بعدی فاز جنوبی نیز با استفاده از نرم‌افزار RES3DINV مدل‌سازی شده و نتایج با استفاده از نرم‌افزار Voxler نمایش داده شده است.

۱-۶ ساختار پایان‌نامه

ساختار پایان‌نامه پنج فصل را شامل می‌شود. فصل اول در مورد اهمیت و ضرورت موضوع و همچنین مروری بر مطالعات قبلی و پژوهش‌های انجام شده پرداخته است. فصل دوم درباره اصول و مبانی روش‌های مقاومت‌ویژه و IP، همچنین آرایه‌های الکترودی بحث شده است. فصل سوم شامل موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و همچنین توضیحاتی در مورد تجهیزات استفاده شده است. در فصل چهارم مدل‌سازی دوبعدی، تفسیر و نتایج آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و سپس

مدل‌سازی سه‌بعدی فاز جنوبی معدن آسمانو بررسی شده است. در نهایت فصل پنجم شامل نتایج حاصل از تحقیق می‌باشد و نیز پیشنهاداتی برای حفاری در محدوده معدن آسمانو ارائه شده است.

فصل دوم

مبانی روش‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی در ژئوفزیک اکتشافی

۲-۱ مقدمه

ژئوفیزیک اکتشافی ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های زیر سطح زمین را با تجهیزات مخصوص به خود و با استفاده از روش‌های خاص به منظور اکتشاف و پی‌جویی ذخایر مدفون شناسایی می‌کند، که به سه بخش دورسنجی، چاه‌پیمایی و ژئوفیزیک سطحی تقسیم‌بندی می‌شود. به کمک این روش‌ها به‌طور مثال در اکتشاف کانی‌های اقتصادی می‌توان محدوده بی‌هنجاری‌های^۱ معدنی را تعیین کرد. در این بین، اکتشافات الکتریکی از تنوع بالایی برخوردارند که بعضی از تکنیک‌ها از منابع انرژی الکتریکی طبیعی (اعم از پتانسیل خودزا^۲ (SP)، جریان‌های تلوریک^۳ و مگنتوتلوریک^۴) استفاده می‌کنند و بعضی تکنیک‌های دیگر (مثل مقاومت‌ویژه و IP) به جریان یا میدان الکتریکی مصنوعی نیاز دارند [کلاگری، ۱۳۷۱]، که با تزریق جریان الکتریکی به زمین انجام می‌شود و برای اکتشاف مواد معدنی و آب‌های زیرزمینی به‌کار گرفته می‌شود [تلفورد و همکاران، ۱۳۸۷]. در اکتشاف فلزات پایه و تا حد کمتری در کاوش آب‌های زیرزمینی روش IP کاربرد دارد که در آشکارسازی سولفیدهای پراکنده نسبت به سولفیدهای توده‌ای بهتر عمل می‌کند. برای ذرات فلزی ریز که داخل یک سنگ مقاوم پراکنده شده‌اند؛ هیچ روشی جز روش IP قادر به شناسایی آن نیست و همچنین در بررسی آب زیرزمینی رس همراه سفره یا در کف سفره از روش IP استفاده می‌شود و سایر روش‌های الکتریکی یا ژئوفیزیکی جواب نمی‌دهد [Telford et al., 1990]. انتخاب روش مقاومت‌ویژه همراه با روش IP برای اکتشاف در محدوده مورد مطالعه به دلایل وجود شواهد کانی‌سازی از نوع رگه‌ای و افشان، مناسب و مورد استفاده قرار گرفته است.

۱- Anomaly

۲- Self potential

۳- Telluric currents

۴- Magnetotelluric

۲-۲ خواص الکتریکی سنگ‌ها

در اکتشافات به روش‌های الکتریکی از سه خاصیت بنیادی و مهم سنگ‌ها بهره گرفته می‌شود [کلاگری، ۱۳۷۱] که عبارتند از:

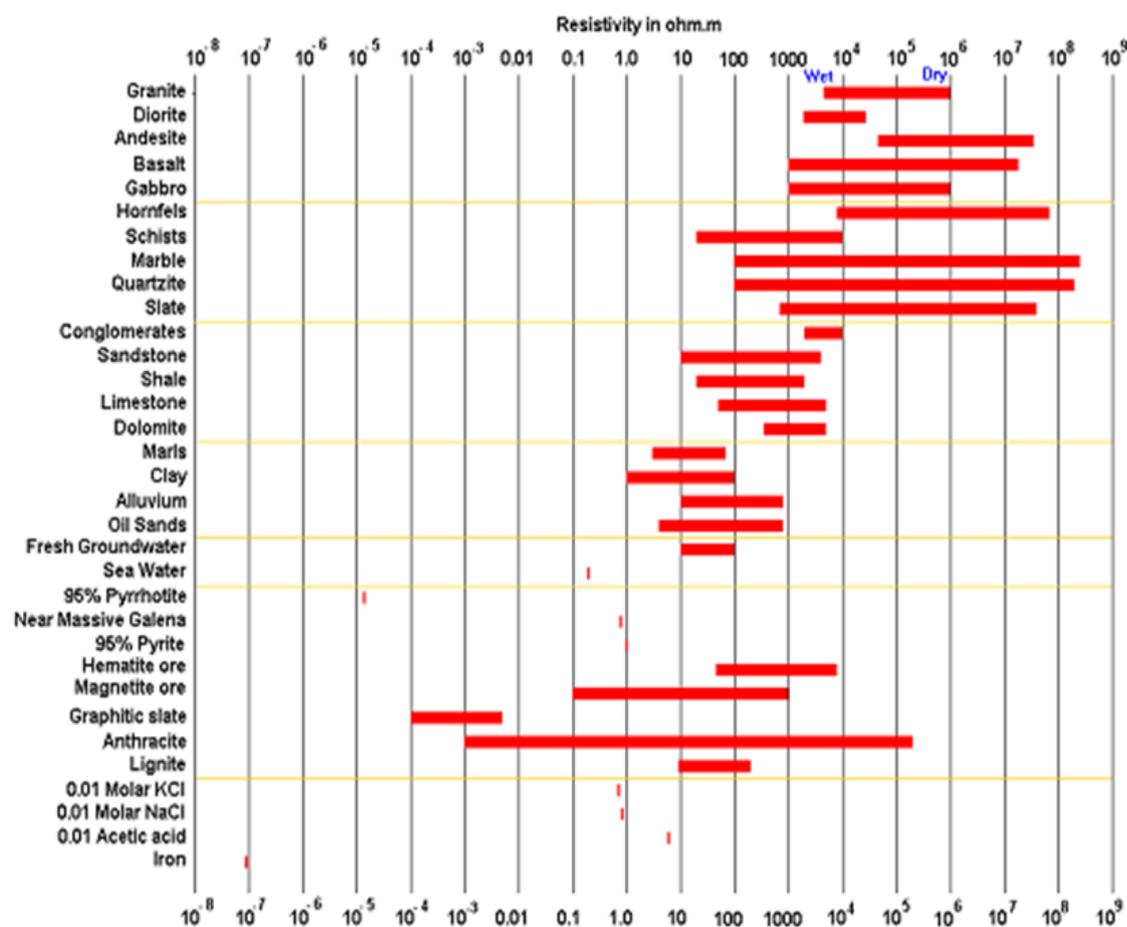
- ۱- فعالیت الکتروشیمیایی که در رابطه با الکترولیت‌های محلول در سفره‌های آبدار می‌باشند. این فعالیت‌ها اساس روش‌های قطبش‌القایی و پتانسیل‌خودزا می‌باشند.
- ۲- مقاومت‌ویژه که عکس آن قابلیت هدایت الکتریکی می‌باشد، عبارت است از مقاومت الکتریکی قطعه‌ای از یک جسم به ابعاد واحد، که در روش‌های ژئوالکتریکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
- ۳- ثابت دی‌الکتریک که اطلاعاتی درباره ظرفیت سنگ‌ها، در ذخیره کردن الکتریسیته هنگام عبور جریان فراهم می‌نماید.

۳-۲ مقاومت‌ویژه سنگ‌ها

هدایت الکتریکی یا عکس آن مقاومت‌ویژه سنگ‌ها به جنس کانی‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها بستگی دارد. با توجه به مقاومت‌ویژه بالای اغلب کانی‌ها، در صورت کامل بودن تراکم سنگ، مقاومت‌ویژه بالایی خواهند داشت [Keller and Frischknecht, 1996]. عوامل متعددی از جمله شوری و یا یون‌های آزاد موجود در آب درون حفره‌ای، حجمی از خلل و فرج سنگ حاوی آب، وضع قرار گرفتن خلل و فرج سنگ و چگونگی ارتباط آن‌ها با هم (نفوذپذیری) و درجه حرارت یا دما بر مقدار مقاومت‌ویژه در یک برداشت صحرائی تأثیرگذار است و باعث تغییر مقدار مقاومت‌ویژه می‌شود [Mooney, 1980]. سن سنگ نیز در مقدار مقاومت‌ویژه مؤثر است و هر چه سن سنگ بیشتر باشد، مقدار مقاومت‌ویژه آن نیز بیشتر است. در سنگ‌های قدیمی‌تر خلل و فرج‌ها، در معرض پرخش‌دگی ثانویه قرار می‌گیرند و در اثر تراکم؛ تخلخل^۱ و نفوذپذیری نیز کاهش می‌یابد [Reynolds, 1997]. مانند سایر خواص فیزیکی،

۱- Prosimy

هم‌پوشانی قابل توجهی بین مواد با مقاومت‌ویژه‌های مختلف وجود دارد؛ که باعث ایجاد ابهاماتی در تفسیر مقاومت‌ویژه می‌شود [Loke, 2004]. شناخت وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری اطلاعات از مقادیر مقاومت‌ویژه برای مواد زیرسطحی مختلف، می‌تواند کمکی برای رفع این ابهامات باشد [Aizebeokhai, 2009]. با توجه به شکل (۱-۲) سنگ‌های آذرین دارای بیشترین مقدار مقاومت‌ویژه و سنگ‌های رسوبی با توجه به درجه تخلخل، نوع و مقدار الکترولیت موجود در خلل و فرج می‌توانند مقاومت‌ویژه کمتری داشته باشند و نیز مقاومت‌ویژه سنگ‌های دگرگونی، بین سنگ‌های آذرین و رسوبی قرار دارد [نوروزی، ۱۳۹۲].



شکل ۱-۲: مقادیر مختلف مقاومت‌ویژه برای چند نمونه سنگ، کانی و خاک [Loke, 2012].

۲-۴ روش مقاومت ویژه

استفاده از روش مقاومت ویژه در سال ۱۹۲۰ با کار برادران شلومبرژه آغاز شد [Loke, 2004]. در اواخر دهه های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ روش های اکتشاف ژئوفیزیکی به طور گسترده ای در جستجوی سولفیدها و فلزات پایه به کار برده شدند [PateReSon and Hallof, 1991]. روش های الکتریکی در این بین گسترش زیادی داشته اند، که با توجه به پیشرفت و دسترسی آسان به کامپیوتر برای پردازش و تفسیر داده ها این گستردگی افزایش بیشتری یافت [Reynolds, 1997]. هدف از برداشت های الکتریکی، تعیین توزیع زیرسطحی مقاومت ویژه به وسیله اندازه گیری های زیرسطحی و به دنبال آن تخمین مقاومت ویژه واقعی^۱ توده های زیرسطحی می باشد [Look, 2000]. در روش های مقاومت سنجی با استفاده از چشمه های مصنوعی جریان؛ جریان را از طریق الکترودهای نقطه ای یا اتصال های خطی و صفحه ای به زمین ارسال می کنند که پتانسیل حاصل از شارش جریان به داخل زمین به وسیله الکترودهای دیگری در نزدیکی زمینی که در آن شارش صورت گرفته و در مجاورت خطوط جریان می باشند، اندازه گیری می شود. با توجه به مشخص بودن مقدار جریان ارسالی به زمین، با اندازه گیری پتانسیل ناشی از آن می توان به آسانی مقاومت ویژه ظاهری زمین را محاسبه نمود [Telford et al., 1990]. روش مقاومت سنجی از لحاظ تئوری بر کلیه روش های الکتریکی دیگر برتری دارد. در این روش از چشمه های الکتریکی با اندازه و ابعاد مشخصی استفاده می شود و نتایج کمی حاصل می شود، به این دلیل که در هنگام برداشت های صحرائی از حداکثر توانایی روش مقاومت ویژه بهره نمی برند. عمده ترین عیب این روش حساسیت زیاد آن به تغییرات کوچک مقاومت ویژه در نزدیکی سطح زمین است، یا به بیانی دیگر سطح بالای نوفه می باشد [Telford et al., 1990].

۱- True Resistivity

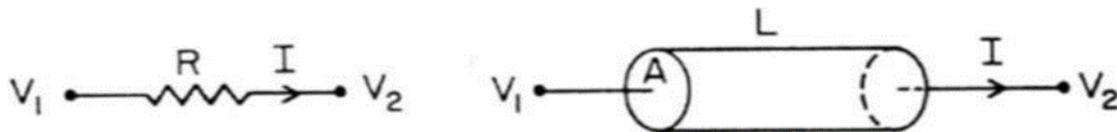
۴-۱ تفاوت مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی

هر ماده‌ای مقاومتی در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهد، که به طبیعت ذاتی آن و نیز به شکل و اندازه آن بستگی دارد و برای تفکیک این دو ویژگی، به این مقدار برای جسمی با ابعاد و شکل معین و استاندارد «مقاومت ویژه ظاهری (ρ)» و برای جسمی با ابعاد و شکل دلخواه «مقاومت (R)» می‌گویند [Telford et al., 1991]. با توجه به قانون اهم^۱، در نتیجه وجود اختلاف پتانسیل V در طرفین جسمی با مقاومت R ، جریان مستقیم I از آن عبور می‌کند. در شکل (۲-۲) در صورتی که اختلاف پتانسیل V در دو سر استوانه باعث شارش جریان I در آن گردد، مقاومت استوانه طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{V}{I} \quad (۱-۲)$$

با توجه به آزمایش‌های مختلف، مقاومت R به طول استوانه (L)، مساحت سطح مقطع (A) و نیز به ویژگی ذاتی وابسته به جنس استوانه (مقاومت ویژه (ρ)) بستگی دارد:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \rightarrow \rho = R \left(\frac{A}{L} \right) \quad (۲-۲)$$



شکل ۲-۲: نمایش مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی [Burger et al., 2006].

مقاومت ویژه، از ویژگی‌های ذاتی مواد محسوب می‌شود، اما مقاومت یک جسم علاوه بر جنس آن به ویژگی‌های هندسی ماده بستگی دارد. واحد مقاومت اهم (Ω) می‌باشد و براساس رابطه (۲-۲) مقاومت ویژه الکتریکی برحسب اهم-متر بیان می‌شود [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰]. مقاومت ویژه الکتریکی یکی از خواص فیزیکی سنگ‌ها می‌باشد که تغییرات زیادی دارد. کانی‌های خاصی مانند فلزات طبیعی و گرافیت از طریق عبور الکترون‌ها جریان الکتریکی را هدایت می‌کنند، در حالی که بیشتر کانی‌های

۱- Ohm's Law

تشکیل دهنده سنگ‌ها نفوذپذیر نبوده و جریان الکتریکی اغلب از طریق یون‌های آب موجود در خلل و فرج سنگ انتقال می‌یابد [Telford et al., 1990]. در اغلب سنگ‌ها، هدایت الکتریکی از طریق عملکرد سیالات موجود در حفره‌ها به‌عنوان الکترولیت و مشارکت بسیار اندک کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ (جز در مواردی که خود کانی‌های تشکیل دهنده سنگ رسانای خوب الکتروسیسته باشند) صورت می‌گیرد [Reynolds, 1997]. بنابراین تخلخل عمده‌ترین کنترل کننده مقاومت سنگ بوده و علاوه بر آن میزان آب درون خلل و فرج و مقاومت الکتریکی آب نیز اثر زیادی در این راستا دارند و در حد وسیعی مقاومت ویژه الکتریکی سنگ را تغییر می‌دهند و بر این اساس هم‌پوشی قابل توجه‌ای بین مقاومت ویژه الکتریکی انواع مختلف سنگ‌ها وجود دارد و تنها براساس داده‌های مقاومت‌سنجی نمی‌توان نوع سنگ را مشخص کرد و عوامل بالا را نیز باید در نظر گرفت [کلاگری، ۱۳۷۱].

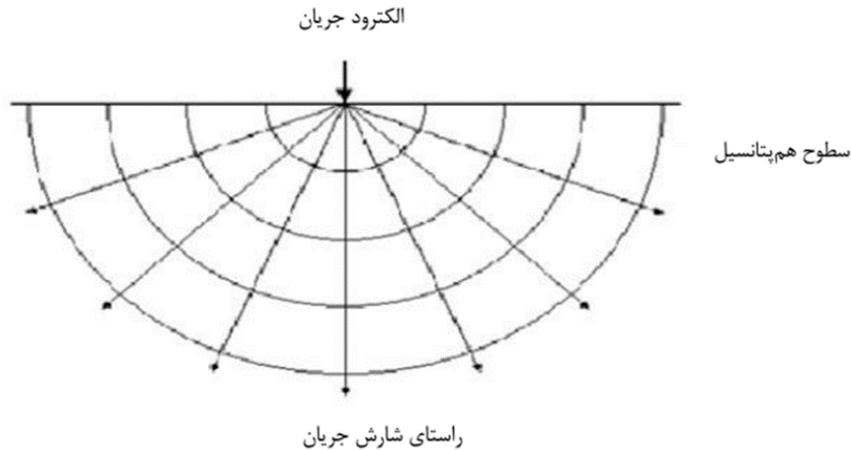
۲-۴-۲ اصول روش مقاومت ویژه

در این روش برای ارسال جریان به درون زمین از دو الکتروود، که الکتروود جریان خوانده می‌شوند، استفاده می‌شود. در این حالت جریان I بین این دو الکتروود ایجاد می‌شود و در نتیجه با دو الکتروود دیگر به‌عنوان الکتروودهای گیرنده، اختلاف پتانسیل را اندازه‌گیری می‌کنند. این جریان درون زمین به‌صورت خطوط جریان نفوذ می‌کند. عمود بر این خطوط، سطوحی قرار دارند که سطوح هم‌پتانسیل نام دارند. در صورتی که زمین همگن باشد؛ این سطوح (شکل ۲-۳) شکل نیمکره دارند [ارمضی، ۱۳۸۶]. در روش مقاومت ویژه الکتریکی قانون فیزیکی پایه، قانون اهم می‌باشد. در روش جریان مستقیم^۱ (DC)، شار جریان پایا است و این جریان پایا در یک محیط همگن^۲ و همسانگرد^۳ جریان می‌یابد [Roy, 2008].

۱- Direct current

۲- Homogeneous

۳- Isotrope



شکل ۳-۲: شارش جریان از یک منبع نقطه‌ای جریان و نتیجه توزیع پتانسیل به صورت سطوح هم‌پتانسیل [After Loke, 2012].

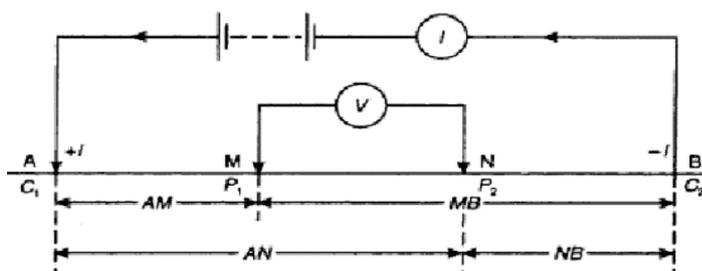
به‌عنوان نمونه در صورتی که الکتروودی گیرنده بین دو الکتروود جریان قرار داشته باشد، می‌توان اختلاف پتانسیل را در این الکتروود گیرنده به‌دست آورد. این اختلاف پتانسیل از جمع جبری دو پتانسیل ناشی از دو قطب الکتریکی حاصل می‌شود. اکنون اگر دو الکتروود گیرنده پتانسیل مانند N, M داشته باشیم، اختلاف پتانسیل بین این دو الکتروود به‌دست می‌آید. نمایشی از آرایه چهار الکتروودی که دو الکتروود پتانسیل بین دو الکتروود جریان قرار گرفته‌اند، در شکل (۴-۲) نشان داده شده است، که مقدار اختلاف پتانسیل آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta V = V_M - V_N = V_{AM} + V_{BM} - (V_{AN} + V_{BN}) \quad (۳-۲)$$

از طرف دیگر در برداشت‌های ژئوالکتریکی هر فرستنده جریان به‌عنوان یک قطب الکتریکی عمل می‌کند (منظور از V_M پتانسیل در نقطه M و V_{AM} پتانسیل در نقطه M وقتی جریان را به‌صورت نقطه‌ای از A به داخل زمین ارسال کنیم و الکتروود B را نداشته باشیم). هرچه از این الکتروودها فاصله بگیریم پتانسیل ناشی از الکتروود کمتر می‌شود. بنابراین پتانسیل را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$dV = \rho I \frac{dL}{S} \quad \rightarrow \quad dV = \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{dr}{r^2}$$

$$V = \int \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{dr}{r^2} \quad \rightarrow \quad V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (۴-۲)$$



شکل ۴-۲: آرایه چهار الکترودی که در آن الکترودهای پتانسیل بین الکترودهای جریان قرار دارند [Reynolds, 1997].

در رابطه (۴-۲)، فاصله نقطه مورد نظر تا الکترود با (r) ، مقاومت ویژه سنگ با (ρ) و جریان الکتریکی با (I) نشان داده شده است. بنابراین برای اختلاف پتانسیل داریم:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} \right] \quad (۵-۲)$$

اگر ضریب آرایه را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM}} \quad (۶-۲)$$

ρ که همان مقاومت ویژه الکتریکی است، طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

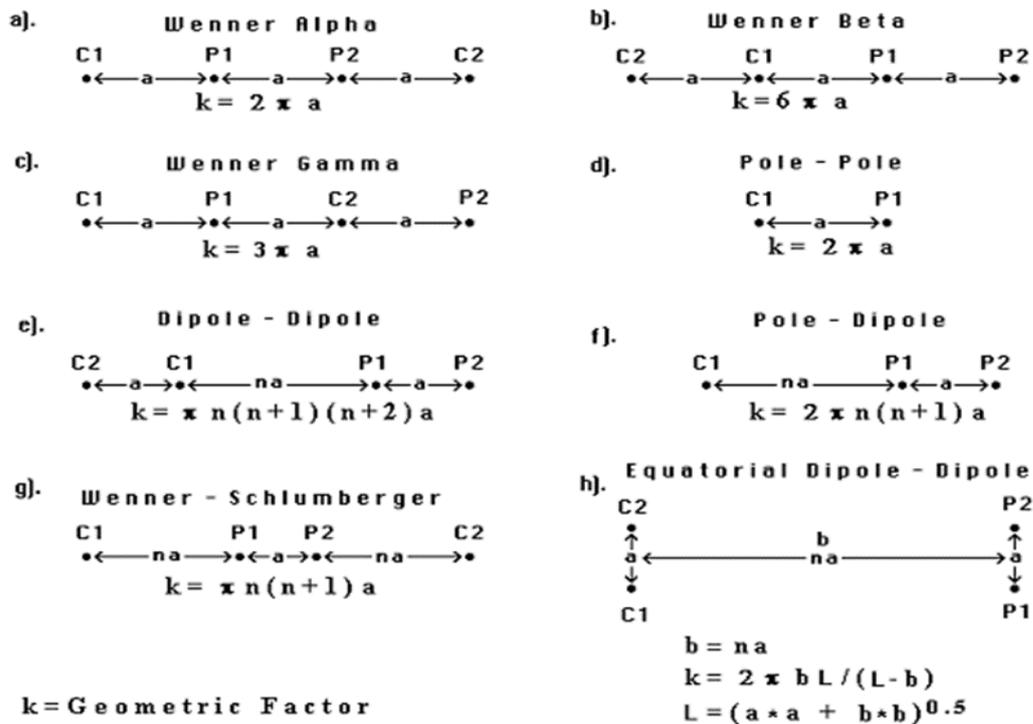
$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \times K \quad (۷-۲)$$

K ضریب آرایه که به آن فاکتور هندسی^۱ نیز می گویند، به چگونگی وضعیت قرارگیری الکترودها نسبت به هم بستگی دارد و با توجه به آرایه مورد استفاده محاسبه می شود. در صورتی که زمین همگن فرض شود مقاومتی که از رابطه (۷-۲) به دست خواهد آمد، مقاومت واقعی می باشد. لیکن در بیشتر موارد زمین ناهمگن است و در نتیجه مقاومتی که به دست می آید، مقاومت ظاهری خواهد بود که با نماد ρ_a نشان داده می شود که به عوامل مختلفی مانند ضخامت، شیب، درجه ناهمگنی و ناهمسانگردی و نیز به آرایه الکترودها بستگی دارد [رمضی، ۱۳۹۰].

۱- Geometric Factor

۲-۴-۳ آرایه‌های الکترونی متداول

موقعیت هندسی قرارگیری الکترودها نسبت به هم را آرایه می‌نامند. آرایه‌های الکترونی متنوعی برای برداشت‌های صحرایی مقاومت‌ویژه وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. انتخاب آرایه مناسب به فضای موجود برای گسترش آرایه مورد استفاده و سختی و کارایی آن در کاربرد موردنظر بستگی دارد. حساسیت آرایه‌ها به ناهمگنی‌های جانبی و فصل مشترک‌های شیب‌دار نیز از اهمیت خاصی برخوردار است [Reynolds, 1997]. هرچند استفاده از آرایه خطی لزومی ندارد، ولی در عمل الکترودها در یک خط قرار می‌گیرند، غیر از این صورت کار صحرایی مشکل و تفسیر نتایج دشوار و پیچیده خواهد شد [Telford et al., 1990]. در بیشتر آرایه‌ها الکترودها در یک خط قرار می‌گیرند و برای کاهش زمان برداشت از آرایه‌های متقارن و ساده‌تر استفاده می‌شود [انوروزی، ۱۳۹۲]. تعدادی از متداول‌ترین آرایه‌های الکترونی در کاوش‌های ژئوالکتریکی به روش مقاومت‌ویژه به همراه فاکتور هندسی مربوط به هر آرایه در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. آنچه در برداشت‌های الکتریکی ثبت می‌شود، مقاومت‌ویژه ظاهری است؛ که برخلاف مقاومت‌ویژه واقعی، یک خاصیت فیزیکی برای مواد زیرسطحی محسوب نمی‌شود و با روش‌های محاسباتی و تفسیر تبدیل به داده‌های واقعی می‌شود [Reynolds, 1997].



$k = \text{Geometric Factor}$

شکل ۲-۵: آرایه‌های الکترودی متداول و فاکتور هندسی مربوط به آن‌ها در مطالعات مقاومت‌سنجی. (a) و نر آلفا، (b) و نر بتا، (c) و نر گاما، (d) قطبی - قطبی، (e) دوقطبی - دوقطبی، (f) قطبی - دوقطبی، (g) و نر شلومبرژه، (h) دوقطبی - دوقطبی استوایی [Loke, 2012].

۲-۴-۴ مزایای روش مقاومت ویژه

روش مقاومت ویژه از روش‌های پرکاربرد در اکتشافات ژئوفیزیکی می‌باشد و نسبت به سایر روش‌ها دارای مزایایی می‌باشد [Mooney, 1980]، که عبارتند از:

- ۱- انعطاف‌پذیری (که می‌توان به منظور پی‌جویی به‌عنوان مثال با آرایه مستطیلی و اکتشاف با کمک آرایه دوقطبی - دوقطبی از روش مقاومت ویژه استفاده کرد).
- ۲- سرعت بالا (افزایش عمق بررسی باعث افزایش زمان برداشت می‌شود).
- ۳- هزینه‌های پایین عملیات صحرائی.
- ۴- سبک و قابل حمل بودن تجهیزات.

۲-۵ روش قطبش القایی

اولین بار در اواخر دهه ۱۹۴۰ روش IP برای اکتشاف توده‌های کانسنگی، به‌ویژه برای سولفیدهای پراکنده مورد استفاده قرار گرفت [Loke, 2012]. توجه به این روش با کار برادران شلومبرژه آغاز شد، آن‌ها مشاهده کردند که پس از قطع جریان در روش مقاومت‌ویژه، ولتاژ برداشتی بلافاصله به صفر نمی‌رسد؛ بلکه در طول زمانی محدود به صفر نزدیک می‌گردد. این پدیده بر اثر ذخیره‌سازی انرژی در زمانی که جریان وصل است، به شکل‌های مختلف مکانیکی، الکتریکی و از همه مهم‌تر شیمیایی رخ می‌دهد. قطبش القایی تابعی از ویژگی‌های 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]. تا سال ۱۹۵۰ تمام اندازه‌گیری‌ها ابتدا با جریان پیوسته (روش حوزه زمان^۱) انجام گرفت و سپس اندازه‌گیری‌های IP با جریان متناوب^۲ (AC) در فرکانس‌های مختلف (روش حوزه فرکانس^۳) صورت پذیرفت [نوروزی، ۱۳۹۲]. روش‌های اندازه‌گیری IP، مشابه روش مقاومت‌ویژه است؛ با این تفاوت که الکترودهای قطبش‌ناپذیر^۴ پتانسیل، جایگزین الکترودهای پتانسیل فلزی می‌شود. هنگامی که جریان قطع می‌شود؛ ولتاژ بین دو الکتروود پتانسیل (در حد چند ثانیه یا حتی دقیقه) اندازه‌گیری می‌شود. این زمان، زمانی است که طول می‌کشد تا ولتاژ بین دو الکتروود پتانسیل به مقدار تقریبی صفر برسد، زیرا زمین به‌طور موقت قطبیده شده است. ولتاژ بعد از قطع جریان ناشی از بار ذخیره شده موقتی است؛ که اصطلاحاً گفته می‌شود که زمین قطبیده شده است و همانند یک خازن عمل می‌کند و بعد از قطع جریان تخلیه می‌شود. [Reynolds, 1997].

۱- Time- Domain

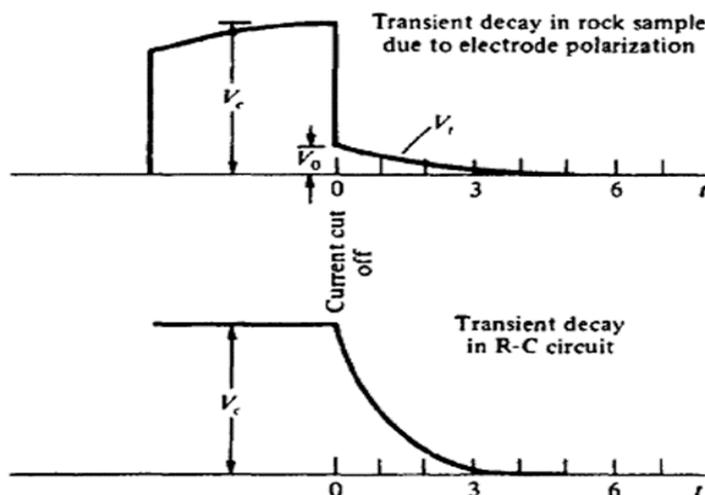
۲- Alternating current

۳- Frequency- Domain

۴- Nonpolarization

۲-۵-۱ مقایسه منحنی واپاشی IP با مدار R-C

در منحنی واپاشی^۱ IP، زمان واپاشی یا زمان افزایش تدریجی شبیه زمان تخلیه بار یا باردار شدن یک خازن از طریق یک مقاومت معین است [Telford et al., 1990]. با توجه به شکل (۲-۶) در نمونه سنگ، در ابتدای کار با جریان مستقیم طول می کشد تا ولتاژ به مقدار حداکثر خود برسد اما در مدار R-C با وصل جریان مستقیم، ولتاژ به مقدار حداکثری خودش می رسد. در مدار R-C بعد از قطع جریان ولتاژ حالت میرایی دارد و به صورت نمایی کاهش می یابد اما در نمونه سنگ بعد از قطع جریان، یک افت ولتاژ داریم و سپس به صورت نمایی کاهش می یابد. در شکل (۲-۶)، قبل از قطع جریان ولتاژ V_c حداکثر مقدار خود را دارد و بعد از قطع جریان در نمونه سنگ مقدار اولیه ولتاژ V_0 می باشد و V_t زمانی است که طول می کشد تا ولتاژ تقریباً صفر شود، که این ولتاژ نشان دهنده اثر IP می باشد. با توجه به مشابهت مدار R-C که ابعادش نسبت به مدار زمین بسیار کوچک است؛ در زمین ابتدایی که جریان را وصل می کنیم زمانی خیلی کوتاه در حد کسری از ثانیه طول می کشد تا V_c به حداکثر مقدار خودش برسد. در زمین، مشابه مدار R-C مقاومت و خازن وجود دارد. در ضمن خاصیت خازنی زمین باعث می شود زمین انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند. نکته ی دیگر که نشان دهنده اثرات IP در زمین است V_0 می باشد، یعنی ابتدایی که جریان قطع می شود، تا چه حد ناگهانی ولتاژ کاهش می یابد؛ بنابراین هرچه V_0 بزرگتر و V_t در زمان طولانی تری به مقدار صفر برسد، اثر IP زمین بالاتر است. در منحنی میرایی IP، ابتدای منحنی اغتشاشی وجود دارد که این اغتشاش ناشی از این است که زمین از حالت تحریک خارج شده است (جریان قطع شود) که باعث می شود یک ولتاژ گذرا، نوسانی و نوفه ای ایجاد شود که حداکثر ۰/۱ ثانیه طول می کشد و بعد از آن منحنی از تابع نمایی تبعیت می کند. در زمان وصل جریان از روش مقاومت ویژه و زمانی که جریان قطع است از روش IP استفاده می شود.



شکل ۲-۶: مقایسه منحنی واپاشی در یک نمونه سنگ با مدار R-C [Telford et al., 1990].

۲-۵-۲ عوامل پدیدآورنده IP

زمانی که جریان به داخل زمین فرستاده می‌شود، زمین در آن محدوده به وسیله انرژی الکتریکی تحریک می‌شود که این انرژی الکتریکی درون زمین به شکل‌های مختلف ذخیره می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی در چندین نوع سنگ مختلف نشان داد که در بین روش‌های ذخیره شدن انرژی‌ها، شکل شیمیایی بیشتر دیده می‌شود و مهم‌تر از همه می‌باشد؛ بنابراین گفته می‌شود پدیده IP فعالیت‌های الکتروشیمیایی در زمین است، که نتیجه دو مورد می‌باشد [Telford et al., 1990]:

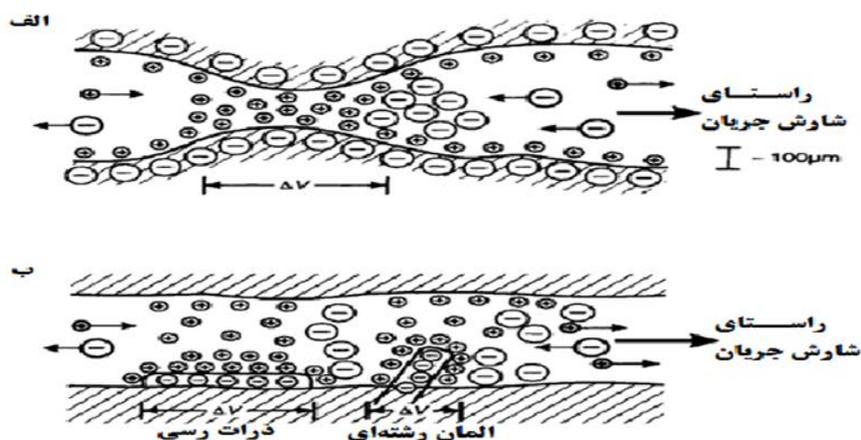
اولین مورد مربوط به تغییر تحرک یون‌ها در سیال موجود در ساختار سنگ‌ها می‌باشد که قطبش‌غشایی^۱ یا الکترولیتی (اثر IP زمینه یا نرمال را به وجود می‌آورد) نام دارد. این اثر حتی ممکن است در سنگ‌هایی که شامل کانی‌های فلزی نیستند رخ دهد. مورد دوم، به تغییر در رسانندگی یونی و الکترونی در مکان‌هایی که کانی‌های فلزی وجود دارند ارتباط دارد که به آن قطبش الکترودی یا ولتاژاضافی^۲ نیز می‌گویند و عموماً بزرگ‌تر از IP زمینه است [Telford et al., 1990].

۱- Membrane Polarization

۲- Over Voltage

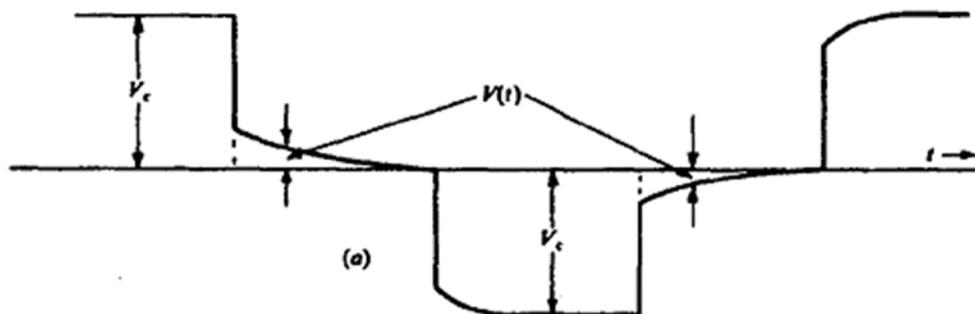
الف) قطبش غشایی یا الکترولیتی:

قطبش غشایی که به طور معمول IP زمینه را در محدوده اکتشافی تشکیل می‌دهد؛ با کانی‌های غیرفلزی در ارتباط می‌باشد. ولتاژ اضافی در اثر این پدیده ممکن است با ولتاژ کانی‌سازی‌های فلزی ضعیف یکسان شود؛ که در این صورت تفکیک آن‌ها با روش‌های معمول IP مشکل است [کلاگری، ۱۳۷۱]. دو علت عمده قطبش غشایی، تنگ شدن مقطع کانال‌های عبور سیال و دیگری اثر کانی‌های رسی موجود در سنگ‌ها مانند ماسه سنگ‌های رسی می‌باشد. اگر قطر کانال ارتباطی در قسمتی از آن کم شود، وقتی که جریان به درون زمین فرستاده شود، این تنگ شدگی مانع شارش یون‌ها می‌شود. یون‌های منفی زون تنگ شده را ترک می‌کنند ولی یون‌های مثبت زون تنگ شده افزایش می‌یابد و در نتیجه یک اختلاف پتانسیل در طول این زون‌ها ایجاد می‌شود. زمانی که جریان الکتریکی قطع می‌شود، عدم تعادل ایجاد شده در تمرکز یون‌ها با برگشت به حالت عادی خود، پتانسیل IP را ایجاد می‌کنند. عامل دیگر قطبش غشایی به حضور ذرات پراکنده رس یا کانی‌های رشته‌ای که موجب تمرکز بارهای منفی می‌شوند، مربوط است [Reynolds, 1997]. قبل از این که جریان وصل شود، یون‌های مثبت و منفی در حالت تعادل قرار دارند، با وجود ذره رسی یون‌های مثبت سیال به طرف سطح آن جذب می‌شوند (به دلیل عرضه بار منفی در سطح کانی رس). زمانی که جریان فرستاده شود، سطح رس بار منفی بیشتری خواهد داشت، در نتیجه یون‌های مثبت بیشتری جذب می‌کند و یون‌های منفی سیال به سمت دیگر رانده می‌شوند. اگر جریان را قطع کنیم، یون‌های داخل سیال ناشی از یون‌های سطح رس‌ها تمایل دارند که به حالت تعادل خود قبل از قطع جریان بازگردند. این برگشت به حالت تعادل زمانی طول می‌کشد و هرچه این زمان طولانی‌تر باشد اثر قطبش غشایی بیشتر خواهد شد [Telford et al., 1990]. چگونگی گسترش قطبش غشایی در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: چگونگی گسترش قطبش‌غشایی، الف) تنگ شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی، ب) بار منفی ذرات رسی و المان رشته‌ای موجود در دیواره کانال ارتباطی [After Reynolds, 1997].

در زمان قطع جریان و نیز وصل جریان ولتاژ مثبت است. در زمان قطع جریان ولتاژ به صفر نزدیک می‌شود و اگر دوباره جریان وصل شود (در همان زمین جریان به اندازه اولیه است)، ولتاژ به همان اندازه اولیه V_c ولی در قطبیت منفی است (شکل ۲-۸) و قطبیت آن یک در میان تغییر می‌کند [Telford et al., 1990].



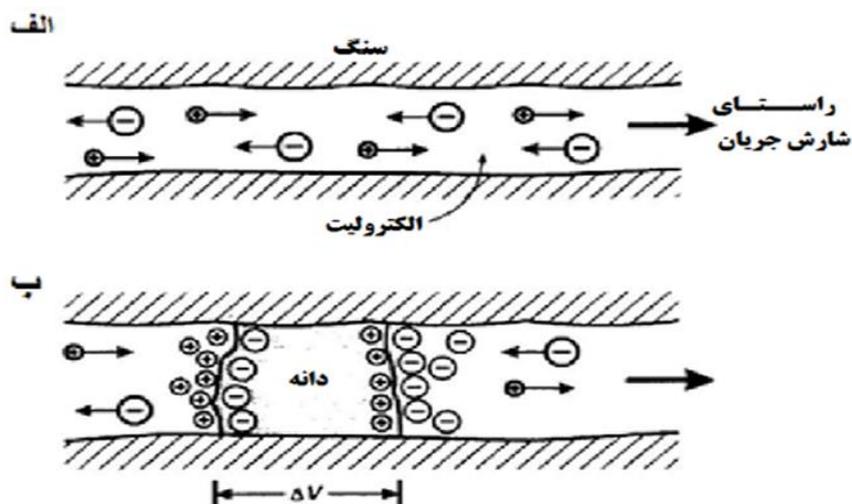
شکل ۲-۸: تغییر قطبیت ولتاژ با اغتشاش وارد شده به آن پس از تزریق دوباره جریان [Telford et al., 1990].

اثر قطبش‌غشایی در کانی‌های رسی برجسته‌تر است، زیرا در سطح خودشان بار منفی بیشتری نسبت به سایر کانی‌های غیرفلزی عرضه می‌کنند. بنابراین این اثر به‌طور عمده به‌علت وجود کانی رس در سنگ یا رسوبات می‌باشد [Loke, 2004]. البته نوع کانی رسی بسیار مهم می‌باشد. به‌عنوان نمونه کانی‌های مونت موریلونیت اثر IP پایین و کائولینیت IP بالایی از خود نشان می‌دهند. همچنین درصد شوری درون سیال هم از عوامل مؤثر در افزایش قطبش‌غشایی می‌باشد، زیرا با افزایش شوری سیال عرضه‌ی

یون‌های مثبت و منفی بیشتر می‌شود. در نتیجه این عوامل قطبش‌غشایی عموماً در سنگ‌هایی حداکثر خواهد بود که کانی‌های رسی با تراکم نسبتاً کم (پراکنده‌تر) باشند و محلول الکترولیت داخل آن باید کمی شوری داشته باشد تا حداکثر قطبش‌غشایی را داشته باشیم [Telford et al., 1990].

ب) قطبش‌الکترودی یا فلزی:

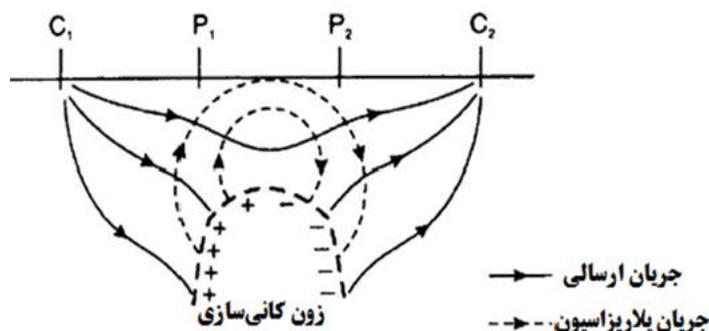
قطبش‌الکترودی مشابه قطبش‌غشایی می‌باشد. هنگامی که داخل متن سنگ کانی فلزی وجود داشته باشد، قطبش‌الکترودی ایجاد می‌شود. جریان الکتریکی که به زمین تزریق می‌شود، بخشی از آن از طریق کانی‌های رسا به صورت الکترونیکی و بخش دیگر آن به صورت الکترولیتی عبور می‌کند. برای ایجاد قطبش‌الکترودی باید محلول یونی با کانی فلزی در کنار هم قرار داشته باشند. در سطح مشترک بین کانی و محلول یک فعل و انفعال شیمیایی صورت می‌گیرد. در شکل (۲-۹)، دو مسیر خلل و فرج در نظر گرفته شده است که در مسیر بالا ذره فلزی وجود ندارد و جریان تنها از طریق محلول الکترولیتی عبور می‌کند، اما در مسیر پایین علاوه بر محلول الکترولیتی، کانی فلزی نیز وجود دارد. اگر در مسیر بالا کانی‌های غیرفلزی مانند رس‌ها وجود داشته باشند، بنابراین هر دو قطبش‌غشایی و الکترودی را با هم داریم؛ حتی اگر در مسیر بالا کانی غیرفلزی وجود نداشته باشد، نمی‌توان گفت قطبش‌غشایی وجود ندارد؛ بلکه وجود دارد ولی می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و فقط بیان شود در سنگ قطبش‌الکترودی وجود دارد. در سطح فلز زمانی که تحریک الکتریکی شود، باعث می‌شود یک‌طرف سطح کانی فلزی بارهای مثبت و طرف دیگر سطح کانی فلزی بارهای منفی تجمع کنند و یون‌های محلول الکترولیتی از نوع مخالف جذب سطح ذره فلزی می‌شوند. این عمل در شیمی، تحت عنوان الکترولیز نامیده می‌شود (با شارش جریان، یک الکترون بین ذره فلزی و محلول تبادل می‌شود) و در شیمی- فیزیک ولتاژ اضافی نام دارد [Telford et al., 1990].



شکل ۲-۹: قطبش الکترودی، الف) شارش جریان در کانال باز، ب) قطبش دانه رسانا که در کانال ارتباطی سنگ قرار گرفته است [After Reynolds, 1997].

میزان عبور الکترون‌ها آهسته‌تر از میزان تبادل الکترون‌ها از طریق یون‌ها می‌باشد؛ زمانی که جریان قطع شود، ولتاژ باقیمانده میرا می‌شود و یون‌ها تمایل دارند به حالت اولیه خود بازگردند که این عمل مدت زمانی طول می‌کشد که نسبت به قطبش‌غشایی این زمان طولانی‌تر است، زیرا در کنار محلول الکترولیتی ذره فلزی وجود دارد که بارهای مثبت و منفی زیادی در سطح خود دارد و یون‌های زیادی را به طرف خود جذب می‌کند. بنابراین وقتی جریان قطع شود زمان بیشتری برای رسیدن به حالت تعادل طول خواهد کشید. هرچند در روش اندازه‌گیری IP معمولی نمی‌توان قطبش‌الکترودی و غشایی را از هم تفکیک کرد. قطبش‌الکترودی در اثر حضور کانی‌هایی با قابلیت رسانش الکترونی، همچون گرافیت و برخی اکسیدها مانند مگنتیت، ایلمنیت، کاسیتريت و تقریباً تمام سولفیدها (به جز اسفالریت خالص، سینابر و استینیت) ایجاد می‌شود. البته بزرگی قطبش‌الکترودی به چشمه جریان خارجی و همچنین مشخصات محیط بستگی دارد. این بزرگی با تراکم فلزی تغییر می‌کند، ولی چون پدیده سطحی است اثر آن وقتی کانی به شکل پراکنده است، بیشتر از مواقعی است که کانی به شکل توده‌ای می‌باشد. این ویژگی جز مزیت‌های IP محسوب می‌شود، زیرا سایر روش‌های الکتریکی در این حالت‌ها به خوبی جواب نمی‌دهند [Telford et al., 1990]. بنابراین هرچه ماده معدنی رساناتر و درصد آن بیشتر باشد IP بزرگ‌تر و هرچه کانی‌ها پراکنده‌تر در متن سنگ میزبان باشند، IP برجسته‌تر است؛ زیرا در این حالت

سطح تماس برای تبادل الکترونی- یونی به حداکثر خواهد رسید. به طور کلی اندازه‌گیری IP در برداشت‌های صحرائی به دو صورت حوزه زمان و حوزه فرکانس انجام می‌شود [کلاگری، ۱۳۷۱]. این فرآیند مبنای اندازه‌گیری افت ولتاژ در روش اندازه‌گیری حوزه زمان است. قطبش دانه‌ها به طور عمده پدیده‌ای سطحی می‌باشد و مطابق شکل (۲-۱۰) دلیلی بر پاسخ قابل توجه IP برای کانی‌سازی‌های فلزی پراکنده است [نوروزی، ۱۳۹۲].



شکل ۲-۱۰: اثر ماکروسکوپی قطبش دانه‌ها در بالای یک کانی‌سازی افشان [After Reynolds, 1997].

۲-۵-۳ روش‌های اندازه‌گیری IP

اندازه‌گیری‌های IP را به وسیله دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل قطبش‌ناپذیر، همراه با برداشت مقاومت‌ویژه با استفاده از آرایه‌های الکتروودی مناسب به‌ویژه بهره‌گیری از آرایه‌های دوقطبی- دوقطبی، قطبی- دوقطبی و مستطیلی انجام می‌دهند [نوروزی، ۱۳۹۲]. در آشکارساز IP، ولتاژ واپاشی برحسب تابعی از زمان به روش‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شود، که به آن IP زمان- حوزه‌ای می‌گویند. چون زمان افزایش تدریجی محدود است، واضح است که مقاومت‌ویژه ظاهری (که یک امپدانس مختلط است) باید با فرکانس تغییر کند؛ به طوری که وقتی فرکانس افزایش یابد، مقاومت‌ویژه ظاهری کاهش یابد. اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه ظاهری با چند فرکانس متناوب غالباً زیر ۱۰ هرتز، روش دیگری به نام IP فرکانس- حوزه‌ای را نیز به وجود می‌آورد [تلفورد و همکاران، ۱۳۸۷]. بنابراین سه روش عمده در اندازه‌گیری‌های IP وجود دارد که عبارتند از:

الف- اندازه‌گیری در حوزه زمان.

ب- اندازه‌گیری در حوزه فرکانس.

ج- اندازه‌گیری قطبش‌القایی طیفی^۱.

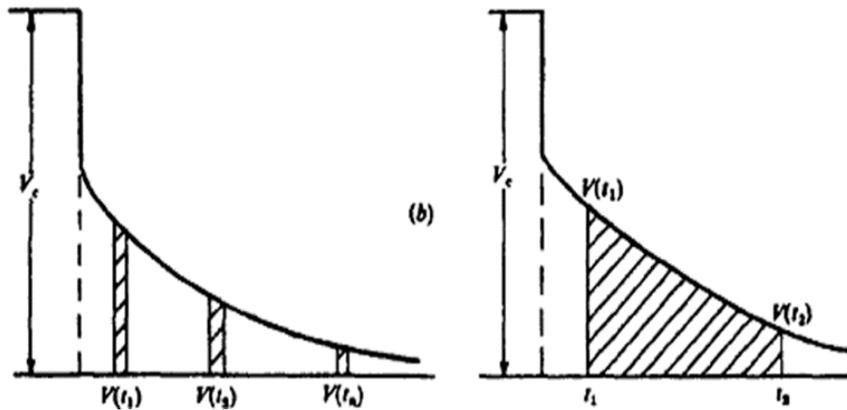
با توجه به این که در انجام این تحقیق از اندازه‌گیری در حوزه زمان استفاده شده است، بیشتر به این روش پرداخته می‌شود و دو روش دیگر به‌طور مختصر ارائه شده است.

الف) اندازه‌گیری در حوزه زمان:

در این روش از جریان با فرکانس خیلی کم استفاده می‌شود. معمولاً جریان را به مدت ۱ الی ۵ دقیقه به زمین تزریق می‌کنند تا اختلاف‌پتانسیل به‌حالت پایدار برسد، سپس جریان را ناگهان قطع می‌کنند [کلاگری، ۱۳۷۱]. پتانسیل حالت شارژ زمین دو قسمت است، یک مورد مربوط به پتانسیل جریان تزریق شده و دیگری مربوط به پتانسیلی است که در اثر قطبش زمین است. پس از قطع جریان، ولتاژ زمین ابتدا به میزان V ، به‌صورت لحظه‌ای کاهش می‌یابد. در ادامه ولتاژ اختلافی به‌صورت منحنی تخلیه می‌شود و به صفر می‌رسد. معمولاً اندازه‌گیری پتانسیل روی منحنی افت و در زمان کوتاهی پس از قطع جریان صورت می‌پذیرد [نوروزی، ۱۳۹۲]. اندازه‌گیری‌ها به‌صورت کمیت‌های مختلف معمولاً دیده می‌شود که تغییرات ولتاژ را نسبت به زمان نشان می‌دهد (شکل ۲-۱۱). اندازه‌گیری حوزه زمان به‌صورت اندازه‌گیری کمیت‌های قطبش‌پذیری و یا بارپذیری^۲ می‌باشد.

۱- Spectral Induced Polarization

۲- Chargeability



شکل ۲-۱۱: روش‌های مختلف اندازه‌گیری قطبش‌القایی در حوزه زمان [Telford et al., 1990].

* قطبش‌پذیری

قطبش ذاتی نیست، اما قطبش‌پذیری ذاتی می‌باشد. 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_c را قطبش‌القایی یا قطبش‌پذیری ظاهری P_a می‌نامند [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰؛ نوروزی، ۱۳۹۲].

$$P_a = \frac{\Delta V_t}{V_c} \quad (۸-۲)$$

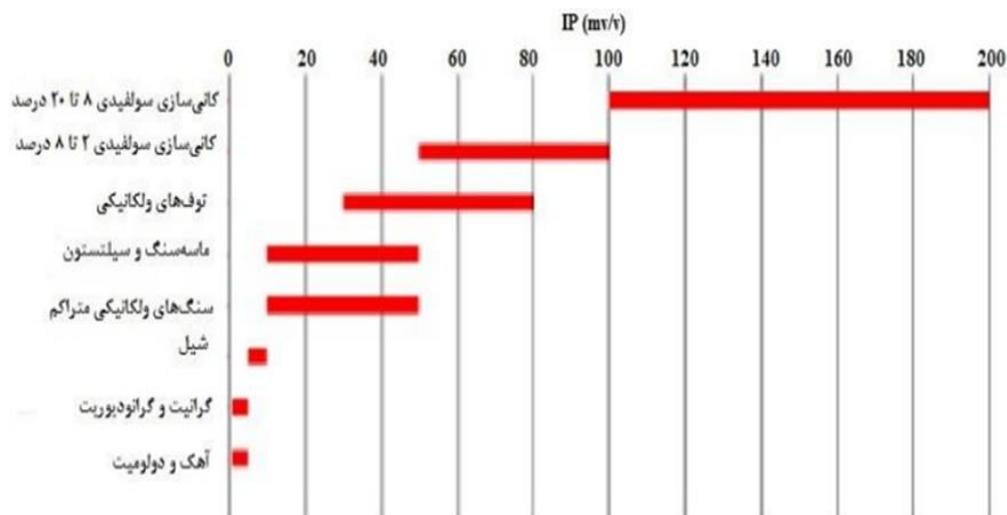
که ΔV_t بر حسب میلی‌ولت و V_c بر حسب ولت می‌باشد. بنابراین واحد قطبش‌پذیری ظاهری با توجه به این که ΔV_t نسبت به V_c بسیار کوچک است، به صورت میلی‌ولت بر ولت (mv/v) یا به صورت درصد بیان می‌شود. تنها مشکل این روش آن است که زمان t را چه زمانی باید در نظر گرفت؛ زیرا زمانی که جریان قطع می‌شود باید زمان اغتشاش تمام شود و از آن طرف هم نمی‌تواند زمان طولانی باشد به این دلیل که V_t به صفر می‌رسد. حتی اگر به صفر هم نرسد و دیر اندازه‌گیری شود با توجه به سطح نوفه، مقدار قابل توجه V_t می‌تواند نوفه‌ای باشد که داده به دست آمده اعتباری ندارد (در طول اندازه‌گیری چون سطح نوفه ثابت است نباید V_t دیر اندازه‌گیری شود زیرا نسبت سیگنال به نوفه کاهش می‌یابد). بنابراین زمان اطلاعات خوبی به ما نمی‌دهد و کمیتی که در حوزه زمان اندازه‌گیری می‌شود، تحت عنوان بارپذیری می‌باشد [Sumner, 1976].

* بارپذیری

زمانی که جریان ارسالی به زمین قطع می‌شود، ولتاژ بلافاصله افت می‌کند و یک ولتاژ باقی‌مانده به جا می‌ماند که با زمان افت می‌کند. اندازه‌گیری IP بعد از گذشت زمان کوتاهی از قطع جریان و در فواصل زمانی بسیار کوتاه صورت می‌گیرد [Reynolds, 1997]. مساحت زیر منحنی واپاشی A به‌وسیله دستگاه اندازه‌گیری IP با انتگرال‌گیری ولتاژ IP در فاصله زمانی t_1 تا t_2 تعیین می‌شود. با تقسیم این انتگرال بر V_c ، مقدار بارپذیری ظاهری M_a با واحد میلی‌ثانیه به دست می‌آید که پارامتر مفیدی برای تشخیص نوع مواد است [Kearey et al., 2002].

$$M_a = \frac{A}{V_c} = \frac{1}{V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (9-2)$$

استفاده از مساحت زیر منحنی به صورت کیفی می‌تواند معیار سنجشی برای IP باشد. مشکلی که وجود دارد این است که این مساحت به تنهایی معیار سنجش نیست، زیرا اگر مقدار جریان تزریقی بیشتر یا کمتر شود، مساحت زیر منحنی هم بزرگ‌تر یا کوچک‌تر می‌شود و باید برای رفع این مشکل مقدار به دست آمده تقسیم بر V_c شود تا در یک زمین مشخص، یک مقدار بارپذیری مشخص به دست آید و مستقل از ولتاژ قبل از قطع جریان V_c و مقدار جریان تزریقی به زمین باشد. اهمیت عمده انتگرال‌گیری و نرمالایز کردن به‌وسیله تقسیم آن بر مقدار ولتاژ اولیه در این است که سطح نوفه ناشی از جفت‌شدگی القایی بین سیم‌ها و نوفه پتانسیل زمینه کاهش پیدا می‌کنند [Telford et al., 1990]. مقدار بارپذیری به دست آمده برای سنگ‌ها و کانی‌های متفاوت می‌باشد و بستگی به زمان شارش جریان در زمین و نیز بازه اندازه‌گیری بعد از قطع جریان دارد. شکل (۲-۱۲) نمونه‌ای از IP سنگ‌ها و کانی‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲: اندازه IP بر حسب میلی ولت بر ولت برای تعدادی از سنگ ها و کانی ها [After Loke, 2012].

جدول (۱-۲) مقادیر بارپذیری کانی های مختلف با تمرکز کانی سازی یک درصد را نشان می دهد. زمان شارش جریان موج مربعی ۳ ثانیه و زمان اندازه گیری منحنی افت ولتاژ القایی یک ثانیه بوده است.

جدول ۱-۲: مقادیر بارپذیری کانی های مختلف [Telford et al., 1990].

Mineral	Chargeability (ms)	Mineral	Chargeability (ms)
Pyrite	13.4	Bornite	6.3
Chalcocite	13.2	Galena	3.7
Copper	12.3	Magnetite	2.2
Graphite	11.2	Malachite	0.2
Chalcopyrite	9.4	Hematite	0.0

ب) اندازه گیری در حوزه فرکانس:

در اندازه گیری حوزه فرکانس، مقاومت ویژه ظاهری در دو فرکانس کمتر از ۱۰ هرتز اندازه گیری می شود. یک واحد متداول در IP حوزه فرکانس، درصد اثر فرکانس یا PFE^1 است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$PFE = \frac{\rho(\omega_L) - \rho(\omega_H)}{\rho(\omega_H)} \times 100 \quad (10-2)$$

که $\rho(\omega_L)$ مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس پایین و $\rho(\omega_H)$ مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس بالا است. پارامتر معمول دیگر در اندازه گیری حوزه فرکانس فاکتور فلزی MF^2 می باشد که با رابطه (۲-۱۲) بیان می شود [Loke, 2012]:

۱- Percent Frequency Effect

۲- Metal Factor

$$MF = \frac{\rho(\omega_L) - \rho(\omega_H)}{\rho(\omega_L) \times \rho(\omega_H)} \times 2\pi \times 10^5 \quad (11-2)$$

واحد فاکتور فلزی MF، زیمنس بر متر (Siemens/m) است. مقدار مقاومت ویژه در فرکانس پایین همواره از مقدار آن در فرکانس بالا بیشتر است. نوعی دیگر از اندازه‌گیری در حوزه فرکانس، زاویه فاز می‌باشد که میزان جابه‌جایی فاز بین جریان خروجی از فرستنده و ولتاژ اندازه‌گیری شده است و برحسب میلی‌رادیان بیان می‌شود [Loke, 2012]. پارامترهایی که در دو حوزه زمان و فرکانس (قطبش ظاهری، بارپذیری ظاهری، اثر فرکانس و فاکتور فلزی) معرفی شده‌اند، در شناسایی انواع کانی‌سازی‌های فلزی پیوسته و پراکنده کاربرد دارند، ولی نمی‌توانند عیار و ماهیت کانی‌سازی را تخمین بزنند. بنابراین از روش IP طیفی استفاده می‌نمایند.

ج) اندازه‌گیری قطبش‌القایی طیفی (SIP):

قطبش‌القایی طیفی بیان دیگری از مقاومت ویژه موهومی است که توسط پلتون^۱ و همکارانش در سال ۱۹۸۳ معرفی شد. یک مدل ریاضی برای توضیح تغییرات مقاومت ویژه با تغییر فرکانس در روش IP مشاهده می‌شود، که مدل کول-کول^۲ است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$|Z_\omega| = \rho_0 \left[1 - M \left(1 - M \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right) \right] \quad (12-2)$$

$Z(\omega)$ رفتار فرکانسی IP موهومی یا مقاومت ویژه موهومی است. ρ_0 مقاومت ویژه جریان مستقیم، ω فرکانس زاویه‌ای^۳، M مقدار باپذیری، τ ثابت زمانی^۴، c وابسته فرکانسی^۵ و $i = \sqrt{-1}$ می‌باشد. ساخت کانی‌سازی به وسیله دو پارامتر c و τ کنترل می‌شود. زمانی که کانی‌سازی‌های قطبش‌پذیر دانه‌درشت هستند، τ افزایش می‌یابد، عکس این حالت برای کانی‌سازی‌های دانه‌ریز رخ می‌دهد. از طرفی هرچه

۱- Pelton

۲- Cole- Cole

۳- Angular Frequency

۴- Time constant

۵- Frequency dependence

پراکندگی دانه‌های کانی قطبش‌پذیر بیشتر باشد، c افزایش می‌یابد و عکس آن برای زمانی که دانه‌ها پراکندگی کمتری دارند رخ می‌دهد [Reynolds, 1997].

۲-۵-۴ عوامل مؤثر بر پدیده IP

عوامل مختلفی بر مقدار IP تأثیر می‌گذارند [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰]، این عوامل عبارتند از:

- ۱- قابلیت هدایت الکترونی کانی‌ها، که نسبت به کانی‌های دارای هدایت الکترولیتی IP قوی‌تری دارند.
- ۲- عیار ماده معدنی، که افزایش آن باعث افزایش مقدار IP می‌شود.
- ۳- عمق کانی‌سازی در کاوش توده‌های معدنی به روش IP بسیار مؤثر است، هرچه توده معدنی کوچک و در عمق بیشتری باشد، ممکن است کانسار را از سنگ دربرگیرنده (به دلیل ایجاد IP ضعیف) نتوان تفکیک کرد.
- ۴- دانه‌بندی با توجه به اندازه آن در مقدار IP اثرگذار است. هرچه ماده معدنی دانه‌ریزتر باشد IP ایجاد شده بزرگ‌تر است، در ضمن باید توجه داشت که اگر دانه‌های ماده معدنی از یک حدی کوچک‌تر شوند، مقدار IP کاهش می‌یابد.

۲-۵-۵ منابع خطا در IP

در برداشت‌های IP، عوامل مختلفی باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌شود [نوروزی، ۱۳۹۲]، این عوامل عبارتند از:

- ۱- نوفه الکترونی ناشی از تماس الکتروود با زمین. (تغییر در الکتروودهای جریان که مرتبط با تغییرات شارژ جریان (در حوزه زمان) و فرکانس (در حوزه فرکانس) است، موجب اغتشاش در جریان یا میدان متناوب ارسالی می‌شود. برای کاهش این اثر باید بخشی از طول الکتروودهای پتانسیل در تماس پایداری با لایه زیرسطحی قرار گیرد یا از الکتروودهای قطبش‌ناپذیر برای پایداری پدیده الکتروشیمیایی حاصل از اثر تماس با زمین استفاده شود).

۲- پتانسیل خودزا (عموماً پایدار هستند و تغییرات آن‌ها کم است و اغتشاش زیادی در اندازه‌گیری IP ایجاد نمی‌کنند و به راحتی پیش از اندازه‌گیری، اثر آن‌ها را حذف یا کاهش می‌دهند).

۳- جریان‌های تلوریک (به دلیل وجود جریان‌های طبیعی در زمین است که با استفاده از یک فیلتر بالاگذر (درون دستگاه) کاهش می‌یابد، به خصوص زمانی که فرکانس پایینی فرستنده کمتر از ۰/۳ هرتز نباشد [تلفورد و همکاران، ۱۳۸۷]).

۴- جفت‌شدگی الکترومغناطیسی^۱ (افزایش طول سیم‌های جریان و فرکانس بالا برای جریانی که استفاده می‌کنیم، سبب جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بیشتر می‌شود).

۲-۵-۶ دلایل منفی در روش حوزه زمان

در عمل ممکن است مقدار IP منفی باشد به این معنی که ولتاژ بعد از قطع جریان، دارای علامتی خلاف جهت ولتاژ قبل از قطع جریان است. عوامل مختلفی از قبیل بی‌هنجاری‌های قطبش‌پذیر یا لایه‌های افقی قطبش‌پذیر که رخ‌نمون دارند یا نزدیک سطح زمین می‌باشند، بی‌هنجاری‌های کروی یا استوانه‌ای، نوفه‌هایی مثل خطوط فشارقوی برق، خطوط تلفن و کابل‌ها باعث ایجاد این پدیده می‌شوند [نوروزی، ۱۳۹۲].

۲-۶ برداشت‌های ژئوالکتریکی

برداشت‌های ژئوالکتریکی به سه صورت زیر انجام می‌شوند:

- برداشت‌های سونداژزنی^۲
- برداشت‌های پروفیل‌زنی^۳

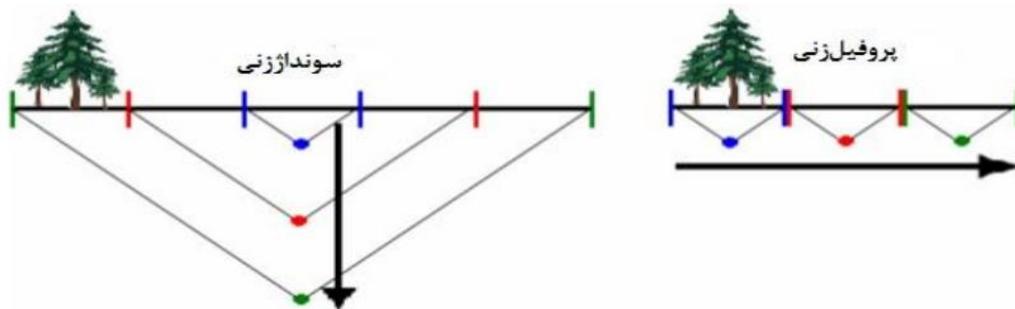
۱- Electromagnetic coupling

۲- Sounding

۳- Profiling

- برداشت‌های ترکیبی.

دو برداشت نخست، تولید یک مجموعه داده به صورت یک‌بعدی قائم (سونداژزنی) و یک‌بعدی افقی (پروفیل‌زنی) می‌کنند (شکل ۲-۱۳). برداشت‌های سونداژزنی به منظور بررسی‌های عمقی در یک نقطه مشخص بر روی سطح زمین، با افزایش فاصله الکترودی انجام می‌شود. در روش دوم که پروفیل‌زنی نام دارد، لازم است که فاصله الکترودی جفت الکترودها در طول پروفیل ثابت نگه داشته شود که این مورد در بررسی جانبی ساختارهای زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۱۳: نمایش برداشت داده به دو روش سونداژزنی و پروفیل‌زنی [After Peake, 2005].

تجهیزات مدرن مقاومت‌ویژه و IP توانایی ترکیب دو روش سونداژزنی و پروفیل‌زنی را دارند و نمایشی دوبعدی را از ساختارهای زیرسطحی به نمایش می‌گذارند. شکل (۲-۱۴) روش ترکیبی را در برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP نشان می‌دهد.

۲-۶-۱ آرایه‌های الکترودی مناسب

در مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و IP، انتخاب آرایه الکترودی مناسب تابع چندین پارامتر است که با توجه به آن‌ها می‌توان بهترین آرایه الکترودی را انتخاب کرد، [Loke, 2012] این پارامترها عبارتند از:

- ۱- شدت سیگنال
- ۲- اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیسی
- ۳- قدرت تفکیک قائم و افقی

٤- عمق تجسس.

دو آرایه دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی بیشتر در اکتشافات به روش مقاومت ویژه و IP استفاده می شوند که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می شود.

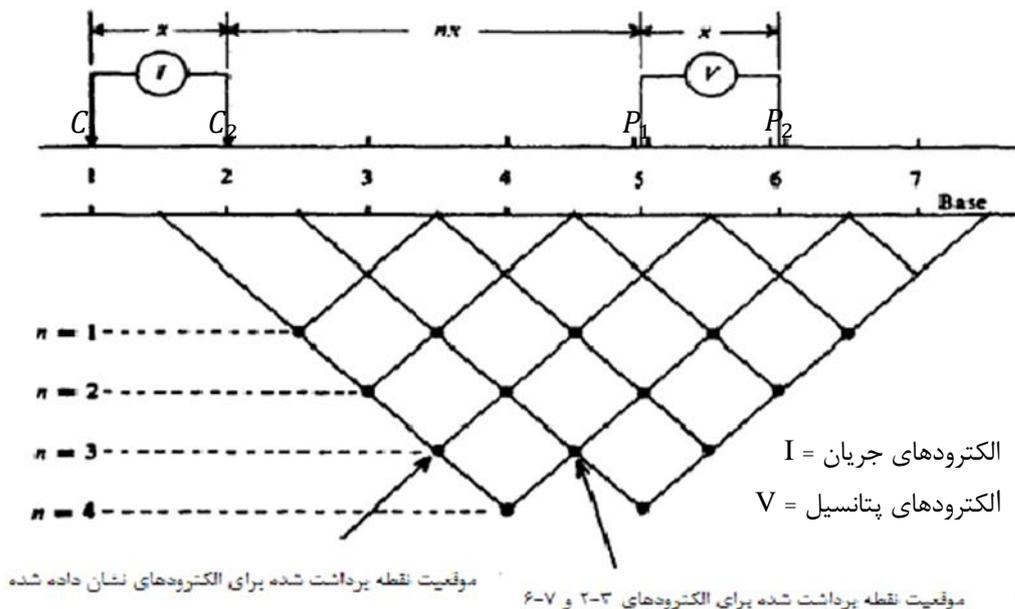
الف) آرایه دوقطبی - دوقطبی:

آرایه دوقطبی - دوقطبی بیشتر در برداشت‌های مقاومت ویژه و IP استفاده می شود. جدا بودن کامل مدار جریان و پتانسیل، اثر نوفه القایی را کاهش می دهد. با توجه به کم بودن القای الکترومغناطیسی در آرایه دوقطبی - دوقطبی، می توان فاصله کابل‌های جریان و پتانسیل را زیاد کرد و پاسخ را از عمق زیاد به دست آورد [Milsom, 2007]. همچنین برای اهداف باریک مناسب است زیرا قدرت تفکیک جانبی و قائم این آرایه بالا می باشد [Goldie, 2007]. به دلیل کم بودن نسبت سیگنال به نوفه در این آرایه، لازم است که از دستگاه‌های با حساسیت بالا استفاده کرد و از اتصال مناسب الکترودها به زمین اطمینان حاصل کرد [Knodel et al., 2007]. از رابطه (۲-۱۳) می توان مقاومت ویژه ظاهری را برای آرایه دوقطبی - دوقطبی به دست آورد:

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (2-13)$$

a فاصله الکترودهای جریان از یکدیگر که با فاصله دوقطبی پتانسیل برابر است و n مضرب صحیحی است از فاصله میان دوقطبی پتانسیل و دوقطبی جریان، که معمولاً بین ۱ تا ۶ یا ۸ تا ۱۰ در نظر گرفته می شود [Reynolds, 1997]. یک عیب این آرایه قدرت سیگنال پایین آن برای مقادیر بالای n و یا دشوار بودن اندازه گیری دقیق پتانسیل به دلیل مقادیر بسیار پایین پتانسیل است. برای رفع این مشکل با افزایش فاصله a بین هریک از دوقطبی‌ها برای کاهش افت پتانسیل، زمانی که طول کلی این آرایه برای افزایش عمق اکتشاف افزایش می یابد، است [Loke, 2012]. در شکل (۲-۱۴) نمایشی از آرایه دوقطبی - دوقطبی آمده است که مقادیر اندازه گیری به نقطه تقاطع خطوط مایل که با زاویه ۴۵ درجه از مراکز دوقطبی‌های پتانسیل و جریان رسم می شوند، نسبت داده می شود [Milson, 2007]. مقادیر رسم شده، مقادیر واقعی پارامتر در آن عمق نمی باشند و شکل رسم شده شبه‌مقطع نامیده می شود که یک تصویر مناسب هرچند غیر واقعی از حضور بی‌هنجاری تهیه می کند، ولی اندازه تغییرات جانبی و

قائم حقیقی آن‌ها را نشان نمی‌دهد. حضور ناحیه بی‌هنجاری ممکن است با انجام حفاری‌های اکتشافی بیشتر جستجو شود [Lowrie, 2007].



شکل ۲-۱۴: نمایشی از آرایه دوقطبی - دوقطبی و نمایش نقاط داده‌ای به صورت ترکیبی در دو بعد [After Telford et al., 1990].

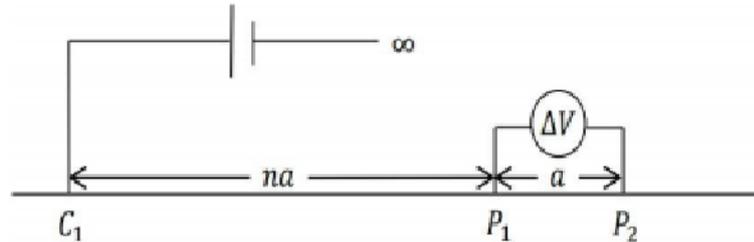
ب) آرایه قطبی - دوقطبی:

در آرایه قطبی - دوقطبی یکی از الکترودهای جریان در فاصله بسیار دوری از سه الکتروود دیگر قرار می‌گیرد که به اصطلاح می‌گویند الکتروود در بی‌نهایت است، به این منظور که اثر آن روی الکترودهای دیگر بسیار اندک است و لزومی ندارد که با مابقی الکتروودها در یک خط باشد. از رابطه (۲-۱۴) می‌توان مقاومت ویژه ظاهری را برای آرایه قطبی - دوقطبی به دست آورد:

$$\rho_a = 2\pi n(n+1)a \frac{\Delta V}{I} \quad (2-14)$$

a فاصله الکترودهای پتانسیل از یکدیگر و n هم مضرب صحیحی است که در واقع نسبت بین فاصله الکتروود فعال جریان و الکتروود پتانسیل نزدیک به آن است، که مقدار n مشابه آرایه دوقطبی - دوقطبی می‌باشد [Telford et al., 1990]. آرایه قطبی - دوقطبی متقارن قدرت تفکیک بالاتری نسبت به سایر

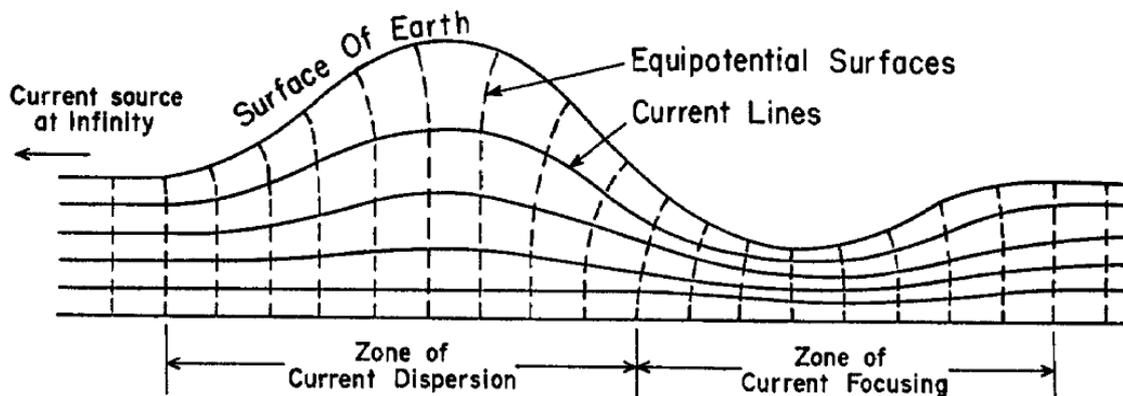
آرایه‌های الکترودی متداول دارد [پیروز و همکاران، ۱۳۹۲]، اما قدرت تفکیک قائم آن نسبت به آرایه دوقطبی - دوقطبی کمتر است و برای بی‌هنجاری‌های باریک قائم مناسب نیست [Goldie, 2007].



شکل ۲-۱۵: نمایشی از آرایه قطبی - دوقطبی [Loke, 2004].

۷-۲ اثر توپوگرافی بر روی داده‌ها

اندازه‌گیری مقاومت ویژه به شدت تحت تأثیر تغییرات رسانندگی ناشی از میزان رطوبت و هوازدگی قرار می‌گیرد. توپوگرافی ناهموار اثر مشابهی دارد. خطوط جریان موازی توپوگرافی سطح زمین عبور می‌کنند. در شکل (۲-۱۶) خطوط جریان زیر تپه و اگر و زیر دره همگرا می‌شوند. بنابراین مجموعه خطوط هم‌پتانسیل که عمود بر خطوط جریان هستند، زیر تپه و اگر می‌شوند و مقاومت ویژه بالاتری زیر تپه و مقدار پایین‌تری از مقاومت ویژه زیر دره ایجاد می‌شود. این انحراف خطوط به دلیل اثر توپوگرافی، بی‌هنجاری کاذب را نشان می‌دهد. این اثر با افزایش شیب سطح زمین افزایش می‌یابد. البته برای شیب‌های کمتر از ۱۰ درجه قابل چشم‌پوشی است [Telford et al., 1990]. با توجه به این که داده‌های مقاومت ویژه و IP تحت تأثیر توپوگرافی قرار می‌گیرند، باید تصحیح توپوگرافی روی این داده‌ها انجام شود [مهدی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹]. زیرا ممکن است موقعیت بی‌هنجاری واقعی تغییر کند و یا آن را مخفی کند [شریفی، ۱۳۹۱].



شکل ۲-۱۶: اثر توپوگرافی بر خطوط جریان و پتانسیل [Telford et al., 1990].

۸-۲ روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی

داده‌های برداشت شده در صحرا یک مجموعه داده خام هستند که توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی آن‌ها به‌طور مستقیم غیرممکن است. باید بین این داده‌ها و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه رابطه‌ای تعیین کرد. به این منظور مدل‌سازی این داده‌ها برای توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی ضروری است. در مدل‌سازی ریاضی، روابط فیزیکی به‌وسیله تعدادی معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی بیان می‌شوند. با حل این معادلات می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را تعیین کرد [اموسوی، ۱۳۹۳]. مدل‌سازی‌های ژئوفیزیکی به دو دسته مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی حیطه‌بندی می‌شوند.

۱-۸-۲ مدل‌سازی فیزیکی

مدل‌سازی فیزیکی شبیه‌سازی ساختار زمین در مقیاس آزمایشگاهی است. این روش وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد و شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی به‌خوبی شرایط غیر قابل پیش‌بینی زمین را فراهم نمی‌کند. با پیشرفت علوم کامپیوتر این روش عمدتاً جای خود را به مدل‌سازی عددی به‌وسیله برنامه‌های کامپیوتری داده است [Dey and Morrison, 1979].

۲-۸-۲ مدل سازی عددی

درک داده‌های جمع‌آوری شده در صحرا و تفسیر آن‌ها به صورت یک مدل زمین‌شناسی قابل قبول در حد توان روش‌های مختلف ژئوفیزیک از وظایف یک ژئوفیزیکست است و 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 به‌خصوصی برخوردار است. به دلیل پیشرفت‌های خیلی سریع علوم کامپیوتر، تکنولوژی نرم‌افزاری و روش‌های عددی در مدل‌سازی ریاضی بهره‌گیری از تئوری معکوس فراهم گردیده است. توسعه چشم‌گیر علوم و تکنولوژی در این زمینه در طی سه دهه گذشته قدرت درک ژئوفیزیکست‌ها را از درون زمین بهبود بخشیده است [Ward, 1990].

* مدل سازی پیشرو^۱

در مدل‌سازی پیشرو، ورودی فرآیند مدل‌سازی یک مدل آزمون فرضی از زمین می‌باشد. در طول فرآیند با توجه به معادلات حاکم بر مسأله، داده‌های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به‌عنوان خروجی مدل ارائه می‌شوند. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترها) ادامه می‌یابد تا زمانی که پاسخ مدل برازش خوبی با داده‌های صحرائی پیدا کند (از مدل، داده به‌دست آید). مدل‌سازی پیشرو بر مبنای روش آزمون و خطا صورت می‌گیرد. بنابراین یک توزیع خاص برای اجزای زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود. در گام اول فضای زیرسطحی به تعدادی سلول تقسیم می‌شود، سپس پاسخ این مدل با توجه به آرایه الکترودی موردنظر محاسبه می‌شود [Dey and Morrison, 1979].

* مدل سازی وارون^۲

در مدل‌سازی وارون با توجه به داده‌های برداشت‌شده، مدل تخمین زده می‌شود. بقیه مراحل مدل‌سازی وارون مشابه مدل‌سازی پیشرو می‌باشد و تفاوت آن‌ها در نحوه انتخاب مدل اولیه است. انتخاب مدل

۱- Forward Modeling

۲- InveReSion Modeling

هرچند در روش وارون سخت است ولی پاسخ به واقعیت نزدیکتر است و تعداد تکرار^۱ برای کاهش خطا کمتر است. به دلیل پیچیده تر بودن مدل در روش وارون، زمان لازم برای محاسبه پاسخهای مدل و حجم اشغالی بیشتر است [Loke,2004]. در روش مقاومت ویژه الکتریکی پارامترهای مدل، مقادیر مقاومت ویژه سلولهای مدل و دادهها مقادیر مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده هستند [مطاعی، ۱۳۹۴]. رابطه بین پارامترهای مدل و پاسخ آنها از روشهای تفاضل محدود^۲ [Hedlin and Constable, 1990] یا اجزاء محدود^۳ [Okan, 2002] تعیین می شود. در تمامی روشهای بهینه سازی، مدل اولیه طوری در فرآیند تکرار شونده بهبود می یابد تا اختلاف بین دادههای برداشت شده (y) و پاسخهای مدل (f) کاسته شود. می توان دادههای برداشت شده را به صورت بردار ستونی y نمایش داد:

$$y = col(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (15-2)$$

M تعداد قرائت ها است. همچنین پاسخهای مدل f را می توان به صورت مشابهی نشان داد:

$$f = col(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (16-2)$$

و پارامترهای مدل به صورت بردار زیر ارائه می شوند:

$$q = col(q_1, q_2, \dots, q_m) \quad (17-2)$$

n تعداد پارامترهای مدل است. تفاوت بین دادههای برداشت شده و پاسخهای مدل از بردار تفاضل g که به صورت زیر است محاسبه می شود:

$$g = y - f \quad (18-2)$$

در روش بهینه سازی کمترین-مربعات، مدل اولیه را تا زمانی که جمع مربعات خطای (E) اختلاف میان پاسخ مدل و مقادیر مشاهده شده به حداقل برسد، تعدیل و اصلاح می کند.

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (19-2)$$

۱- Iteration

۲- Finite Element (FE)

۳- Finite Difference (FD)

برای کاهش مقدار خطای فوق، معادله گوس- نیوتن^۱ برای تعیین مقدار تغییر در پارامترهای مدل استفاده می‌شود [Loke and Barker, 1995].

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (20-2)$$

که در معادله فوق Δq بردار تغییر پارامترهای مدل و J ماتریس ژاکوبین^۲ مشتقات جزئی است. عناصر ماتریس ژاکوبین به صورت $J_{ij} = \partial f_i / \partial q_j$ می‌باشند به این معنی که تغییر در i امین پاسخ مدل به دلیل تغییر در j امین پارامتر مدل است. بعد از محاسبه بردار تغییر پارامتر، مدل جدید به وسیله رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (21-2)$$

رابطه (۲۰-۲) به ندرت در وارون سازی ژئوفیزیکی استفاده می‌شود. به دلیل کاستی‌های معادله گوس- نیوتن از بهبود یافته آن با عنوان مارکوارت- لوبنبرگ^۳ استفاده می‌شود [Loke and Barker, 1995].

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (22-2)$$

J ماتریس ژاکوبین و λ فاکتور تعدیل^۴ می‌باشد. این روش با نام رگرسیون ریج شناخته می‌شود. در وارون سازی داده‌های سونداژ با تعداد لایه‌های کم در یک مدل، این روش بهتر پاسخ می‌دهد. ولی در مواردی که پارامترهای مدل زیاد باشند (مانند مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی) مدل تولید شده 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 می‌شود تا تغییرات فضایی در پارامترهای مدل را کمینه کند [Loke and Barker, 1995]:

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

$$F = \alpha_x c_x^T c_x + \alpha_y c_y^T c_y + \alpha_z c_z^T c_z \quad (24-2)$$

۱- Gauss- Newton

۲- Jacobwin

۳- Marquardt- Levenberg

۴- Damping Factor

c_x ، c_y و c_z ماتریس‌های هموارسازی در جهات x ، y و z می‌باشند. α نیز وزن نسبی داده شده به فیلترهای هموارسازی در جهات ذکر شده است. معادله (۲-۲۴) مربع تغییرات فضایی یا سختی مقادیر مقاومت ویژه مدل را کمینه می‌کند. در واقع 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 مناطقی در زیر سطح به صورت درونی همگن هستند؛ ولی با محیط پیرامون خود متفاوت بوده و دارای مرزهای تند هستند، بهینه شده معادله فوق که به روش وارون‌سازی بلوکی معروف است جواب‌های به مراتب قابل قبول‌تری می‌دهد، که به صورت زیر است [Loke and Barker, 1995]:

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (2-25)$$

$$F = \alpha_x c_x^T R_m c_x + \alpha_y c_y^T R_m c_y + \alpha_z c_z^T R_m c_z \quad (2-26)$$

R_d و R_m ماتریس‌های وزنی هستند. برای محاسبه مقاومت ویژه سه روش وجود دارد: ۱- روش تحلیلی، ۲- روش جزء مرزی^۱، ۳- روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود. روش تحلیلی دقیق‌ترین روش است. ولی استفاده از این روش محدود به چند شکل هندسی ساده (کره و استوانه) است. روش جزء مرزی از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است؛ اما در این روش نیز تعداد نواحی با مقدار مقاومت ویژه متفاوت محدود است (معمولاً کمتر از ۱۰ لایه). در بررسی‌های مهندسی و زیست‌محیطی می‌توان توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح را به صورت اختیاری در نظر گرفت. در نتیجه روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود تنها گزینه‌های کاربردی هستند. دو روش مذکور می‌توانند زیر سطح را به هزاران سلول با مقاومت ویژه‌های متفاوت تقسیم کنند [Loke, 2004].

۱- Boundary element method

۹-۲ روش‌های عددی برای حل مسائل وارون‌سازی

از میان روش‌های عددی حل مسائل وارون‌سازی، روش کمترین مربعات به دلیل سادگی ریاضی، از پرتعدادترین روش‌ها می‌باشد. در این مدل‌سازی، قبل از هر چیز به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز می‌باشد [Loke and Lane, 2004]. مدل اولیه در نرم‌افزار RES2DINV یک مدل اولیه همگن متناسب با داده‌های مشاهده‌ای است؛ به‌گونه‌ای که منجر به تغییرات شدید در مراحل تکرار نگردد. پس از تخمین مدل اولیه نوبت به تصحیح این مدل با هدف رسیدن به تطابق قابل‌قبول با داده‌های صحرائی می‌رسد. برای این منظور دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد، که عبارتند از روش معمول کمترین مربعات گوس- نیوتن و روش شبه نیوتن^۱.

۹-۲-۱ روش کمترین مربعات گوس- نیوتن

یکی از روش‌های معمول که برای حل مسائل غیرخطی استفاده می‌شود، روش بهینه‌سازی گوس- نیوتن است. این روش به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل وارون‌سازی از جمله در نرم‌افزار RES2DINV به‌کار برده می‌شود [Sasaki, 1992]. روش مدل‌سازی وارون کمترین مربعات گوس- نیوتن در سه مرحله انجام می‌شود. مرحله اول شامل محاسبه مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری برای مدل به‌کار گرفته شده می‌باشد که از روش تفاضل محدود یا روش اجزاء محدود برای این کار استفاده می‌شود. مرحله دوم به محاسبه ماتریس ژاکوبین (محاسبه ماتریس مشتقات جزئی مرتبه اول) و مرحله سوم به حل سیستم معادلات خطی می‌پردازد. این مراحل به‌صورت تناوبی تکرار می‌شوند، تا برازش مناسبی بین مدل فرض شده با مدل صحرائی ایجاد شود و یا این‌که برنامه به حداکثر تکرار تعریف شده خود برسد. از مزایای این روش مدل‌سازی، نزدیک بودن مدل ساخته شده به‌وسیله نرم‌افزار با مدل زمینی در همان تکرارهای اولیه

۱- Quasi-Newton

می‌باشد. به دلیل محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، این روش دارای زمان طولانی بوده و نیاز به حافظه زیادی برای مدل‌سازی دارد [Loke and Lane, 2004].

۲-۹-۲ روش شبه‌نیوتن

در روش گوس-نیوتن ماتریس ژاکوبین در هر بار تکرار محاسبه می‌شود. روش شبه‌نیوتن در مقایسه با روش گوس-نیوتن، روشی سریع‌تر است. زیرا ماتریس ژاکوبین را در هر بار تکرار محاسبه نمی‌کند و حافظه کمتری از رایانه را اشغال می‌کند. این مزایا باعث شده تا در وارون‌سازی بیشتر روش شبه‌نیوتن استفاده شود [Loke and lane, 2004]. روش شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین به وسیله 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:

$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T \quad (27-2)$$

$$B_{i+1} u_i = \frac{(\Delta y_i - B_i P_i)}{P_i P_i^T} B_i + u_i P_i^T \quad (28-2)$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i \quad (29-2)$$

در این روابط 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 B_i و P_i بردار انحراف پارامتر می‌باشند. البته لازم به ذکر است که روش‌های دیگری نیز برای روش شبه‌نیوتن وجود دارند. مدل‌سازی وارون شبه‌نیوتن در چهار گام اصلی انجام می‌شود. در گام اول پارامترهایی که فرایند وارون‌سازی را کنترل می‌کنند؛ باید انتخاب شوند. میرایی اولیه، میرایی کمینه و همچنین حداکثر 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]. همچنین بعضی

معیارهای همگرایی مانند RMS^1 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. این امر با ضابطه زیر تعریف می‌شود:

$$e_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{\varepsilon_i} \quad (30-2)$$

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 0.05 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 میانگین‌گرفتن از لگاریتم‌های مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده f_i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f(x) = r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (31-2)$$

اکنون 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 و در حافظه رایانه ذخیره می‌شود. معادله کمترین مربعات نیز برای تعیین بردار انحراف پارامتر P_0 حل می‌شود. ارزیابی مقاومت‌ویژه بلوک‌ها به‌وسیله رابطه (32-2) صورت می‌گیرد:

$$r_1 = r_0 + P_0 \quad (32-2)$$

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

1- Root mean square

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 باز هم مؤثر نباشد، عامل میرایی افزایش پیدا می‌کند و بردار P_i دوباره محاسبه می‌شود.

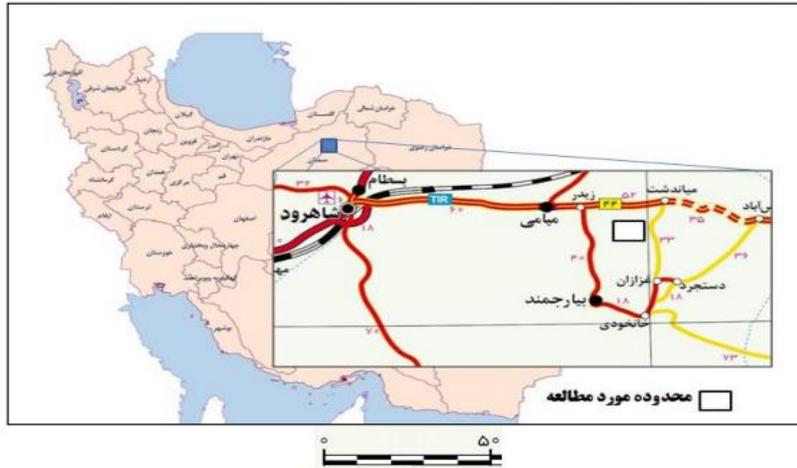
در گام چهارم، بعد از آن که یک مدل جدید به دست آمد، بردار انحراف پارامتر P_{i+1} با استفاده از ماتریس ژاکوبین ارزیابی شده و B_{i+1} محاسبه می‌شود. مراحل سوم و چهارم مرتباً تکرار می‌شوند؛ تا این که برنامه همگرا شود، یا این که به حداکثر تعداد تکرارها برسد [Loke and Lane, 2004].

فصل سوم

موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی منطقه و عملیات برداشت داده‌های صحرائی

۳-۱ مقدمه

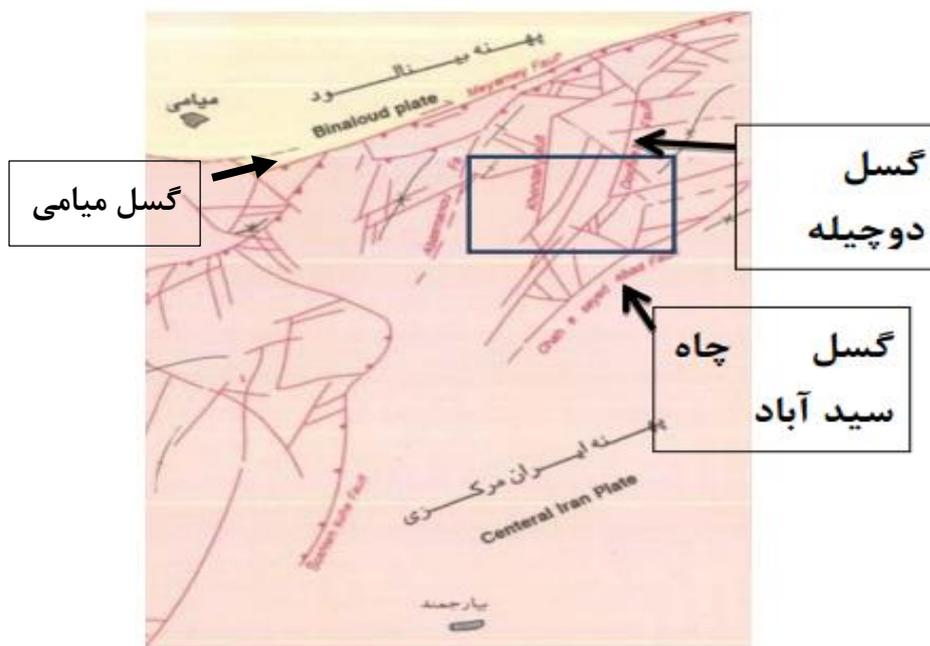
منطقه مورد مطالعه در شمال شرق ایران در منتهی الیه شرق استان سمنان و بین شهرهای شاهرود و سبزوار واقع شده است. این مطالعات در محدوده معدنی آسمانو در ۲۵ کیلومتری شرق شهر میامی در استان سمنان انجام شده است. این محدوده معدنی در سیستم UTM در زون 40N واقع شده است. این منطقه در چهارگوش ۱:۲۵۰,۰۰۰ جاجرم و در ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ میامی واقع شده است و به دلیل پتانسیل‌های معدنی، به خصوص کانی‌سازی مس مورد توجه می‌باشد و منطقه‌ای نیز به وسعت تقریبی ۲۸ کیلومتر مربع در بازه طول شرقی "۱۰' ۵۶° ۵۵ تا "۰۰' ۰۰° ۵۶ و عرض شمالی "۲۶' ۲۰° ۳۶ تا "۵۱' ۲۲° ۳۶ را شامل می‌شود. سنگ میزبان کانی‌سازی سنگ‌های آتشفشانی دوران ائوسن بوده و از نظر زمین‌شناسی در قسمت غربی زون سبزوار و در زون متالوژنی تروود-عباس‌آباد قرار گرفته است. پس از طی مسافت ۲۵ کیلومتر از شهر میامی در جاده اصلی تهران-مشهد (مقابل کاروانسرای میاندشت)، به سمت راست تغییر مسیر داده و وارد راه فرعی خاکی جیپ‌رو شده و پس از طی مسافت ۱۲ کیلومتر در مسیر خاکی می‌توان به منطقه مورد نظر دسترسی پیدا کرد. در شکل (۳-۱) راه‌های دسترسی به منطقه نشان داده شده است. از ارتفاعات مهم ناحیه می‌توان به کوه‌های میامی (۲۴۱۷ متر) و سوخته‌کوه (۲۴۲۵ متر) اشاره نمود. رودخانه دائمی در تمام ناحیه وجود ندارد و مسیل‌های زیدر، کال طاقی و کفتاره از آبراهه‌های فصلی مهم بوده که در فصول بارندگی مسیر گذر سیل هستند. از لحاظ آب و هوایی منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوایی سرد و خشک است. در بهار معتدل و در تابستان گرم و خشک بوده و در پاییز و زمستان سرد می‌باشد. بیشتر مردم این منطقه با دامداری و کشاورزی امرار معاش می‌کنند و آب مصرفی به وسیله چاه، قنات و چشمه‌ها تأمین می‌شود. پوشش گیاهی منطقه عمدتاً بوته و عاری از درخت است هرچند درختچه‌های کوتاهی به چشم می‌خورد. نزدیک‌ترین روستا به منطقه، روستای غزازان است که دارای امکانات رفاهی می‌باشد [ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۳].



شکل ۳-۱: راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه.

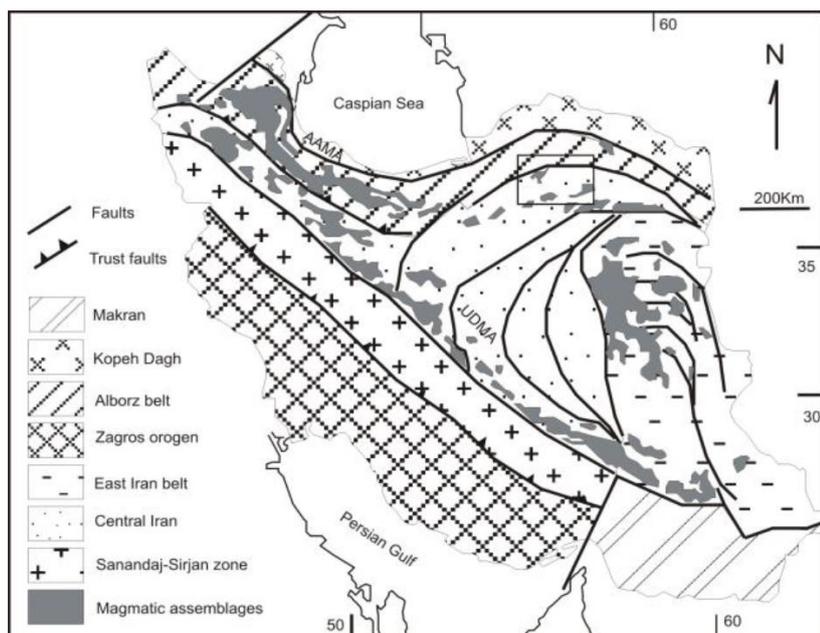
۲-۳ زمین‌شناسی منطقه

محدوده مورد مطالعه از لحاظ زمین‌شناسی در مرز زون ایران مرکزی و زون بینالود قرار گرفته که به وسیله گسل میامی از هم جدا می‌شوند. کانی‌سازی مس آسمانو در قسمت جنوبی گسل میامی واقع شده است و در بخش کوچکی از انتهای شمالی زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۲-۳) گسل میامی، گسل‌های اصلی چاه سیدآباد و گسل دوچپله با روند جنوب خاوری-شمال باختری در شکل‌گیری مورفولوژی منطقه نقش اساسی دارند و ناحیه بین این گسل‌ها بالا آمده و بخش مرتفع را پدید آورده است. همچنین دشت میامی در شمال و دشت بیارجمند در جنوب، در کناره این گسل‌ها شکل گرفته است و سنگ‌های آهکی کرتاسه و سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی ائوسن، بخش‌های مرتفع و سنگ‌های سست (مارن و ماسه‌سنگ) نئوژن نواحی پست را ایجاد کرده‌اند [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹].



شکل ۲-۳: نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور با تغییرات، ۱۳۷۹].

محدوده مورد مطالعه در تقسیم‌بندی ساختاری ایران (شکل ۳-۳) در زون ماگمایی شمال شرق ایران و در حاشیه شمالی کویر ایران مرکزی قرار دارد [Alavi, 1991]. کمربند فلززایی سبزوار، گستره‌ای از شرق نیشابور تا سر کویر سمنان را شامل می‌شود و نواحی سبزوار، عباس‌آباد، میامی، معلمان و جنوب دامغان را در بر می‌گیرد. گسل عطاری مرز شمالی زون سبزوار می‌باشد که امتداد آن به گسل میامی می‌رسد. حد جنوبی این زون را گسل تکنار مشخص می‌کند. ناحیه معدنی ترود-عباس‌آباد در قسمت غربی این کمربند فلززایی قرار داشته و میزبان ذخایر کانی‌سازی مس تیپ مانتو می‌باشد [سامانی، ۱۳۸۱]. وسعت تقریبی محدوده معدنی عباس‌آباد ۱۳۰ کیلومتر مربع بوده و با راستای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی از واحدهای ائوسن و الیگوسن تشکیل شده و به‌طور چیره از گدازه‌های آندزیتی-بازالتی، سنگ‌های آذرآواری و واحدهای رسوبی مانند شیل، ماسه‌سنگ، آهک و کنگلومرا تشکیل شده است [ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷].

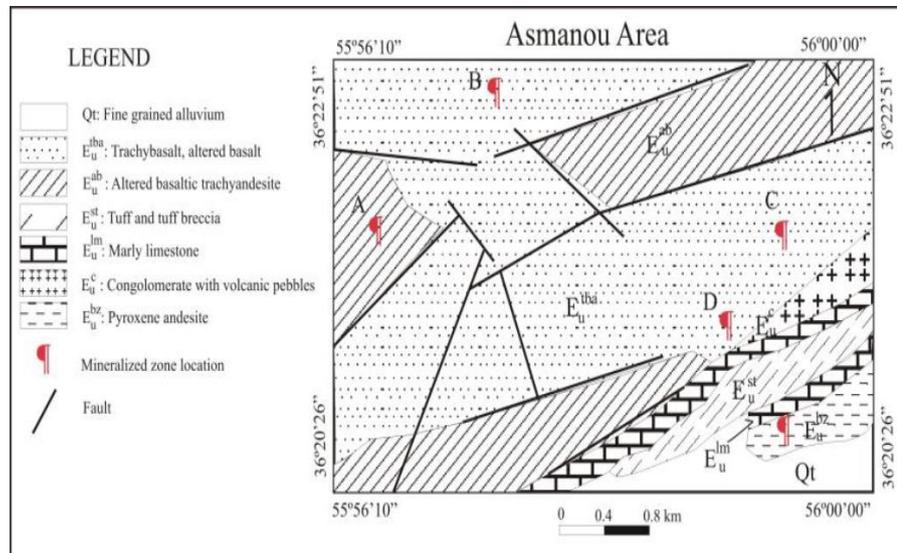


شکل ۳-۳: نقشه ساده شده تکتونیک ایران با زون‌های زمین‌ساختی گوناگون و توزیع مجموعه‌های ماگمایی سنوزوئیک [علوی، ۱۹۹۱]. موقعیت محدوده تروند-عباس‌آباد و منطقه کانه‌زایی آسمانو در شمال شرق ایران (داخل کادر) دیده می‌شود.

ورقه میامی بخش کوچکی از انتهای شمالی پهنه ایران مرکزی است که واحدهای سنگی آن در بر گیرنده ردیفی از سنگ‌های ژوراسیک و کرتاسه می‌باشند. نهشته‌های ژوراسیک عمدتاً در جنوب شرقی شهر میامی و در جنوب شرقی نقشه قرار گرفته است که به دلیل زمین‌ساخت شدیدی که منطقه را تحت تأثیر قرار داده و به‌طور کامل چین خورده است، می‌باشد. لیتولوژی غالب واحدهای ژوراسیک شیل، ماسه‌سنگ، شیل آهکی و کنگلومرا می‌باشد. نهشته‌های کرتاسه در جنوب میامی و غرب بیارجمند با ضخامت‌های بالا تشکیل شده و ستیغ قله‌های مرتفع را می‌سازد که جنس آن از کنگلومرا، سنگ‌آهک و آهک‌های ضخیم تشکیل شده است [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹]. واحدهای ائوسن رسوبی، بیشترین گسترش را در منطقه دارد و با یک امتداد شمال‌شرق- جنوب‌غرب ارتفاعات نه‌چندان بلندی را در منطقه می‌سازد. در منطقه میامی نهشته‌های ائوسن بیشتر از سنگ‌های رسوبی و کمتر از سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده است. واحدهای رسوبی عمدتاً از ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومرا تشکیل شده است. واحدهای آتشفشانی دوران ائوسن غالباً از توف، گدازه‌های آندزیتی سبز

رنگ، پیروکسن آندزیت، آندزیت بازالت‌های قهوه‌ای و سبز و نیز تراکی بازالت‌های تجزیه شده تشکیل شده است [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹]. محدوده معدنی آسمانو در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ میامی در واحد (E_{u}^{ab}) قرار گرفته است که سنگ بازالت قهوه‌ای و سبز رنگ با بافت پورفیریتیک با زمینه میکروولیتیک و پورفیرهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن است و در بعضی موارد به یک برش با ترکیب آندزیتی تبدیل می‌شود. ضخامت این واحد در حدود ۱۳۵۰ متر است. بخش کانی‌سازی مس در این واحد قرار گرفته و در برخی مناطق روند شمالی-جنوبی و در برخی دیگر روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی دارد که در این امتداد به‌طور پراکنده کانه‌زایی مس رخنمون دارد. کانی‌سازی به‌صورت مالاکیت، آزوریت، کوپریت و مس طبیعی قابل مشاهده است [ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۳]. این واحد یکی از میزبان‌های مهم کانی‌سازی در منطقه می‌باشد. بر روی این واحد، تراکی‌بازالت (E_{u}^{tba}) ائوسن با بافت پورفیری به رنگ قهوه‌ای تیره تا سیاه تشکیل شده است که بخش میانی و شمالی منطقه را پوشانده و مانند واحد تراکی‌آندزیتی متحمل دگرسانی زئولیتی-کربناتی شده است. ضخامت این واحد تا ۲۰۰۰ متر نیز می‌رسد و دارای روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی است. این واحد میزبان مهم کانی‌سازی مس در منطقه آسمانو محسوب می‌شود. قدیمی‌ترین واحد سنگ‌شناختی در منطقه آسمانو، پیروکسن آندزیت (E_{u}^{bz}) ائوسن می‌باشد که با ضخامتی تقریبی ۴۰۰ متر در قسمت جنوب‌شرقی نقشه برونزد دارد (شکل ۳-۴) و میزبان یکی از زون‌های کانی‌سازی در منطقه می‌باشد. واحد کنگلومرای (E_{u}^c) ائوسن با جور شدگی ضعیف و گردشدگی متوسط تا خوب بر روی این واحد قرار گرفته است و قطعات آن عمدتاً از سنگ‌های آتشفشانی می‌باشد که به‌وسیله سیمان سلیسی-کربناتی به هم متصل شده‌اند. ضخامت این واحد ۳۰۰ متر بوده و قسمتی از شرق نقشه را شامل می‌شود، قسمت‌هایی از کانی‌زایی مس اکسیدی در این واحد تشکیل شده است (شکل ۳-۴). بر روی این واحد آهک مارنی (E_{u}^{lm}) تشکیل شده که گسترش آن در جنوب شرقی نقشه می‌باشد که فاقد کانی‌سازی است. این واحد با ماسه‌سنگ توفی، توف و توف مارنی سبز رنگ (E_{u}^{st}) ائوسن پوشیده شده است و گسترش آن در

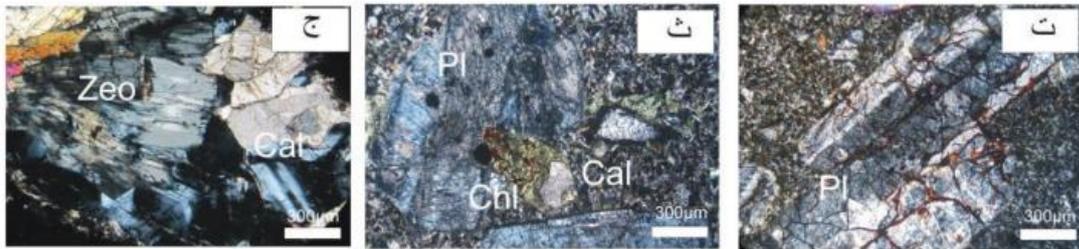
قسمت جنوب شرقی نقشه (شکل ۳-۴) می‌باشد و آثاری از کانی‌سازی در آن مشاهده نشده است
 ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷].



شکل ۳-۴: نقشه ساده شده زمین‌شناسی محدوده معدنی آسمانو [ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷].

۳-۳ تفکیک مناطق دگرسانی در منطقه

دگرسانی در منطقه آسمانو (شکل ۳-۵) از گسترش وسیعی برخوردار است و به منطقه رخنمون رگه‌ها محدود نیست. بازالت‌های دانه‌درشت تحت تأثیر محلول‌های گرمابی قرار گرفته و تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی وسیعی در آن‌ها ایجاد شده است. دگرسانی زئولیت- کربنات به‌طور گسترده در نواحی میانی نقشه مشخص می‌شود. مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که اغلب سنگ‌ها به مجموعه‌ای از کلریت، کربنات و زئولیت تبدیل شده‌اند. دگرسانی‌های کلریتی و اکسید آهن در مجاورت رگه‌ها با وسعت بسیار محدود تشکیل شده است. از مرکز رگه‌ها به سمت حاشیه دگرسانی به سه دسته دگرسانی اکسید آهن، دگرسانی کلریتی و دگرسانی زئولیتی کربناتی تقسیم می‌شود [ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۳].

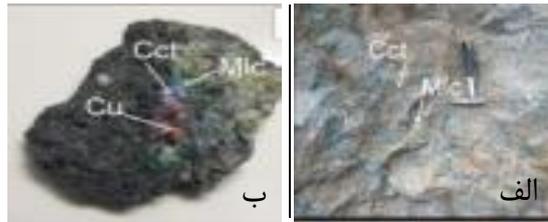


شکل ۳-۵: تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از دگرسانی‌های موجود در منطقه آسمانو، الف) دگرسانی هماتیته که حفرات و شکستگی‌های سنگ میزبان توسط کانی‌های آهن‌دار، کلریت و کربنات پر شده است، ب) دگرسانی کلریتی همراه با اکسیدهای آهن، صفحات شکستگی را پر کرده است، پ) دگرسانی زئولیتی - کربناتی در تراکی‌بازالت؛ حفرات سنگ توسط زئولیت و کربنات پر شده است، ت) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی هماتیته که در آن شکستگی‌های موجود در بلور پلاژیوکلاژ توسط اکسیدهای آهن پر شده است، ث) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی کلریتی که تبدیل‌شدگی پلاژیوکلاژ به کلریت و سریسیت و حفره پر شده توسط کربنات را نشان می‌دهد، ج) تصویر میکروسکوپی از پرشدگی حفرات توسط کربنات و زئولیت در دگرسانی زئولیتی - کربناتی (زئولیت: Zeo، کلسیت: Cal، پلاژیوکلاژ: Pl، کلریت: Chl) ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷.

۳-۴ کانه‌زایی منطقه

براساس مطالعات کانی‌شناسی و روابط بافتی در مرحله اکتشاف سطحی، دو مرحله کانی‌سازی در منطقه آسمانو قابل تشخیص است. در مرحله اول مس خالص به‌صورت پراکنده در حفرات سنگ نهشته شده است. ابعاد آن تا ۵۰۰ میکرون هم می‌رسد. گاهی به‌صورت دانه‌های ریز در داخل کالکوسیت مشاهده می‌شود. مگنتیت به‌صورت بلورهای وجه‌دار وجود دارد که در بیشتر موارد هماتیت جایگزین آن شده است. کالکوسیت نیز با ابعاد دانه‌ریز به‌صورت پراکنده در متن سنگ و در حفرات کانی‌ها مانند الیوین و پیروکسن تشکیل شده است. در مرحله دوم هیدروکسیدهای آهن در اثر دگرسانی سوپرژن از کانی‌های

آهن دار تشکیل شده است. کانی‌ها در این مرحله به صورت رگه و رگچه‌ای و گاهی به صورت پراکنده در متن سنگ مشاهده می‌شود (شکل ۳-۶-الف). مس خالص، کوپریت، مالاکیت و کالکوسیت در داخل شکستگی‌ها در این مرحله تشکیل شده‌اند (شکل ۳-۶-ب). مشخصات کانی‌سازی با کانی‌سازی مس تیپ میشیگان که از نوع رگه‌ای و پراکنده است، مشابهت‌های زیادی دارد [ابراهیمی س، ۱۳۹۱].



شکل ۳-۶: الف) رگچه‌های داربستی کالکوسیت و مالاکیت در سنگ میزبان پیروکسن آندزیت (ب) نمونه‌ای از سنگ میزبان کانی‌سازی شده همراه با کالکوسیت، مالاکیت و مس طبیعی به صورت پرکننده حفرات [ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷].

۳-۵ دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده

این عملیات صحرائی ژئوالکتریکی، با استفاده از سیستم اندازه‌گیری بارپذیری و مقاومت‌سنج ساخت شرکت GDD کانادا متشکل از یک دستگاه ترانس‌میتزر مدل TXII با توان ۵۰۰۰ وات و یک دستگاه رسیور ۱۰ کاناله مدل GRX8 (شکل ۳-۳) و نیز با دستگاه موتور برق ژاپنی با توان ۷۶۰۰ وات برای تولید برق انجام شده است (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۷: نمایش دستگاه فرستنده GDD Transmitter-TXII با توان ۵۰۰۰ وات (سمت راست) و دستگاه گیرنده GDD Receiver-GRX8 (سمت چپ).



شکل ۳-۸: نمایش دستگاه موتور برق ژاپنی با توان ۷۶۰۰ وات.

در این مطالعات از کابل‌های پتانسیل ۲۰ رشته‌ای برای برداشت‌های ۱۰ کاناله همزمان و الکترودهای غیر قطبش‌پذیر پتانسیل دست‌ساز (شکل ۳-۵) نیز استفاده شده است.



شکل ۳-۹: نمایی از کابل‌های ۲۰ رشته‌ای مخصوص برای برداشت‌های ۱۰ کاناله همزمان به همراه استفاده از الکترودهای غیر قطبش‌پذیر پتانسیل.

۳-۵-۲ دستگاه فرستنده

وظیفه این دستگاه تبدیل جریان الکتریکی متناوب ۲۲۰ ولت ۵۰ هرتز ورودی از موتور برق به جریان الکتریکی مستقیم مربعی و سپس تقویت و در نهایت ارسال آن متناسب با تنظیمات زمانی است. از مهم‌ترین خصوصیات این دستگاه (شکل ۳-۳) به‌طور اختصار می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تقویت ولتاژ با طیف‌های متعدد از ۱۵۰ ولت تا ۲۴۰۰ ولت.
- توانایی ارسال جریان الکتریکی تا ۱۰ آمپر نیز از ویژگی‌های مهم این فرستنده است. هر چند در عمل هیچگاه لزومی برای ارسال چنین آمپر زیادی به زمین وجود ندارد، اما این مسئله در زمین‌های بسیار هادی (زمین‌های اشباع شده با آب شور و رس که در خوزستان و برخی نقاط وجود دارند)، ممکن است با حداقل ولتاژ (۱۵۰ ولت) جریان الکتریکی تا ۱۰ آمپر نیز در زمین جریان یابد. در چنین حالتی به دستگاه آسیب نخواهد رسید.
- این دستگاه در حوزه زمان کار می‌کند. بر این اساس امکان تنظیم ارسال جریان مستقیم الکتریکی در فواصل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۸ ثانیه نیز امکان‌پذیر است. در مناطق شیلی و رسی از ۱ ثانیه و در مناطقی که میزان بارپذیری بسیار کم باشد، از زمان‌های بالاتر استفاده می‌شود. تجربه ثابت کرده، برای اکتشاف مناطق سولفوری در اکثر مناطق کشور زمان ۲ ثانیه مناسب‌ترین زمان برای این سیستم می‌باشد.
- امکان بررسی کیفیت اتصال الکترودهای جریان با زمین. قبل از شروع اندازه‌گیری لازم است کیفیت اتصال الکترودها مورد بررسی قرار گیرد. مقاومت الکتریکی بین الکترودهای فرستنده جریان بر روی صفحه نمایش دستگاه قابل اندازه‌گیری و مشاهده است.
- کارکرد بسیار ساده، چراغ‌های علائم خطاها و صفحه نمایش دیجیتال برای نمایش آمپر ارسالی و نیز توان مورد استفاده، از مزایای مهم این دستگاه است.
- سبکی، پوشش مقاوم در برابر حرارت، رطوبت، خاک و ضربه و نیز حجم کم در مقایسه با سایر ترانسمیترهای ساخت شرکت‌های معتبر (با توجه به توان خروجی آن‌ها) و حمل آسان از دیگر امتیازات این دستگاه به شمار می‌رود.

۳-۵-۳ دستگاه گیرنده

وظیفه این سیستم دریافت کلیه اطلاعات مورد نیاز از الکترودهای پتانسیل نصب شده بر روی زمین است. این سیستم خود از دو دستگاه تشکیل شده است:

الف) دستگاه دریافت:

دستگاه دریافت اطلاعات در هر لحظه، از یازده الکترودهمزمان اطلاعات را دریافت می‌کند. بنابراین در هر لحظه اطلاعات ۱۰ کانال ثبت می‌گردد. برای مثال اگر الکترودهای ۱ تا ۱۱ به این بخش اطلاعات برسانند، اطلاعات کانال ۱ (اطلاعات بین الکتروده ۱ و ۲) و کانال ۲ (اطلاعات بین الکتروده ۲ و ۳) و ... به صورت همزمان در حافظه ذخیره می‌گردد. به این ترتیب راندمان کار ده برابر می‌شود (شکل ۳-۳).

ب) دستگاه پردازش:

دستگاه پردازش شامل دستگاه کوچک و پیشرفته‌ای است که از طریق بلوتوث و یا کابل اطلاعات گیرنده را دریافت کرده و پس از پردازش اولیه اطلاعات، آن‌ها را به صورت داده‌های رقمی در حافظه خود ذخیره می‌نماید (شکل ۳-۶). این بخش که با سیستم عامل ویندوز موبایل کار می‌کند، خود کامپیوتر کوچکی است که دارای بسیاری از نرم‌افزارهای عمومی نظیر Word, Excel و ... بوده و نرم‌افزارهای تخصصی دستگاه GDD Program می‌باشد. صفحه نمایش بزرگ و لمسی، استفاده از این ابزار را بسیار ساده و سریع کرده است. با اجرای برنامه تخصصی این سیستم امکانات بسیار متعددی در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. از جمله مهمترین آن می‌توان به موارد زیر به اختصار اشاره نمود:

- تعیین نوع آرایش مورد استفاده.
- امکان بررسی کیفیت اتصال الکترودهای پتانسیل با زمین قبل از شروع اندازه‌گیری.
- تعیین موقعیت الکترودهای پتانسیل از نظر مسافتی نسبت به ابتدای پروفیل و معرفی آن به سیستم جهت محاسبه خودکار ضریب K که در تعیین مقاومت ویژه ظاهری به کار می‌رود.

امکانات زیادی در این پردازشگر وجود دارد که ذکر تک تک آنها خارج از موضوع این مبحث است. در نهایت داده‌های ذخیره شده در حافظه را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار واسطه‌ای که بر روی رایانه نصب می‌شود، از طریق بلوتوث و یا کابل USB از پردازشگر به رایانه منتقل کرد. فرمت‌های متفاوتی از جمله txt و یا dat و یا حتی با فرمت نرم‌افزار مدل‌سازی RES2DINV برای تخلیه اطلاعات در نظر گرفته شده است. سبکی و استحکام هر دو دستگاه از دیگر امتیازات این مجموعه محسوب می‌گردد. علاوه بر دستگاه‌های مذکور تجهیزات جانبی دیگر شامل دو دستگاه G.P.S گارمین مدل 64S (برای تعیین مختصات گمانه‌های الکتریکی)، بی‌سیم، کابل‌های رابط و فرقره‌های مربوطه، الکترودهای فلزی و غیر قطبش‌پذیر، چکش و غیره نیز مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۱۰: دستگاه پردازش (PDA) و گیرنده مدل GRx8 (عملیات صحرایی برداشت‌های IP/RES در محدوده معدن مس آسمانو).



شکل ۳-۱۱: دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده (قرقره و کابل، بی‌سیم و ...) در عملیات صحرایی برداشت‌های IP/ReS در محدوده معدن مس آسمانو.

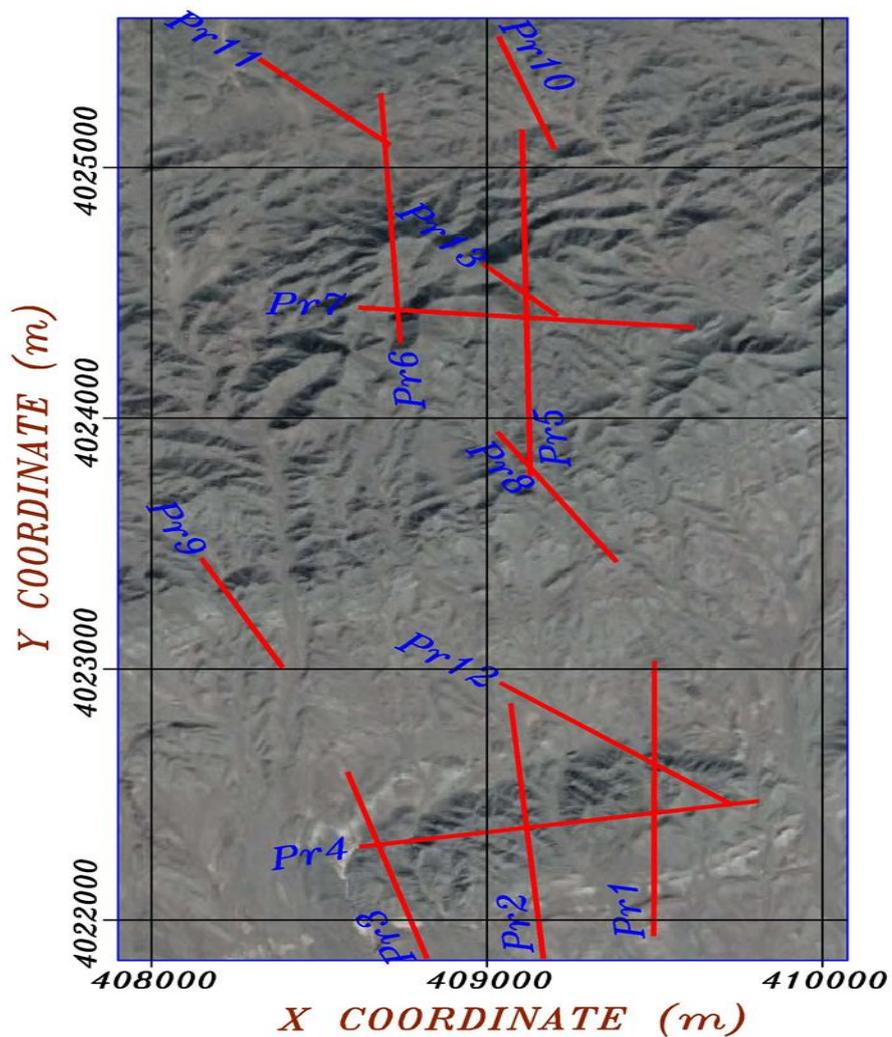
۳-۶ عملیات برداشت داده‌های صحرایی

یکی از مهم‌ترین مراحل در انجام پروژه‌های اکتشافی، مرحله برداشت داده‌های صحرایی است. باید توجه داشت که برداشت داده‌های با کیفیت بالا و با حداقل نوفه الزامی است؛ زیرا در غیر این صورت حتی پیشرفته‌ترین روش‌های پردازش و تفسیر، کارایی چندانی ندارند.

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی در منطقه، احتمال کانی‌زایی وجود دارد. به‌منظور برداشت اطلاعات در این محدوده علاوه بر روش‌های غیرمستقیم از روش‌های مستقیم مانند حفر گمانه اکتشافی و ترانشه نیز برای به‌دست آوردن اطلاعات در مطالعات قبلی استفاده شده است.

مطالعات ژئوفیزیکی محدوده معدن مس آسمانو براساس قرارداد مشاوره منعقد شده بین شرکت برین تجارت پرشیا و مهندس شهروز شفیع‌زاده (مدیریت شرکت زمین‌کاوغستر) انجام پذیرفته است. این مطالعات به‌منظور بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و زمین‌ساختی تشکیلات و تعیین موقعیت‌های کانی‌سازی‌های سولفیدی مس صورت گرفته، با انجام تعداد ۳۲۶۶ اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه و IP در

امتداد ۱۳ پروفیل و با آرایه‌های الکترودی دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی انجام شده است. عملیات صحرائی فوق با سرپرستی آقای محمد محمدزاده مقدم (به همراه نگارنده این پایان‌نامه) در تابستان ۱۳۹۸ انجام شده است. نقشه موقعیت محدوده معدن آسمانو به همراه پروفیل‌های طراحی شده در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. قبل از شروع برداشت‌های صحرائی، ابتدا نقاط ابتدایی و انتهایی هر پروفیل در سیستم مختصات UTM مشخص گردید. سپس به وسیله نرم‌افزار Map Source موقعیت هر یک از ایستگاه‌های اندازه‌گیری به فواصل مختلف از یکدیگر در امتداد هر پروفیل تعیین و به GPS دستی انتقال داده شد. نقاط پروفیل با استفاده از GPS دستی بر روی زمین با رنگ و سنگ‌چین نشانه‌گذاری می‌شوند. سپس الکترودهای غیرقطبش‌پذیر پتانسیل و الکترودهای فلزی جریان در ایستگاه‌های مختلف قرار می‌گیرند سپس کابل‌ها در مسیر پروفیل پهن می‌شوند و بعد از بررسی عوامل مختلف اقدام به برداشت داده‌ها صورت می‌گیرد. از آن جا که برداشت‌های ژئوفیزیک تحت تأثیر شرایط توپوگرافی دچار خطا می‌گردند، لذا باید اثر توپوگرافی را در هنگام تهیه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی تصحیح نمود. برای این منظور اطلاعات ارتفاعی هر ایستگاه با GPS برداشت می‌شود تا در مدل‌سازی‌ها از آن‌ها استفاده شود. برای ایجاد سطح تماس بیشتر الکترودهای فرستنده جریان الکتریکی با سطح زمین، سعی شده در ایستگاه‌هایی که جریان ضعیف است از چندین الکتروود فلزی در هر ایستگاه فرستنده جریان به همراه مقداری آب نمک استفاده شود.



CLIENT: BARIN TEJARAT PERSIA COMPANY		GEOPHYSICAL SURVEY in ASMANO CUPPER MINE AREA
OBSERVER: PAYA MADAN CONSULTING ENGINEERING		LOCATION MAP
CONSULTANT: SHAHROOZ SHAFIZADEH		
Scale: 1:20000		Geoelectrical Profiles <u>Pr1</u> & it's Number

شکل ۳-۱۲: نقشه موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک IP/ReS منطقه آسمانو (جانمایی شده بر روی تصویر ماهواره‌ای).

در محدوده معدن مس آسمانو، پروفیل‌های ۱۳ گانه با حداکثر $n=12$ و با حداکثر عمق تجسس حدود ۲۰۰ متر انجام گردیده است. مشخصات پروفیل‌های برداشت شده در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول ۱-۳: مشخصات فنی برداشت‌های IP/ReS در محدوده معدن مس آسمانو.

شماره پروفیل	ناحیه برداشت شده	نوع آرایه	فاصله الکترودی (متر)	طول فاصله برداشت (متر)	تعداد کل اندازه‌گیری	تعداد اندازه‌گیری سالم	تعداد اندازه‌گیری ضعیف
۱	جنوبی	دوقطبی - دوقطبی	۳۰	۱۱۱۰	۳۳۳	۳۲۲	۱۱
۲	جنوبی	دوقطبی - دوقطبی	۳۰	۱۰۲۰	۲۳۱	۲۲۸	۳
۳	جنوبی	دوقطبی - دوقطبی	۲۰	۷۸۰	۳۷۲	۳۴۲	۳۰
۴	جنوبی	دوقطبی - دوقطبی	۴۰	۱۲۰۰	۲۵۸	۲۵۷	۱
۵	شمالی	دوقطبی - دوقطبی قطبی - دوقطبی	۴۰	۱۴۰۰	۴۸۹	۴۵۱	۳۸
۶	شمالی	دوقطبی - دوقطبی	۴۰	۱۰۰۰	۱۷۸	۱۷۸	۰
۷	شمالی	دوقطبی - دوقطبی	۴۰	۱۰۰۰	۱۸۹	۱۸۹	۰
۸	میانی	دوقطبی - دوقطبی	۴۰	۶۳۰	۱۵۳	۱۵۳	۰
۹	میانی	دوقطبی - دوقطبی	۳۰	۵۰۰	۲۰۴	۲۰۲	۲
۱۰	شمالی	دوقطبی - دوقطبی	۲۰	۴۸۰	۱۸۳	۱۸۲	۱
۱۱	شمالی	دوقطبی - دوقطبی	۲۰	۵۲۰	۲۰۹	۲۰۹	۰
۱۲	جنوبی	دوقطبی - دوقطبی	۲۰	۸۴۰	۳۸۴	۳۵۰	۳۴
۱۳	شمالی	دوقطبی - دوقطبی	۲۰	۳۰۰	۸۳	۸۳	۰
		جمع		۱۰۷۸۰	۳۲۶۶	۳۱۴۶	۱۲۰

فصل چهارم

مدل سازی و تفسیر مقطع دو بعدی مقاومت ویژه و قطبش القایی

۴-۱ مقدمه

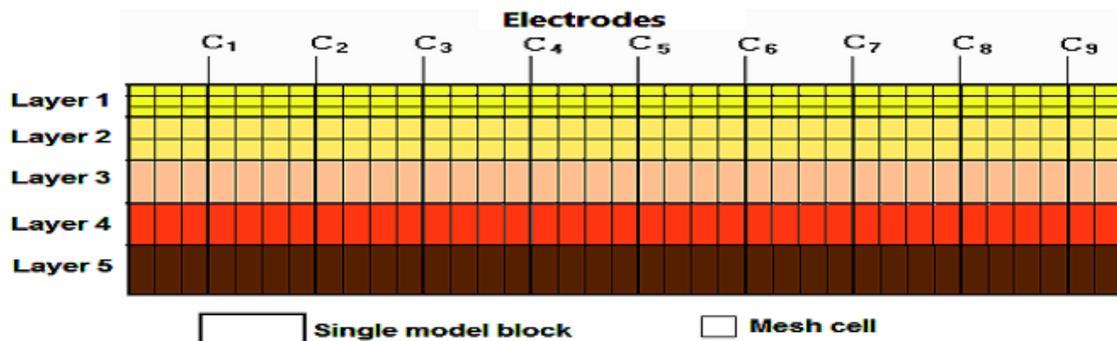
مدل‌سازی و تفسیر داده‌های خام ژئوفیزیکی عبارت است از تعیین بی‌هنجاری‌های و ویژگی‌های آن‌ها از روی تغییراتی که در داده‌ها مشاهده می‌گردد. در تفسیر کیفی، بیشتر انواع ساختارهای ایجاد کننده بی‌هنجاری‌ها، جهت، امتداد و میزان گسترش آن‌ها مورد نظر قرار می‌گیرد. در این حالت شکل، عمق، گسترش و امتداد و خواص فیزیکی بی‌هنجاری‌ها به‌طور نسبی تعیین می‌گردد.

با توجه به مطالبی که در فصل دوم بیان شد؛ روش‌های مدل‌سازی وارون در مقایسه با روش‌های مدل‌سازی پیشرو سرعت بالاتری دارند، همچنین بی‌هنجاری‌های زیرسطحی ساختاری کاملاً پیچیده دارند. بنابراین مدل ارائه شده باید با تعداد محدودی پارامتر قابل کنترل باشد؛ تا بهترین و بهینه‌ترین مدلی را که با داده‌های صحرایی و ویژگی‌های زمین‌شناسی و دیگر اطلاعات منطقه هم‌خوانی داشته باشد، به‌دست آورد؛ که این مهم با روش مدل‌سازی وارون صورت می‌گیرد [Loke and Barker, 1995]. در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی دوبعدی داده‌های برداشت شده از نرم‌افزار RES2DINV استفاده شده است. در این نرم‌افزار یک روش بهینه‌سازی وجود دارد که از تعدیل مقدار مقاومت‌ویژه بلوک‌های مدل، اختلاف بین مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را می‌کاهد. مقدار این اختلاف با ریشه میانگین مربعات خطا بیان می‌شود. در ادامه اشاره‌ای به شیوه مدل‌سازی و برخی از ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌شود.

۴-۲ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP

نتایج اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه و IP در این مطالعات به‌صورت مقاطع دوبعدی حاصل از مدل‌سازی وارون ارائه شده است. این مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به‌طور هم‌زمان به‌وسیله نرم‌افزار RES2DINV انجام شده است. نرم‌افزار RES2DINV یک برنامه کامپیوتری اتوماتیک است؛ که مدل‌های دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP را برای ساختارهای زیرسطحی به کمک داده‌های حاصل از برداشت صحرایی، تهیه

می‌کند. مدل‌سازی دوبعدی در این نرم‌افزار با مدل‌سازی معکوس تعداد زیادی بلوک‌های مستطیلی (شکل ۱-۵) انجام می‌شود. توزیع و اندازه بلوک‌ها بستگی به توزیع داده‌های برداشت دارد [Loke, 2014].



شکل ۴-۱: نمایشی از بلوک‌ها و مش‌بندی‌های استفاده شده در مدل‌سازی مستقیم [Loke, 2014].

در این نرم‌افزار مدل‌سازی وارون با روش اجزاء محدود و تفاضل محدود برای تعداد زیادی از داده‌های صحرائی قابل انجام است. امکان تصحیح توپوگرافی روی شبکه داده‌ها نیز مقدور است. روش تفاضل محدود چون مش‌های آن مستطیلی هستند؛ برای زمین‌های بدون توپوگرافی استفاده می‌شود و روش اجزاء محدود به دلیل این‌که مش‌های آن مثلثی و دوزنقه‌ای هستند، برای زمین‌های دارای توپوگرافی استفاده می‌شود [Loke, 2014].

داده‌های مقاومت‌ویژه و IP حاصل از به‌کارگیری آرایه‌های ونر، قطبی-قطبی، دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی و آرایه‌های ترکیبی در این نرم‌افزار قابل مدل‌سازی‌اند. این نرم‌افزار، مدل‌سازی مقاومت‌ویژه و IP را به‌طور هم‌زمان انجام می‌دهد. هدف از وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، ارائه مدلی است که بیشترین تطابق را با داده‌های صحرائی 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 صحرائی حاصل گردد. همچنین مدل به‌دست آمده باید با داده‌های زمین‌شناسی تطبیق داده شود تا صحت آن نیز از نظر زمین‌شناسی مورد تأیید قرار گیرد [Loke, 2004].

از ۱۳ پروفیل اجرا شده در این پروژه فقط پروفیل شماره ۵ با دو آرایه دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی برداشت شده است و مابقی پروفیل‌ها فقط با آرایه دوقطبی- دوقطبی برداشت شده اند. مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده در محدوده معدن آسمانو در بخش‌های شمالی و جنوبی و همچنین دو پروفیل در بخش میانی به اجرا در آمده است.

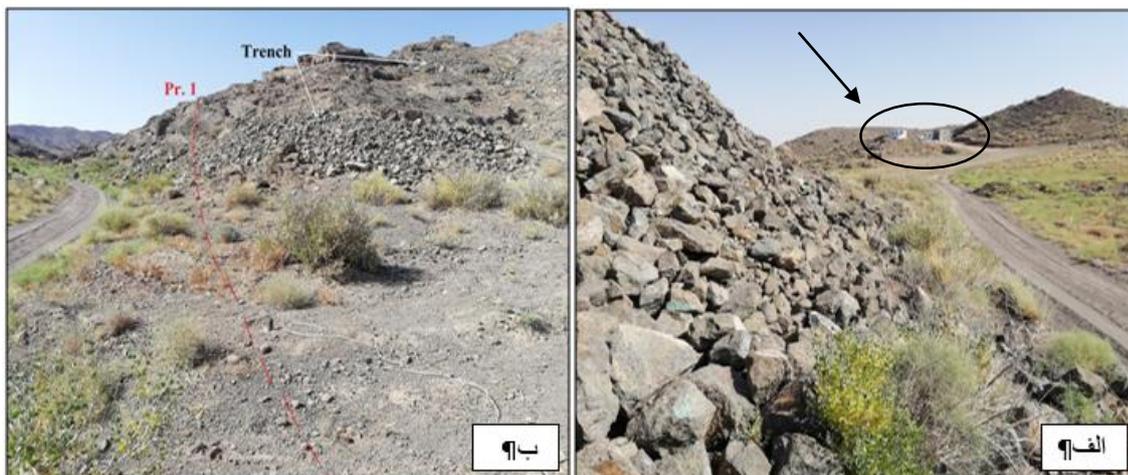
* تفسیر پروفیل‌های محدوده جنوبی منطقه اکتشافی آسمانو:

پروفیل‌های شماره ۱ تا ۴ در محدوده جنوبی معدن آسمانو برداشت شده است که در ادامه به تفاسیر مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.1

اولین پروفیل برداشت شده در منطقه می‌باشد که با آزمایشات صفر درجه شمالی- جنوبی است. از آرایه دوقطبی- دوقطبی برای برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و بارپذیری استفاده شده است. طول پروفیل ۱۱۱۰ متر با فاصله الکترودی ۳۰ متر (در مدل‌سازی از نصف فاصله الکترودی استفاده شده است) است و در جهت شمال به جنوب برداشت داده‌های صحرایی صورت گرفته است. همچنین قسمت انتهایی پروفیل از مجاور کانکس‌های موجود در منطقه (شکل ۴-۲-الف) و وسط پروفیل نیز از کنار ترانشه‌های موجود در منطقه (شکل ۴-۲-ب) عبور می‌کند. موقعیت اولین الکتروود جریان نسبت به مبدأ صفر است و نیز موقعیت آخرین الکتروود پتانسیل ۱۱۱۰ متر نسبت به مبدأ می‌باشد. در اولین برداشت، الکتروودهای جریان در موقعیت‌های ایستگاه صفر و ۳۰ متر و تعداد ۱۲ الکتروود قطبش‌ناپذیر پتانسیل که اولین آن در ایستگاه ۹۰ متر از مبدأ و آخرین آن در ۴۲۰ متر از مبدأ قرار گرفت. فرستنده ۱۰ کاناله است و ابتدا ۸ قرائت و سپس ۴ قرائت انجام می‌شود. در مرحله بعد الکتروود جریان از ایستگاه صفر به ایستگاه ۶۰ متر منتقل می‌شود و تا ۴۲۰ متر قرائت انجام می‌گیرد، زیرا کوتاه بودن کابل پتانسیل اجازه اندازه‌گیری مقادیر تا انتهای پروفیل را نمی‌دهد و باید طی چند مرحله با پهن کردن دوباره کابل پتانسیل روی زمین اندازه‌گیری صورت گیرد تا قرائت‌های بعدی تا انتهای پروفیل تکمیل شود. مدل‌سازی وارون داده‌های

مقاومت ویژه و بارپذیری در امتداد این پروفیل با آرایه و فاصله الکترودی ذکر شده، می‌تواند تا عمق ۱۰۰ متر درون زمین را پوشش دهد. در طول این پروفیل ۳۳۱ نقطه برای دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که دارای تعداد ۱۱ اندازه‌گیری ضعیف است. با توجه به شکل (۴-۵) ابتدا و انتهای پروفیل با توجه به شکل دوزنقه‌ای مقطع نیازی به اندازه‌گیری نبوده زیرا پاسخ از عمق خیلی کم نزدیک سطح زمین می‌دهد و این کار باعث کاهش زمان عملیات صحرائی می‌شود. با در نظر گرفتن طراحی پروفیل‌ها، اندازه طول آن‌ها بیشتر از طولی که برای بررسی نیاز است در نظر گرفته شده است تا محدوده اصلی تا عمق‌های بالا مورد بررسی قرار گیرد.



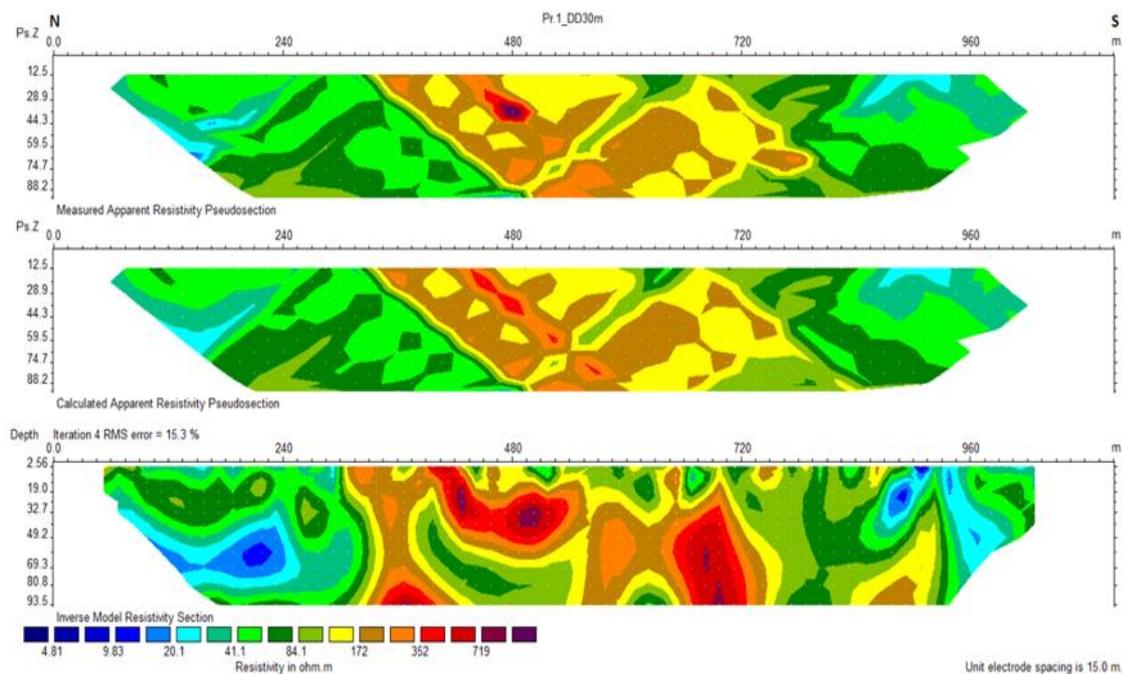
شکل ۴-۲: الف) نمایی از جهت شمال به جنوب پروفیل Pr.1 و عبور از کنار کانکس‌های موجود در منطقه، ب) نمایی از جهت جنوب به شمال محدوده وسط پروفیل Pr.1 که از کنار ترانشه‌ها عبور کرده است.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۱) آمده است.

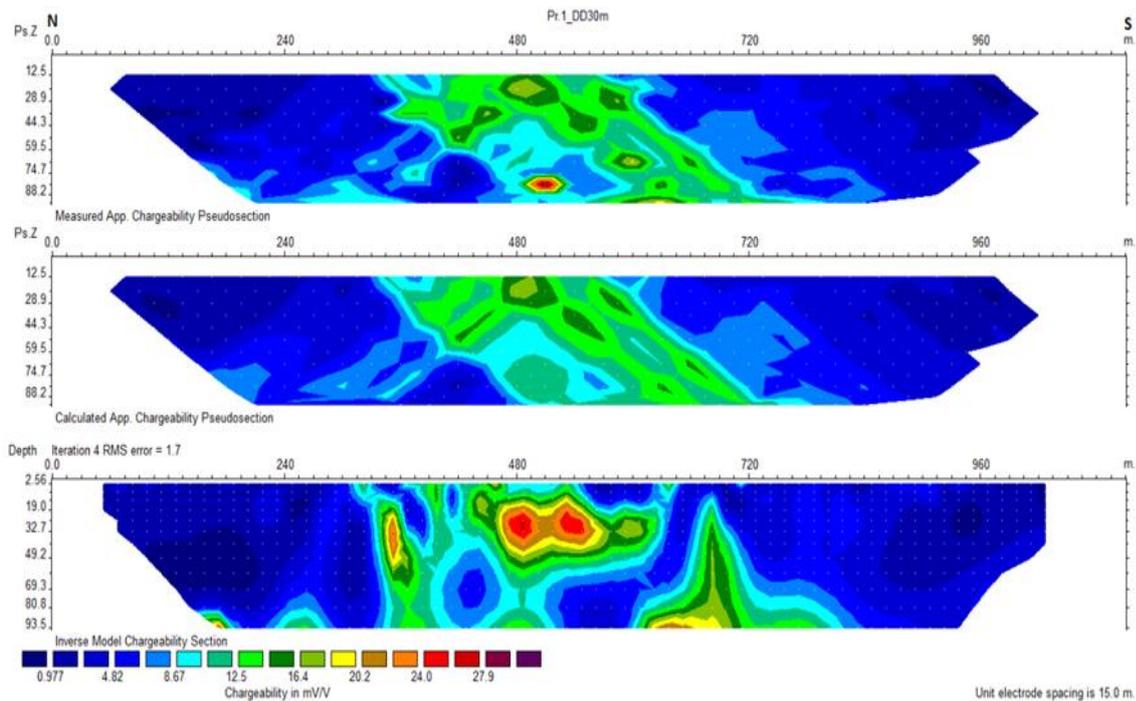
جدول ۴-۱: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل pr.1.

انتهای جنوبی مقطع			ابتدای شمالی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۹۴۹۸	۴۰۲۱۹۳۸	۱۲۲۳	۴۰۹۵۰۰	۴۰۲۳۰۳۲	۱۲۶۲	۳۰	دوقطبی - دوقطبی

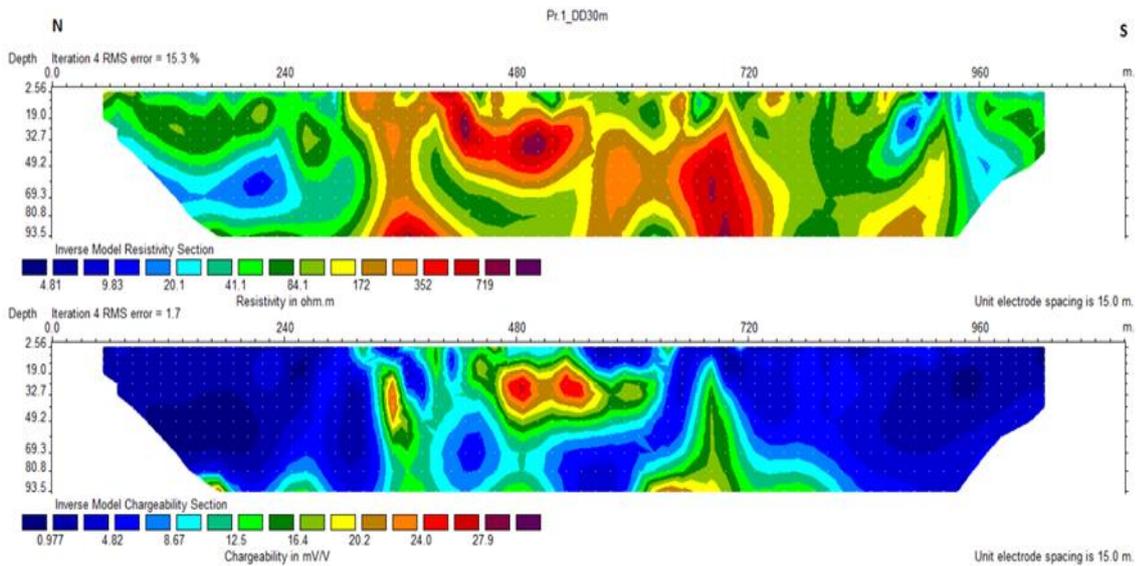
در شکل (۳-۴) شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه و در شکل (۴-۴) شبه مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل نشان داده شده است. همچنین در شکل (۵-۴) مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون نشان داده شده است که خطای RMS با ۴ تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۱۵,۳٪ و برای مدل بارپذیری ۱,۷٪ است. همچنین مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل با اعمال توپوگرافی منطقه با استفاده از نرم افزار ذکر شده در شکل (۶-۴) نمایش داده شده است. پروفیل Pr.12 در فاصله ۴۰۷ متری و پروفیل Pr.4 در ۶۱۰ متری از پروفیل Pr.1 عبور و آن را قطع می کنند. مقدار مقاومت ویژه بین ۴,۸۱ تا بالغ بر ۷۱۹ یا کمی بیشتر بر حسب اهم- متر می باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۰,۹۸ تا ۲۷,۹ میلی ثانیه متغیر است.



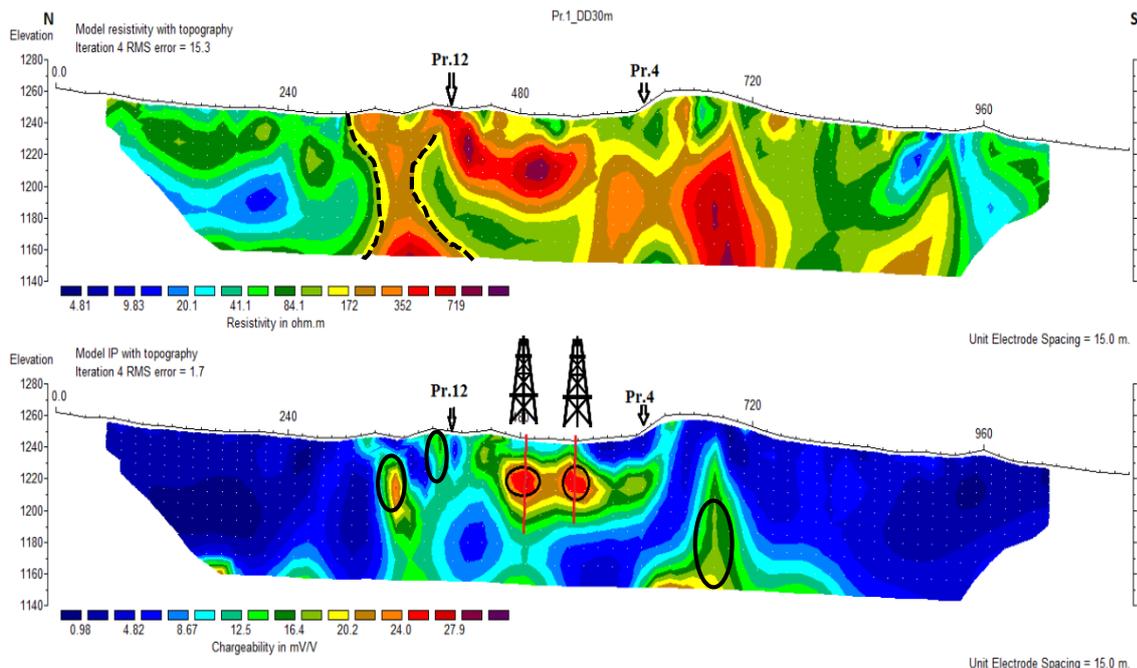
شکل ۳-۴: شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون در طول پروفیل Pr.1.



شکل ۴-۴: شبه مقاطع و مقطع دوبعدی بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون در طول پروفیل Pr.1.



شکل ۴-۵: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری بدون توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.1.



Horizontal scale is 17.36 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model cartoon elevation = 1.36

شکل ۴-۶: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.1 (محل تقاطع با پروفیل‌های Pr.12 و Pr.4 با فلش، ناحیه گسلس با خط چین و موقعیت‌های حفاری با نماد حفاری مشخص شده است).

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، سنگ میزبان کانی‌سازی مس تراکی‌اندزیت‌های بازالتی مربوط به دوران ائوسن می‌باشند. اندزیت‌ها و بازالت‌ها مقاومت ویژه الکتریکی بالایی از خود نشان می‌دهند. لذا در بخش‌های مقاوم مقطع، موقعیت‌هایی که مقادیر بارپذیری قابل توجهی داشته باشند، می‌توانند احتمال بالایی برای کانی‌سازی مس داشته باشند. با توجه به این نکات در مدل‌سازی دوبعدی و تفسیر داده‌ها، موقعیت‌های دارای احتمال کانی‌سازی مس قابل شناسایی است. در ابتدا و انتهای مقطع مقدار بارپذیری پایین است که نشان‌دهنده عدم وجود کانسار فلزی پراکنده یا رگه‌ای می‌باشد، همچنین مقدار مقاومت ویژه در این نواحی کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل واحدهای رسوبی یا آهک مارنی باشد. تغییرات جانبی و عمقی بالا در مرکز پروفیل در نزدیکی ترانشه‌ها و باطله‌هایی است که از قبل انجام شده است. با توجه به این نکات و نتایج حاصل از مدل‌سازی، در فاصله ۰ تا ۳۲۰ متر و نیز فاصله ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر این پروفیل نمی‌توان انتظار کانی‌سازی مس حتی ضعیف را داشت، اما در فاصله ۳۲۰ تا ۸۰۰ متر این پروفیل افزایش مقادیر بارپذیری مشاهده می‌شود و نیز مقادیر مقاومت ویژه در این محدوده

نیز افزایش یافته که می‌تواند نشانی از کانی‌سازی مس باشد. همچنین لایه‌های منظم در سازندها و روباره‌های رسوبی مشاهده نمی‌شود که می‌تواند نشان از احتمال تکتونیزه بودن شدید منطقه باشد. در فاصله ۳۲۰ تا ۴۰۰ متر با توجه به تغییرات جانبی و عمقی مقاومت‌ویژه و بارپذیری، احتمال بالای گسل خوردگی سنگ‌ها وجود دارد. این محدوده به‌عنوان یکی از نقاط حفاری در عمق بین ۳۵ تا ۵۰ متر پیشنهاد می‌گردد. همچنین فاصله ۴۰۰ تا ۵۵۰ متر و عمق محدود به ۲۰ تا ۵۰ متر و فاصله ۶۵۰ تا ۷۰۰ متر و عمق محدود به ۵۰ تا ۶۰ متر نشان‌دهنده موقعیت‌هایی با احتمال کانی‌سازی می‌باشند. بنابراین اگر روی این پروفیل حفاری انجام شود، اولویت‌های حفاری طبق جدول (۲-۴) پیشنهاد می‌گردد:

جدول ۲-۴: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.1.

نام پروفیل	فاصله نسبت به ابتدای پروفیل	عمق حفاری (متر)	اولویت
پروفیل Pr.1	۴۸۸	۵۰	۱
	۵۳۳	۵۰	۱
	۳۹۰	۵۰	۲
	۳۵۰	۵۰	۳

۲-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.2

این پروفیل در طراحی‌ها دارای راستای شمالی- جنوبی است که برداشت داده‌های صحرایی در راستای آن به طول ۱۰۲۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۳۰ متر در جهت مخالف جنوب به شمال صورت گرفته است. این پروفیل در جنوب محدوده معدن و با فاصله تقریبی ۳۶۰ متری در غرب پروفیل Pr.1 و موازی آن قرار گرفته است. روش کار برداشت این پروفیل و پروفیل‌های دیگر با توجه به امکانات و نحوه برداشت همانند پروفیل Pr.1 می‌باشد. در طول این پروفیل ۲۳۱ نقطه برای دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که دارای تعداد ۳ اندازه‌گیری ضعیف است. در ضمن با توجه به فاصله الکترودی، این اندازه‌گیری تا عمق ۱۰۰ متر از زمین را پوشش می‌دهد. پروفیل Pr.4 در فاصله ۵۲۵ متر از پروفیل Pr.2 عبور و آن را قطع می‌کند.

همچنین در راستای این پروفیل سازندهای آندزیتی و رخنمون‌های کانی‌سازی مس به چشم می‌خورد (شکل ۴-۷).



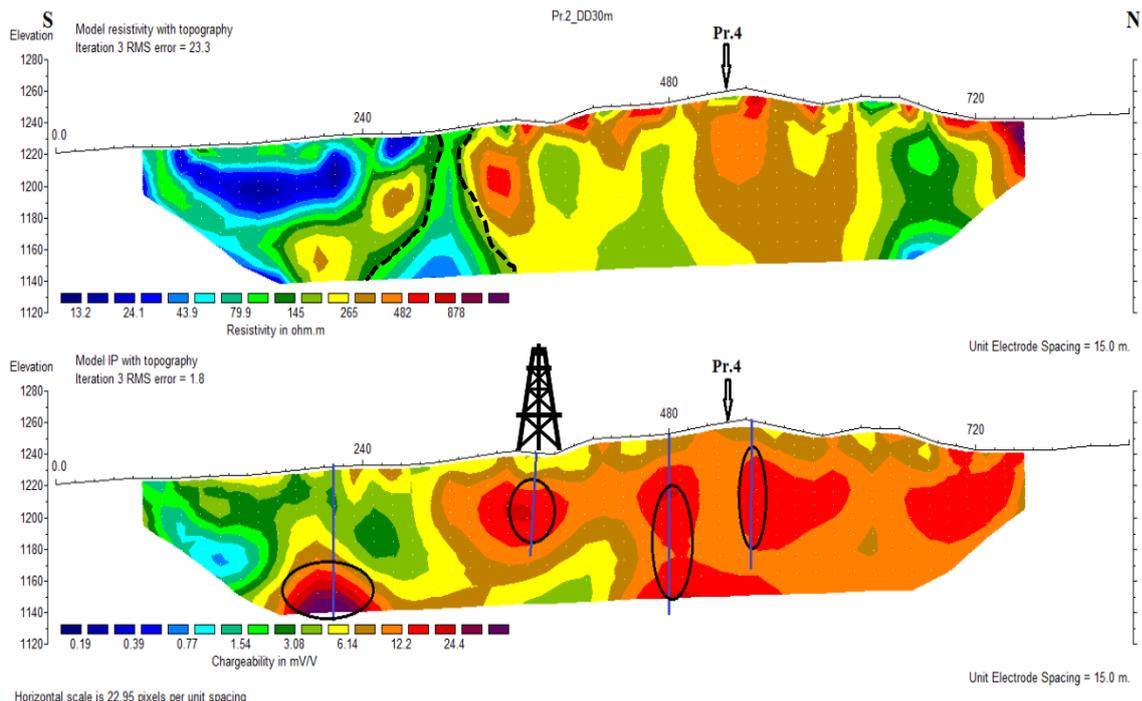
شکل ۴-۷: الف) نمایی از آغشتگی سنگ‌های رخنمون یافته سیلیسی شده و کانی‌سازی مس در محدوده پروفیل Pr.2، ب و ج) نمایی از پروفیل Pr.2 و برونزدهای سنگی در حین عملیات صحرایی برداشت ژئوفیزیکی.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۳) آمده است.

جدول ۴-۳: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.2.

انتهای شمالی مقطع			ابتدای جنوبی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۹۰۷۱	۴۰۲۲۸۶۴	۱۲۵۴	۴۰۹۱۶۹	۴۰۲۱۸۴۷	۱۲۲۱	۳۰	دوقطبی - دوقطبی

مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل دارای خطای RMS با ۳ تکرار، در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت‌ویژه ۲۳,۳٪ و برای مدل بارپذیری ۱,۸٪ است. مقدار مقاومت‌ویژه بین ۱۳,۲ تا بالغ بر ۸۷۸ یا کمی بیشتر بر حسب اهم-متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۰,۱۹ تا ۲۴,۴ بر حسب میلی‌ثانیه متغییر است. در شکل (۴-۸) مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری با آرایه دوقطبی-دوقطبی مربوط به پروفیل Pr.2 با توپوگرافی نمایش داده شده است که به تفسیر آن می‌پردازیم.



شکل ۴-۸: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.2 (محل تقاطع با پروفیل Pr.4 با فلش، موقعیت بی‌هنجاری‌ها با بیضی و ناحیه گسلش با خط چین مشخص شده است).

در مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری پروفیل Pr.2 مشاهده می‌شود که در بخش‌های جنوبی و بخشی از عمق‌های شمالی مقطع، مقادیر مقاومت ویژه بسیار پایین است که نشان‌دهنده عدم وجود کانی‌سازی مس می‌باشد. همچنین افزایش مقادیر بارپذیری در قسمت شمالی مقطع نمی‌تواند نشان‌دهنده کانی‌سازی مس باشد، زیرا همانطور که ذکر شد مقاومت ویژه در این بخش‌ها بسیار پایین است و افزایش مقادیر بارپذیری می‌تواند به دلیل وجود رس در میان سازندهای رسوبی مانند مارن آهکی باشد. بخش‌های مرکزی علاوه بر افزایش مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی افزایش مقادیر بارپذیری را نیز به همراه دارد که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، سنگ میزبان سنگ‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی می‌توانند در این محدوده همراه با کانی‌سازی مس باشند. در فاصله ۰ تا ۳۳۰ متر این پروفیل مقدار مقاومت ویژه پایین است و این موقعیت‌ها نمی‌توانند کانی‌سازی مس داشته باشند و افزایش مقادیر بارپذیری در عمق‌های بالا در فاصله بین ۱۸۰ تا ۲۵۵ متر با توجه به احتمال وجود خطای سیستماتیک مدل‌سازی و همچنین قرارگیری آن در کناره‌های مقطع مدل‌سازی شده نباید چندان مورد توجه قرار گیرد با وجود این که در این موقعیت مقاومت ویژه الکتریکی نیز مقدار پایینی دارد. بنابراین با

توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و در نظر گرفتن آندزیتی بودن سنگ میزبان کانی‌سازی مس، در موقعیت‌های فاصله حدود ۳۴۵ تا ۴۰۰ متر و در عمق‌های محدود به ۲۰ تا ۵۰ متر تغییرات مقاومت‌ویژه و بارپذیری با شدت بالایی قابل مشاهده است و محتمل‌ترین موقعیت کانی‌سازی مس می‌تواند باشد. در فاصله بین ۴۵۰ تا نزدیک ۶۰۰ متر در عمق‌های محدود به ۳۰ تا ۸۰ متر تعدادی از موقعیت‌ها نیز می‌توانند نشان از احتمال بالای کانی‌سازی در امتداد پروفیل را داشته باشند. همچنین در فاصله ۳۰۰ تا ۳۴۵ متر با توجه به روند تغییرات منحنی‌های میزان مقاومت‌ویژه الکتریکی و تأثیری که بر روی مقادیر بارپذیری داشته است، احتمال گسل‌خوردگی سنگ‌ها بالا است. در این پروفیل نیز عدم وجود روندهای لایه‌های منظم در سازندهای رسوبی؛ می‌تواند نشان از احتمال بالای تکتونیزه بودن منطقه داشته باشد. بنابراین در امتداد پروفیل Pr.2 اولویت‌های حفاری پیشنهادی می‌تواند به ترتیب جدول (۴-۴) مورد توجه باشند.

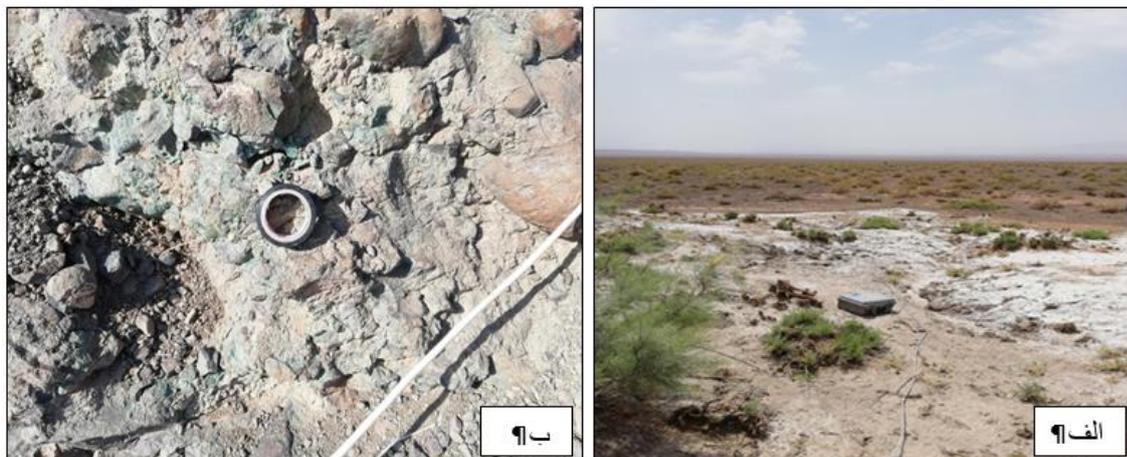
جدول ۴-۴: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.2.

اولویت	عمق حفاری (متر)	فاصله نسبت به ابتدای پروفیل	نام پروفیل
۱	۵۰	۳۷۰	پروفیل Pr.2
۲	۸۰	۵۵۰	
۳	۸۰	۴۸۳	
۴	۱۰۰	۲۱۸	

۴-۲-۳ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.3

پروفیل Pr.3 دارای راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی است که برداشت داده‌های صحرایی در این پروفیل به طول ۷۸۰ متر با آرایه دوقطبی - دوقطبی و فاصله الکترودی ۲۰ متر صورت گرفته است. این پروفیل در جنوب محدوده معدن با فاصله تقریبی ۴۵۰ متری در غرب پروفیل Pr.2 واقع شده است. در طول این پروفیل ۳۷۲ نقطه برای دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که دارای تعداد ۳۰ اندازه‌گیری ضعیف می‌باشد. با توجه به فاصله الکترودی، این اندازه‌گیری تا عمق ۷۰ متر از زمین را پوشش می‌دهد. همچنین این پروفیل دارای توپوگرافی نرم‌تری نسبت به دو پروفیل قبلی

می‌باشد و در طول آن دو ایستگاه ۶۰۰ و ۶۲۰ متر در نم‌زار و در ارتفاع کمتری نسبت به بقیه ایستگاه‌ها واقع شده اند (شکل ۴-۱۴-الف).



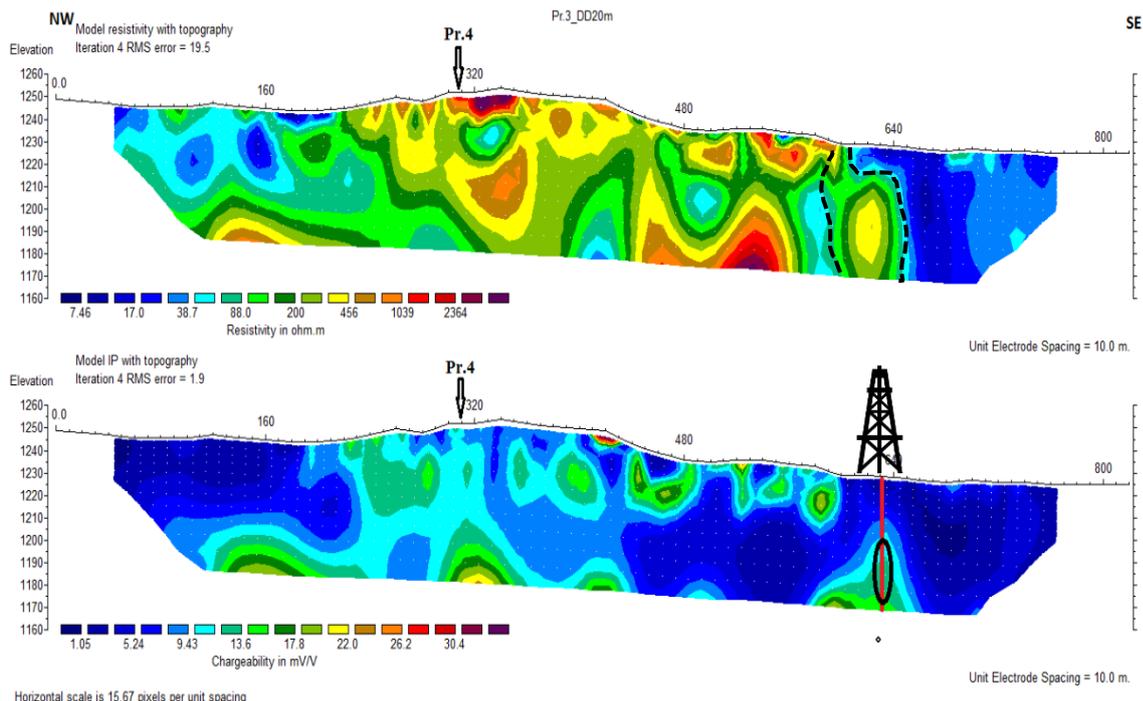
شکل ۴-۹: الف) نمایی از امتداد پروفیل Pr.3 و عبور از نم‌زار، ب) نمایی از سنگ‌های رخنمون یافته در محدوده پروفیل Pr.3 و کانی‌سازی مس.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل در سیستم مختصات UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۵) آمده است.

جدول ۴-۵: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.3.

انتهای جنوب شرقی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			ابتدای شمال غربی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
۴۰۸۸۲۲	۴۰۲۱۸۴۸	۱۲۲۵	۴۰۸۵۸۵	۴۰۲۲۵۹۰	۱۲۴۹	۲۰	دوقطبی - دوقطبی

در شکل (۴-۱۰) مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری با آرایه دوقطبی-دوقطبی و فاصله الکترودی ۲۰ متر (در مدل‌سازی نصف فاصله الکترودی استفاده شده است) مربوط به پروفیل Pr.3 با توپوگرافی نمایش داده شده است. پروفیل Pr.4 در فاصله حدود ۳۱۰ متری از پروفیل Pr.3 عبور و آن را قطع می‌کند. خطای RMS با ۴ تکرار در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت‌ویژه ۱۹,۵٪ و برای مدل بارپذیری ۱,۹٪ است. مقدار مقاومت‌ویژه بین ۷,۴۶ تا بالغ بر ۲۳۶۴ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم-متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۱,۰۵ تا ۳۰,۴ بر حسب میلی‌ثانیه متغیر است.



شکل ۴-۱۰: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.3 (محل تقاطع با پروفیل Pr.4 با فلش، موقعیت بی‌هنجاری با بیضی و ناحیه گسلش با خط چین مشخص شده است).

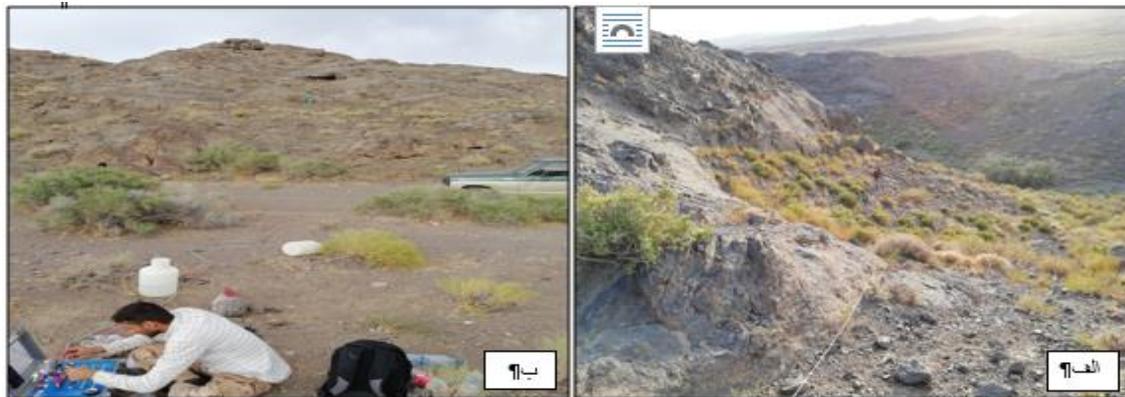
مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری در شکل (۴-۱۰) مربوط به این پروفیل نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در این مقطع نسبت به پروفیل‌های قبلی پایین‌تر است که دلیل آن می‌تواند با توجه به قرارگیری این پروفیل در اطراف رخنمون‌های سنگی باشد (شکل ۴-۹ ب). همچنین با توجه به مقاطع می‌توان بیان کرد که در طول این پروفیل سازندهای غالب در عمق، مرتبط با سنگ‌های رسوبی از جمله آهک مارنی است. همچنین انتهای مقطع با توجه به بارپذیری پایین و مقاومت ویژه پایین که در ارتفاع کمتر و هموارتری نسبت به ایستگاه‌های قبل دارد نشان از آبرفتی بودن همراه با ذرات رس دارد (مقدار بارپذیری این محدوده از ۱ تا کمتر از ۵ میلی‌ثانیه است) که احتمال کانی‌سازی ندارد (ابتدای مقطع نیز چنین شرایطی دارد). براساس اطلاعات زمین‌شناسی منطقه سنگ میزبان کانی‌سازی مس از نوع آندزیت و تراکی‌آندزیت‌های مربوط به دوران ائوسن هستند که دارای مقاومت ویژه الکتریکی بالایی می‌باشند. بنابراین فقط در بخش‌های با عمق کم در فاصله بین ۳۵۰ تا ۴۸۰ متر و نیز در بین عمق‌های متوسط تا عمق‌های بالا در فاصله حدود ۶۰۰ تا ۶۵۰ متر احتمال کانی‌سازی مس وجود دارد. احتمال کانی‌سازی مس در موقعیت ذکر شده دوم بیشتر است و تقریباً می‌توان گفت که

تنها موقعیت کانی‌سازی مس در طول این پروفیل است و احتمال کانی‌سازی مس در دیگر موقعیت‌های مکانی طول این پروفیل بسیار پایین است. البته باید توجه داشت که در فاصله ۶۰۰ تا ۶۵۰ متر منحنی‌های میزان مقاومت ویژه الکتریکی، تغییرات زیادی دارند که می‌تواند نشان‌دهنده گسل خوردگی بالای سنگ‌ها در این فاصله باشد (در شرایط گسلش واحدهای خرد شده ایجاد می‌شوند که احتمال جایگزینی فضاهای خالی آنها با مواد رسی نیز بالا است). بنابراین این احتمال وجود دارد که بارپذیری بالا در فاصله ۶۰۰ تا ۶۵۰ متر در عمق متوسط به بالا به دلیل وجود مواد رسی باشد که در تفسیر این موقعیت‌ها باید همه جوانب در نظر گرفته شود. در ضمن با نکاتی که بیان شد می‌توان ذکر کرد که رخنمون‌های نشان داده شده در شکل (۴-۹-ب) سطحی می‌باشند و گسترش عمقی ندارند. بنابراین اگر در طول این پروفیل تصمیم به حفر گمانه اکتشافی گرفته شود، چنین حفاری‌هایی در فاصله ۶۳۰ متر و با عمق حداکثر ۶۰ متر انجام شود. هر چند این موقعیت به‌عنوان اولویت کانی‌سازی مطرح می‌شود نه حفاری.

۴-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.4

این پروفیل دارای راستای غربی- شرقی بوده و در محدوده جنوبی معدن و عمود بر سه پروفیل قبلی می‌باشد. طول این پروفیل در حدود ۱۲۰۰ متر است که با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۴۰ متر، برداشت داده‌های ژئوفیزیکی در طول آن صورت گرفته است. در طول این پروفیل ۲۵۸ نقطه برای دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است و دارای تعداد یک اندازه‌گیری ضعیف است. با توجه به فاصله الکترودی، این اندازه‌گیری تا عمق ۱۳۴ متر از زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل در توپوگرافی بالاتری نسبت به پروفیل‌های محدوده جنوبی معدن قرار دارد و سه پروفیل قبلی را قطع می‌کند. نمایی از امتداد این پروفیل در شکل (۴-۱۱) مشاهده می‌شود و قسمتی از آن از مجاور کانکس‌های موجود در منطقه عبور می‌کند (شکل ۴-۱۲-الف). در امتداد این پروفیل برخی از

برونزدهای کانی‌سازی مس مشاهده شده است. شکل (۴-۱۲-ب) محدوده اطراف پروفیل Pr.4 را نشان می‌دهد که کانی‌سازی مس در آن برونزد دارد.



شکل ۴-۱۱: الف) نمایی از انتهای غربی پروفیل Pr.4، ب) نمایی از مسیر پروفیل Pr.4 (دید به سمت شرق) در حین عملیات صحرایی برداشت ژئوفیزیکی.



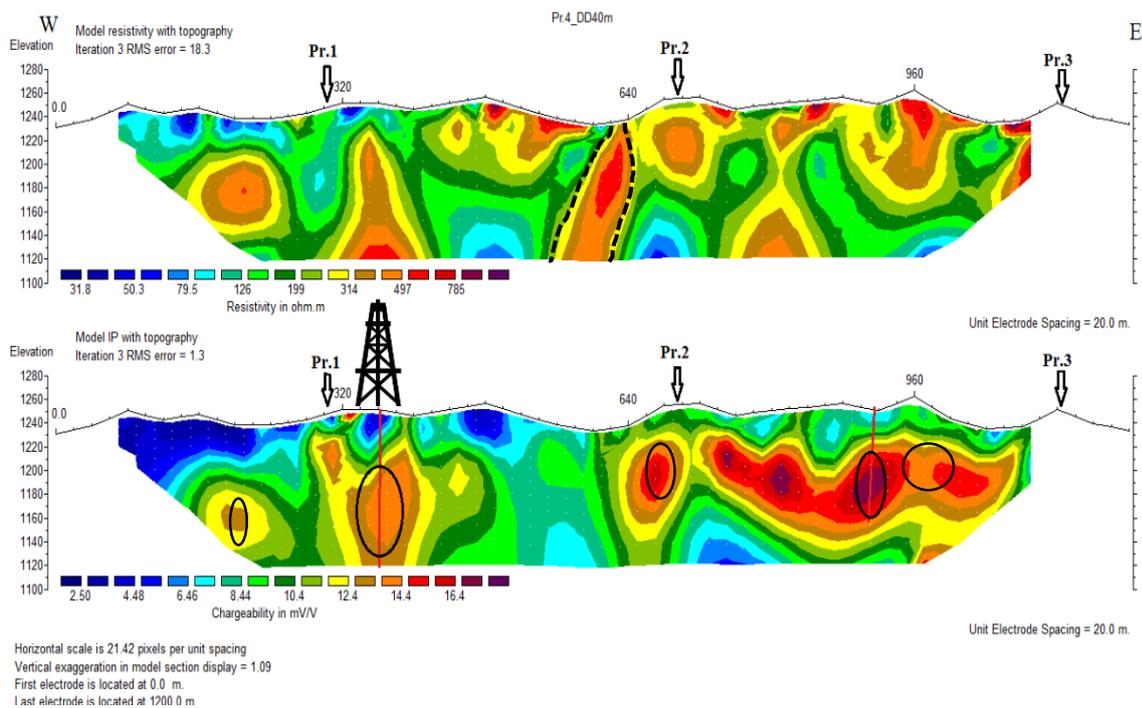
شکل ۴-۱۲: الف) نمایی از دید به شرق پروفیل Pr.4 و عبور از مجاورت کانکس‌های موجود در منطقه، ب) نمایی از رخنمون‌های کانی‌سازی مس در محدوده پروفیل Pr.4 (عملیات صحرایی برداشت ژئوفیزیکی).

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این مقطع در سیستم مختصات UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۶) آورده شده است.

جدول ۴-۶: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.4.

انتهای شرقی مقطع			ابتدای غربی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۸۶۲۰	۴۰۲۲۲۹۲	۱۲۳۴	۴۰۹۸۱۱	۴۰۲۲۴۷۵	۱۲۳۱	۴۰	دوقطبی - دوقطبی

در شکل (۴-۱۳) مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل نشان داده شده است. پروفیل Pr.1 در فاصله ۳۰۰ متر، پروفیل Pr.2 در فاصله ۶۹۵ متر و پروفیل Pr.3 در فاصله ۱۱۲۵ متر از پروفیل Pr.4 عبور و آن را قطع می‌کنند. خطای RMS با ۳ تکرار در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت‌ویژه ۱۸,۳٪ و برای مدل بارپذیری ۱,۳٪ است. مقدار مقاومت‌ویژه بین ۳۱,۸ تا بالغ بر ۷۸۵ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم-متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۲,۵۰ تا ۱۶,۴ بر حسب میلی‌ثانیه متغییر است.



شکل ۴-۱۳: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.4 (محل تقاطع با پروفیل‌های Pr.1، Pr.2 و Pr.3 با فلش، ناحیه گسلش با خط چین و موقعیت بی‌هنجاری‌ها با بیضی نشان داده شده است).

با توجه به مقاطع مقاومت‌ویژه و بارپذیری این پروفیل (شکل ۴-۱۳)، مقادیر مقاومت‌ویژه پایین در ابتدای غربی مقطع نشان از وجود سنگ‌های رسوبی و آبرفت‌های دانه‌ریز در حد رس به همراه سایر واریزه‌ها دارد. در مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات زیاد منحنی‌های میزان مقاومت‌ویژه الکتریکی، خردشدگی بالای سنگ‌ها در طول این مقطع را نشان می‌دهد. در فاصله ۵۵۰ تا ۶۳۰ متر با توجه به گستردگی تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه تا عمق‌های بالا و تأثیر آن بر مقادیر

بارپذیری، احتمال گسل خوردگی سنگ‌ها در این بخش‌ها نسبتاً بالا است. این محدوده در ارتفاع کمتری نسبت به اطراف خود قرار دارد و با توجه به مقادیر بارپذیری به‌دست آمده برای این محدوده، احتمال پرشدگی این محدوده با مواد رسی و سایر آبرفت‌ها و واریزه‌ها بالا بوده و احتمال کانی‌سازی در محدوده گسلش، ضعیف است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی برای این مقطع و استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، و با توجه به سنگ میزبان آندزیتی و تراکی‌آندزیت که دارای مقاومت‌ویژه الکتریکی بالایی می‌باشند در فاصله حدود ۱۸۰ تا ۲۳۰ متر این پروفیل و در عمق‌های محدود به ۶۵ تا ۹۲ متر احتمال کانی‌سازی مس وجود دارد. همچنین در فاصله حدود ۳۴۰ تا ۴۰۰ متر و در عمق‌های محدود به ۴۰ تا ۱۲۵ متر، فاصله حدود ۶۴۰ تا ۷۰۰ متر و در عمق‌های محدود به ۲۰ تا ۵۰ متر، فاصله حدود ۹۰۰ تا ۹۴۰ متر و در عمق‌های محدود به ۲۵ تا ۱۰۰ متر و در فاصله ۹۴۰ تا ۱۰۰۰ متر در عمق‌های محدود به ۲۵ تا ۷۰ متر احتمال کانی‌سازی مس وجود دارد. از بین موارد فوق، محتمل‌ترین موقعیت کانی‌سازی مس می‌تواند مربوط به محدوده ۳۴۰ تا ۴۰۰ متر در عمق‌های ۴۰ تا ۱۲۵ متر و فاصله ۹۰۰ تا ۹۴۰ متر در عمق‌های ۲۵ تا ۱۰۰ متر باشد، زیرا تغییرات مقاومت‌ویژه و بارپذیری در این بخش‌ها با شدت بالایی قابل مشاهده است. بنابراین اگر در امتداد پروفیل Pr.4 تصمیم به حفر گمانه اکتشافی گرفته شود، اولویت‌های حفاری می‌تواند به ترتیب ذیل مورد توجه باشد:

- ۱- فاصله حدود ۳۶۰ متر از ابتدای پروفیل و با حداکثر عمق گمانه ۱۰۰ متر به‌عنوان اولویت اول.
- ۲- فاصله حدود ۹۱۰ متر از ابتدای پروفیل و با عمق گمانه ۱۰۰ متر به‌عنوان اولویت دوم.

۴-۲-۵ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.12

پروفیل Pr.12 دارای راستای جنوب‌شرقی- شمال‌غربی است که برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۸۴۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۲۰ متر صورت گرفته است. این پروفیل در جنوب محدوده معدن برداشت شده است. در طول این پروفیل ۳۸۴ نقطه برای دو پارامتر

مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است و دارای تعداد ۳۴ اندازه‌گیری ضعیف می‌باشد. با توجه به فاصله الکترودی، این اندازه‌گیری تا عمق ۶۷ متر از زمین را پوشش می‌دهد. در شکل (۴-۱۴) محدوده پروفیل Pr.12 در حین عملیات صحرایی و نیز کانی‌سازی مس نشان داده شده است.



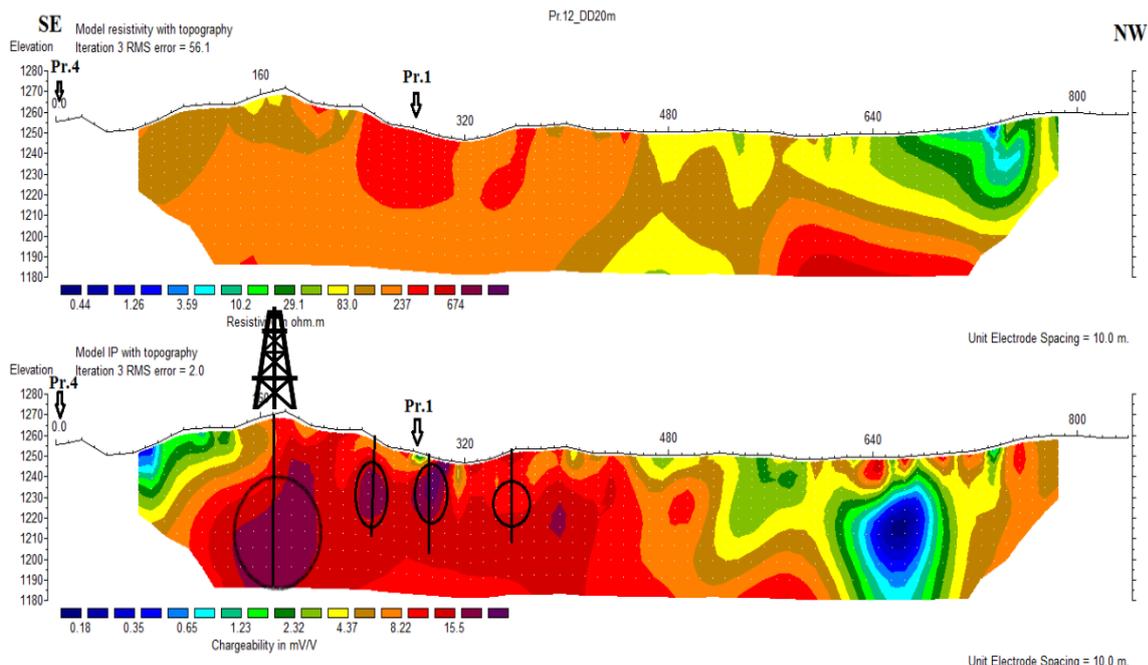
شکل ۴-۱۴: الف) نمایی از پروفیل Pr.12، ب) نمایی از کانی‌سازی مس در محدوده پروفیل Pr.12 در حین عملیات برداشت ژئوفیزیکی.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل در سیستم مختصات UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۷) آورده شده است.

جدول ۴-۷: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.12.

انتهای شمال غربی مقطع			ابتدای جنوب شرقی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۹۰۴۰	۴۰۲۲۹۴۶	۱۲۵۹	۴۰۹۷۲۹	۴۰۲۲۴۶۱	۱۲۵۶	۲۰	دوقطبی - دوقطبی

در شکل (۴-۱۵) مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل نشان داده شده است. این پروفیل در تقاطع با دو پروفیل دیگر قرار دارد که پروفیل Pr.4 از ابتدا و پروفیل Pr.1 از ۲۸۰ متری پروفیل Pr.12 عبور و آن را قطع می‌کنند. خطای RMS با ۳ تکرار در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۵۶,۱٪ و برای مدل بارپذیری ۲٪ است. مقدار مقاومت ویژه بین ۰,۴۴ تا بالغ بر ۶۷۴ اهم-متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۰,۱۸ تا ۱۵,۵ بر حسب میلی‌ثانیه متغیر است.



Horizontal scale is 15.30 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 1.33

شکل ۴-۱۵: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.12. محل تقاطع با پروفیل های Pr.1 و Pr.4 با فلش نشان داده شده است. موقعیت بی‌هنجاری‌ها با بیضی مشخص شده است.

در مقاطع بارپذیری و مقاومت ویژه الکتریکی (شکل ۴-۱۵)، تغییرات جانبی و عمقی بسیار بالایی دیده می‌شود که می‌تواند نشان از تکتونیزه بودن، خصوصاً در بخش‌های مرکزی آن باشد. عدم وجود روندهای لایه‌های منظم که اغلب در سازندها و روباره‌های رسوبی مشاهده می‌شود، نشان از احتمال تکتونیزه بودن شدید منطقه دارد. در بخش‌های شمال غربی مقطع مقاومت ویژه الکتریکی کاهش یافته که می‌تواند به دلیل وجود واحدهای رسوبی مانند آهک‌های مارنی باشد. مقادیر بارپذیری در این موقعیت نیز بسیار پایین است که به دلیل عدم وجود کانسارهای فلزی پراکنده یا رگه‌ای است. با توجه به این نکات و نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوفیزیک، در فاصله ۴۵۰ متری تا انتهای شمال غربی پروفیل Pr.12 نمی‌توان انتظار کانی‌سازی داشت. اما در فاصله ۱۲۰ تا ۴۵۰ متر این پروفیل مقادیر بارپذیری هم‌زمان با مقاومت ویژه الکتریکی افزایش یافته است که می‌تواند نشان از کانی‌سازی مس باشد. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و میزبانی سنگ‌های آندزیتی در کانی‌سازی مس و بالا بودن مقاومت ویژه آندزیت‌ها، موقعیت‌های دارای احتمال بالای کانی‌سازی مس در امتداد پروفیل Pr.12 را می‌توان تعیین کرد. بنابراین در فاصله ۱۳۰ تا ۲۰۰ متر و در عمق‌های محدود به ۱۵ تا ۶۰ متر، فاصله ۲۳۰ تا ۲۶۰ متر و در

عمق‌های محدود به ۱۰ تا ۴۰ متر و فاصله حدود ۲۸۰ تا ۳۷۰ متر و در عمق‌های محدود به ۲۰ تا ۴۰ متر احتمال کانی‌سازی مس وجود دارد. از بین موارد ذکر شده، بیشترین احتمال موقعیت کانی‌سازی مس می‌تواند به محدوده ۱۳۰ تا ۲۰۰ متر و در عمق‌های ۱۵ تا ۶۰ متر نسبت داده شود، زیرا تغییرات مقاومت‌ویژه و بارپذیری در این محدوده شدت بالایی دارد. اگر در امتداد این پروفیل حفاری انجام شود، اولویت‌های حفاری پیشنهادی می‌تواند طبق جدول (۴-۸) باشد.

جدول ۴-۸: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.12.

اولویت	عمق حفاری (متر)	فاصله نسبت به ابتدای پروفیل	نام پروفیل
۱	۷۰	۱۷۰	پروفیل Pr.12
۲	۴۰	۲۵۰	
۳	۴۰	۲۹۰	

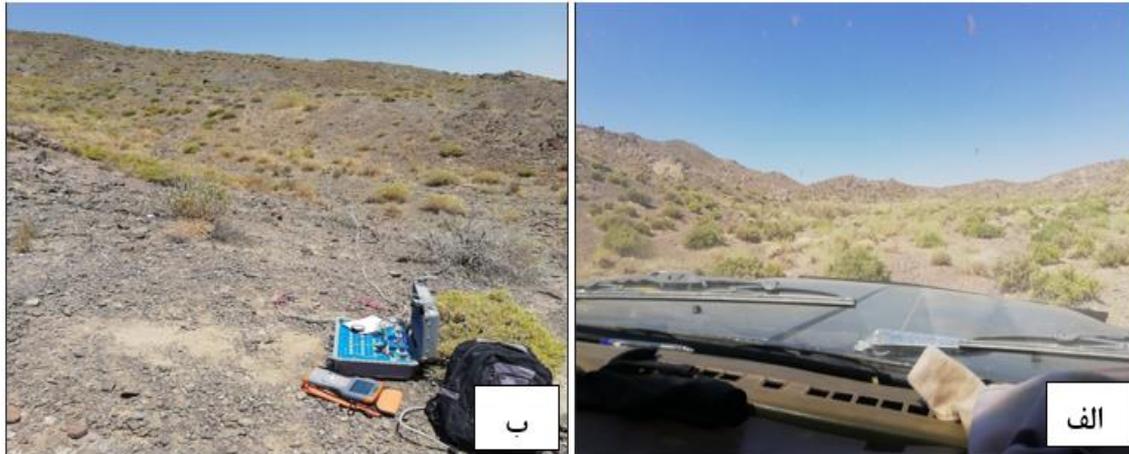
* تفسیر پروفیل‌های محدوده شمالی منطقه اکتشافی آسمانو:

تعداد ۶ پروفیل در محدوده شمالی معدن آسمانو برداشت شده است که به تفاسیر مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مربوط به آن‌ها در ادامه پرداخته می‌شود:

۴-۲-۶ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.5

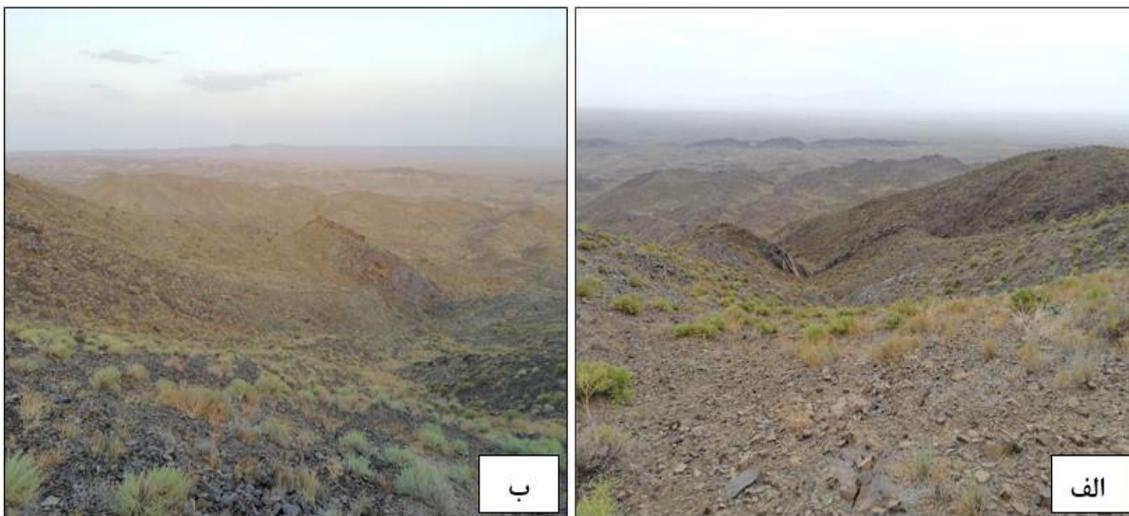
این پروفیل با راستای شمالی-جنوبی طراحی شده است که برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۱۴۰۰ متر با آرایه دوقطبی-دوقطبی همزمان با آرایه قطبی-دوقطبی و فاصله الکترودی ۴۰ متر از سمت جنوب به شمال صورت گرفته است. این پروفیل در محدوده شمالی معدن آسمانو طراحی و برداشت شده است. در طول این پروفیل ۴۸۹ نقطه برای دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری و برای دو آرایه اندازه‌گیری شده است که دارای تعداد ۳۸ اندازه‌گیری ضعیف است. با توجه به فاصله الکترودی در آرایه قطبی-دوقطبی، این اندازه‌گیری تا عمق ۲۰۰ متر از زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراهه‌ای و استفاده از خودروی آفریدی است (شکل ۴-۱۶-الف). شکل (۴-۱۶-ب) نیز فاصله ۵۰۰ متری از ابتدای

پروفیل را نشان می‌دهد. قسمت شمالی این پروفیل در ارتفاع بالاتری نسبت به قسمت جنوبی آن قرار دارد.



شکل ۴-۱۶: الف) عدم دسترسی آسان به محدوده پروفیل Pr.5، ب) نمایی از سمت جنوب به شمال در فاصله حدود ۵۰۰ متری از ابتدای پروفیل Pr.5.

شکل (۴-۱۷) نیز نمایی از سمت شمال و سمت جنوب محدوده این پروفیل را در فاصله ۸۵۰ متری از ابتدای پروفیل نشان می‌دهد که نشان‌دهنده ارتفاع بالای آن نسبت به ابتدای پروفیل است.



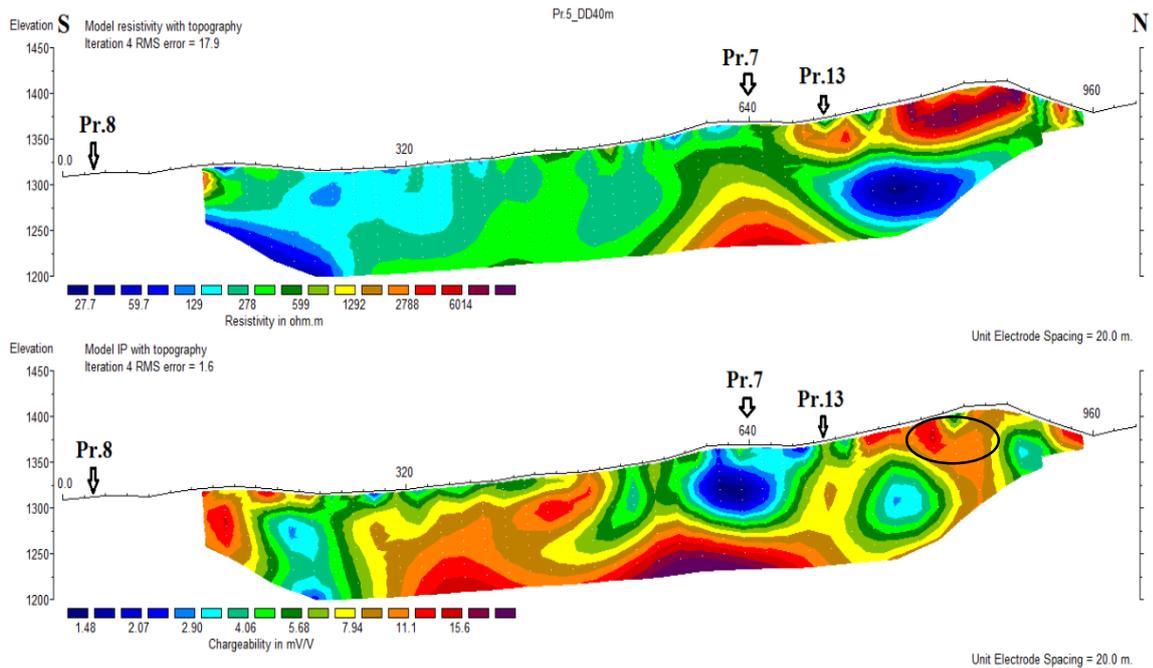
شکل ۴-۱۷: نمایی از پروفیل Pr.5 در فاصله ۸۵۰ متری از ابتدای آن، الف) دید به سمت جنوب، ب) دید به سمت شمال.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۹-۴) آمده است.

جدول ۹-۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.5.

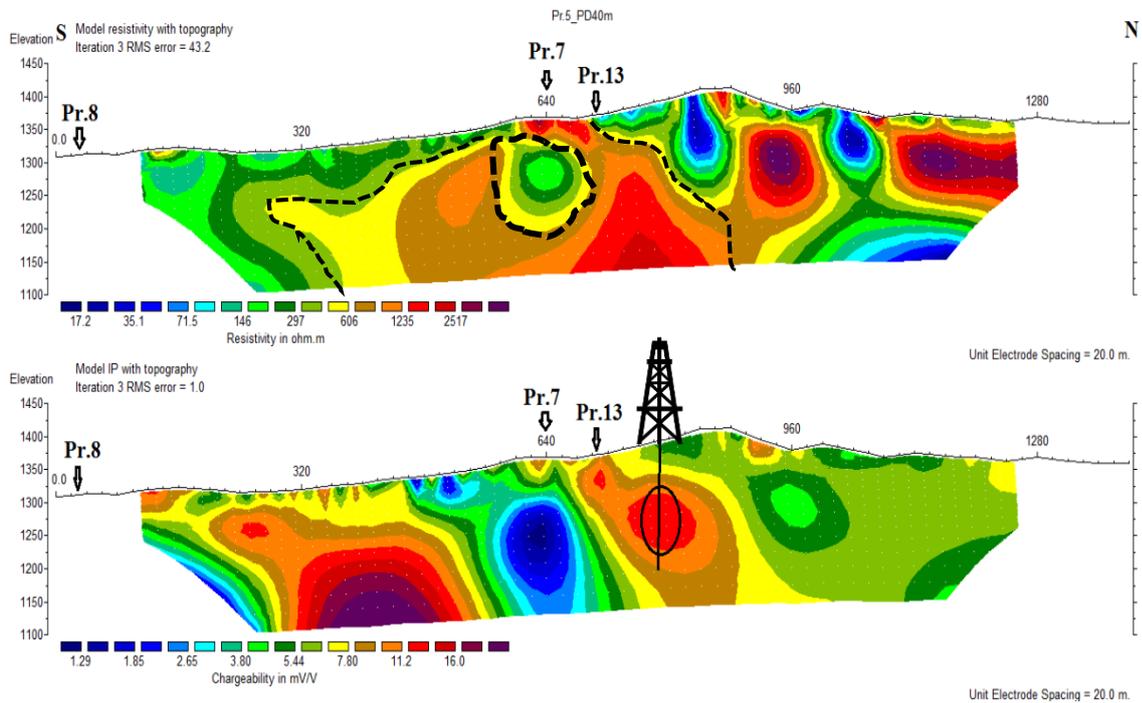
انتهای شمالی مقطع			ابتدای جنوبی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۹۱۰۵	۴۰۲۵۱۵۱	۱۳۶۰	۴۰۹۱۳۰	۴۰۲۳۷۶۸	۱۳۰۹	۴۰	دوقطبی - دوقطبی قطبی - دوقطبی

در شکل (۴-۱۸) مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل برای آرایه دوقطبی - دوقطبی نشان داده شده است. پروفیل Pr.8 در فاصله ۳۲ متری، پروفیل Pr.7 در فاصله ۶۴۰ متری و پروفیل Pr.13 در فاصله ۷۰۵ متری از پروفیل Pr.5 عبور و آن را قطع می کنند. خطای RMS با ۴ تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۱۷,۹٪ و برای مدل بارپذیری ۱,۶٪ است. مقدار مقاومت ویژه بین ۲۷,۷ تا بالغ بر ۶۰۱۴ بر حسب اهم - متر می باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۱,۴۸ تا ۱۵,۶ بر حسب میلی ثانیه متغیر است. در شکل (۴-۱۹) مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل برای آرایه قطبی - دوقطبی نشان داده شده است. خطای RMS با ۳ تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۴۳,۲٪ و برای مدل بارپذیری ۱٪ است. مقدار مقاومت ویژه بین ۱۷,۲ تا بالغ بر ۲۵۱۷ بر حسب اهم - متر می باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۱,۲۹ تا ۱۶ بر حسب میلی ثانیه متغیر است.



Horizontal scale is 25.70 pixels per unit spacing
Vertical exaqaeration in model section displav = 0.70

شکل ۴-۱۸: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.5 با آرایه دوقطبی- دوقطبی. محل تقاطع با پروفیل های Pr.8, Pr.7, Pr.13 با فلش نشان داده شده است.



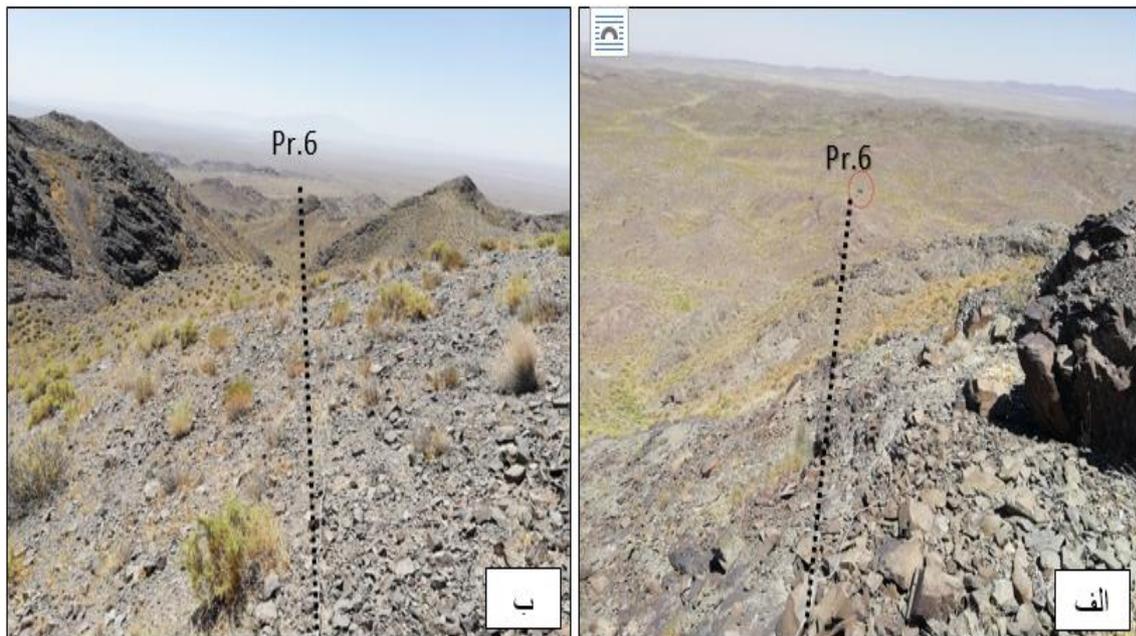
شکل ۴-۱۹: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.5 با آرایه قطبی- دوقطبی (محل تقاطع با پروفیل های Pr.8, Pr.7, Pr.13 با فلش، موقعیت بی هنجاری با بیضی و ناحیه گسلش با خط چین مشخص شده است).

در مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و بارپذیری این پروفیل، با صرف‌نظر از ابتدا و انتهای پروفیل (مقطع دوزنقه‌ای شکل) که عمق کم را نشان می‌دهد و با توجه به طراحی پروفیل، در فاصله ۱۲۰ تا ۵۲۰ متر که در ارتفاع کمتری قرار دارند مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی بسیار پایین است و نشان می‌دهد که در این موقعیت‌ها سنگ‌های آندزیتی گسترش چندانی ندارند. از طرف دیگر در فاصله ۱۲۰ تا ۳۲۰ متر مقادیر بارپذیری نیز پایین است، بنابراین در حدود فاصله ۱۲۰ تا ۳۲۰ متر کانی‌سازی مس مشاهده نمی‌شود. در فاصله ۳۲۰ تا ۵۲۰ متر در مقطع بارپذیری قطبی-دوقطبی، افزایش شدید مقادیر بارپذیری دیده می‌شود، اما در همین محدوده مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی افزایش چندانی نداشته است، بنابراین به نظر می‌رسد که در این محدوده حرکات تکتونیکی، بیشتر از نوع گسلش، اتفاق افتاده است و قسمت جنوبی یال گسل را نشان می‌دهد و تا حدود ۷۰۰ متر این گسل ادامه داشته و باعث تغییرات نسبتاً بالای مقاومت‌ویژه الکتریکی شده است. تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی در محدوده بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر کاهش شدید داشته و نشان از وجود مواد رسوبی در این بخش‌ها دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد که در فاصله ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر یک زون خرد شده وجود دارد که با مواد رسوبی که اغلب حاوی مقادیری رس هستند، پُر شده است و این موقعیت قسمت شمالی یال گسل را نشان می‌دهد. در فاصله حدود ۷۵۰ تا ۹۰۰ متر در مقطع دوقطبی-دوقطبی افزایش مقادیر مقاومت‌ویژه و بارپذیری قابل مشاهده است و به نظر می‌رسد که در این موقعیت‌ها سنگ‌های آندزیتی به همراه کانی‌سازی مس وجود داشته باشد. در انتهای شمالی مقطع قطبی-دوقطبی از فاصله ۹۰۰ متر به بعد مقدار مقاومت‌ویژه الکتریکی در بخش‌های کم عمق افزایش یافته اما مقدار بارپذیری پایین است که می‌تواند نشان‌دهنده آندزیتی بودن سنگ میزبان بدون کانی‌سازی باشد. فاصله ۹۲۰ متر تا انتهای شمالی مقطع دوقطبی-دوقطبی و در عمق‌های نسبتاً پایین شرایط تقریباً مشابهی دارد و به دلیل عدم افزایش قابل توجه مقادیر بارپذیری، نمی‌تواند نشان‌دهنده کانی‌سازی مس در این موقعیت‌ها باشد. بنابراین با توجه به تفاسیری که صورت پذیرفت، در این پروفیل، موقعیت فاصله ۶۸۰ تا ۸۴۰ متر و با عمق محدود به ۵۰ تا ۱۱۵ متر می‌تواند به‌عنوان موقعیت احتمالی برای کانی‌سازی مس مورد توجه قرار گیرد و چنان‌چه در این محدوده تصمیم

به حفر گمانه اکتشافی گرفته شود، مناسبتر آن است که گمانه مذکور در فاصله ۷۸۰ متر از مبدأ و با حداکثر عمق ۱۱۵ متر حفر گردد.

۴-۲-۷ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.6

این پروفیل با راستای شمالی- جنوبی طراحی شده است. برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۱۰۰۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۴۰ متر از سمت شمال به جنوب صورت گرفته است. این پروفیل در محدوده شمالی معدن آسمانو و در حدود ۴۰۰ متری غرب پروفیل Pr.5 برداشت شده است. در طول این پروفیل ۱۷۸ نقطه برای دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که بدون اندازه‌گیری ضعیف است. این پروفیل همانند پروفیل Pr.5 به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراه‌های و استفاده از خودروی آفرودیدی است. شکل (۴-۲) نشان‌دهنده پروفیل Pr.6 با دید به سمت شمال و جنوب است.



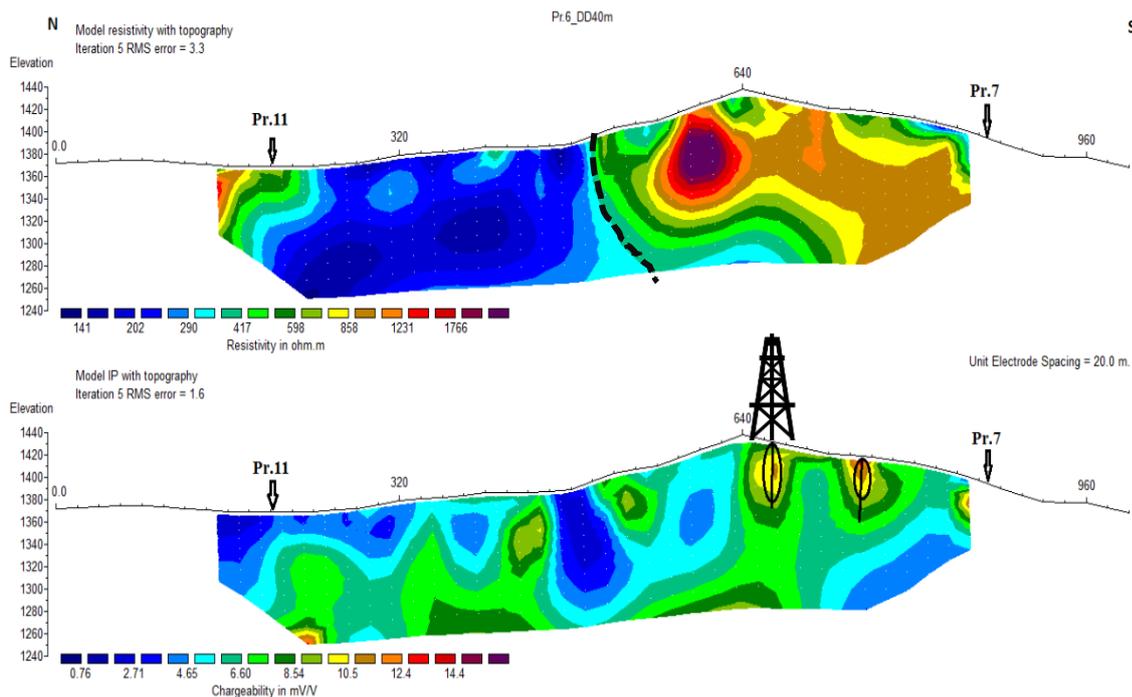
شکل ۴-۲: نمایی از اواسط پروفیل Pr.6، (الف) دید به سمت شمال، (ب) دید به سمت جنوب.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۱۰) آمده است.

جدول ۴-۱۰: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.6

انتهای جنوبی مقطع			ابتدای شمالی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۸۷۴۲	۴۰۲۴۳۰۱	۱۳۶۸	۴۰۸۶۸۴	۴۰۲۵۲۹۵	۱۳۷۲	۴۰	دوقطبی - دوقطبی

مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری همراه با توپوگرافی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است. این پروفیل در تقاطع با دو پروفیل دیگر قرار دارد که پروفیل Pr.11 در ۲۰۰ متری و پروفیل Pr.7 در حدود ۸۷۰ متری از پروفیل Pr.6 عبور و آن را قطع می‌کنند. خطای RMS با ۵ تکرار در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت‌ویژه ۳،۳٪ و برای مدل بارپذیری ۱،۶٪ است. مقدار مقاومت‌ویژه بین ۱۴۱ تا ۱۷۶۶ و کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم-متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۰،۷۶ تا ۱۴،۴ بر حسب میلی‌ثانیه متغییر است.



شکل ۴-۲۱: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.6 (محل تقاطع با پروفیل‌های Pr.11 و Pr.7 با فلش، موقعیت بی‌هنجاری‌ها با بیضی و محل گسل با خط چین نشان داده شده است).

در مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و بارپذیری پروفیل Pr.6، از ابتدای شمالی مقطع تا حدود ۵۰۰ متر با توجه به مقادیر نسبتاً پایین مقاومت‌ویژه و بارپذیری، کانی‌سازی مس مشاهده نمی‌شود، همچنین در

این موقعیت‌ها سنگ‌های آندزیتی دارای گسترش چندانی نیستند. مقادیر مقاومت‌ویژه به‌دست آمده بیانگر وجود سنگ‌های رسوبی است. در فاصله حدود ۵۰۰ متر احتمالاً حرکات تکتونیکی با شدت بالا اتفاق افتاده و موجب تغییرات جانبی شدید در مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی و بارپذیری شده است. احتمالاً در محدوده گسل آب‌های زیرزمینی جریان داشته و یا به‌صورت محبوس به دام افتاده‌اند، علت این امر کاهش شدید مقادیر بارپذیری است، زیرا آب‌های زیرزمینی بارپذیری بسیار پایینی دارند. در فاصله ۵۴۰ تا ۶۴۰ متر افزایش ناگهانی مقاومت‌ویژه قابل مشاهده است، اما به دلیل عدم افزایش بارپذیری نمی‌تواند دلیل بر وجود واحدهای کانی‌سازی مس باشد و می‌تواند تنها نشان‌دهنده سنگ میزبان آندزیتی بدون کانی‌سازی باشد. در فاصله ۶۴۰ تا ۸۵۰ متر مقاومت‌ویژه الکتریکی مقادیر نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد که می‌تواند به دلیل وجود سنگ‌های آندزیتی باشد، اما مقادیر بارپذیری در این محدوده بالا نیست و فقط در فاصله ۶۴۰ تا ۶۸۰ متر و نیز ۷۴۰ تا ۷۶۰ متر احتمال کانی‌سازی مس وجود دارد که کمتر از ۵۰ متر عمق دارند. با توجه به تفاسیر و اطلاعات زمین‌شناسی در امتداد این پروفیل می‌توان فاصله ۶۴۰ تا ۶۸۰ متر و ۷۴۰ تا ۷۶۰ متر و در عمق‌های محدود به ۱۰ تا ۴۰ متر را به‌عنوان موقعیت‌هایی که احتمال کانی‌سازی مس وجود دارد معرفی نمود. اگر در امتداد پروفیل Pr.6 تصمیم به حفر گمانه اکتشافی گرفته شود، اولویت‌های حفاری می‌تواند به ترتیب جدول (۴-۱۱) باشد.

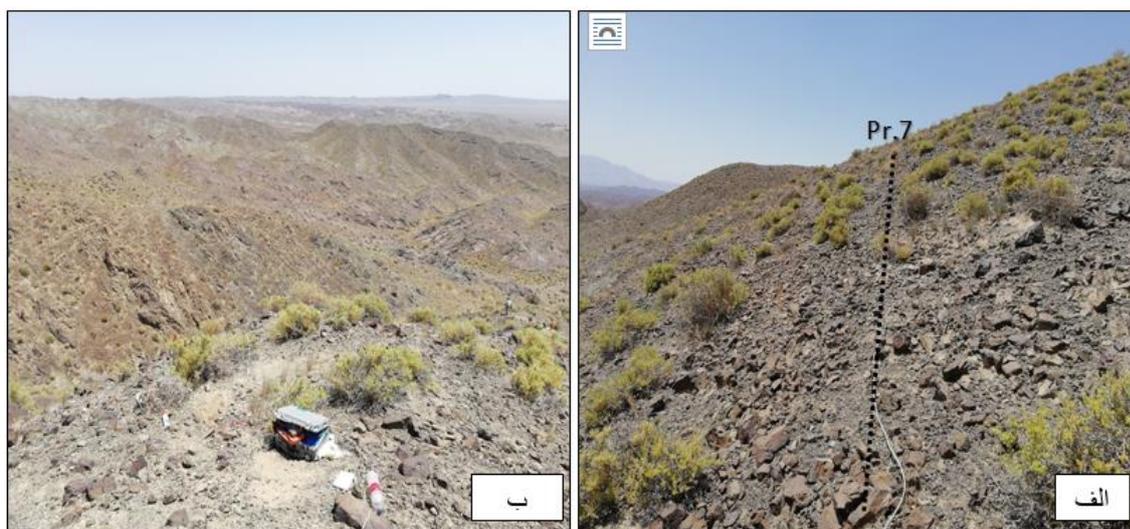
جدول ۴-۱۱: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.6.

نام پروفیل	فاصله نسبت به ابتدای پروفیل	عمق حفاری (متر)	اولویت
پروفیل Pr.6	۶۶۵	۵۰	۱
	۷۵۰	۵۰	۲

۴-۲-۸ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.7

این پروفیل دارای راستای شرقی- غربی است که برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۱۰۰۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۴۰ متر صورت گرفته است. این پروفیل در

محدوده شمالی معدن برداشت شده است. در طول این پروفیل ۱۸۹ نقطه برای دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که بدون اندازه‌گیری ضعیف است. مطالعات با این آرایه و فاصله الکترودی، در حدود ۱۲۵ متر از عمق زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل همانند پروفیل‌های محدوده شمالی به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراه‌ای و استفاده از خودروی آفرودی است. شکل (۴-۲۲) نشان‌دهنده منطقه اطراف پروفیل Pr.7 است.



شکل ۴-۲۲: نمایی از منطقه اطراف پروفیل Pr.7. الف) دید به سمت غرب، ب) دید به سمت شرق.

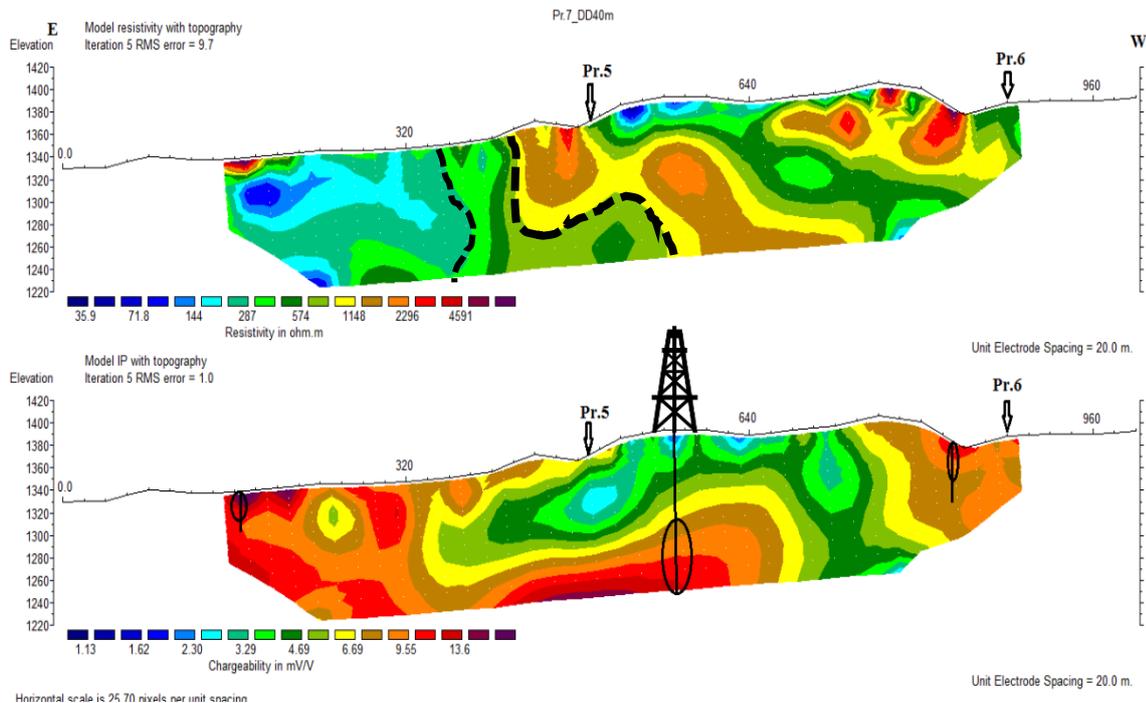
مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۱۲) آمده است.

جدول ۴-۱۲: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.7.

انتهای غربی مقطع			ابتدای شرقی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۸۶۱۷	۴۰۲۴۴۴۱	۱۳۹۳	۴۰۹۶۱۷	۴۰۲۴۳۶۲	۱۳۳۰	۴۰	دوقطبی - دوقطبی

مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری همراه با توپوگرافی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده است. این پروفیل در تقاطع با دو پروفیل دیگر قرار دارد که پروفیل Pr.5 در فاصله ۴۹۰ متری و پروفیل Pr.6 در حدود ۸۸۰ متری از پروفیل Pr.7 عبور و آن را قطع می‌کنند.

خطای RMS با ۵ تکرار در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت‌ویژه ۰٫۷٪ و برای مدل بارپذیری ۱٪ است. مقدار مقاومت‌ویژه بین ۳۵٫۹ تا بالغ بر ۴۵۹۱ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم-متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۱٫۱۳ تا ۱۳٫۶ بر حسب میلی‌ثانیه متغیر است.



شکل ۴-۲۳: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.7 (محل تقاطع با پروفیل‌های Pr.5 و Pr.6 با فلش، موقعیت بی‌هنجاری‌ها با بیضی و ناحیه گسلس با خط چین نشان داده شده است).

همانطور که در مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و بارپذیری پروفیل شماره Pr.7 مشاهده می‌شود، ابتدای شرقی مقطع در فاصله حدود ۱۵۰ تا ۲۲۰ متر مقادیر بارپذیری و مقاومت‌ویژه الکتریکی بالاست و احتمال کانی‌سازی سطحی تا عمق ۲۵ متر را دارد. در فاصله ۲۲۰ تا ۳۵۰ متر با توجه به مقادیر نسبتاً پایین مقاومت‌ویژه الکتریکی و مقادیر پایین بارپذیری، احتمال کانی‌سازی مس بسیار پایین است. مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی نشان‌دهنده پایین بودن احتمال حضور سنگ‌های آندزیتی با گستردگی بالا در این فاصله‌ها می‌باشد. این مقادیر بیشتر دارای خصوصیات سنگ‌های رسوبی هادی، مانند آهک مارنی می‌باشند. در فاصله حدود ۳۵۰ تا ۴۲۰ متر به نظر می‌رسد حرکات تکتونیکی از نوع گسل‌های کششی اتفاق افتاده و باعث تغییرات جانبی شدید در مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی و بارپذیری شده است. در

فاصله حدود ۴۲۰ تا ۴۸۰ متر مقدار مقاومت ویژه تا عمق ۱۰۰ متر بالا است، اما مقدار بارپذیری پایین است که نشان از احتمال وجود سنگ‌های آندزیتی بدون کانی‌سازی است. در فاصله حدود ۵۴۰ تا ۶۶۰ متر و در بخش‌های نیمه‌عمیق تا عمق‌های بالا، افزایش مقاومت ویژه الکتریکی قابل مشاهده است که این افزایش با افزایش نسبی مقادیر بارپذیری در عمق‌های نسبتاً بالا همراه است، لذا به نظر می‌رسد که در این منطقه احتمال کانی‌سازی مس وجود داشته باشد. در فاصله حدود ۶۶۰ تا ۷۴۰ متر با توجه به مقدار بالای مقاومت ویژه و پایین بودن مقدار بارپذیری تا عمق ۵۰ متر کانی‌سازی وجود ندارد. همچنین در فاصله حدود ۷۶۰ تا ۸۶۰ متر نیز مقاومت ویژه الکتریکی مقادیر نسبتاً بالایی را در واحدهای کم‌عمق و نزدیک به سطح تا حداکثر عمق ۵۰ متر نشان می‌دهند که با توجه به مقیاس مقاومت ویژه این پروفیل، می‌تواند به حضور سنگ‌های آندزیتی مربوط باشد، اما مقادیر بارپذیری خیلی کم افزایش یافته است. بنابراین در این محدوده احتمال کانی‌سازی مس به میزبانی سنگ‌های آندزیتی به صورت محدود و در عمق کم می‌تواند وجود داشته باشد. با توجه به توضیحاتی که داده شد و نیز استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، موقعیت‌های دارای احتمال کانی‌سازی مس در این پروفیل به شرح زیر می‌باشند:

- فاصله حدود ۱۵۰ تا ۲۲۰ متر و در عمق‌های محدود به ۵ تا ۲۵ متر.

- فاصله حدود ۵۴۰ تا ۶۲۰ متر و در عمق‌های محدود به ۷۰ تا ۱۲۰ متر.

- فاصله حدود ۸۰۰ تا ۸۵۰ متر و در عمق‌های محدود به ۱۰ تا ۵۵ متر.

حفاری‌های احتمالی پیشنهادی با اولویت‌ها به ترتیب جدول (۴-۱۳) می‌باشد.

جدول ۴-۱۳: اولویت‌های پیشنهادی حفاری پروفیل Pr.7.

نام پروفیل	فاصله نسبت به ابتدای پروفیل	عمق حفاری (متر)	اولویت
پروفیل Pr.7	۵۷۰	۱۲۰	۱
	۱۷۰	۲۵	۲
	۸۳۰	۵۵	۳

۹-۲-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.10

این پروفیل دارای راستای شمال غربی- جنوب شرقی است که برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۴۸۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۲۰ متر صورت گرفته است. این پروفیل در محدوده شمالی معدن برداشت شده است. در طول این پروفیل ۱۸۳ نقطه برای دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که دارای تعداد ۱ اندازه‌گیری ضعیف است. مطالعات با این آرایه و فاصله الکترودی، در حدود ۶۳ متر از عمق زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل همانند پروفیل‌های محدوده شمالی به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراه‌ای و استفاده از خودروی آفرودی است. شکل (۴-۲۴) نشان‌دهنده منطقه اطراف پروفیل Pr.10 است.



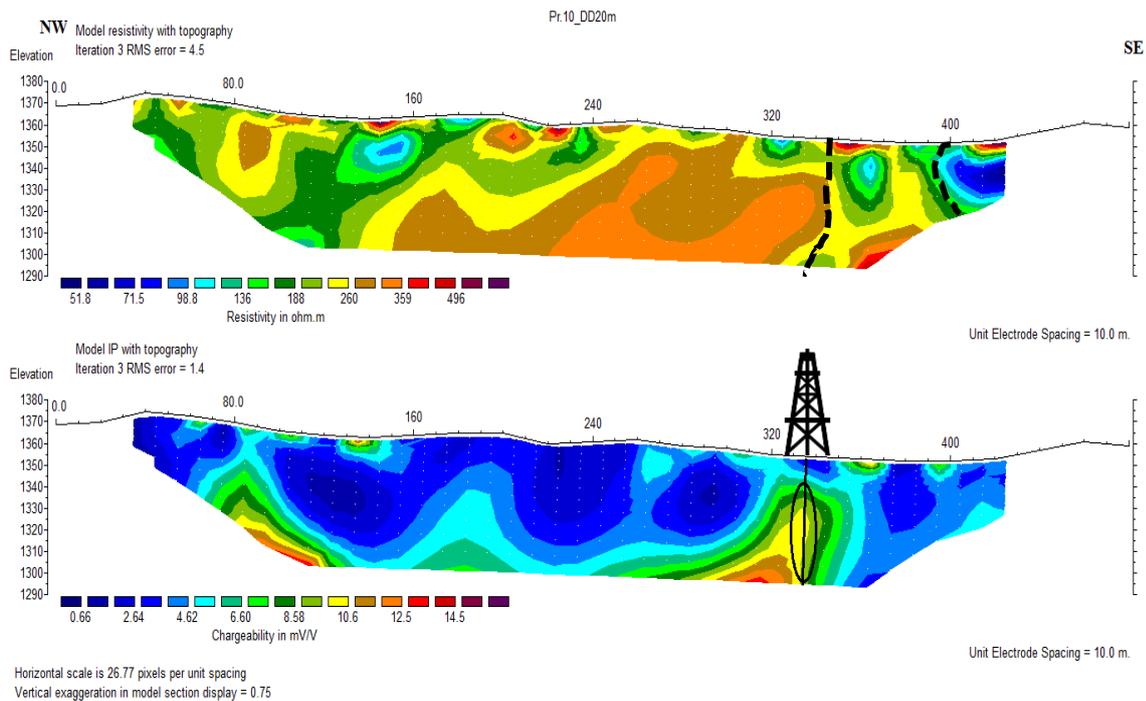
شکل ۴-۲۴: نمایی از محدوده پروفیل Pr.10 و عدم دسترسی به آن و استفاده از خودرو آفرودی.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۱۴) آمده است.

جدول ۴-۱۴: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.10

انتهای جنوب شرقی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			ابتدای شمال غربی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
۴۰۹۲۰۲	۴۰۲۵۰۷۲	۱۳۵۹	۴۰۹۰۳۵	۴۰۲۵۵۲۱	۱۳۶۹	۲۰	دوقطبی - دوقطبی

مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری همراه با توپوگرافی حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل در شکل (۴-۲۵) نشان داده شده است. خطای RMS با ۳ تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۴,۵٪ و برای مدل بارپذیری ۱,۴٪ است. مقدار مقاومت ویژه بین ۵۱,۸ تا بالغ بر ۴۹۶ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم- متر می باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۰,۶۶ تا ۱۴,۵ بر حسب میلی ثانیه متغیر است.



شکل ۴-۲۵: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.10 (موقعیت بی‌هنجاری با بیضی و ناحیه گسلش با خط چین نشان داده شده است).

در مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری پروفیل Pr.10 (شکل ۴-۲۵) مقاومت ویژه الکتریکی مقادیر پایینی دارد که احتمال وجود سنگ‌های رسوبی از جمله آهک مارنی دوران ائوسن را می‌تواند داشته باشد. بنابراین در امتداد این پروفیل احتمال گستردگی سنگ‌های آندزیتی به‌عنوان سنگ میزبان

کانی‌سازی مس، نسبتاً پایین بوده و کانی‌سازی مس زیاد به چشم نمی‌خورد. اما در فاصله حدود ۳۲۰ تا ۳۴۰ متر و در عمق‌های حدود ۲۰ تا ۵۰ متر افزایش نسبی مقاومت‌ویژه الکتریکی قابل مشاهده است. در این موقعیت مقادیر بارپذیری نیز افزایش نسبی را نشان می‌دهد که می‌تواند نشان از حضور سنگ‌های آندزیتی و کانی‌سازی مس داشته باشد. در محدوده فاصله ۳۵۰ تا ۴۰۰ متر تغییرات جانبی مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی تا عمق‌های بالا ادامه دارد که می‌تواند نشان از وجود ناپیوستگی تکتونیکی از نوع گسل‌های کششی داشته باشد. با توجه به کاهش مقادیر بارپذیری در این موقعیت، به نظر می‌رسد که در محدوده گسل آب‌های زیرزمینی جریان داشته و یا محبوس شده باشند. تنها موقعیت برای کانی‌سازی مس، در راستای این پروفیل فاصله ۳۲۰ تا ۳۴۰ متر و در عمق‌های محدود به ۲۰ تا ۵۰ متر می‌باشد. اگر تصمیم به حفر گمانه اکتشافی در این موقعیت گرفته شود، حفاری پیشنهادی در فاصله ۳۳۵ متر انجام گرفته و تا عمق حدود ۶۰ متر ادامه داشته باشد.

۴-۲-۱۰ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.11

این پروفیل دارای راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است که برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۵۲۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۲۰ متر صورت گرفته است. این پروفیل در محدوده شمالی معدن برداشت شده است. در طول این پروفیل ۲۰۹ نقطه برای دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که بدون اندازه‌گیری ضعیف است. مطالعات با این آرایه و فاصله الکترودی، در حدود ۶۳ متر از عمق زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل همانند پروفیل‌های محدوده شمالی به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراه‌ای و استفاده از خودروی آفریدی است. شکل (۴-۲۶) نشان‌دهنده منطقه اطراف پروفیل Pr.11 و تجهیزات مورد استفاده است.



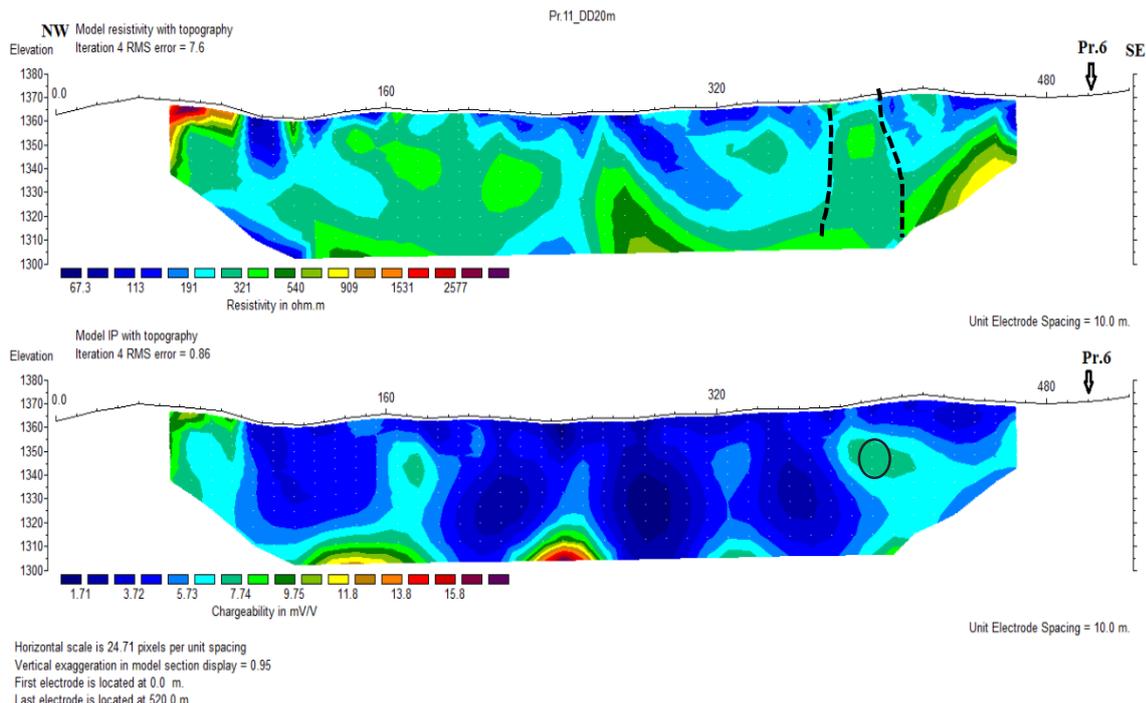
شکل ۴-۲۶: نمایی از محدوده پروفیل Pr.11 و تجهیزات مورد استفاده.

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۱۵) آمده است.

جدول ۴-۱۵: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.11.

انتهای جنوب شرقی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			ابتدای شمال غربی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
۴۰۸۷۱۲	۴۰۲۵۰۸۹	۱۳۷۳	۴۰۸۳۲۱	۴۰۲۵۴۳	۱۳۶۳	۲۰	دوقطبی - دوقطبی

مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری همراه با توپوگرافی حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل در شکل (۴-۲۷) نشان داده شده است. پروفیل Pr.6 در فاصله ۵۰۰ متری از پروفیل Pr.11 عبور و آن را قطع می کند. خطای RMS با ۴ تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۷,۶٪ و برای مدل بارپذیری ۰,۸۶٪ است. مقدار مقاومت ویژه بین ۶۷,۳ تا بالغ بر ۲۵۷۷ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم- متر می باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۱,۷۱ تا ۱۵,۸ بر حسب میلی ثانیه متغییر است.



شکل ۴-۲۷: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.11 (محل تقاطع با پروفیل Pr.6 با فلش، موقعیت بی هنجاری با بیضی و محل گسلش با خط چین نشان داده شده است).

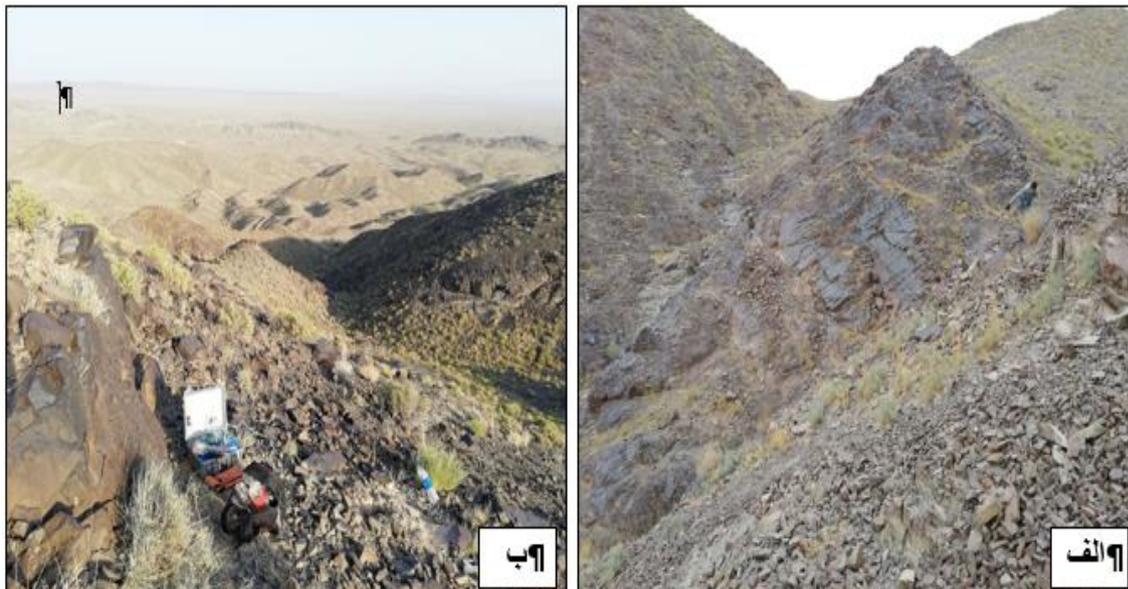
در مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری پروفیل Pr.11 (شکل ۴-۲۷) مشابه با پروفیل قبلی، مقاومت ویژه الکتریکی مقادیر پایینی دارد که می تواند نشان از وجود سنگ های رسوبی از جمله آهک مارنی دوران ائوسن باشد. همچنین روند منحنی های میزان مقاومت ویژه الکتریکی نشان از وجود لایه بندی در امتداد این پروفیل دارد که نشان دهنده سازندهای رسوبی است. مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری در فاصله ۳۸۰ تا ۴۰۰ متر از واحدهای سطحی تا حداکثر عمق تجسس افزایش نسبی نشان می دهد، بنابراین این موقعیت می تواند از سنگ های تکتونیزه و خرد شده آندزیتی که احتمالاً حاوی مقادیر اندکی کانی سازی مس است، تشکیل شده باشد. در مجموع با برداشت های ژئوفیزیک، در امتداد این پروفیل کانی سازی مس در سطح گسترده قابل تشخیص نبوده است و موقعیت مذکور در فاصله ۳۸۰ تا ۴۰۰ متر صرفاً در قیاس با سایر بخش های این پروفیل دارای شرایط نسبتاً بهتری است و نمی تواند مبین احتمال کانی سازی در سطح گسترده باشد و به همین دلیل حفاری اکتشافی در امتداد این پروفیل پیشنهاد نمی گردد.

۴-۲-۱۱ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.13

این پروفیل دارای راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است که برداشت داده‌های صحرایی در این پروفیل به طول ۳۰۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۲۰ متر در خلاف جهت از انتها به ابتدای پروفیل صورت گرفته است. این پروفیل در محدوده شمالی معدن برداشت شده است. در طول این پروفیل ۸۳ نقطه برای دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که بدون اندازه‌گیری ضعیف است. مطالعات با این آرایه و فاصله الکترودی، حدود ۶۳ متر از عمق زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل همانند پروفیل‌های محدوده شمالی به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراه‌های و استفاده از خودروی آفریدی است. شکل (۴-۲۸) نشان‌دهنده منطقه اطراف پروفیل Pr.13 و توپوگرافی نسبتاً شدید اطراف آن است. در شکل (۴-۲۹) نمایی از اطراف پروفیل Pr.13، در محل تلاقی آن با پروفیل Pr.5 (خرد شدگی و تشکیل واحدهای واریزه‌ای در سطح مشاهده می‌شود) و نیز تجهیزات مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۸: نمایی از توپوگرافی نسبتاً شدید در راستای پروفیل Pr.13.



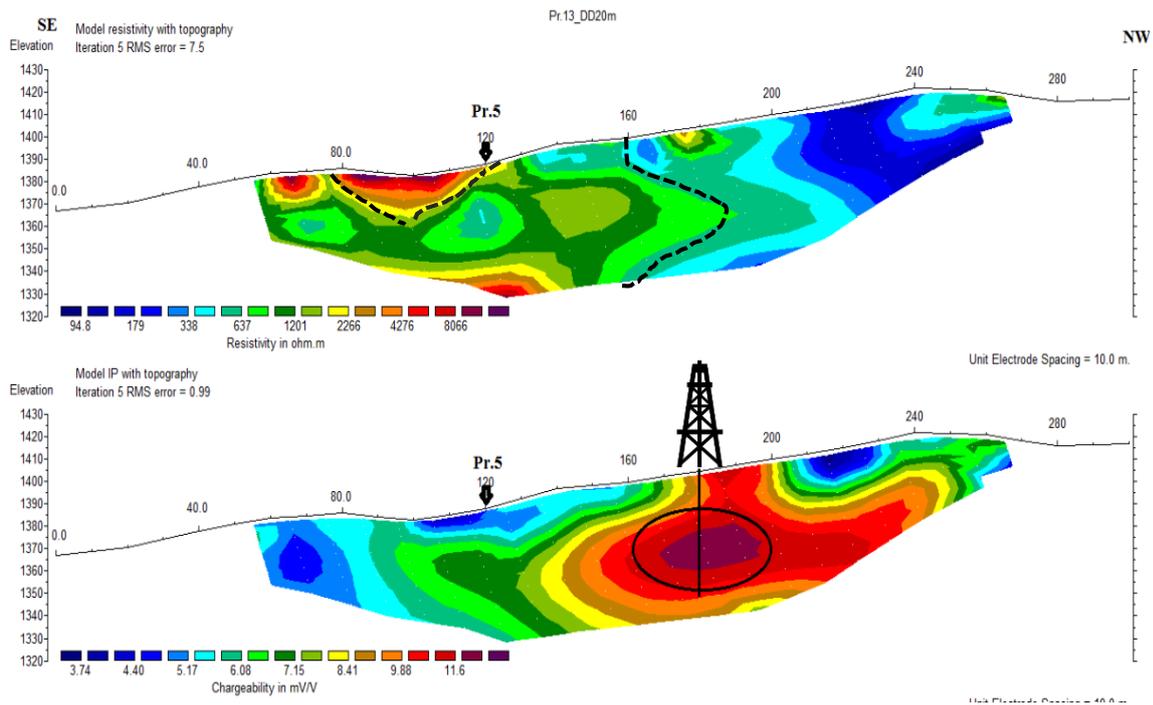
شکل ۴-۲۹: نمایی از اطراف پروفیل Pr.13، الف) در محل تلاقی آن با پروفیل Pr.5 خرد شدگی و تشکیل واحدهای واریزه‌ای در سطح (دید به سمت شمال غرب)، ب) تجهیزات مورد استفاده در راستای این پروفیل (دید به سمت جنوب شرق).

مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (۴-۱۶) آمده است.

جدول ۴-۱۶: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.13.

انتهای شمال غربی مقطع			ابتدای جنوب شرقی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۸۹۸۹	۴۰۲۴۶۱۵	۱۴۱۷	۴۰۹۲۱۰	۴۰۲۴۴۰۸	۱۳۶۷	۲۰	دوقطبی - دوقطبی

مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری همراه با توپوگرافی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل در شکل (۴-۳۰) نشان داده شده است. پروفیل Pr.5 در فاصله ۱۲۰ متری از پروفیل Pr.13 عبور و آن را قطع می‌کند. خطای RMS با ۵ تکرار در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت‌ویژه ۷,۵٪ و برای مدل بارپذیری ۰,۹۹٪ است. مقدار مقاومت‌ویژه بین ۹۴,۸ تا بالغ بر ۸۰۶۶ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم-متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۳,۷۴ تا ۱۱,۶ بر حسب میلی‌ثانیه متغییر است.



شکل ۴-۳۰: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.13 (محل تقاطع با پروفیل Pr.5 با فلش، موقعیت بی هنجاری با بیضی و محل گسل ها با خط چین نشان داده شده است).

در مقاطع پروفیل Pr.13 شکل (۴-۳۰)، مقاومت ویژه الکتریکی در نیمه جنوب شرقی مقطع مقادیر نسبتاً بالایی دارد که می تواند نشان از وجود سنگ های آندزیتی دوران ائوسن داشته باشد، اما با توجه به پایین بودن مقادیر بارپذیری در این موقعیت ها نمی توان انتظار کانی سازی مس را داشت. در فاصله ۱۲۰ تا ۱۶۰ متر تغییرات جانبی مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری بسیار بالا است که می تواند نشان از وجود ناپیوستگی تکتونیکی از نوع گسل های کششی داشته باشد. در فاصله حدود ۱۶۰ تا ۲۰۰ متر و در عمق های حدود ۱۰ تا ۵۰ متر افزایش نسبی مقاومت ویژه الکتریکی و به خصوص بارپذیری قابل مشاهده است. در این موقعیت احتمال وجود سنگ های آندزیتی همراه با کانی سازی مس بالا است. در فاصله ۲۰۰ تا ۲۴۰ متر مقطع این پروفیل مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی پایین بوده و مقادیر بارپذیری نسبتاً در عمق افزایش یافته است که می تواند به دلیل وجود مواد رسوبی یا آهک مارنی باشد. بنابراین با توجه به این که سنگ میزبان کانی سازی، آندزیت و تراکی آندزیت ها مقدار مقاومت ویژه بالایی دارند در این بخش ها کانی سازی مس نمی تواند اتفاق افتاده باشد. در فاصله ۲۴۰ تا ۲۶۰ متر مقطع این پروفیل مقادیر

مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری پایین بوده و در این بخش‌ها نیز کانی‌سازی مس وجود ندارد. بنابراین برای پروفیل Pr.13 تنها موقعیت برای کانی‌سازی مس، فاصله حدود ۱۶۰ تا ۲۰۰ متر و در عمق‌های محدود به ۱۰ تا ۵۰ متر است. اگر تصمیم به حفر گمانه اکتشافی در این موقعیت گرفته شود، حفاری در فاصله حدود ۱۸۰ متر و تا عمق حدود ۵۰ متر پیشنهاد می‌گردد.

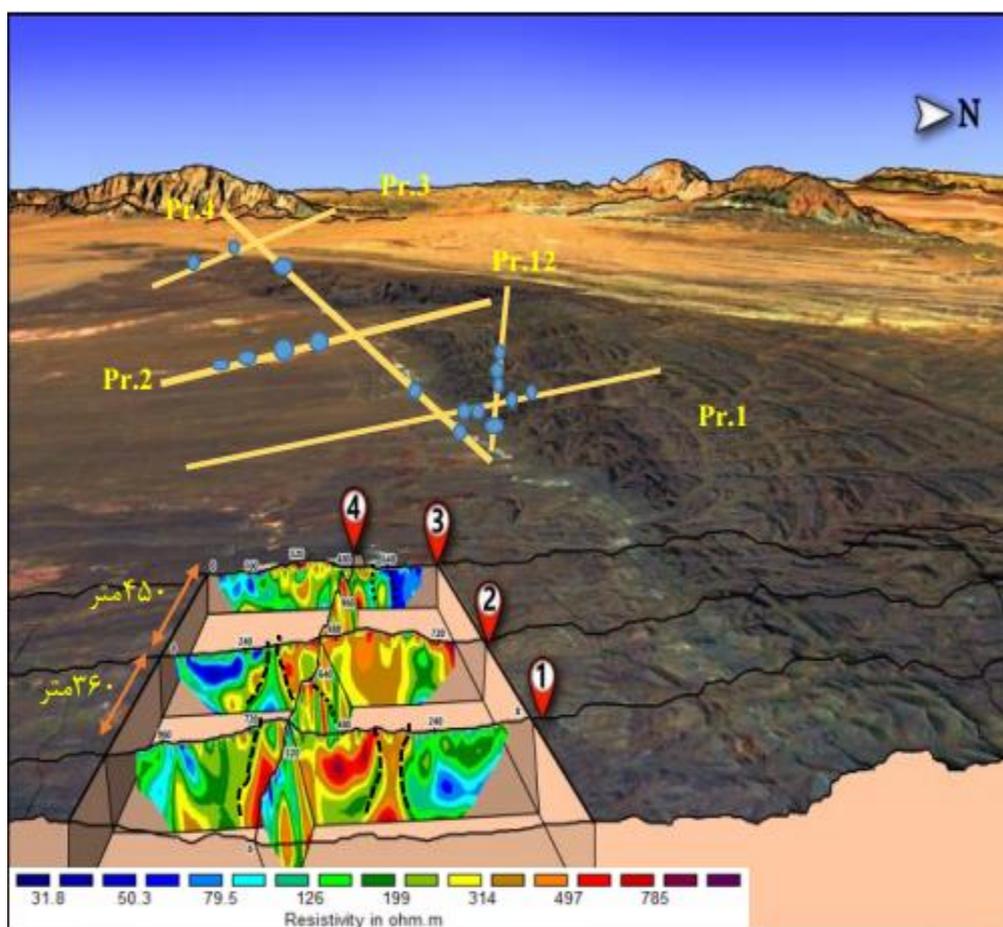
* تفسیر پروفیل‌های محدوده میانی منطقه اکتشافی آسمانو:

پروفیل شماره ۸ و ۹ در محدوده میانی معدن آسمانو برداشت شده است که تفسیر مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مربوط به آن‌ها نشان داد که در راستای این پروفیل‌ها بی‌هنجاری مشاهده نشده است (پیوست- الف).

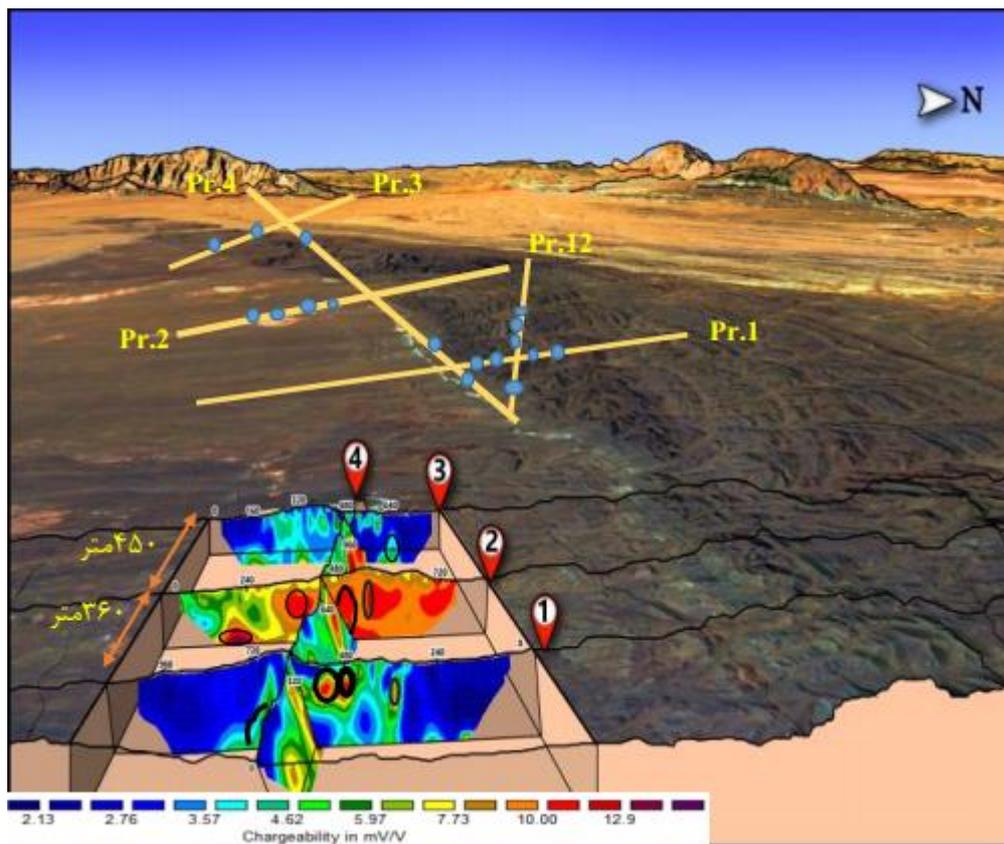
۳-۴ نمایش مدل‌سازی سه‌بعدی پروفیل‌های جنوبی

هدف از پردازش سه‌بعدی، به دست آوردن توزیع مقاومت ویژه در یک حجم سه‌بعدی از ساختارهای زیرسطحی است. به منظور تخمین توزیع مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی به صورت سه‌بعدی عموماً از روش‌های وارون‌سازی استفاده می‌شود. از شناخته‌شده‌ترین نرم‌افزارها در این خصوص می‌توان به RES3DINV اشاره کرد. تمام داده‌های سه‌بعدی برداشت‌شده با استفاده از آرایش‌های مختلف به وسیله این نرم‌افزار قابل پردازش می‌باشد. همچنین پروفیل‌های دوبعدی که در شبکه‌های منظم برداشت شوند، قابل پردازش در این نرم‌افزار می‌باشند. تئوری وارون‌سازی و همچنین امکانات این نرم‌افزار مشابه دوبعدی آن (RES2DINV) می‌باشد، با این تفاوت که در این نرم‌افزار به منظور وارون‌سازی، ساختارهای زیرسطحی مورد مطالعه را به بلوک‌های سه‌بعدی تقسیم می‌کند. خروجی این نرم‌افزار مقاطع و پلان‌های دوبعدی در جهات اصلی از ساختارهای زیرسطحی مورد مطالعه می‌باشد. به منظور نمایش داده‌های آن به صورت سه‌بعدی، امکان خروجی گرفتن از نرم‌افزار به منظور نمایش داده‌ها در نرم‌افزارهای کمکی وجود دارد. به این ترتیب مدل وارون‌سازی شده در این نرم‌افزار قابل نمایش در نرم‌افزارهای با گرافیک بالاتر نظیر Voxler می‌باشد. در این مرحله به تفسیر پروفیل‌های که در جنوب منطقه مورد مطالعه اجرا

شده‌اند پرداخته می‌شود. با توجه به همپوشانی ضعیف در نمای سه‌بعدی در بعضی موارد بی‌هنجاری‌های تشخیص داده شده در نمای دوبعدی از دید پنهان شده‌اند. اما با ارائه نمای سه‌بعدی می‌توان ارتباط بین کانه‌زایی اتفاق افتاده در پروفیل‌ها را بهتر از نمای دوبعدی نشان داد. اولین مدل ارائه شده برای مقاومت‌ویژه در شکل (۳۱-۴) و مدل بارپذیری در شکل (۳۲-۴) با، 3D Map Generator Geo و با انتقال نقاط در نرم‌افزار Google Earth انجام شد تا درک کلی از منطقه و پروفیل‌ها به عمل آید.



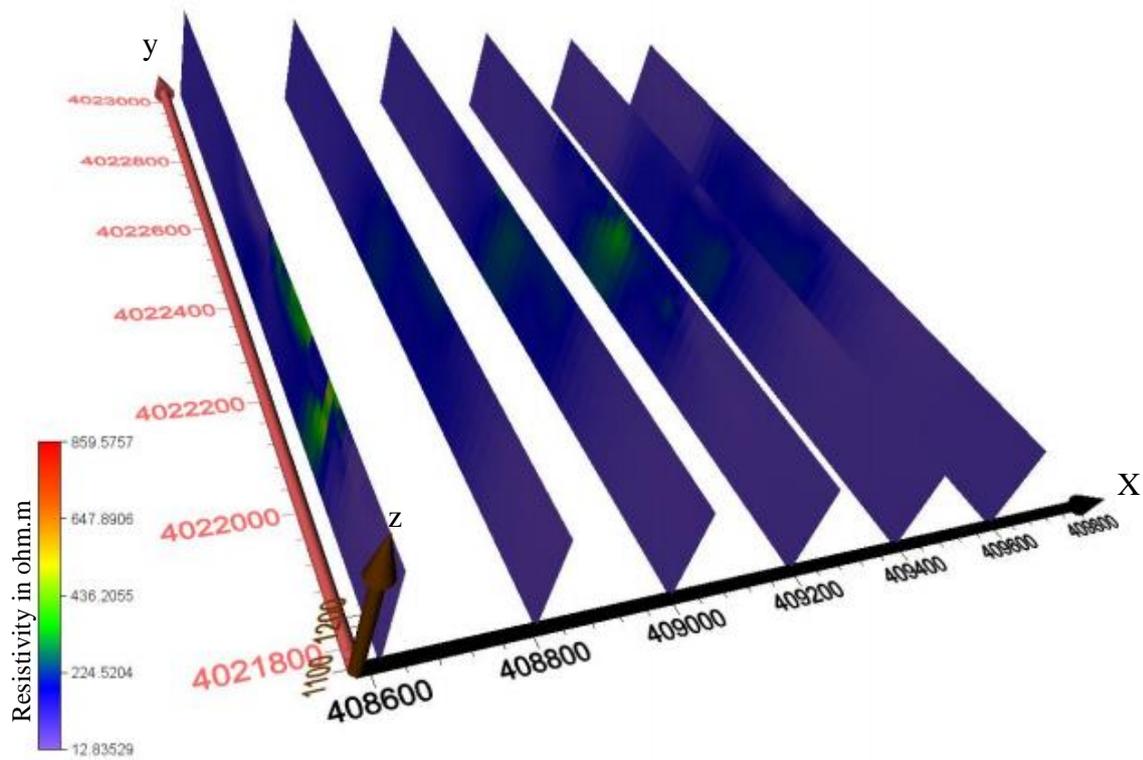
شکل ۳۱-۴: نمایشی از نمای سه‌بعدی مربوط به مقاومت‌ویژه پروفیل‌های جنوبی.



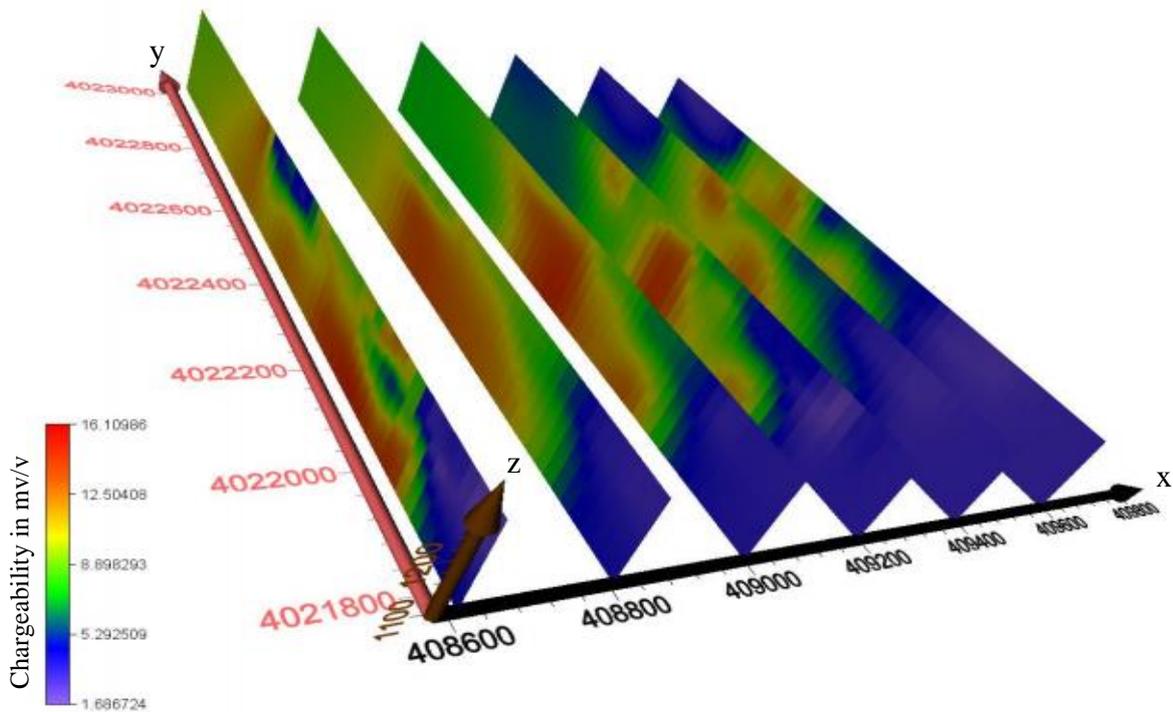
شکل ۴-۳۲: نمایشی از نمای سه بعدی مربوط به بارپذیری پروفیل‌های جنوبی.

خروجی‌های به دست آمده از نرم‌افزار RES3DINV به وسیله نرم‌افزار Voxler در شکل (۴-۳۳) و شکل

(۴-۳۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۳-۴: نمایشی سه بعدی از مدل مقاومت ویژه (برش‌های موازی با محور Y).



شکل ۳۴-۴: نمایشی سه بعدی از مدل بارپذیری (برش‌های موازی با محور Y).

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہادات

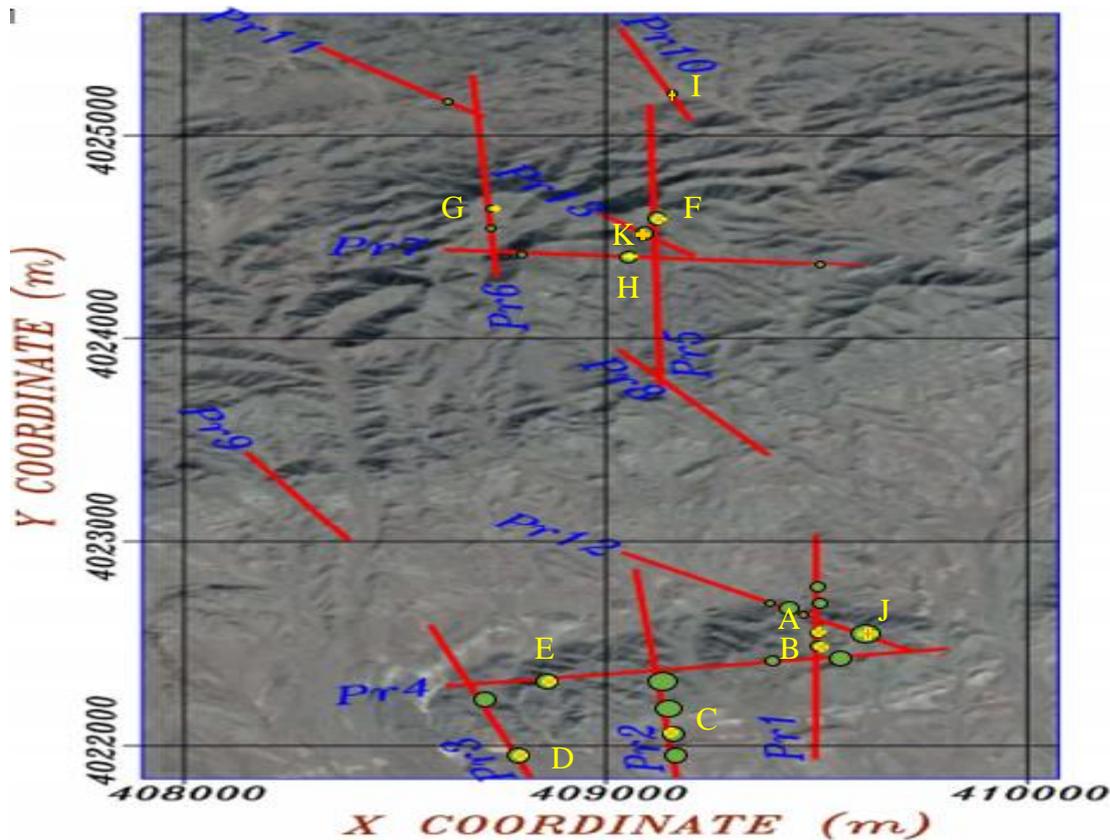
۵-۱ مقدمه

برداشت داده‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی به‌منظور پتانسیل‌یابی کانسار مس در محدوده معدن آسمانو در ۸۵ کیلومتری شهرستان شاهرود در استان سمنان انجام شد. تفسیر هم‌زمان نتایج با روش‌های بیان شده، تلفیق اطلاعات و داده‌های حاصله و با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی، نمونه برداری و زدن ترانسه، می‌توان تخمینی از گسترش کانی‌سازی فلزی ارائه نمود.

۵-۲ موقعیت بی‌هنجاری‌ها در راستای پروفیل‌های برداشت‌شده

نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوالکتریکی به روش مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در محدوده معدن آسمانو به‌صورت مقاطع دوبعدی رسم گردید و قسمت جنوبی آن نیز به‌صورت سه‌بعدی ارائه شد. با مطالعات بر روی این پروفیل‌ها موقعیت‌های کانی‌سازی مس سولفیدی مشخص شد. موقعیت بی‌هنجاری‌های تشخیص داده شده در راستای پروفیل‌ها در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. در این نقشه موقعیت بی‌هنجاری‌های مشخص شده در پروفیل‌ها به‌صورت دایره سبز رنگ مشخص شده‌اند. ابعاد دایره‌ها مشخص‌کننده گستردگی بی‌هنجاری‌های سولفیدی مس می‌باشد و موقعیت‌هایی که احتمال بالای کانی‌سازی دارند، به‌عنوان نقاط پیشنهادی با اولویت اول برای حفاری‌های اکتشافی معرفی شده‌اند (این نقاط در نقشه با رنگ زرد مشخص شده‌اند). در شکل (۵-۱) مشاهده می‌شود که بیشترین تراکم بی‌هنجاری‌ها در بخش‌های جنوبی محدوده معدن آسمانو واقع شده است. کانی‌سازی‌های مس در این موقعیت‌ها ابعاد بزرگتری دارند. تراکم و تعداد بی‌هنجاری‌ها در محل تقاطع پروفیل‌های شماره ۱ و ۱۲ قابل توجه می‌باشد. با توجه به تراکم بی‌هنجاری‌ها در محدوده جنوبی معدن آسمانو می‌توان نتیجه گرفت که برونزدهای سنگ‌های آذرین آندزیتی در این محدوده شرایط مناسب‌تری برای کانی‌سازی مس دارد. در بخش‌های شمالی محدوده معدن آسمانو بی‌هنجاری‌ها گستردگی بسیار پایینی دارند. مقدار مقاومت‌ویژه پایین در این بخش‌ها از مشخصه‌های پروفیل‌های ژئوفیزیک برداشت شده محدوده شمالی

است و گستردگی سنگ‌های رسوبی در این بخش‌ها بیشتر از گستردگی آندزیت‌ها می‌باشد و آندزیت‌های این بخش‌ها، اغلب فاقد کانی‌سازی گسترده می‌باشد. در پروفیل‌های شماره ۸ و ۹ بی‌هنجاری کانی‌سازی مس تشخیص داده نشده است و به نظر می‌رسد که از سنگ‌های رسوبی دوران ائوسن مانند آهک مارنی تشکیل شده‌اند.



شکل ۵-۱: نمایش بی‌هنجاری‌ها و اولویت‌های حفاری بر روی هر پروفیل در محدوده معدن آسمانو (اولویت‌ها با رنگ زرد مشخص شده‌اند).

۳-۵ نتیجه‌گیری

مطالعات ژئوفیزیکی محدوده معدن آسمانو با تعداد ۳۲۶۶ اندازه‌گیری مقاومت ویژه و قطبش‌القایی در امتداد ۱۳ پروفیل و با حداکثر عمق تجسس حدود ۲۰۰ متر انجام شد. در این مطالعات از آرایه‌های الکترودی دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی استفاده شده است. حداقل طول پروفیل‌های ژئوفیزیک اجرا شده در محدوده معدن آسمانو در حدود ۳۰۰ متر بوده که مربوط به پروفیل شماره ۱۳ و طویل‌ترین

پروفیل برداشت شده با طول حدود ۱۴۰۰ متر مربوط به پروفیل شماره ۵ می‌باشد. این پروفیل، تنها پروفیلی بوده که در آن از هر دو آرایه الکترودی ذکر شده استفاده شده است. مجموع طول پروفیل‌های برداشت شده در منطقه آسمانو در حدود ۱۰۷۸۰ متر است. بیشترین سطح منطقه از سنگ‌های آذرین آندزیتی (در منطقه آسمانو سنگ‌های آندزیتی به‌عنوان سنگ میزبان کانی‌سازی مس می‌باشند) و رسوبی آهک مارنی مربوط به دوران ائوسن تشکیل شده است. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی، احتمال کانی‌سازی مس در واحدهای سنگی آندزیتی و یا در محل کنتاکت این سنگ‌ها با واحدهای رسوبی مانند آهک‌های مارنی وجود دارد. سنگ‌های آندزیتی مقاومت‌ویژه الکتریکی بالایی دارند، بنابراین واحدهای مقاوم در این مطالعات ژئوفیزیکی برای تعیین موقعیت‌های کانی‌سازی مس مورد توجه است. در محدوده معدن آسمانو بخش‌هایی از سنگ‌های مقاوم آذرین که دارای مقادیر بارپذیری بالایی بوده‌اند، به‌عنوان قسمت‌هایی که دارای احتمال بیشتری برای کانی‌سازی مس هستند، تشخیص داده شدند. با مطالعات ژئوالکتریکی به روش مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی بر روی پروفیل‌های اجرایی در محدوده معدن آسمانو، موقعیت‌هایی به‌عنوان واحدهای احتمالی کانی‌سازی مس تشخیص داده شدند. در شکل (۵-۱) همانطور که مشاهده می‌شود در محدوده جنوبی معدن آسمانو تراکم بی‌هنجاری‌ها بالا است و در محدوده شمالی معدن آسمانو تعدد بی‌هنجاری‌ها پایین است. همچنین پروفیل‌های میانی (پروفیل ۸ و ۹) فاقد کانی‌سازی احتمالی مس است. در نقشه شکل (۵-۱) قابل مشاهده است که اغلب اولویت‌های حفاری در بخش‌های جنوبی منطقه آسمانو واقع شده‌اند (اولویت‌های حفاری با رنگ زرد مشخص شده‌اند). بیشترین تراکم و تعدد بی‌هنجاری‌ها در محل تقاطع پروفیل‌های شماره ۱ و ۱۲ قابل تفکیک بوده است که می‌تواند شرایطی مناسب برای کانی‌سازی مس باشد. با توجه به این که احتمال کانی‌سازی مس در سنگ میزبان آندزیتی و در محل کنتاکت آندزیت‌ها با آهک‌های مارنی دوران ائوسن نیز وجود دارد، تفکیک چنین آنومالی‌هایی مورد توجه می‌باشد و با توجه به شکل (۵-۱) در بخش‌های جنوبی محدوده معدن آسمانو در اطراف پروفیل‌های شماره ۱ تا ۳ و در محل کنتاکت این دو سازند، بی‌هنجاری‌ها با احتمال بالای کانی‌سازی مس قابل تفکیک می‌باشد. در بخش‌های شمالی محدوده معدن آسمانو

بی‌هنجاری‌های تشخیص داده شده گستردگی بسیار پایینی دارند که می‌توان احتمال داد که در این مناطق (بخش‌های شمالی منطقه آسمانو) به دلیل ارتفاع بالای سنگ‌های سازندی، امکان شست‌وشوی کانی‌سازی‌های مس و انتقال آن به بخش‌های پست‌تر (مناطق جنوبی منطقه آسمانو) وجود دارد. در محدوده شمالی محدوده معدن آسمانو موقعیت چندانی برای حفاری‌های احتمالی وجود ندارد و فقط در راستای پروفیل شماره ۵ یک نقطه به‌عنوان موقعیت امیدبخش جهت حفاری‌های اکتشافی پیشنهاد گردیده است. در بخش‌های شمالی منطقه آسمانو مقادیر مقاومت‌ویژه به‌دست آمده بیشتر نشان از وجود سنگ‌های رسوبی مانند آهک‌های مارنی دوران ائوسن دارد و سنگ‌های آندزیتی گستردگی کمتری دارند. در این بخش‌ها، حتی موقعیت‌هایی که از آندزیت تشکیل شده‌اند در آن کانی‌سازی چندانی مشاهده نشده است که دلیل آن احتمالاً شست‌وشوی کانی‌سازی‌های مس به مناطق جنوبی می‌تواند باشد.

۴-۵ پیشنهادات

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی موجود و اطلاعات ژئوفیزیکی به‌دست آمده، موقعیت‌هایی در هنگام تفاسیر پروفیل‌ها به‌عنوان حفاری‌های پیشنهادی ارائه شد اما در این قسمت اولویت‌های حفاری در کل منطقه آسمانو با مشخصات جدول (۵-۱) جهت حفاری‌های اکتشافی پیشنهاد می‌گردد. پیشنهاد می‌شود از روش‌های تکمیلی دیگر به‌ویژه روش قطبش‌القایی طیفی (SIP) به‌منظور بررسی دقیق‌تر بافت و ابعاد کانی‌سازی در منطقه و تفکیک انواع منابع IP از جمله رس‌ها و تفکیک کانی‌های فلزی از یکدیگر استفاده شود.

در این مطالعات برای تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و IP از مدل‌سازی وارون دوبعدی استفاده شد و قسمت جنوبی آن به‌صورت سه بعدی ارائه شد که در تفسیر بهتر به ما کمک می‌کند. به همین دلیل برداشت‌های سه‌بعدی داده‌ها با هدف مدل‌سازی سه‌بعدی در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود. مدل‌سازی

سه‌بعدی منوط به برداشت‌های سه‌بعدی می‌باشد که در منابع مختلفی از جمله (Loke, 2012) به آن پرداخته شده است.

همچنین پیشنهاد می‌شود در قسمت شمالی معدن آسمانو چندین پروفیل با آرایه قطبی-دوقطبی برای عمق تجسس بیشتر به دلیل ارتفاع زیاد منطقه شمالی معدن استفاده شود زیرا در بعضی نقاط رخنمون‌هایی مشاهده شد که اطراف پروفیل‌های اجرایی نمی‌باشد و بهتر است از چند پروفیل موازی و یک پروفیل متقاطع عمود بر آن‌ها استفاده شود تا بتوان به صورت سه‌بعدی به تفسیر آن پرداخت و نتیجه بهتری به دست آورد.

جدول ۵-۱: مشخصات گمانه‌های اکتشافی پیشنهادی در معدن آسمانو.

اولویت حفر گمانه اکتشافی	عمق حفاری	ضخامت زون کانی‌زایی احتمالی	فاصله از ابتدای پروفیل	شماره پروفیل و نقطه موردنظر	نوع کانی‌سازی
۱	۵۰	۳۰	۴۸۸	(A)۱	آندزیتی
۱	۵۰	۱۵	۵۳۳	(B)۱	آندزیتی
۲	۵۰	۳۰	۳۷۰	(C)۲	آندزیتی
۳	۱۰۰	۳۰	۳۶۰	(E)۴	کنتاکت آندزیت و رسوبی
۴	۷۰	۵۰	۱۷۰	(J)۱۲	آندزیتی
۵	۶۰	۲۰	۶۳۰	(D)۳	کنتاکت آندزیت و رسوبی
۶	۱۱۵	۴۰	۷۸۰	(F)۵	آندزیتی
۷	۱۲۰	۱۵	۵۷۰	(H)۷	آندزیتی
۸	۵۰	۱۵	۶۶۵	(G)۶	کنتاکت آندزیت و رسوبی
۹	۶۰	۱۵	۳۳۵	(I)۱۰	آندزیتی
۱۰	۵۰	۳۵	۱۸۰	(K)۱۳	کنتاکت آندزیت و رسوبی

سوست الف
پیی

مدل سازی و تفسیر مقطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل های ۸ و ۹

* تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.8

این پروفیل دارای راستای جنوب شرقی- شمال غربی است که برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۶۳۰ متر با آرایه دوقطبی- دوقطبی و فاصله الکترودی ۳۰ متر صورت گرفته است. این پروفیل در محدوده میانی معدن آسمانو برداشت شده است. در طول این پروفیل ۱۵۳ نقطه برای دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که بدون اندازه‌گیری ضعیف است. مطالعات با این آرایه و فاصله الکترودی، حدود ۹۴ متر از عمق زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل مانند پروفیل‌های محدوده شمالی به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراه‌ای و استفاده از خودروی آفریدی است. شکل (الف- ۱) نشان‌دهنده منطقه اطراف پروفیل Pr.8 است. مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (الف- ۱) آمده است.

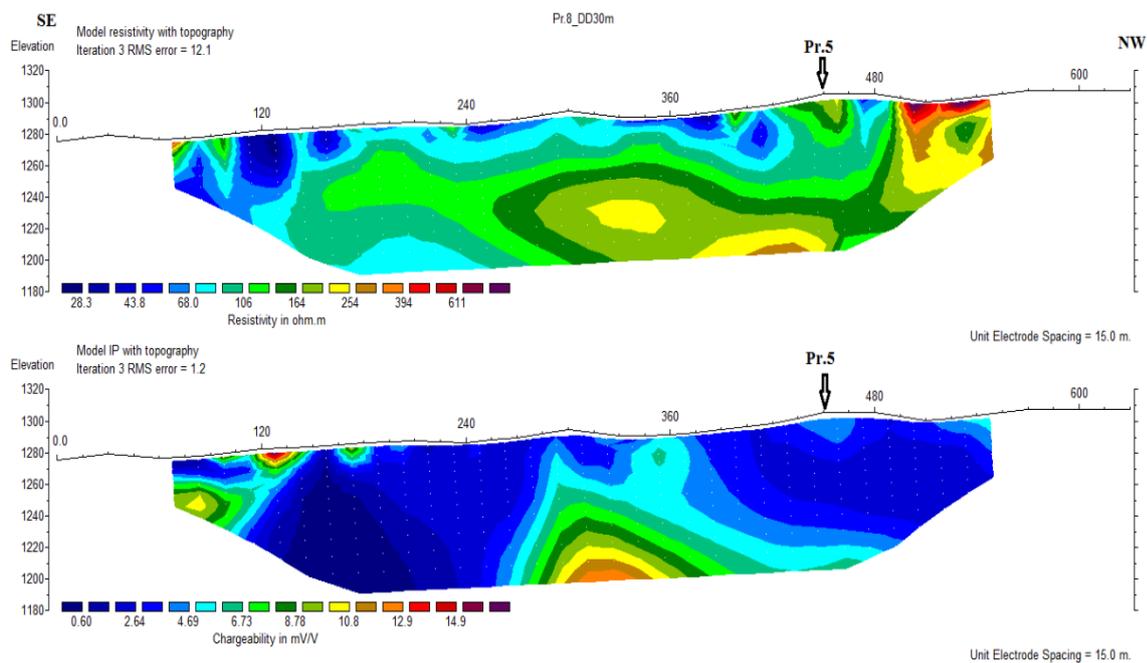
جدول الف- ۱: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.8.

انتهای شمال غربی مقطع			ابتدای جنوب شرقی مقطع			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)		
۴۰۹۰۳۲	۴۰۲۳۹۴۶	۱۳۰۸	۴۰۹۳۸۷	۴۰۲۳۴۲۸	۱۲۷۶	۳۰	دوقطبی- دوقطبی

مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری همراه با توپوگرافی حاصل از مدل‌سازی وارون این پروفیل در شکل (الف- ۲) نشان داده شده است. پروفیل Pr.5 در فاصله ۴۵۰ متری از پروفیل Pr.8 عبور و آن را قطع می‌کند. خطای RMS با ۳ تکرار در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۱،۱۲٪ و برای مدل بارپذیری ۱،۲٪ است. مقدار مقاومت ویژه بین ۲۸،۳ تا بالغ بر ۶۱۱ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم- متر می‌باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۰،۶۰ تا ۱۴،۹ بر حسب میلی ثانیه متغییر است.



شکل الف - ۱: نمایی از امتداد پروفیل Pr.8 در حین برداشت های ژئوفیزیک.



Horizontal scale is 30.60 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.76

شکل الف - ۲: مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.8. محل تقاطع با پروفیل Pr.5 با فلش نشان داده شده است.

در مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری پروفیل Pr.8 (شکل الف - ۲) مقاومت ویژه الکتریکی مقادیر بسیار پایینی دارد که می‌تواند به دلیل وجود سنگ‌های رسوبی از جمله آهک مارنی دوران ائوسن باشد و افزایش چندانی که نشان از وجود سنگ‌های آندزیتی (سنگ میزبان کانی‌سازی مس) باشد، قابل مشاهده نیست. در مرکز پروفیل و در بخش‌های نیمه عمیق تا عمق‌های بالای مقطع، افزایش جزئی در مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی و نیز مقادیر بارپذیری دیده می‌شود که با توجه به میزان افزایش این مقادیر احتمال خیلی پایینی برای کانی‌سازی مس وجود دارد. در بخش‌های سطحی انتهای شمال غربی پروفیل نیز افزایش جزئی این مقادیر، احتمالاً متأثر از هوازدگی سنگ‌های رسوبی و یا تشکیل شرایط واریزه‌ای است. در این موقعیت‌ها مقادیر بارپذیری افزایش پیدا نکرده است که می‌تواند دلیل بر عدم وجود کانی‌سازی مس محسوب شود. بنابراین در طول پروفیل Pr.8 شرایط مناسبی برای کانی‌سازی مس قابل تشخیص نمی‌باشد.

* تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری پروفیل Pr.9

این پروفیل دارای راستای جنوب شرقی - شمال غربی است که برداشت داده‌های صحرائی در این پروفیل به طول ۵۰۰ متر با آرایه دوقطبی - دوقطبی و فاصله الکترودی ۲۰ متر صورت گرفته است. این پروفیل در محدوده میانی معدن آسمانو برداشت شده است و در فاصله حدود ۱۰۵۰ متری جنوب غربی پروفیل Pr.8 قرار داشته و دارای راستای موازی با آن است. در طول این پروفیل ۲۰۴ نقطه برای دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری اندازه‌گیری شده است که دارای تعداد ۲ اندازه‌گیری ضعیف است. مطالعات با این آرایه و فاصله الکترودی، حدود ۶۳ متر از عمق زمین را پوشش می‌دهد. این پروفیل مانند پروفیل‌های محدوده شمالی به دلیل دور بودن از محدوده معدن، تنها راه دسترسی به آن استفاده از مسیرهای آبراه‌ای و استفاده از خودروی آفرودیدی است. شکل (الف - ۳) نشان‌دهنده منطقه اطراف پروفیل Pr.9 است. مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی این پروفیل نیز در سیستم مختصاتی UTM در زون ۴۰ در جدول (الف - ۲) آمده است.

جدول الف- ۲: مختصات الکترودهای ابتدایی و انتهایی پروفیل Pr.9.

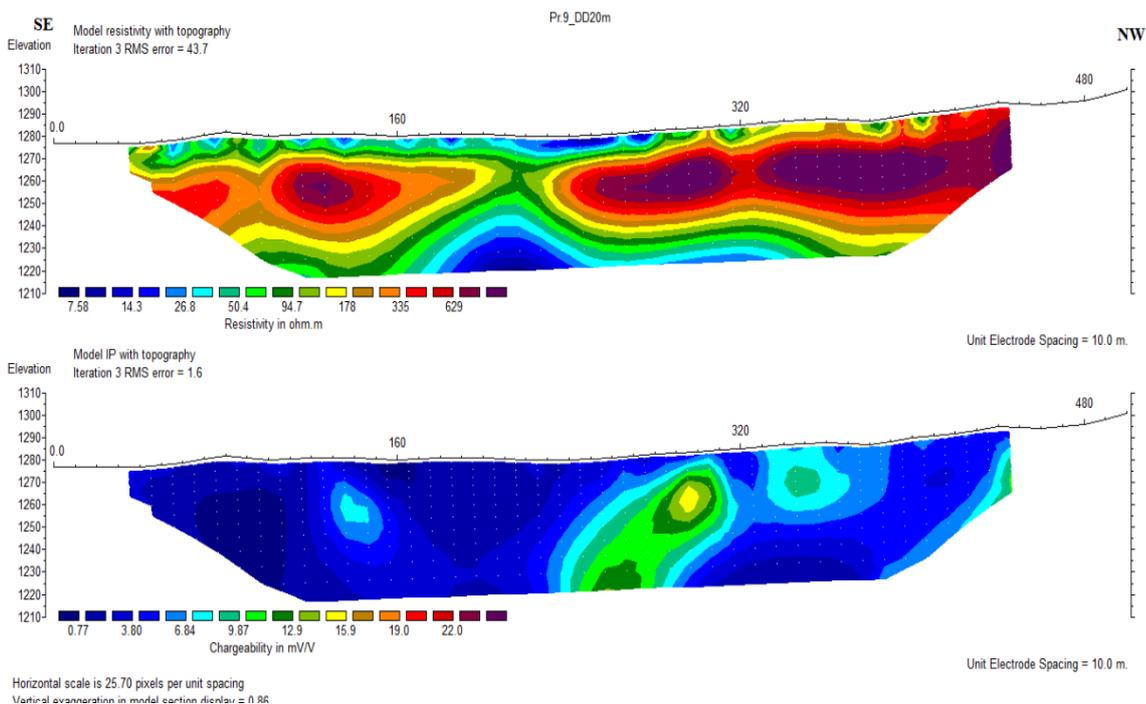
انتهای شمال غربی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			ابتدای جنوب شرقی مقطع X(m) Y(m) Z(m)			فاصله الکترودی (متر)	نوع آرایه
۴۰۸۱۴۸	۴۰۲۳۴۴۳	۱۳۰۱	۴۰۸۳۹۱	۴۰۲۳۰۰۷	۱۲۷۷	۲۰	دوقطبی - دوقطبی



شکل الف- ۳: نمایی از پروفیل Pr.9 و عدم دسترسی آسان به آن.

مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری همراه با توپوگرافی حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل در شکل (الف- ۴) نشان داده شده است. خطای RMS با ۳ تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه ۴۳,۷٪ و برای مدل بارپذیری ۱,۶٪ است. مقدار مقاومت ویژه بین ۷,۵۸ تا بالغ بر ۶۲۹ یا کمی بیشتر (در اندکی از نقاط) بر حسب اهم- متر می باشد و نیز مقدار بارپذیری بین ۰,۷۷ تا ۲۲ بر حسب میلی ثانیه متغیر است. در مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری پروفیل Pr.9 شکل (الف- ۴)، مقاومت ویژه الکتریکی مقادیر پایینی دارد که می تواند نشان از وجود سنگ های رسوبی از جمله آهک مارنی دوران ائوسن باشد. همچنین روند منحنی های میزان مقاومت ویژه الکتریکی نشان از وجود

لاپه‌بندی در امتداد این پروفیل دارد که این موضوع از مشخصه‌های سازندهای رسوبی است. افزایش نسبی مقاومت‌ویژه الکتریکی در بخش‌های زیرسطحی و در عمق‌های ۱۰ تا ۳۰ متر می‌تواند به دلیل تراکم نسبتاً بالای سنگ‌های کربناته باشد و با توجه به رنج مقاومت‌ویژه این پروفیل و البته روند منحنی‌های میزان، نمی‌تواند بیانگر حضور سنگ‌های آندزیتی (سنگ میزبان کانی‌سازی مس) باشد. در محدوده فاصله ۱۸۰ تا ۲۴۰ متر تغییرات جانبی مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی به حداکثر می‌رسد که این موضوع با توجه به تأثیری که بر روی مقادیر بارپذیری نیز داشته است، می‌تواند نشان از وجود ناپیوستگی تکتونیکی از نوع گسل‌های کششی داشته باشد. به نظر می‌رسد که در محدوده گسل، آب‌های زیرزمینی جریان داشته و یا تجمع کرده باشد. همین شرایط در محدوده فاصله ۳۰۰ تا ۳۴۰ متر نیز برقرار است. در این موقعیت با توجه به افزایش نسبی مقادیر بارپذیری، می‌توان گفت که محدوده گسل با مواد دانه‌ریز مانند مواد رسی پر شده است. بنابراین تفاسیر، در امتداد پروفیل Pr.9 کانی‌سازی چندانی قابل مشاهده نیست و به همین دلیل حفاری اکتشافی در این امتداد پیشنهاد نمی‌گردد.



شکل الف - ۴: مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و بارپذیری با توپوگرافی در راستای پروفیل Pr.9.

منابع فارسی:

- ابراهیمی س، (۱۳۹۱)، "گزارش زمین‌شناسی نقشه ۱:۱۰۰۰ منطقه مس دوجپله"، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- ابراهیمی س، عرب‌امیری ع و بیاری ه، (۱۳۹۷)، "شواهد کانی‌سازی مس نوع مانتو در منطقه آسمانو براساس ویژگی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی و میانبارهای سیال"، پژوهش‌های دانش زمین، سال نهم، شماره ۳۶، زمستان ۱۳۹۷، ص ۶۷-۸۵.
- ابراهیمی س، عرب‌امیری ع و بیاری ه، (۱۳۹۳)، "گزارش پایانی عملیات اکتشاف کانسار مس آسمانو"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- امام جمعه ا، راستاد ا، بوذری ف و رشیدنژاد عمران ن، (۱۳۸۶)، "مقدمه‌ای بر سیستم رگه و رگچه-پراکنده مس (سرب-روی) در محدوده معدنی چاه موسی-قله کفتران"، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۷۰، ص ۱۱۲-۱۲۵.
- پایگاه داده‌های علوم زمین www.ngdir.ir
- پیروز ا، جهان‌بین م، رفعت‌هرات ع، احمدزاده غ و فردوسی ح، (۱۳۹۲)، "به تصویر کشیدن ناهمگنی‌های جانبی واقع در زیر سطح زمین توسط به کارگیری آرایش الکترودی قطبی-دوقطبی متقارن و مدل‌سازی معکوس دوبعدی داده‌های اندازه‌گیری شده"، اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی، ص ۹۶، شاهرود.
- تلفورد دی آی، جلدارت ال پی، شریف آر آی و کیز دی آی، (۱۳۸۷)، "ژئوفیزیک کاربردی"، جلد اول، ترجمه حاجب حسینی و زمردیان، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۶۹۶.
- تلفورد دی آی، جلدارت ال پی، شریف آر آی و کیز دی آی، (۱۳۸۷)، "ژئوفیزیک کاربردی"، جلد دوم، ترجمه حاجب حسینی و زمردیان، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۵۷۹.
- حجت آ و رنجبر ح، (۱۳۹۰)، "اصول ژئوالکتریک کاربردی"، چاپ اول، انتشارات ستایش، تهران.

- رشیدنژاد عمران ن، (۱۳۷۱)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "پترولوژی محیط تکنو ماگمایی و ارتباط کانی‌سازی طلا محدوده باغو"، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- رمضی ح، (۱۳۹۰)، "اکتشافات ژئوفیزیکی کانسار مس خونیک در خراسان جنوبی با استفاده از روش‌های ژئوالکتریکی"، اولین همایش ملی مس.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۷۹)، نقشه زمین‌شناسی میامی.
- سامانی ب، (۱۳۸۱)، "مقالوژی کانسارهای مس نوع مانتو در ایران"، انجمن زمین‌شناسی ایران، ص ۱۳۸-۱۴۵.
- شریفی ف، (۱۳۹۱)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "اکتشاف آب‌های زیرزمینی کارستی در منطقه جنوب‌غربی تپال شاهرود با استفاده از مدل‌سازی با روش عددی اجزاء محدود و وارون‌سازی داده‌های ژئوالکتریکی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شمس‌الدینی نژاد م، (۱۳۹۲)، "اکتشافات ژئوفیزیکی به روش‌های IP و ReS در اندیس معدنی قلعه گنج"، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی علوم زمین.
- طاشی م، موسیوند ف و قاسمی ح، (۱۳۹۶)، "کانی‌سازی مس - نقره مسیوسولفاید تیپ بشی در سکانس رسوبی - آتشفشانی کرتاسه زیرین: ذخیره مس گرماب، جنوب شرق شاهرود"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی مشهد، شماره ۹، ص ۲۳۳-۲۱۳.
- کلاگری ع، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز.
- کلاگری ع، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، چاپ اول، انتشارات تابش، تهران، ص ۵۷۱ و ۵۸۸.
- گرگانی ی، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون‌القایی به‌منظور اکتشاف کانسار مس دوچپله - میامی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

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

- مهدی زاده ی، پیروز ا و عرب امیری ع، (۱۳۸۹)، "نقش توپوگرافی و تصحیح آن در شکل گیری و جابجایی توده های زیر سطحی"، چهاردهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران و بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین، دانشگاه ارومیه.

- نوروزی غ، (۱۳۹۲)، "روش های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی؛ مقاومت ویژه- پلاریزاسیون القایی- الکترومغناطیس"، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۱.

- نوروزی غ، (۱۳۹۲)، "روش های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۳۷۵.

منابع انگلیسی:

- Aizebeokhai A.P, (2009), "Geoelectrical resistivity imaging in environmental studies", ERTEP 2007, pp.297, Ghana, Africa.
- Alavi M., (1991), "Tectonic map of the Middle East", Geological Survey of Iran, Tehran.
- Burger H. R., Sheehan A. F., and Jones C. J., (2006), "Applied Geophysics: exploring the shallow subsurface", W.W. Norton and Company Press, 265-347.
- Dey A. and Morrison H. F., (1997), "Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures", Geophysics, 44(4), pp 753-780.
- Goldie M., (2007), "A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada", *The Leading Edge*, 2, 26, pp 180.
- Hedlin C., Constable S., (1990), "Occam's inversion to generate smooth: Two dimensional models from magnetotelluric data", Geophysics, 55, pp 1613-1624.
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C. (1966). "Electrical Methods in Geophysical Prospecting", volume 10. Pergamon Press Inc.
- Kearey p., Brooks M. and Hill I., (2002), "An introduction to geophysical exploration", Vol. 1, Third edition, John Wiley and Sons Ltd, Oxford, pp.196.

- Knödel K., Lange G. and Voigt H. J., (2007), “*Environmental geology: Handbook of field methods and case studies*”, Vol. 1, FiReSt Edition, Springer, Heidelberg, pp.206.
- Loke, M. H., (2000), “*Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A practical guide to 2-D and 3-D surveys*”.
- Loke, M. H., (2004), “*2-D and 3-D electrical imaging surveys*”.
- Loke, M. H. (2012), “Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys”, Course Notes for USGS Workshop 2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data. Pp.172.
- Loke, M. H. (2014), “*Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*” Course Notes for USGS Workshop 2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data. pp. 172. Lowrie W., (2007), “*Fundamentals of geophysics*”, Vol. 1, Second Edition, Cambridge University Press, UK.1, pp.266.
- Loke M. H. and Barker R. D., (1995), “*Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections*”, *Geophysics*, 60 (6), 1682-1690.
- 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, 9, pp.873.
- Mooney H. M., (2004), “*Handbook of Engineering Geophysics*”, Vol. 2, Bison Instruments Inc., Minnesota, U.S.A., pp. 27-1.
- Mooney H. M., (1980), “*Handbook of Engineering Geophysics*”, Vol. 2: Electrical Resistivity Instrumentation Inc., Minnesota, USA, pp. 1-27
- Okan T., (2002), “*Interpretation of field observation in induced polarization*”, international conference on earth science and electronic.
- Paterson, N. R., and Hallof, P., G., (1991), “*Gold metallogeny and exploration Geophysical exploration for Gold*”, Springer.
- Peake J., (2005), MSc.thesis, “*A comparison of electrical resistivity techniques to characterize Karst GEOLOGY, EASTON, PA*”, Temple University College Graduate Board.

- Reynolds J. M., (1997), "*An Introduction to Applied and Environmental geophysics*", John Wiley and Sons Ltd, Chichester, pp. 418- 580.
- Roy K. K. (2008), "*Potential Theory in Applied Geophysics*", Anjumana Ara Begum Row, Golf garden.
- Sasaki Y., (1992), "*Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation*", Geophysical prospecting, 40(4), 453-463.
- Slater L. D. and Lesmes, D., (2002), IP interpretation in environmental investigations: Geophysics, Soc. Of Expl. Geophys., 67, 77- 88
- Sumner, J. S. (1976), "*Principles of Induced Polarisation for Geophysical Exploration*", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Telford W. M., Geldart L. P. and Sheriff R. E., (1990), "*An Introduction to Applied Geophysics*", Cambridge UniveReSity Press, New York.
- Telford W. M., Geldart L. P. and Sheriff R. E., (1990), "*Applied geophysics*", Cambridge univeReSity press, pp.81.
- Telford W. M. and Sheriff R. E., (1991), "*Applied Geophysics*", 2nd Edition Cambridge University Press.
- Ward S. H., (1990), "*Resistivity and induced polarization method in geotechnical and environmental geophysics*", Society of exploration geophysics, V 1, 147- 189.
- www.Google Earth.com.

Abstract

One of the most important steps in exploring mineral resources is to identify target areas. Geophysical methods are indirect and non-destructive methods and they have a high efficiency that works with the aim of searching for hidden reserves by measuring a physical parameter at the level and compared to direct exploration methods such as drilling, they have lower cost and higher speed. Asemano mineral area is located 25 km east of Mayamey city in Semnan province. The host rocks are Eocene volcanic rocks, which are geologically located in the western part of the Sabzevar zone and in the Trud-Abbasabad zone Himalayas. According to geological studies, the Andesite igneous and sedimentary limestone rocks of the Eocene period cover most of the region. Due to the geological conditions and previous studies, resistivity (ReS) methods and induced polarization (IP) are suitable methods for studying the geophysical of copper sulfide mineralization. IP is one of the important methods in the exploration of sulfide and metal ores, especially scattered sulfides, which along with the resistivity method has been used as a complementary method in these studies. These studies cover a wide range, with 3266 IP/ReS measurements along 13 profiles and with dipole-dipole and pole-dipole electrode arrays in the northern and southern phases of the Asemano mine area. The results of geophysical perceptions have been modeled and interpreted by RES2DINV software. Based on the results of data modeling and interpretation, positions with high IP values and moderate to high resistivity were identified as promising mineralization situations. Because with three-dimensional interpretation, more accurate and reliable answers can be obtained, the three-dimensional sections of the southern phase are also modeled using RES3DINV software and the results are displayed using VOXLER software. According to these results, in the northern phase of the mine, despite sedimentary rocks and low resistivity, there will be no suitable geological conditions for copper mining. Only in line with profile number 5, a promising drilling proposal has been made. Unlike the northern phase, more anomalies were detected in the southern phase, which, despite Andesite igneous rocks having high resistivity, had high IP values in the same areas, creating favorable conditions for sulfide copper mineralization. Based on this research, a number of drilling points in profiles 1 to 4 have been proposed. Profile number 1 has a higher priority than other profile. Also, in profile 12, the minimum drilling depth with a depth of 40 meters and profile number 2 with a drilling depth of 50 meters can be suggested as promising areas for drilling. The advantages of this research are the use of cross-sectional

profiles in order to increase the reliability of the data, the long length of the profiles, the use of unbreakable and very effective polarizing electrodes and high study depth and the use of combined dipole data collection methods, pointed dipole and pole- dipole.

Keywords

Asemano, electrical resistivity, induced polarization, copper mineralization, inverse modeling, dipole- dipole electrode array, pole- dipole electrode array.



Shahrood University of technology
Faculty of Mining Engineering, petroleum and Geophysics

**Modeling and interpretation of resistivity and induced
polarization data in the area of asemano copper mine,
mayamey city, Semnan Province**

Naser saberi

Supervisors:

Dr. A. Arab amiri

Dr. A. Kamkar rohani

July 2020

