



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوالکتریک

مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی منطقه معدنی مس کال ابری -
بردسکن

نگارنده: سمیرا عرب انصاری

اساتید راهنما

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور

دکتر فرج الله فردوست

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه : اکتشاف

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم سمیرا عرب انصاری

تحت عنوان: مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی منطقه معدنی مس کال ابری -

بردسکن

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : فرج الله فردوست		نام و نام خانوادگی : علیرضا عرب امیری
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : ابوالقاسم کامکار روحانی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : ایرج پیروز
	آرزو عابدی		نام و نام خانوادگی : سوسن ابراهیمی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به

خدایم

که پدری دلسوز و فداکار

مادری مهربان و کم نظیر

و

یاوری صبور و مقاوم

به من کمترین عطا کرد.

تقدیر و تشکر:

سرآغاز، حمد و سپاس پروردگار کریم را که یاری‌بخش این بنده حقیر بود. بر خود لازم می‌دانم از کلیه کسانی که بنده را در تدوین و نگارش این پایان‌نامه یاری نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. به خصوص از اساتید فرزانه جناب آقای دکتر علیرضا عرب امیری و جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که در کلیه مراحل انجام این پژوهش با خوشرویی، یاری و راهنمایی نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین مراتب سپاس‌گذاری خود را از جناب آقای دکتر فرج‌الله فردوست و جناب آقای برهان یعقوبی تبار و جناب آقای موسی قربانی به خاطر تجارب ارزشمندشان و کمک به اینجانب در نگارش این پایان‌نامه اعلام می‌نمایم.

در پایان از آقای دکتر ایرج پیروز و خانم دکتر سوسن ابراهیمی به عنوان اساتید داور؛ که در به سرانجام رساندن این پایان‌نامه نقش بسزایی داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب سمیرا عرب انصاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی منطقه معدنی مس کال ابری - بردسکن تحت راهنمایی جناب آقای دکتر علیرضا عرب امیری و جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی متعهد می شوم .

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

تاریخ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

معدن مس کال ابری در استان خراسان رضوی، شهرستان بردسکن، در شمال روستای درونه قرار گرفته است. محدوده کال ابری در حاشیه شمالی زون ایران مرکزی و در جنوب زون افیولیتی سبزوار قرار گرفته است. ماده معدنی اصلی این معادن، مس است که به صورت اکسید و سولفید در منطقه قابل مشاهده است. در این مطالعات از روش IP و مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است. برداشت داده‌ها با استفاده از ترکیب آرایش‌های دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی با فاصله الکترودی ۱۰ و ۲۰ متر انجام شده است. در این برداشت تعداد ۱۱۷۸ نقطه در قالب شش پروفیل در معدن کال ابری اجرا شده است. در این پژوهش، داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده، توسط نرم‌افزارهای RES2DINV و ZondRes2d مورد مدل‌سازی معکوس قرار گرفته و توسط نرم‌افزار Voxler به صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است. نتایج حاصل از آنها به کمک اطلاعات زمین‌شناسی منجر به شناسایی زون‌های کانی‌سازی مس در منطقه شده و عمق و ابعاد کانی‌سازی در قسمت‌های مختلف تعیین شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، زون‌های کانی‌زایی مس، دارای بارپذیری بالا و مقاومت ویژه متوسط تا بالا می‌باشند و در کنتاکت آهک و آندزیت، کنتاکت آهک و واحد آذرآواری و یا درون شکستگی‌های آندزیتی قرار گرفته‌اند. بر این اساس، ۱۴ گمانه جهت حفاری به منظور دستیابی به کانی‌سازی مس در عمق پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: پلاریزاسیون القایی، مقاومت ویژه الکتریکی، مدل‌سازی معکوس، کال ابری،

Voxler, ZondRes2d, RES2DINV

فهرست

فصل اول: کلیات

- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۲-۱ مروری بر مطالعات انجام شده..... ۴
- ۳-۱ ضرورت و هدف از انجام تحقیق..... ۶
- ۴-۱ روش تحقیق..... ۶
- ۵-۱ ساختار پایان نامه..... ۷

فصل دوم: اصول و تئوری روش‌های مقاومت ویژه و IP

- ۱-۲ مقدمه..... ۱۰
- ۲-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی..... ۱۱
- ۱-۲-۲ تفاوت مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی..... ۱۲
- ۲-۲-۲ مقاومت ویژه ظاهری..... ۱۵
- ۳-۲ روش پلاریزاسیون القایی..... ۱۷
- ۱-۳-۲ پلاریزاسیون غشایی..... ۱۹
- ۲-۳-۲ پلاریزاسیون الکتروودی..... ۱۹
- ۴-۲ عوامل موثر بر مقدار IP..... ۲۵
- ۵-۲ اختلالات در اندازه‌گیری‌ها..... ۲۶
- ۶-۲ آرایه مورد استفاده در برداشت‌های ژئوالکتریک..... ۲۷

فصل سوم: زمین‌شناسی

- ۱-۳ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه..... ۳۲
- ۲-۳ زمین‌شناسی عمومی و تکتونیک ناحیه..... ۳۳
- ۳-۳ چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی محدوده معدنی کال ابری..... ۳۶
- ۴-۳ رخداد کانه‌زایی در کانسار کال ابری..... ۳۸
- ۵-۳ دگرسانی..... ۳۹

فصل چهارم: مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و IP

- ۱-۴ مقدمه..... ۴۲
- ۲-۴ روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی..... ۴۲
- ۱-۲-۴ مدل‌سازی فیزیکی..... ۴۲
- ۲-۲-۴ روش‌های مدل‌سازی عددی..... ۴۲
- ۳-۴ نرم‌افزار RES2DINV..... ۴۴
- ۴-۴ نرم‌افزار Zondres2D..... ۴۵
- ۵-۴ عملیات صحرائی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP..... ۴۶
- ۶-۴ تفسیر کمی و کیفی مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP توسط نرم‌افزارهای RES2DINV و Zondres2D..... ۴۹
- ۱-۶-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از پروفیل P1 توسط نرم‌افزار RES2DINV..... ۵۰
- ۲-۶-۴ مدل IP به دست آمده از پروفیل P1 با استفاده از نرم‌افزار Zondres2D..... ۵۳
- ۳-۶-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از پروفیل P2 توسط نرم‌افزار RES2DINV..... ۵۴

- ۴-۶-۴ مدل IP به دست آمده از پروفیل P2 با استفاده از نرم افزار Zondres2D..... ۵۷
- ۴-۶-۵ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P3 توسط نرم افزار RES2DINV..... ۵۷
- ۴-۶-۶ مدل IP به دست آمده از پروفیل P3 با استفاده از نرم افزار Zondres2D..... ۵۹
- ۴-۶-۷ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P4 توسط نرم افزار RES2DINV..... ۶۰
- ۴-۶-۸ مدل IP به دست آمده از پروفیل P4 با استفاده از نرم افزار Zondres2D..... ۶۲
- ۴-۶-۹ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P5 توسط نرم افزار RES2DINV..... ۶۳
- ۴-۶-۱۰ مدل IP به دست آمده از پروفیل P5 با استفاده از نرم افزار Zondres2D..... ۶۵
- ۴-۶-۱۱ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P6 توسط نرم افزار RES2DINV..... ۶۵
- ۴-۶-۱۲ مدل IP به دست آمده از پروفیل P6 با استفاده از نرم افزار Zondres2D..... ۶۷
- ۴-۷ مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج حاصل از گمانه های حفر شده در منطقه..... ۶۸
- ۴-۸ نمایش سه بعدی پروفیل ها توسط نرم افزار Voxler..... ۷۲

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۵-۱ مقدمه..... ۷۸
- ۵-۲ نتیجه گیری..... ۷۸
- ۵-۳ پیشنهادات..... ۸۰
- منابع..... ۸۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ نمایش مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی..... ۱۳
- شکل ۲-۲ نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی..... ۱۵
- شکل ۳-۲ انحراف خطوط جریان در مرز دو لایه با مقاومت ویژه‌های مختلف. الف: لایه دوم مقاوم‌تر از لایه اول. ب: لایه اول مقاوم‌تر از لایه دوم..... ۱۷
- شکل ۴-۲ اثر ولتاژ اضافی ناشی از پلاریزاسیون القایی بعد از قطع جریان..... ۱۸
- شکل ۵-۲ اثر پلاریزاسیون غشایی و الکترودی. الف) توزیع نرمال یون‌ها در ماسه سنگ متخلخل، ب) پلاریزاسیون غشایی در ماسه سنگ متخلخل ناشی از یک ولتاژ dc اعمال شده، ج) جریان الکترولیتی در حفره بالایی و پلاریزاسیون الکترودی در حفره پائینی..... ۲۰
- شکل ۶-۲ تغییرات ولتاژ قبل و بعد از قطع جریان نسبت به زمان..... ۲۱
- شکل ۷-۲ اندازه IP برحسب میلی‌ولت بر ولت برای تعدادی از سنگ‌ها و کانی‌ها..... ۲۲
- شکل ۸-۲ افزایش زمان شارژ (a تا c)، که در پی آن فرکانس اندازه‌گیری کاهش و اثر ولتاژ اضافی افزایش می‌یابد (Vpa تا Vpc). در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس پایین (در c)، بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالا (در a) می‌باشد..... ۲۳
- شکل ۹-۲ آرایه دو قطبی - دو قطبی و رسم شبهه مقطع..... ۲۹
- شکل ۱-۳ نقشه موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به کانسار مس کال ابری در شمال غرب بردسکن..... ۳۲
- شکل ۲-۳ الف) زیرپهنه ایران میانی از دیدگاه علوی ب) ناحیه مورد مطالعه بر روی کمربند خواف- درونه..... ۳۴
- شکل ۳-۳ نقشه تکتونیکی کانسار کال ابری براساس نقشه ۱:۵۰۰۰..... ۳۵
- شکل ۴-۳ تصویر صحرایی از قرارگیری واحدهای آهکی، توف و آگلومرا به صورت هم‌روند و هم‌شیب..... ۳۶

- شکل ۳-۵ موقعیت پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده کانسار مس کال ابری، بر روی بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ درونه..... ۳۷
- شکل ۳-۶ الگوی تشکیل کانسار مس کال ابری به صورت شماتیک..... ۳۹
- شکل ۳-۷ تصویر صحرایی از دگرسانی‌های کلریتی، سربستی و اکسیدهای آهن در مجاور یکدیگر..... ۴۰
- شکل ۴-۱ نمایی از بلوک‌ها و مش‌بندی‌های استفاده شده در مدل‌سازی مستقیم..... ۴۴
- شکل ۴-۲ نمایی از محدوده کال ابری و امتداد تقریبی تمامی پروفیل‌های اجرا شده در این محدوده..... ۴۸
- شکل ۴-۳ نمایی از محدوده کال ابری و مسیر تقریبی پروفیل‌های P1, P2, P3..... ۴۸
- شکل ۴-۴ نمایی از محدوده کال ابری و مسیر تقریبی پروفیل‌های P4, P5, P6..... ۴۹
- شکل ۴-۵ مدل دوبعدی پلاریزاسیون‌القایی و مقاومت‌ویژه در راستای پروفیل P1..... ۵۱
- شکل ۴-۶ کانه‌زایی مس در یک سینه کار کانسار ابری. تمرکز مس به صورت اکسیدی در مرز دو واحد آذرآواری در زیر و آهک در بالا صورت گرفته است..... ۵۲
- شکل ۴-۷ مدل IP به دست آمده از نرم‌افزار Zondres2d (پروفیل P1)..... ۵۴
- شکل ۴-۸ مدل دوبعدی پلاریزاسیون‌القایی و مقاومت‌ویژه در راستای پروفیل P2..... ۵۶
- شکل ۴-۹ منطقه مورد مطالعه در طول پروفیل P2 (دید به سمت شمال). رخنمون کانی‌زایی مس در طول این پروفیل مشاهده نمی‌شود..... ۵۶
- شکل ۴-۱۰ مدل IP به دست آمده از نرم‌افزار Zondres2d (پروفیل P2)..... ۵۷
- شکل ۴-۱۱ مدل دوبعدی پلاریزاسیون‌القایی و مقاومت‌ویژه در راستای پروفیل P3..... ۵۹
- شکل ۴-۱۲ مدل IP به دست آمده از نرم‌افزار Zondres2d (پروفیل P3)..... ۶۰
- شکل ۴-۱۳ مدل دوبعدی پلاریزاسیون‌القایی و مقاومت‌ویژه در راستای پروفیل P4..... ۶۱
- شکل ۴-۱۴ توپوگرافی موجود در منطقه مورد مطالعه در طول پروفیل‌های P4 و P5 (دید به سمت جنوب غرب)..... ۶۲

- شکل ۴-۱۵ مدل IP به دست آمده از نرم افزار Zondres2d (پروفیل P4).....۶۳
- شکل ۴-۱۶ مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در راستای پروفیل P5.....۶۴
- شکل ۴-۱۷ مدل IP به دست آمده از نرم افزار Zondres2d (پروفیل P5).....۶۵
- شکل ۴-۱۸ مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در راستای پروفیل P6.....۶۷
- شکل ۴-۱۹ مدل IP به دست آمده از نرم افزار Zondres2d (پروفیل P6).....۶۸
- شکل ۴-۲۰ محل قرارگیری گمانه‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای. (گمانه BH1 بر روی پروفیل P2، گمانه BH2 بر روی پروفیل P3 و گمانه BH3 بر روی پروفیل P1 قرار گرفته‌اند).....۶۹
- شکل ۴-۲۱ نمودار میانگین توزیع عنصر مس در نمونه‌های یازده گمانه بر حسب ppm.....۶۹
- شکل ۴-۲۲ نمودار تغییرات مس (بر حسب ppm) نسبت به عمق در گمانه BH2.....۷۰
- شکل ۴-۲۳ محل قرارگیری گمانه BH2 بر روی مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی در راستای پروفیل P3.....۷۰
- شکل ۴-۲۴ محل قرارگیری گمانه‌های BH1A و BH2A بر روی پروفیل P6.....۷۱
- شکل ۴-۲۵ نمودار تغییرات مس (بر حسب ppm) نسبت به عمق در گمانه BH1A.....۷۲
- شکل ۴-۲۶ محل قرارگیری گمانه BH1A بر روی مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی در راستای پروفیل P6.....۷۲
- شکل ۴-۲۷ نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های IP پروفیل‌های P1، P2 و P3.....۷۳
- شکل ۴-۲۸ نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های مقاومت ویژه پروفیل‌های P1، P2 و P3.....۷۴
- شکل ۴-۲۹ نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های IP پروفیل‌های P4، P5 و P6.....۷۴
- شکل ۴-۳۰ نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های مقاومت ویژه پروفیل‌های P4، P5 و P6.....۷۵

شکل ۱-۵ مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P1 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی این پروفیل.....۸۳

شکل ۲-۵ مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P2 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی این پروفیل.....۸۳

شکل ۳-۵ مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P3 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی این پروفیل.....۸۴

شکل ۴-۵ مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P4 به همراه گمانه پیشنهادی بر روی این پروفیل.....۸۴

شکل ۵-۵ مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P5 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی این پروفیل.....۸۵

شکل ۶-۵ مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P6 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی این پروفیل.....۸۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۵ مشخصات حفاری‌های پیشنهادی..... ۸۲

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

ژئوفیزیک به معنای عام، کاربرد فیزیک در بررسی و شناخت زمین و محیط اطراف آن است. به عبارت دیگر ژئوفیزیک به مطالعه کمی خواص فیزیکی مختلف زمین می‌پردازد. با استفاده از این نتایج کمی می‌توان به مطالعه خصوصیت‌های فیزیکی و رفتار پوسته و در برخی موارد جبه و هسته زمین پرداخت. لذا می‌توان با به کارگیری این علم، اطلاعات بسیار مهم و ارزشمندی را با صرف هزینه و زمانی اندک به دست آورد [Telford et al., 1990]. روش‌های ژئوفیزیکی بر اساس سیگنال‌های مورد استفاده به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱- روش‌های چشمه طبیعی: سیگنال‌هایی که در این روش‌ها اندازه‌گیری می‌شوند، حاصل تغییرات میدان‌های طبیعی زمین می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های گرانی‌سنجی^۱، رادیومتری^۲، مغناطیس‌سنجی^۳ و پتانسیل خودزا^۴ اشاره کرد.

۲- روش‌های چشمه مصنوعی: سیگنال‌های مورد استفاده در این روش‌ها به صورت مصنوعی تولید و به درون زمین ارسال می‌شوند. سیگنال‌های برگشتی که تحت تأثیر مواد زیرسطحی قرار گرفته‌اند، توسط گیرنده‌های مناسب اندازه‌گیری می‌شوند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مقاومت‌ویژه، پلاریزاسیون القایی^۵ و لرزه‌نگاری اشاره کرد [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰].

امروزه به علت پنهان بودن ذخایر معدنی، به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشافات ضروری است. پلاریزاسیون القایی، روشی نسبتاً جدید در ژئوفیزیک کاربردی بوده و عمدتاً در اکتشاف فلزات پایه کاربرد

¹ Gravity methods

² Radiometric methods

³ Magnetic methods

⁴ Self-potential method

⁵ Induct Polarization (IP)

دارد. با استفاده از این روش می‌توان به بخش عمده‌ای از مسائل اکتشافی معدنی پی برد. با انتخاب آرایش و فواصل الکترودی مناسب، نتایج حاصل از این روش زون‌های سطحی کانی‌سازی را با در نظر گرفتن بی-هنجاری‌ها به خوبی نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از این روش بی‌هنجاری‌های کوچک و نسبتاً عمیق و بی‌هنجاری‌هایی که به وسیله لایه‌های پوشش هادی^۱ مدفون شده‌اند و بی‌هنجاری‌های مرکب به خوبی قابل تشخیص می‌باشد. واضح است که روش IP یکی از با ارزش‌ترین روش‌های بررسی مناطق کانی‌سازی و سولفیدی پراکنده^۲ می‌باشد. همچنین این روش برای پیدا کردن و اکتشاف زون‌های کانی‌سازی شده توده‌ای، نفوذی و رگه‌ای استفاده می‌شود. برداشت IP را می‌توان با فرستادن جریان الکتریکی توسط دو الکتروود به زمین و اندازه‌گیری پتانسیل باقیمانده پس از قطع جریان توسط دو الکتروود دیگر بررسی کرد [Telford et al., 1990].

روش مقاومت‌سنجی نیز روشی است که با اندازه‌گیری و تعیین مقدار مقاومت‌مخصوص ظاهری سنگ‌ها می‌توان در برخی موارد عوامل زمین‌شناسی از جمله گسل، ساختمان لایه‌های زیرین، ضخامت آبرفت و کنتاکت لایه‌ها و غیره را مشخص نمود. مقاومت‌مخصوص ظاهری سنگ‌ها تابعی از عواملی چون وجود مواد هادی (آب)، مواد رسی، کانی‌های فلزی، لایه‌ها و جنس آنها و غیره می‌باشد [Loke, 2004]. لذا می‌توان هم‌زمان با اندازه‌گیری و مشخص بودن مقدار جریان و با در نظر گرفتن فواصل الکتروودهای جریان و پتانسیل میزان اختلاف پتانسیل حاصله را اندازه‌گیری کرد.

در این روش‌ها، برداشت‌ها به صورت سیستماتیک و تحت شرایط کنترل‌شده‌ای انجام می‌شوند و نتایج آنها به صورت مقادیر عددی تحت عنوان داده‌های مشاهده‌ای ارائه می‌شوند. برای هر نوع نتیجه‌گیری از این

¹ Overburden

² Disseminated

داده‌ها، باید رابطه بین توزیع خواص فیزیکی سیستم مورد مطالعه (زمین) و پاسخ ژئوفیزیکی قابل مشاهده معلوم گردد.

استنباط خواص فیزیکی سیستم مورد مطالعه از روی داده‌های مشاهده‌ای یک روند معکوس است و ابزار کمی مورد نیاز برای رسیدن به آن، تئوری معکوس^۱ خوانده می‌شود. از آنجا که نتایج خام در اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی نمی‌توانند هیچ‌گونه اطلاعات کمی درباره عمق حقیقی، ابعاد و یا توزیع مقاومت‌های ویژه حقیقی الکتریکی در زیر زمین بیان کنند، لذا مدل‌سازی داده‌ها، اجتناب‌ناپذیر است.

۱-۲ مروری بر مطالعات انجام شده

آزمایشات صحرائی کنراد شلومبرژه در سال ۱۹۱۲ منجر به ابداع روش مقاومت‌سنجی شد و انتشار نتیجه تحقیقاتش در سال ۱۹۲۰ سبب افزایش کاربردهای اقتصادی اولیه این روش شد. در پی آن، استفاده از این روش در سال ۱۹۲۳ منجر به کشف گاز در کشور رومانی گردید [مهدوی، ۱۳۸۳]. اولین بار در اواخر دهه ۱۹۴۰ روش IP یا پلاریزاسیون‌القایی برای اکتشاف توده‌های کانسنگی بالاخص برای سولفیدهای پراکنده مورد استفاده قرار گرفت. در دهه ۱۹۶۰ از این روش به‌طور گسترده در اکتشافات ژئوفیزیک معدنی فلزات پایه استفاده شده است. پدیده IP برای اولین بار توسط کنراد شلومبرژه^۲ کشف شد. تا سال ۱۹۵۰، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از این روش در حوزه زمان صورت می‌گرفت [Seigel, 1959]. در دهه ۱۹۶۰، از این روش به‌طور گسترده در اکتشافات ژئوفیزیکی مواد معدنی و فلزات پایه مدفون در زیر سطح زمین استفاده شده است. روش IP در اکتشاف مواد معدنی از سال ۱۹۵۰ و در کاربردهای دیگر از سال

^۱ Inverse Theory

^۲ Schlumberger

۱۹۷۰ استفاده شده است. در ادامه چند نمونه از موارد استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه و IP در اکتشاف فلزات در ایران و جهان ذکر می‌شود.

مرادزاده و همکاران (۱۳۸۶) با مدل‌سازی معکوس هموار و پارامتری داده‌های به دست آمده از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه در منطقه تاش موفق به تعیین مناطق کانی‌سازی سرب و روی شدند. حدیدی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از تلفیق روش‌های IP و مقاومت‌ویژه با مغناطیس‌سنجی موفق به اکتشاف زون کانی‌سازی سرب و روی در محدوده جنوب شرقی تکاب شدند. رمزی و مصطفایی (۱۳۹۰) با استفاده از روش‌های مذکور و به ویژه روش IP موفق به آشکارسازی زون کانی‌سازی مس در منطقه خونیک خراسان جنوبی شدند. زیگل^۱ و همکاران (۱۹۶۸) در منطقه پیرامید^۲ واقع در کانادا توسط این روش موفق به اکتشاف کانی‌سازی گالن-اسفالریت شدند، در این مورد در مناطقی که کانی‌سازی به صورت پراکنده بود، پاسخ مقاومت‌ویژه افزایش نشان می‌داد. اکادا^۳ (۱۹۹۵) در منطقه هیشی‌کاری در ژاپن با استفاده از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه موفق به اکتشاف کانسار سولفیدی رگه‌ای و کانی‌سازی اپی‌ترمال شد. در این مورد پاسخ IP شواهد قابل اعتمادتری نسبت به مقاومت‌ویژه و روش گرانی‌سنجی استفاده شده ارائه داد. وب^۴ و راوسون^۵ (۱۹۹۵) با تلفیق روش‌های مختلف ژئوفیزیکی از جمله گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، الکترومغناطیس حوزه زمان^۶ و در نهایت روش IP به اکتشاف کانسار ارنست هنری در استرالیا پرداختند.

¹ Seigel

² Pyramid

³ Okada

⁴ Web

⁵ Rawstone

⁶ Time Domain EM (TEM)

۳-۱ ضرورت و هدف از انجام تحقیق

هدف نهایی تمام اکتشافات ژئوفیزیک کاربردی رسیدن به تصویری دقیق از ویژگی‌های زیرزمینی است. فلز مس یک فلز گرانبه‌است که از هزاران سال پیش مورد توجه قرار گرفته و به فراخور شرایط و امکانات هر دوره مورد اکتشاف و بهره‌برداری قرار می‌گیرد. هم‌زمان با صنعتی شدن کشورها و افزایش چشمگیر بازار تقاضا برای فلزات پایه از جمله مس، نیاز به بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته برای اکتشاف و استخراج این فلزات بیشتر شده است. در ایران نیز با توجه به شناسایی وجود پتانسیل‌های بسیار خوب در مورد ذخایر زیرزمینی مس، نیاز به استفاده از روش‌های نوین اکتشاف احساس شد.

هدف از انجام این پژوهش، پردازش و تفسیر داده‌های موجود و تعیین محدوده‌های کانی‌سازی مس با استفاده از مدل‌سازی معکوس در منطقه کال ابری واقع در روستای درونه در شهرستان بردسکن است. در نهایت مناطق مناسب حفاری احتمالی پیشنهاد می‌شود.

۴-۱ روش تحقیق

برداشت‌های صحرائی با هدف اکتشاف سولفیدهای مس توسط شرکت زمین پرداز کویر، در محدوده معدن مس کال ابری انجام شده است. به منظور کاهش نوفه در روش‌های پلاریزاسیون‌القایی و مقاومت‌ویژه الکتریکی از آرایه‌های دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی استفاده شده است. فاصله الکترودی در برداشت داده‌ها ۱۰ و ۲۰ متر می‌باشد. در این برداشت‌ها تعداد ۱۱۷۸ نقطه در قالب شش پروفیل در محدوده کال ابری برداشت شده است. به منظور شناسایی بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه، مدل‌سازی معکوس روی داده‌های برداشتی انجام شده است و با استفاده از نتایج حاصل از آنها به کمک اطلاعات زمین‌شناسی، عمق و ابعاد کانی‌سازی در منطقه تعیین شده است. با استفاده از نرم‌افزارهای RES2DINV

و ZondRes2d مناطق بی‌هنجار با IP بالا و مقاومت‌ویژه متوسط تا بالا مشخص شده و توسط نرم‌افزار Voxler به صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. فصل اول به بیان مقدمه و ذکر مختصری از تاریخچه کارهای انجام شده، ضرورت و هدف از انجام تحقیق و همچنین روش تحقیق می‌پردازد. در فصل دوم به کلیاتی از اصول و تئوری روش‌های مقاومت‌ویژه و IP پرداخته می‌شود. فصل سوم شامل تشریح محدوده جغرافیایی مورد مطالعه و شرح زمین‌شناسی آن می‌باشد. فصل چهارم به تفسیر و ارائه مقاطع مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده می‌پردازد و در نهایت در فصل پنجم نتایج و پیشنهادات لازم ارائه می‌شود.

فصل دوم

اصول و تئوری روش‌های مقاومت-

ویژه و IP

۲-۱ مقدمه

ایده اکتشاف مواد معدنی با کمک اندازه‌گیری‌های الکتریکی در حدود سال‌های ۱۸۰۰ ارائه شد؛ اما کاربرد عملی و نتیجه‌بخش این روش حدود یک قرن بعد میسر گردید. روش‌های الکتریکی که با تزریق جریان الکتریکی به زمین انجام می‌پذیرد، برای اکتشاف مواد معدنی و همچنین آب‌های زیرزمینی کاربرد گسترده‌ای دارند [تلفورد و همکاران، ترجمه حاجب حسینی و زمردیان، ۱۳۸۷]. در دو مرحله از اکتشاف مواد معدنی می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی استفاده کرد: نخست در مرحله پی‌جویی. در این مرحله می‌توان از اطلاعات ژئوفیزیکی هوایی که در مقیاس ناحیه‌ای در یک منطقه وسیع برداشت شده‌اند، برای پیدا کردن بی‌هنجاری‌ها استفاده کرد. مرحله دیگر استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مراحل مقدماتی، نیمه تفصیلی و تفصیلی اکتشاف است. در این مرحله پس از استفاده از مدل‌های تکتونیکی، پترولوژیکی و دگرسانی و انتخاب محل مناسب، برای پیدا کردن محل دقیق ذخیره پنهان، شکل، گسترش و عمق آن می‌توان از روش یا روش‌های ژئوفیزیکی مناسب استفاده کرد. بر پایه اطلاعات ژئوفیزیکی توأم با اطلاعات زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون و ژئوشیمی می‌توان محل‌های مناسب را برای حفاری تعیین و در صورت موفقیت مقدار ذخیره کانسار را تخمین زد [Telford et al., 1990].

به‌طور کلی برای اکتشاف ذخایر معدنی روش‌های متنوع ژئوفیزیکی موجود می‌باشند؛ که بسته به شرایط، می‌توان از یک یا چند روش به‌طور هم‌زمان برای اکتشاف استفاده کرد. از روش‌های ژئوفیزیکی که برای اکتشاف کانسارها استفاده می‌شود، می‌توان به روش‌های مغناطیس‌سنجی، روش‌های الکتریکی^۱، الکترومغناطیسی^۲، ثقل‌سنجی و لرزه‌نگاری^۳ اشاره نمود. روش‌های الکتریکی اغلب برای پی‌جویی کانی‌ها به‌کار می‌روند و بیشتر این روش‌ها برای اکتشاف در اعماق کم مفید می‌باشند. انتخاب روش یا روش‌های

¹ Electrical methods

² Electromagnetic methods

³ Seismic methods

مناسب برای شناسایی یک کانسار، با طبیعت کانی‌های موجود در آن منطقه و سنگ‌های اطراف آن سر و کار دارد [کریم پور و همکاران، ۱۳۸۷]. به‌طور عمده شناسایی سولفیدهای فلزی به وسیله روش‌های الکتریکی انجام می‌گیرد. سولفیدهای پراکنده معمولاً به کمک IP مورد اکتشاف قرار می‌گیرند [کلاگری، ۱۳۷۱؛ حاجب حسینی و زمردیان، ۱۳۷۵]. همچنین روش مقاومت‌ویژه به دلیل تغییرات وسیع مقاومت-ویژه سنگ‌ها و کانی‌ها، به‌طور مؤثری برای اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی، بررسی آلودگی‌های زیست-محیطی، اکتشاف کانسارهای معدنی، بررسی مسائل مهندسی برای تعیین محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها، درز و شکاف‌ها و کاربردهای متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق روش‌های مقاومت‌ویژه و IP با استفاده از آرایش‌های دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی به صورت هم‌زمان به کار گرفته شده‌اند.

۲-۲ روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ ابداع شدند، اما از دهه ۱۹۷۰ و خصوصاً به دلیل دسترسی به کامپیوتر برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای پیدا کردند. این روش‌ها به‌طور مؤثری در اکتشاف آب‌های زیرزمینی، انواع آلودگی آب‌های زیرزمینی، بررسی مسائل مهندسی برای تعیین محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها و مناطق خرد شده، درز و شکاف‌ها، مناطق یخ‌زده، چاه-های معدنی، در بررسی‌های باستان‌شناسی برای تعیین گسترش فضایی بقایای ساختارهای مدفون قدیمی، علاوه بر کاربردهای متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰].

روش مقاومت‌ویژه به مطالعه لایه‌بندی زیرسطحی بر اساس مقاومت‌ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده در سطح زمین می‌پردازد [Zonge Engineering, 1994]. مقاومت‌ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی-های الکتریکی ناهگنی‌های زیر سطح زمین ارائه می‌دهد. هدف از برداشت‌های الکتریکی تخمین چگونگی

توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح زمین به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های سطحی می‌باشد. مقاومت ویژه زمین به عوامل مختلفی همچون کانی‌ها، آب محتوی^۱، تخلخل^۲ و درجه اشباع آب^۳ در سنگ بستگی دارد [Loke, 2004].

۲-۲-۱ تفاوت مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی

هر ماده‌ای در مقابل عبور جریان الکتریکی از خود مقاومتی نشان می‌دهد که از یک سو تابع طبیعت ذاتی آن و از سوی دیگر تابع شکل و اندازه آن می‌باشد. برای تفکیک این دو ویژگی این مقدار را برای جسمی به شکل و اندازه دلخواه «مقاومت» R و برای جسمی با ابعاد و شکل معین و استاندارد «مقاومت ویژه» ρ می‌نامند [Telford et al., 1991]. با توجه به قانون اهم، در نتیجه وجود اختلاف پتانسیل $V=V_1-V_2$ در طرفین جسمی با مقاومت R ، جریان مستقیم I از جسم عبور می‌کند. برای درک تفاوت مقاومت ویژه الکتریکی و مقاومت الکتریکی، استوانه نشان داده شده در شکل (۱-۲) را در نظر می‌گیریم. طبق قانون اهم، در صورتی که اختلاف پتانسیل V در دو سر استوانه باعث شارش جریان I در استوانه گردد، آنگاه مقاومت استوانه با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R=V/I \quad (1-2)$$

با آزمایش‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت R به طول استوانه (L)، مساحت سطح مقطع (A) و همچنین یک ویژگی ذاتی وابسته به جنس استوانه (مقاومت ویژه ρ) بستگی دارد:

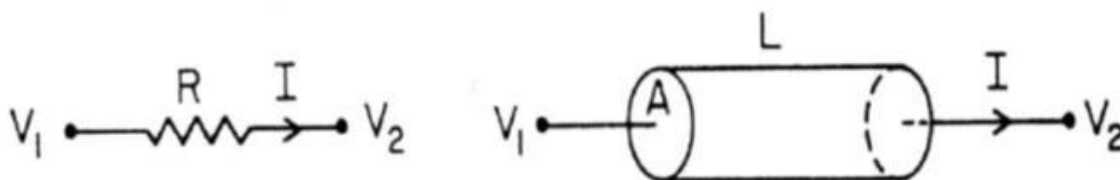
$$R = \rho (L/A) \rightarrow \rho = R (A/L) , \Omega(m^2/m) \quad (2-2)$$

¹ Water content

² Porosity

³ Water Saturation

مقاومت ویژه، یکی از ویژگی‌های ذاتی مواد است (مانند دانسیته)، در حالی که مقاومت یک جسم علاوه بر جنس آن به ویژگی‌های هندسی ماده نیز بستگی دارد. با توجه به این که واحد مقاومت اهم (Ω) است، بر اساس رابطه (۲-۲) مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم-متر بیان می‌شود [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰].



شکل (۱-۲): نمایش مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی [Burger et al., 2006].

در روش مقاومت ویژه جریان الکتریکی مصنوعی توسط دو الکتروود به زمین تزریق می‌شود و اختلاف پتانسیل منتجه بین دو نقطه در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. انحراف از شکل اختلاف پتانسیل‌های قابل انتظار در مورد زون‌های همگن اطلاعاتی در مورد شکل و خواص الکتریکی ناهمگونی‌های زیرسطحی ارائه می‌دهد. مقاومت ویژه یک ماده به عنوان مقاومت ویژه بین سطوح مخالف به مکعب واحد از جسم بر حسب اهم‌متر تعریف می‌شود. مقاومت ویژه الکتریکی یکی از خواص فیزیکی سنگ‌ها می‌باشد که دارای تغییرات زیادی است. کانی‌های خاصی مانند فلزات طبیعی و گرافیت از طریق عبور الکترون‌ها جریان الکتریکی را هدایت می‌کنند؛ لیکن بیشتر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها غیرقابل نفوذ بوده و جریان الکتریکی اغلب از طریق یون‌های آب موجود در خلل و فرج سنگ انتقال می‌یابد [Telford et al., 1990]. در بسیاری از سنگ‌ها، هدایت الکتریکی از طریق عملکرد سیالات موجود در حفرات به عنوان الکتروولیت و مشارکت بسیار اندک کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ (به جز در مواردی که کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ خود رسانای خوب الکتریسیته باشند) صورت می‌پذیرد [Reynolds, 1997]. بنابراین تخلخل عمده-ترین کنترل‌کننده مقاومت سنگ بوده و علاوه بر آن میزان آب درون خلل و فرج و مقاومت الکتریکی آب نیز در این جهت نقش اصلی را بازی می‌کنند و درحد وسیعی مقاومت ویژه الکتریکی سنگ را تغییر می‌-

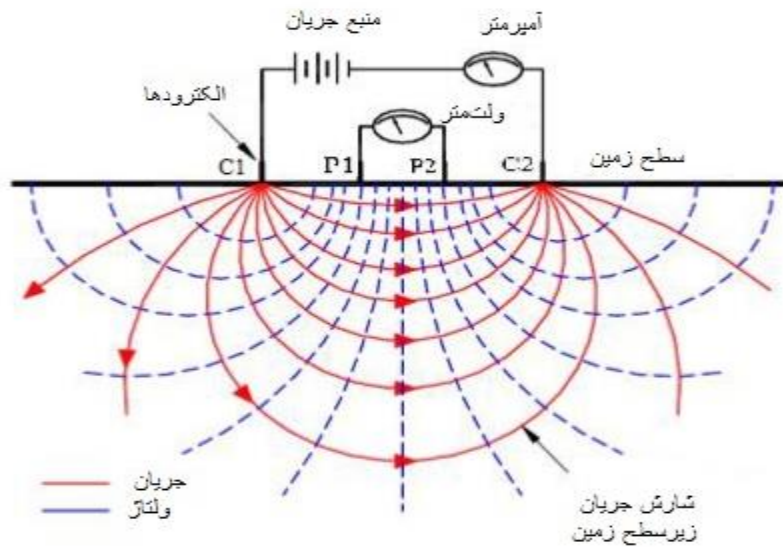
دهند و بر این اساس هم‌پوشی قابل ملاحظه‌ای بین مقاومت‌ویژه الکتریکی انواع مختلف سنگ‌ها وجود دارد و در نتیجه مشخص کردن نوع سنگ‌ها تنها بر اساس داده‌های مقاومت‌سنجی ممکن نیست و حتماً باید عوامل فوق را مدنظر قرار داد. در اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی، جریان الکتریکی مستقیم توسط دو الکتروود جریان (C1, C2) به درون زمین فرستاده می‌شود و اختلاف پتانسیل حاصل بین دو الکتروود پتانسیل (P1, P2) در زمین اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت‌ویژه الکتریکی از رابطه بعد محاسبه می‌گردد:

$$\rho = K \cdot V/I \quad (3-2)$$

در این فرمول V اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده و I شدت جریان تزریق شده به زمین و K ضریب ژئومتری مورد استفاده بوده و اگرچه برای هر آرایه می‌توان رابطه آن را بیان کرد ولی رابطه کلی محاسبه این ضریب طبق رابطه (۴-۲) می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱].

$$K = 2\pi \cdot \frac{1}{\frac{1}{c_1 p_1} + \frac{1}{c_1 p_2} + \frac{1}{c_2 p_1} + \frac{1}{c_2 p_2}} \quad (4-2)$$

در شکل (۲-۲) نمونه‌ای از یک آرایش چهار الکتروودی نشان داده شده است. در این شکل، الکتروودهای C_1 و C_2 نشان دهنده الکتروودهای جریان و الکتروودهای P_1 و P_2 الکتروودهای پتانسیل می‌باشند.



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

در این آرایش چهار الکترودی، اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، طبق رابطه (۵-۲) محاسبه می‌شود.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{rc_{1p1}} - \frac{1}{rc_{2p1}} - \frac{1}{rc_{1p2}} + \frac{1}{rc_{2p2}} \right) \quad (۵-۲)$$

که در آن ΔV ، اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، r_{c1p1} فاصله بین الکترودهای C1 و P1، r_{c2p1} فاصله بین الکترودهای C2 و P1، r_{c1p2} برابر فاصله بین الکترودهای C1 و P2 و بالاخره r_{c2p2} فاصله بین الکترودهای C2 و P2 می‌باشند [Loke, 2004].

۲-۲-۲ مقاومت ویژه ظاهری

مقادیر مقاومت ویژه سنگ‌ها که در کتب مختلف آمده، دارای گستره وسیعی از اعداد با هم‌پوشانی فراوان است [Telford et al., 1991]. بدون شک هیچ ویژگی فیزیکی دیگری چنین بازه وسیعی را به نمایش نمی‌گذارد. بنابراین تنها با تکیه بر نتایج مقاومت ویژه مواد نمی‌توان ماده مورد نظر را به‌طور یکتا تعیین

کرد؛ زیرا تناظر یک به یک بین ماده‌ای خاص و مقاومتی معین وجود ندارد. مقاومت ویژه‌ای که در برداشت صحرایی حاصل می‌شود به فاکتورهایی فراتر از تخلخل، درجه اشباع، مقاومت ویژه سیال و ... بستگی دارد و به نام مقاومت ویژه ظاهری معروف است [Reynolds, 1997]. اگر مقاومت ویژه در یک محیط همگن و ایزوتروپ اندازه‌گیری شود، آنگاه آن را مقاومت ویژه واقعی می‌نامند؛ اما اگر اندازه‌گیری در یک محیط ناهمگن و غیر ایزوتروپ صورت گیرد، آنگاه آن را مقاومت ویژه ظاهری می‌گویند که تابعی از شکل ناهمگنی مربوطه خواهد بود [کلاگری، ۱۳۷۱].

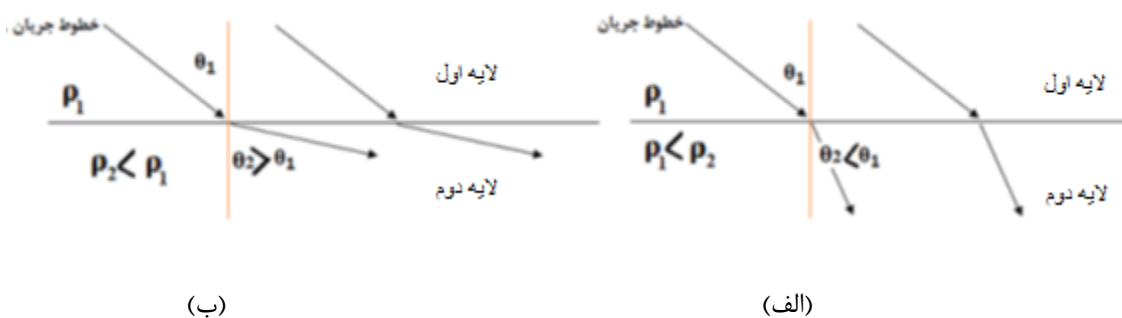
در طبیعت زمین همگن و یکنواخت وجود ندارد و برداشت‌های زمینی واقعی در چنین شرایطی انجام می‌شود. مقادیر مقاومت ویژه‌ای که در این روش حاصل می‌شود، مقدار میانگین مقاومت ویژه در طول مسیر برداشت است؛ زیرا جریان تزریقی تحت تأثیر تمام سازندهای مسیر خود قرار گرفته است. بنابراین این مقدار با توجه به هندسه آرایش الکتروودی برای یک عمق خاص در نظر گرفته می‌شود.

هابرت^۱ در سال ۱۹۴۰ نشان داد که خطوط جریان در عبور از فصل مشترک محیط‌های با تباین مقاومت-ویژه، از رابطه (۲-۶) تبعیت می‌کند:

$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (۲-۶)$$

بنابراین، در صورتی که مقاومت ویژه لایه عمیق‌تر بیشتر از لایه فوقانی آن باشد، خطوط جریان به عمود بر فصل مشترک نزدیک شده و فاصله آنها از یکدیگر بیشتر می‌شود (شکل ۲-۳-الف). بالعکس اگر خطوط جریان به لایه‌ای با مقاومت ویژه کمتر وارد شوند، از خط عمود بر فصل مشترک دور شده و به راستای موازی با مرز تمایل پیدا می‌کنند (شکل ۲-۳-ب).

^۱ Hubbert



شکل (۲-۳): انحراف خطوط جریان در مرز دو لایه با مقاومت ویژه‌های مختلف. الف: لایه دوم مقاوم‌تر از لایه اول. ب: لایه اول مقاوم‌تر از لایه دوم [After Burger et al., 2006].

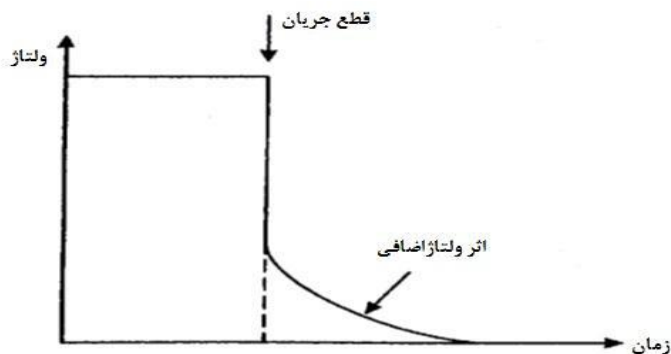
کاملاً واضح است که با انحراف خطوط جریان در عبور از مرزهای با تباین مقاومت ویژه در طرفین، سطوح هم‌پتانسیل نیز دچار تغییر می‌شوند [Burger et al., 2006].

۲-۳ روش پلاریزاسیون القایی

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

روش پلاریزاسیون القایی برای اکتشاف کانی‌های فلزی جلادار سولفیدی پورفیری و کانی‌های رسی و زئولیت‌ها بسیار مناسب می‌باشد و کاربرد وسیعی در اکتشاف فلزات پایه دارد. عمق نفوذ آن به‌طور تقریبی از عمق ۵۰ متری تا ۲۰۰ متری می‌باشد و در آشکارسازی سولفیدهای پراکنده نسبت به سولفیدهای

توده‌ای، بهتر عمل می‌نماید [Telford et al., 1990]. اندازه‌گیری‌های روش IP خیلی شبیه روش مقاومت‌ویژه است؛ که در این روش از دو الکتروود جریان فلزی و دو الکتروود پتانسیل غیرپلاریزه استفاده می‌شود. هنگامی که جریان قطع می‌شود؛ ولتاژ بین دو الکتروود پتانسیل (در چند ثانیه یا چند دقیقه) اندازه‌گیری می‌شود؛ که این زمان زمانی است که طول می‌کشد تا ولتاژ بین دو الکتروود پتانسیل به مقدار تقریبی صفر برسد، زیرا زمین به‌طور موقت پلاریزه شده است. این ولتاژ بعد از قطع جریان ناشی از بار ذخیره شده، موقتی است؛ که اصطلاحاً گفته می‌شود زمین پلاریزه شده است و همانند یک خازن عمل می‌کند که بعد از قطع جریان تخلیه می‌شود [Reynolds, 1997]. شکل (۲-۴) نشان‌دهنده اثر ولتاژ اضافی می‌باشد.



شکل (۲-۴): اثر ولتاژ اضافی ناشی از پلاریزاسیون القایی بعد از قطع جریان [After Reynolds, 1997].

تجارب آزمایشگاهی نشان داده است هنگامی که جریان الکتریکی از نوع مستقیم DC و یا متناوب AC با فرکانس خیلی کم حدود ۰/۱ هرتز به زمین فرستاده شود، انرژی الکتریکی در داخل سنگ‌ها بر اساس فرآیندهای الکتروشیمیایی ذخیره می‌شود. این عمل معمولاً به دو طریق صورت می‌گیرد: الف) پلاریزاسیون غشایی یا غیر فلزی^۱، ب) پلاریزاسیون الکتروودی یا فلزی^۲

¹ Membrane Polarization

² Over Voltage

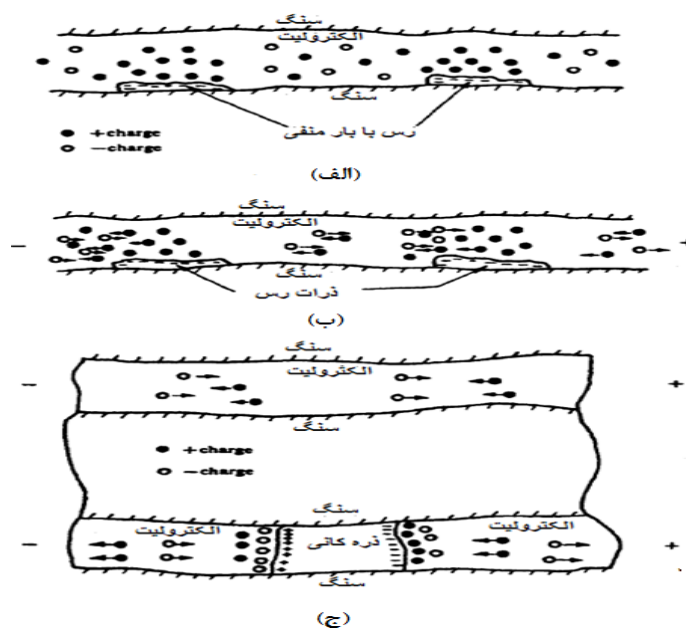
۲-۳-۱ پلاریزاسیون غشایی

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

۲-۳-۲ پلاریزاسیون الکترودی

این نوع پلاریزاسیون که از نظر اصولی شبیه به پلاریزاسیون غشایی است؛ در مواردی رخ می‌دهد که کانی‌های فلزی در سنگ وجود داشته و بخشی از جریان به صورت الکترونی و بخشی نیز به صورت الکترولیتی منتقل شود. در چنین شرایطی، یک واکنش شیمیایی در فصل مشترک سیال و کانی رخ می‌دهد. در شکل (۲-۵) دو مسیر حفره‌ای متفاوت در یک سنگ نشان داده شده است. در حفره بالایی، جریان تماماً به صورت الکترولیتی شارش می‌یابد. در حفره پائینی، حضور یک کانی فلزی با بارهای سطحی با علامت مخالف در هر طرف، باعث تجمع یون‌ها در الکترولیت موجود در هر طرف کانی فلزی

می‌شود. با توجه به این که سرعت شارش جریان در الکترولیت بسیار کمتر از کانی فلزی است؛ تجمع یون‌ها توسط ولتاژ خارجی باقی می‌ماند. با قطع جریان، یون‌ها به حالت تعادل اولیه خود بازگشته و ولتاژ اضافه از بین می‌رود [Telford et al., 1990].



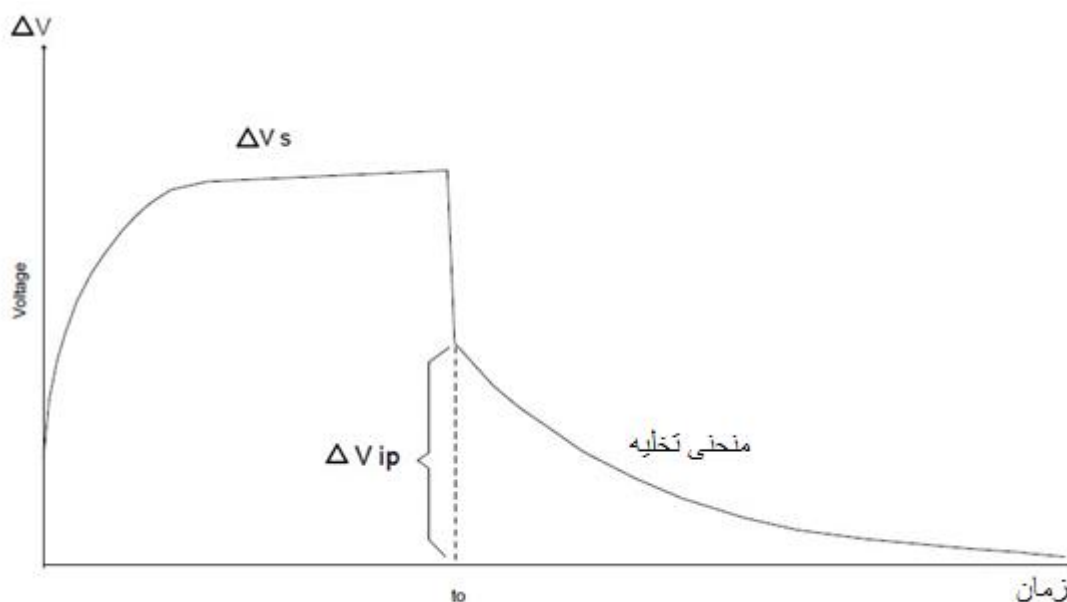
شکل (۲-۵): اثر پلاریزاسیون غشایی و الکتروودی. الف) توزیع نرمال یون‌ها در ماسه سنگ متخلخل، ب) پلاریزاسیون غشایی در ماسه سنگ متخلخل ناشی از یک ولتاژ dc اعمال شده، ج) جریان الکترولیتی در حفره بالایی و پلاریزاسیون الکتروودی در حفره پائینی [After Telford et al., 1990].

دو روش اصلی برای اندازه‌گیری میزان شارپذیری وجود دارد:

الف: روش اندازه‌گیری در حوزه زمانی^۱

در این روش از جریان با فرکانس خیلی کم استفاده می‌شود. معمولاً جریان I را به مدت ۱ الی ۵ دقیقه وارد زمین می‌کنند تا اختلاف پتانسیل به یک حالت ثابت و پایدار برسد، سپس جریان را ناگهان قطع می‌کنند (شکل ۲-۶). در این حالت نحوه اندازه‌گیری معمولاً به ۳ طریق صورت می‌گیرد:

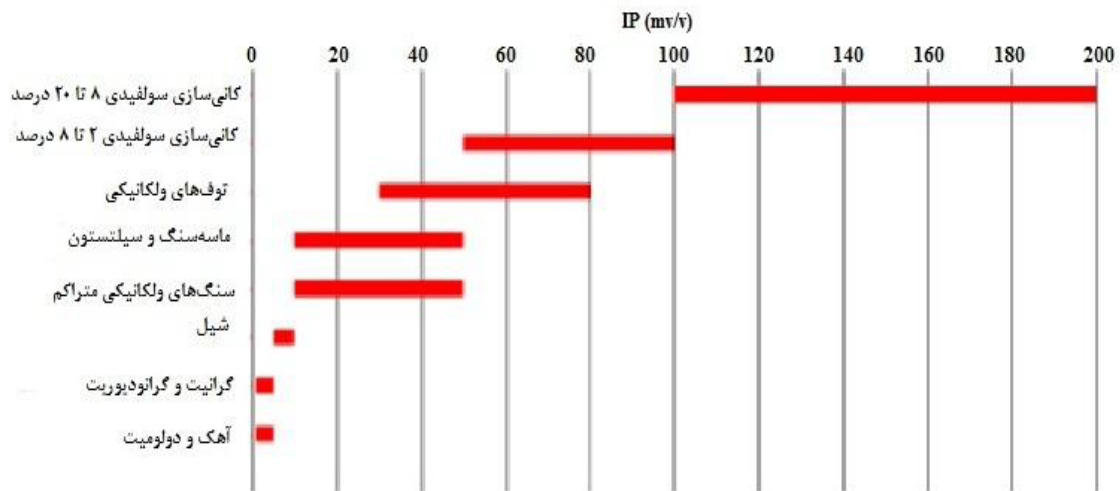
- اندازه‌گیری بارپذیری ظاهری براساس نسبت تغییرات اختلاف پتانسیل IP بر تغییرات اختلاف پتانسیل منبع
- اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP
- اندازه‌گیری بارپذیری از طریق محاسبه تمامی مساحت زیر منحنی ولتاژ [کلاگری، ۱۳۷۱].



شکل (۲-۶): تغییرات ولتاژ قبل و بعد از قطع جریان نسبت به زمان [After www.geomoto.com].

¹ Time-Domain

مقدار بارپذیری به دست آمده برای سنگ‌ها و کانی‌ها متفاوت می‌باشد و بستگی به زمان شارش جریان در زمین و نیز بازه اندازه‌گیری بعد از قطع جریان دارد. شکل (۷-۲) نمونه‌ای از IP سنگ‌ها و کانی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

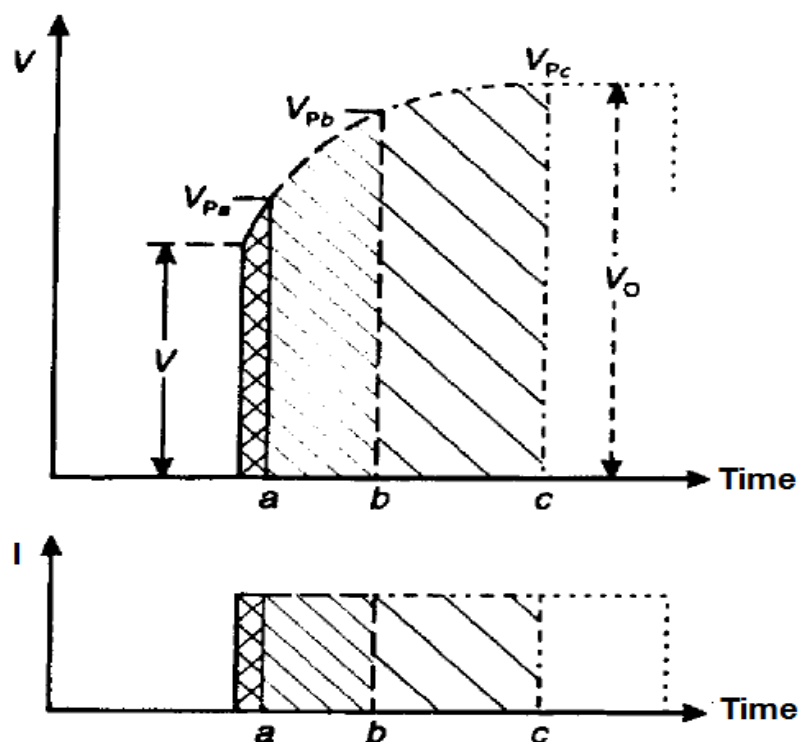


شکل (۷-۲): اندازه IP برحسب میلی‌ولت بر ولت برای تعدادی از سنگ‌ها و کانی‌ها [After Loke, 2014].

ب: روش اندازه‌گیری در حوزه فرکانسی^۱

در مطالعات حوزه فرکانس (فرکانس متغیر) پلاریزاسیون القایی، مقاومت ویژه ظاهری در دو فرکانس کمتر از ۱۰ هرتز (مانند ۰/۱ و ۵ هرتز یا ۰/۳ و ۲/۵ هرتز) با استفاده از همان آرایش الکترودی استفاده شده در روش‌های حوزه زمان و مقاومت ویژه DC اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت ویژه در فرکانس پائین (ρ_{a0}) بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالا (ρ_{a1}) است. برای یک شارژ کوتاه، ولتاژ اضافی (V_{pa}) اندازه‌گیری شده به طور بارزی کمتر از مقدار به دست آمده برای زمان شارژ طولانی‌تر (V_{pc} و V_{pb}) می‌باشد شکل (۸-۲) [Reynolds, 1997].

¹ Frequency Domain



شکل (۸-۲): افزایش زمان شارژ (a تا c)، که در پی آن فرکانس اندازه‌گیری کاهش و اثر ولتاژ اضافی افزایش می‌یابد (V_{pa}) تا (V_{pc}). در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس پایین (در c)، بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالا (در a) می‌باشد

[Reynolds, 1997].

چون زمان واهلش برای اندازه‌گیری بسیار کوتاه است؛ به همین خاطر بزرگی کلی ولتاژ اندازه‌گیری شده در ارتباط با جریان اعمالی، مقدار مقاومت (R) را به دست می‌دهد؛ که با ضرب کردن آن در فاکتور هندسی مناسب مقدار مقاومت ویژه به دست می‌آید. اگر قطب‌های جریان تعویض شود و قطع و وصل جریان با یک زمان تأخیر قابل مقایسه با زمان شارژ صورت گیرد؛ این همان به کار بردن سیگنال جریان متناوب در یک فرکانس داده شده می‌باشد. باید توجه نمود مقاومت ویژه در فرکانس پائین‌تر بزرگتر از مقدار آن در فرکانس بالاتر است.

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

اثر فرکانس:

$$FE = (\rho_{a0} - \rho_{a1}) / \rho_{a1} \quad (7-2)$$

که به ترتیب ρ_{a0} و ρ_{a1} مقاومت ویژه در فرکانس پائین و بالا می‌باشند و $\rho_{a0} > \rho_{a1}$

درصد اثر فرکانس:

$$PFE = 100FE \quad (8-2)$$

لازم به ذکر است که درصد اثر فرکانس (در حوزه فرکانس) در مقادیر ضعیف پلاریزه‌شوندگی یا در جایی که FE خیلی کوچکتر از ۱ باشد با بارپذیری در حوزه زمان هم‌ارز می‌شود.

مارشال^۱ و مادن^۲ (۱۹۵۹) با به کار بردن درصد اثر فرکانس، فاکتور فلزی (MF) را معرفی کردند (رابطه ۹-۲) [Marshall and Madden, 1959]. به نظر برخی ژئوفیزیکدانان، فاکتور فلزی جهت تعیین مناطق سولفیدهای پراکنده نسبت به داده‌های درصد اثر فرکانس کارایی بهتری دارد.

فاکتور فلزی:

$$MF = A (\rho_{a0} - \rho_{a1}) / (\rho_{a0} \rho_{a1}), \text{ (Siemens/m)} \quad (9-2)$$

$$= A (\sigma_{a1} - \sigma_{a0})$$

¹ Marshall

² Madden

ρ_{a1} و ρ_{a0} مقاومت ویژه‌های ظاهری و σ_{a1} و σ_{a0} رسانندگی‌های الکتریکی ظاهری هستند. در فرکانس‌های

پائین و بالا به ترتیب، $\rho_{a0} > \rho_{a1}$ و $\sigma_{a0} < \sigma_{a1}$ و $A=2\pi \times 10^5$

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

۲-۴ عوامل مؤثر بر مقدار IP

فاکتورهایی که بر اندازه‌گیری‌های IP اثر می‌گذارند عبارتند از:

- نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که کانی‌های دارای قابلیت هدایت الکترونیکی، IP قوی‌تری نسبت به کانی‌هایی که دارای قابلیت هدایت الکترونیکی هستند (مانند مالاکیت)؛ ایجاد می‌کنند. البته موارد استثنایی هم وجود دارد. مثلاً اسفالریت درحالی که دارای هدایت الکتریکی فلزی است؛ IP ضعیفی از خود نشان می‌دهد.
- عمق کانی‌سازی نیز در کاوش توده‌های معدنی به روش IP بسیار مؤثر است. اگر توده معدنی نسبتاً کوچک و عمیق باشد، ممکن است IP اندازه‌گیری شده، آنقدر ضعیف باشد؛ که نتوان کانسار را از سنگ در برگیرنده تفکیک کرد.
- عیار ماده معدنی نیز بر پاسخ IP اثر می‌گذارد. با افزایش عیار مواد معدنی شدت IP افزایش می‌یابد.
- پدیده IP به سطح ایجاد شده توسط دانه‌های ماده معدنی بستگی دارد. هر چقدر ماده معدنی دانه ریزتر باشد، IP حاصل بزرگتر می‌باشد (منظور حالت پورفیری است). البته این نکته را باید

مدنظر قرار داد؛ که در صورتی که اندازه دانه‌بندی از یک حدی کوچکتر شود، شدت IP به جای افزایش، کاهش می‌یابد.

○ مقاومت‌ویژه سنگ‌های دربرگیرنده کانسار نیز بر پاسخ IP اثر می‌گذارد؛ که این تأثیر، به اختلاف مقاومت‌ویژه بین کانسار و سنگ میزبان بستگی دارد. با افزایش مقاومت‌ویژه سنگ‌های دربر-گیرنده کانسار نسبت به مقاومت‌ویژه کانسار، مقدار جریان اولیه‌ای که وارد کانسار می‌شود؛ افزایش می‌یابد [لطیف کار، ۱۳۹۳].

۲-۵ اختلالات در اندازه‌گیری‌ها

در این قسمت اختلالات ناشی از پدیده‌های زمین‌شناسی نامطلوب و اثر شرایط خاص زمین‌شناسی مورد توجه قرار می‌گیرد و خطاهای دستگاهی در مقایسه با سایر خطاها قابل اغماض فرض می‌شود. برای دستیابی به داده‌های با کیفیت بالا در مطالعات IP، باید نوفه‌ها و اغتشاشات الکتریکی پاسخ IP پیش از برداشت و تفسیر آنها به حداقل برسد. منابع ایجاد نوفه عبارت است از:

- پتانسیل خودزا (SP)
- جفت‌شدگی الکترومغناطیسی^۱
- نشت جریان از سیم‌ها (در اثر آسیب‌دیدگی روکش سیم)
- جریان حاصل از قطبش الکترودهای پتانسیل
- جریان‌های تلوریک^۲ [کلاگری، ۱۳۷۱].

دستگاه‌های جدید به‌راحتی جریان‌های SP را خنثی می‌کنند. جریان حاصل از جفت‌شدگی الکترومغناطیسی، توسط القای متقابل بین سیم‌های جریان ایجاد می‌شود. پتانسیل القایی هم به‌طور

^۱ EM coupling

^۲ Telluric currents

مستقیم و هم از راه زمین مجاور صورت می‌گیرد. این نوفه یکی از نوفه‌های آزاردهنده در این روش است. در مواقعی که از آرایش‌های با سیم طویل و با فرکانس‌های بالا استفاده می‌شود، اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیسی می‌تواند خیلی بزرگ باشد. برای کم شدن جفت‌شدگی حاصل از سیم‌های طویل، از آرایه‌های قطبی - دوقطبی و دوقطبی - دوقطبی استفاده می‌شود و معمولاً فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱۰ هرتز) به کار می‌رود. ضمناً تا حد امکان سیم‌های پتانسیل و جریان از هم دور نگه داشته می‌شوند. پتانسیل حاصل از قطبش الکترودهای پتانسیل با به‌کارگیری الکترودهای قطبش‌ناپذیر^۱ خنثی می‌گردد. نوفه تلوریک را می‌توان به‌طور موفقیت‌آمیزی با یک فیلتر بالاگذر (در درون دستگاه) کاهش داد، به‌خصوص زمانی که فرکانس پایینی فرستنده کمتر از ۰/۳ هرتز نباشد [تلفورد و همکاران، ترجمه حاجب حسینی و زمردیان، ۱۳۸۷].

۲-۶ آرایه مورد استفاده در برداشت‌های ژئوالکتریک

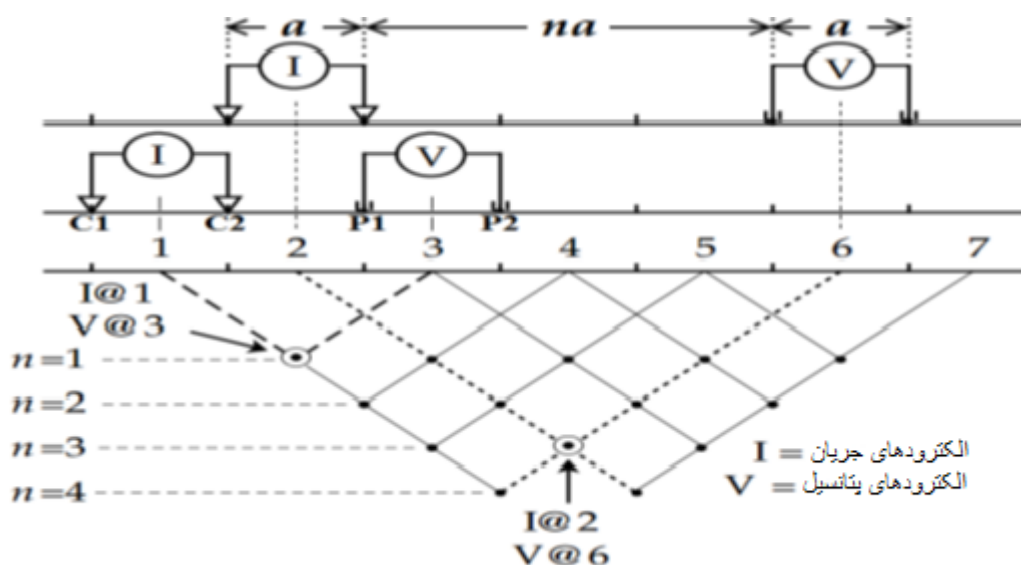
منظور از آرایه، نحوه چیدمان الکترودهای فرستنده و گیرنده بر روی زمین است. روش و چیدمان‌های بسیار متفاوتی برای منظورهای متفاوت در روش‌های مطالعات ژئوالکتریک به کار گرفته می‌شود؛ که در این تحقیق فقط به شرح دو نوع آرایه که از آنها استفاده شده؛ پرداخته می‌شود. در بررسی‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده در این محدوده از ترکیب آرایه دوقطبی - دوقطبی با آرایه قطبی - دو قطبی استفاده شده است. این آرایه بیشترین عمق نفوذ را دارد؛ اما به‌طور نسبی، نسبت سیگنال به نوفه در این آرایه کم است. بنابراین برای به دست آوردن داده با کیفیت خوب، الکترودها باید به قدر کافی به زمین وصل شوند و دستگاه باید حساسیت بالایی داشته باشد [Knödel et al., 2007].

¹ Nonpolarization

آرایه دوقطبی - دوقطبی قدرت تفکیک جانبی و قائم خوبی دارد و بهترین مشخصه آن، قدرت تفکیک برای اهداف قائم باریک می‌باشد. عیب آن قدرت سیگنال پایین در مقایسه با آرایه قطبی - دوقطبی یا آرایه مستطیلی است. آرایه قطبی - دوقطبی، قدرت تفکیک قائم دوقطبی - دوقطبی را ندارد؛ یا برای بی-هنجاری‌های باریک قائم، قدرت تفکیک هم‌سطح دوقطبی - دوقطبی را دارا نمی‌باشد [Goldie, 2007].

آرایه الکترودی قطبی - دوقطبی متقارن قدرت تفکیک بالاتری نسبت به سایر آرایه‌های الکترودی متداول دارد [پیروز و همکاران، ۱۳۹۲]. آرایه دوقطبی - دوقطبی به طور عمومی در IP استفاده می‌شود زیرا جدا بودن کامل مدار جریان و ولتاژ، اثر نوفه القایی را کاهش می‌دهد [Milsom, 2007]. در این آرایه فواصل بین جفت الکترودهای جریان و جفت الکترودهای پتانسیل برابر مقدار ثابت a می‌باشد (شکل ۲-۹). برای اندازه‌گیری با این آرایه، فاصله a اساساً در کوچکترین واحد فاصله الکترودی ثابت نگه داشته می‌شود و معمولاً با فاصله a شروع می‌شود. فاکتور n (که نسبت فاصله بین دو الکتروود $C1$ و $P1$ به طول دوقطبی جریان یا پتانسیل است) از ۱ به ۲ افزایش می‌یابد؛ درحالی که فاصله دوقطبی جریان یا پتانسیل در a ثابت شده است. برای اندازه‌گیری‌های بعدی فاکتور n به ۳ و همین‌طور تا حدود ۶ به منظور افزایش عمق اکتشاف افزایش می‌یابد. یک عیب این آرایه قدرت سیگنال بسیار پایین آن برای مقادیر بالای فاکتور n و یا دشوار بودن اندازه‌گیری دقیق پتانسیل به دلیل مقادیر بسیار پایین پتانسیل می‌باشد. یک راه برای غلبه بر این مشکل، افزایش فاصله a بین هر یک از دوقطبی‌های جریان و پتانسیل برای کاهش افت پتانسیل، زمانی که طول کلی این آرایه برای افزایش عمق اکتشاف افزایش می‌یابد، است. اندازه‌گیری‌های بعدی با مقادیر مختلف n به دست می‌آید. در صورت لزوم، می‌تواند با مقادیر بزرگتر فاصله جفت دوقطبی جریان یا پتانسیل تکرار شود [Loke, 2012]. در اصل، یک مقدار بزرگتر n ، از اعماق بیشتری اطلاعات می‌دهد [Milsom, 2007]. عمق متوسط اکتشاف با این آرایه به هر دو فاکتور n و a بستگی دارد [Loke, 2012]. همان‌طور که در شکل (۲-۹) دیده می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری به نقطه تقاطع خطوط مایل که با زاویه

۴۵ درجه از مراکز دوقطبی جریان و پتانسیل رسم می‌شود، نسبت داده می‌شود [Milsom, 2007]. مقادیر رسم شده مقادیر واقعی پارامتر در آن عمق نمی‌باشد. شکل رسم شده شبه‌مقطع نامیده می‌شود؛ که یک تصویر مناسب هرچند غیر واقعی از حضور بی‌هنجاری‌های رسانا تهیه می‌کند؛ ولی اندازه تغییرات جانبی و عمودی حقیقی آنها را نشان نمی‌دهد. حضور ناحیه بی‌هنجاری ممکن است با انجام حفاری‌های اکتشافی بیشتر جستجو شود [Lowrie, 2007].



شکل (۲-۹): آرایه دوقطبی - دوقطبی و رسم شبه‌مقطع [After Lowrie, 2007].

در آرایه قطبی - دوقطبی سه الکتروود C2, P1, P2 در امتداد یک پروفیل قرار داشته و الکتروود دیگر جریان (C1) در یک فاصله بسیار زیاد از پروفیل و در امتدادی عمود بر امتداد پروفیل قرار دارد؛ که به آن اصطلاحاً جریان بی‌نهایت گفته می‌شود. این الکتروود جریان تا پایان داده‌برداری ثابت باقی خواهد ماند. فاصله الکتروودهای پتانسیل P1P2 برابر با a می‌باشد. در هر اندازه‌گیری الکتروودهای C1C2 ثابت بوده و الکتروودهای P1P2 در امتداد پروفیل به اندازه a حرکت می‌کنند، در نتیجه اندازه‌گیری برای عمق‌های مختلف انجام می‌گیرد. فاصله بین تنها الکتروود متحرک جریان (C2) و نزدیک‌ترین الکتروود پتانسیل در این آرایه برابر na می‌باشد ($n=1,2,3,\dots$) و عمق هر اندازه‌گیری بیشتر از $na/2$ خواهد بود. بنابراین برای

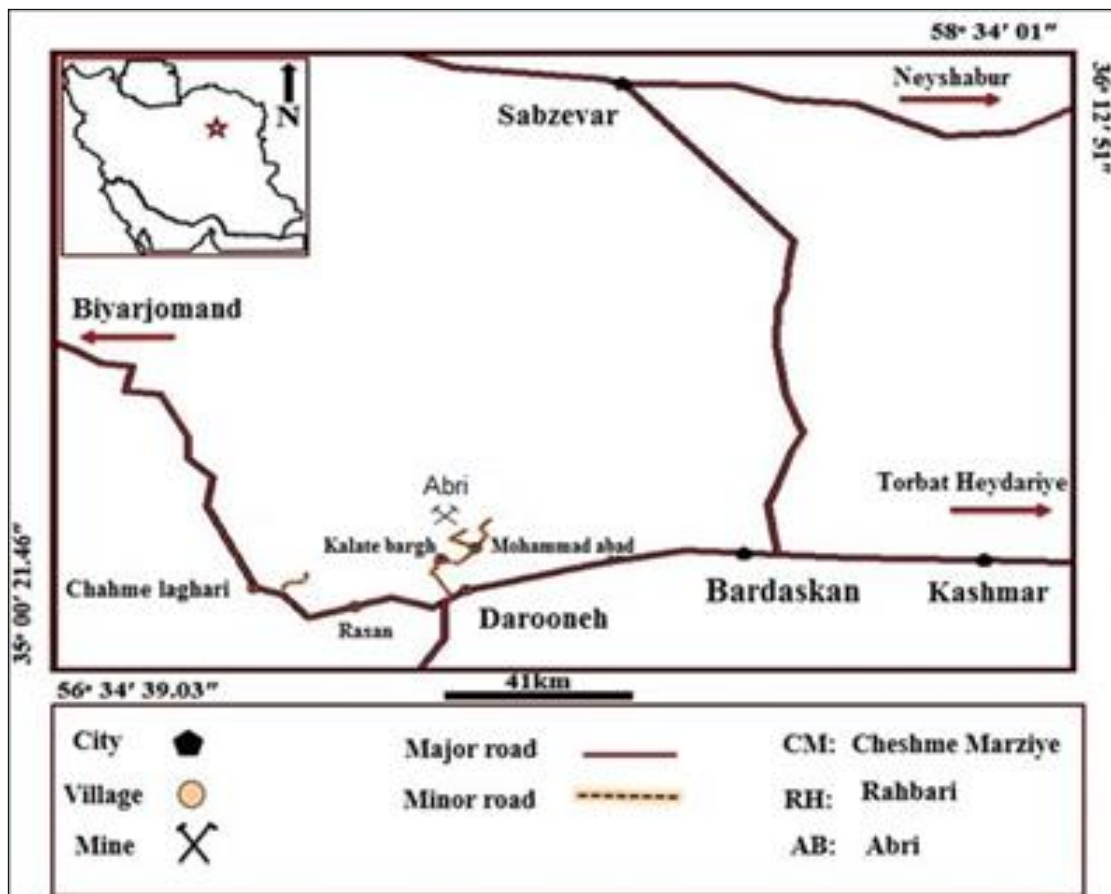
یک n ثابت عمق نفوذ آرایه قطبی - دو قطبی بیشتر از آرایه دوقطبی - دوقطبی است. به این ترتیب احتمالاً می‌توان با ترکیب دو آرایه عمق نفوذ را افزایش داد [مرتضی نژاد، ۱۳۹۳].

فصل سوم

زمین شناسی

۳-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه

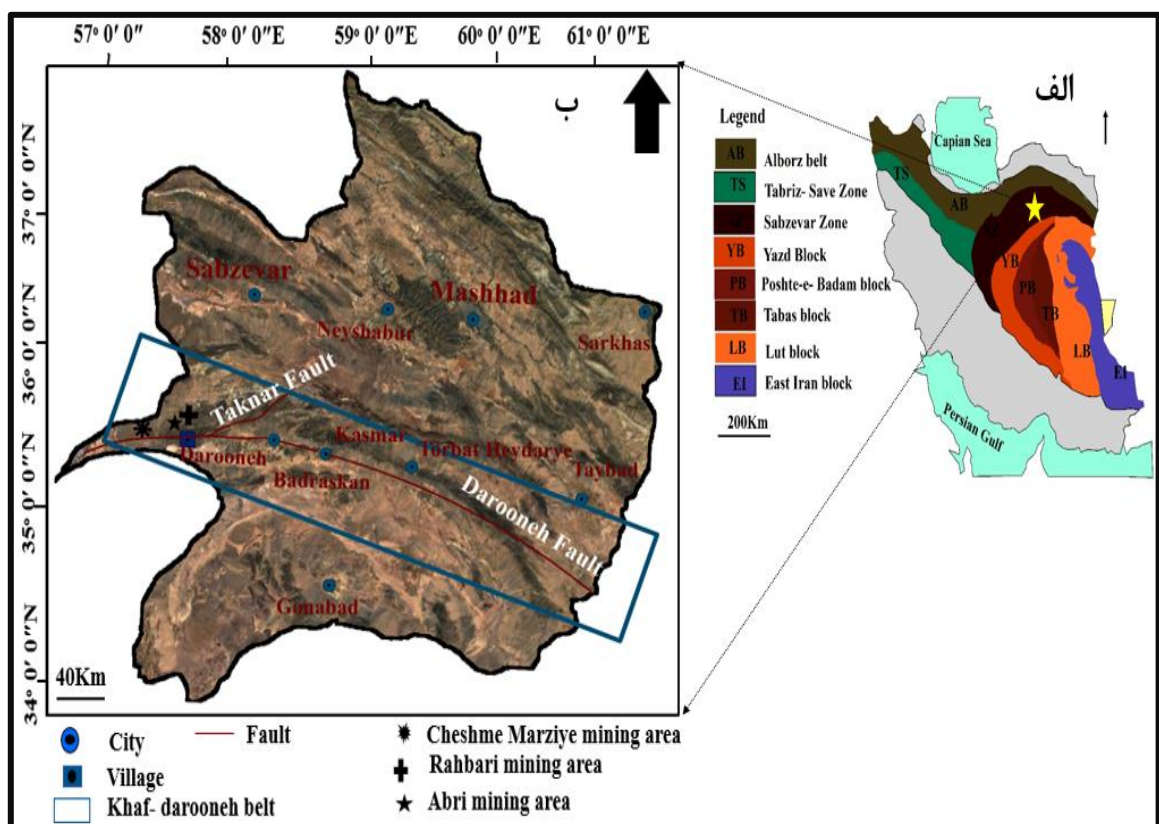
کانسار مس کال ابری در ۵۵ کیلومتری شمال غربی شهرستان بردسکن و ۱۵ کیلومتری شمال روستای درونه در استان خراسان رضوی قرار دارد. این کانسار در بین طول‌های جغرافیایی $26^{\circ} 20'$ تا $57^{\circ} 24'$ و عرض‌های جغرافیایی $35^{\circ} 17' 45''$ تا $35^{\circ} 19' 47''$ واقع شده است. دسترسی به محدوده معدنی از روستای درونه در جهت شمال غرب با طی مسافت ۱۵ کیلومتر در جاده خاکی تا روستای کلات‌برق و پس از آن در جهت شمال شرق با طی مسافت حدود ۱۸ کیلومتر تا روستای محمدآباد و مسافت حدود ۵ کیلومتر به سمت غرب روستای محمدآباد امکان‌پذیر می‌باشد (شکل ۳-۱).



شکل (۳-۱): نقشه موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به کانسار مس کال ابری در شمال غرب بردسکن [اسلطانی، ۱۳۹۵].

۲-۳ زمین‌شناسی عمومی و تکتونیک ناحیه

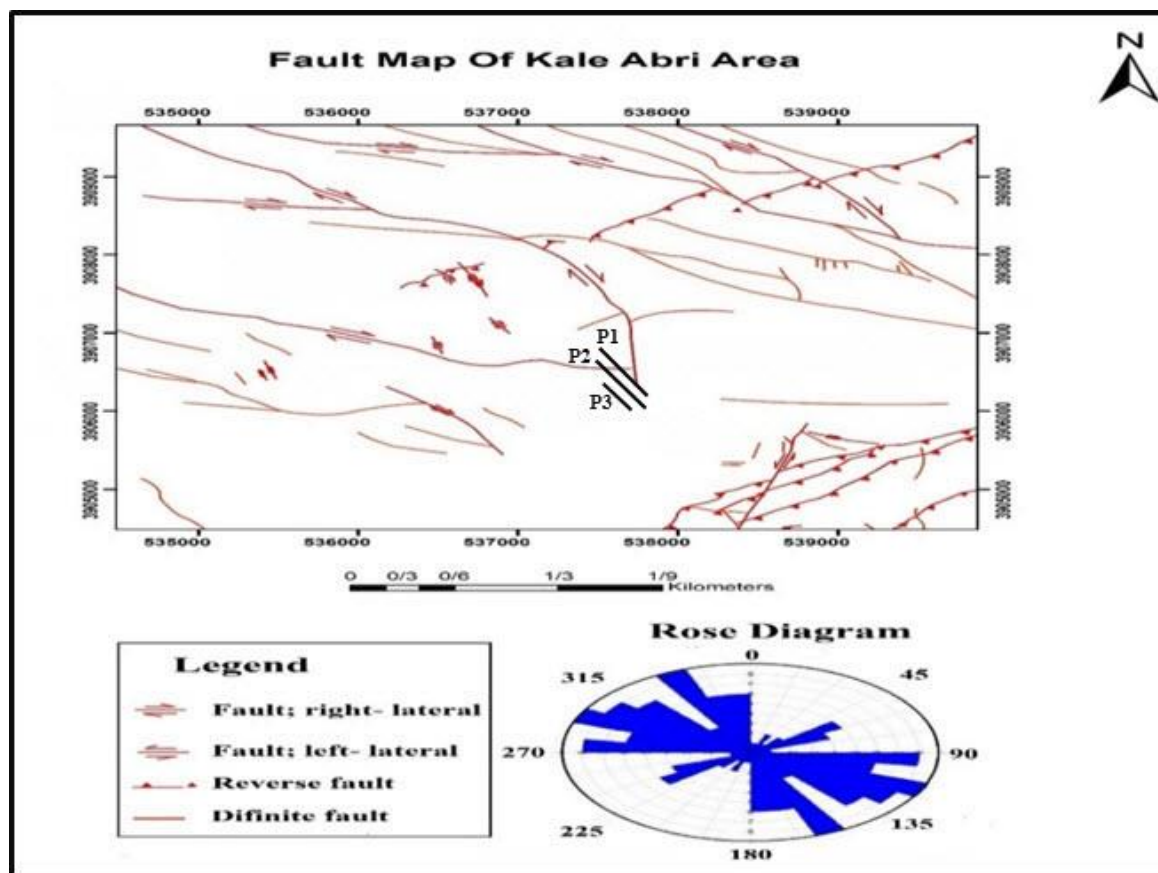
ناحیه مورد مطالعه در قسمت میانی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ درونه [قائمی و موسوی حرمی، ۱۳۸۵]، در استان خراسان رضوی، شمال غرب بردسکن واقع شده است. محدوده کال ابری در حاشیه شمالی ایران مرکزی، جنوب زون سبزوار قرار گرفته است. قرارگیری این محدوده بر روی زون افیولیتی و بالا بودن فعالیت‌های ماگمایی سنوزوئیک و حضور فعال گسل درونه در این بخش، به این منطقه جایگاهی خاص از نظر زمین‌شناسی داده است. واحدهای سنگی موجود در محدوده ورقه درونه شامل رخنمون‌هایی از پرکامبرین تا عهد حاضر می‌باشند. چینه‌شناسی منطقه مورد نظر شامل برونزدهایی از ائوسن تا رسوبات کواترنری (سنوزوئیک) می‌باشد. رخنمون‌های سنگی منطقه معدنی کال ابری بخشی از کمربند خواف- درونه (خواف- تربت حیدریه- بردسکن- بردسکن) است و عمدتاً شامل مجموعه‌های آتشفشانی- رسوبی و رسوبی با سن ائوسن میانی هستند (شکل ۳-۲). محدوده مطالعاتی کال ابری در حاشیه شمالی خرده قاره ایران مرکزی که این ناحیه دقیقاً منطبق بر بخش‌های افیولیتی و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن موجود در پهنه ایران مرکزی است واقع شده است.



شکل (۳-۲): الف) زیرپهنه ایران میانی از دیدگاه علوی [Alavi, 1991]. ب) ناحیه مورد مطالعه بر روی کمربند خواف- درونه

چهار سیستم گسلی در منطقه کال ابری قابل تشخیص است و شامل گسل‌های راندگی با روند شمال شرقی- جنوب غربی، گسل‌های امتداد لغز با مولفه راست‌بر با روند شمال غربی- جنوب شرقی و گسل‌های امتداد لغز شمالی- جنوبی و شرقی- غربی می‌باشند (شکل ۳-۳). محل قرارگیری پروفیل‌های P1، P2 و P3 در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. گسل درونه با روندی خاوری- باختری، عمده‌ترین ساختار در ناحیه مورد مطالعه است. در جنوب گسل درونه دشت نمکزار درونه قرار گرفته است. گسل یاد شده به عنوان گسلی فعال شناخته شده است. در جنوب گسل درونه که با فروافتادگی همراه بوده است، مخروط افکنه‌هایی در پای ارتفاعات ایجاد شده‌اند. فعالیت‌های جوان این گسل سبب گسترش مخروط افکنه‌ها به سوی دشت جنوبی شده است. گسل‌های دیگری که به موازات گسل درونه قرار دارند با فعالیت خود پستی

و بلندی‌هایی را در راستای باختری- خاوری ایجاد نموده‌اند. در واقع محدوده مطالعاتی در امتداد این ساختارها در شمال گسل درونه واقع شده است. این گسل‌ها سبب به وجود آمدن انحنا در مسیر آبراهه‌هایی که عمود بر راستای گسل‌ها جریان دارند، شده‌اند. به‌طور کلی به دلیل جوان و فعال بودن فعالیت‌های زمین‌ساختی در ناحیه، منطقه از دیدگاه ریخت‌شناسی در مراحل جوانی قرار دارد [قربانی و صالح پور، ۱۳۹۴]. تغییرات ساختاری ناشی از فعالیت گسل‌های منطقه مورد مطالعه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند؛ زیرا کانه‌زایی در محل درزه‌ها و شکستگی‌ها رخ داده است.



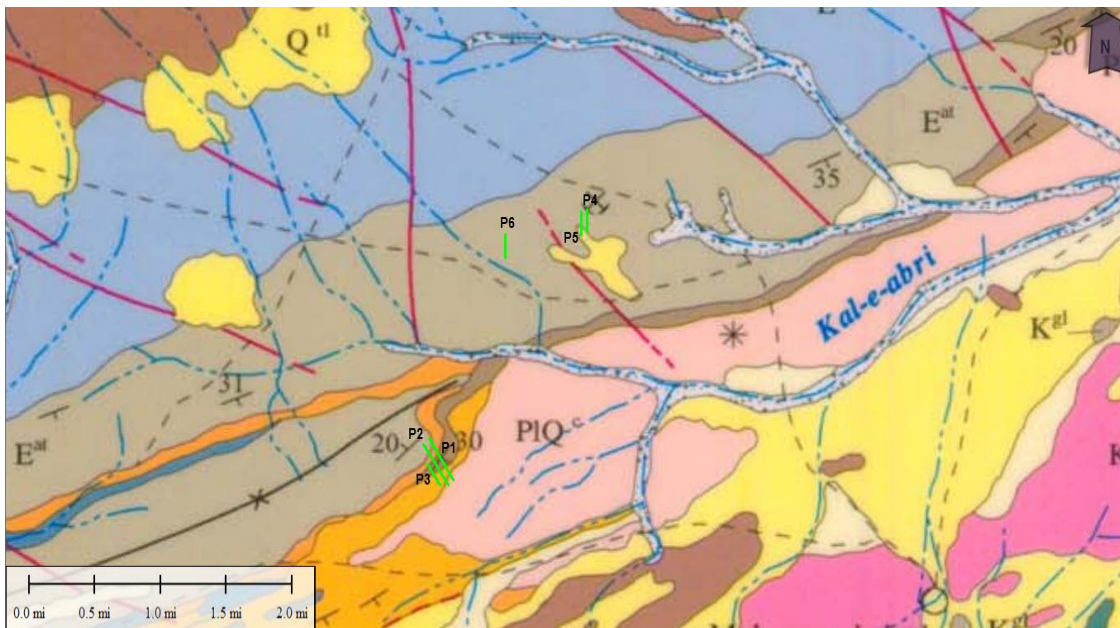
شکل (۳-۳): نقشه تکتونیکی کانسار کال ابری براساس نقشه ۱:۵۰۰۰ [قربانی و صالح پور، ۱۳۹۴].

۳-۳ چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی محدوده معدنی کال ابری

واحدهای سنگی در محدوده مورد مطالعه شامل سه مجموعه گدازه‌های زیر دریایی (آندزیت و بازالت)، مجموعه آذرآواری (توف و آگلومرا) و مجموعه رسوبی (آهک، آهک مارنی) با سن ائوسن میانی می‌باشند. سه مجموعه سنگی فوق در منطقه کال ابری به صورت متناوب، هم‌شیب و هم‌روند نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل ۳-۴). در شکل (۳-۵) موقعیت پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده کانسار مس کال ابری، بر روی بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ درونه نشان داده شده است. در مشاهدات صحرایی واحدهای آذرآواری بخش اعظم محدوده مورد مطالعه را در برمی‌گیرد و به صورت هم‌روند با واحدهای گدازه‌ای رخنمون دارند. [سلطانی، ۱۳۹۵].



شکل (۳-۴): تصویر صحرایی از قرارگیری واحدهای آهکی، توف و آگلومرا به صورت هم‌روند و هم‌شیب [سلطانی، ۱۳۹۵].



RGB(136,171,209) (dorouneh.jpg)

1:38210 | GEO (WGS84) - (57.4241453116, 35.3419545961) | 35° 20' 31.0365" N, 57° 25' 26.9231" E

L E G E N D

QUATERNARY	
Q ^{al}	Recent alluvium.
Q ^s	Sand dunes.
Q ^c	Clay flat.
Q ^{sc}	Salt and clay flat.
Q ¹²	Younger terraces.
Q ¹¹	Younger gravel fan.
Q ¹⁰	Older terraces and gravel fan.
PIQ ^c	Conglomerate and sandstone.
M ^{mm}	Alternations of light red siltstone, silty marl and marl interbedded with sandstone.
M ^{sg}	Light grey sandstone interbedded conglomerate and alternations of sandstone, silty sandstone and light red siltstone in upper part.
M ^{rs}	Red conglomerate interbedded with sandstone.
M ^{ms}	Alternations of red to light grey marl, silty marl, sandstone and limy siltstone.
M ^{ms'}	Alternations of red conglomerate and red to green sandstone interbedded with green marl.
M ^{rs'}	Red conglomerate interbedded with sandstone.
OLM ^{ol}	Alternations of cream limestone green sandstone and marl.
OLM ¹	Cream, medium to thin bedded limestone.
EOL ^{ol}	Alternations of green to red, massive conglomerate and thick bedded sandstone interbedded with marl.
EOL ^{ol'}	Alternations of thick bedded limestone, sandstone and siltstone.
EOL ^{ol''}	Alternations of light brown to yellow, sandstone and conglomerate.
E ^{ds}	Dark red to dark green, andesite, trachy andesite and andesite basalt.
E ^{bs}	Black to dark green basalt and andesite basalt.
E ^{as}	Andesite, pyroxene andesite and andesite porphyry.
E ^{sl}	Alternations of light green to cream, sandstone, siltstone, silty marl and thin bedded limestone.
E ^{sl'}	Alternations of green to red agglomerate, tuff, lapilli tuff and andesite.
E ^{sl''}	Black to dark green, andesite, pyroxene andesite, basaltic andesite and basalt.
E ^{sl'''}	Alternations of green to grey, sandstone, tuffaceous sandstone, marl and siltstone interbedded with limestone.
PE ^{ol}	Red to green conglomerate and sandstone interbedded with yellow limestone.
K ^{sp}	Spillite, basalt, gabbro, basaltic andesite, harzburgite, serpentinite.
K ^{pl}	Pink to cream, thin bedded globotruncana petagic limestone.
K ^{pl'}	Alternations of limestone and marl.
K ^{pl''}	Alternations of tuff, lapilli tuff, agglomerate and tuffaceous sandstone interbedded with radiolarite and plagic limestone with rhyolite, quartz trachy andesite and andesite.
K ^{pl'''}	Green to light grey tuff, lapilli tuff and agglomerate.
Ub	Harzburgite and serpentinite.
K ^{ol}	Green to light grey, thin bedded marly limestone and sandy limestone.
K ^{ol'}	Yellow to light brown, thin bedded limestone.
K ^{ol''}	Light grey, thick bedded to massive limestone.
K ^{ol'''}	Light green marl interbedded with light brown, thin bedded limestone.
K ^{ol''''}	Red sandstone and conglomerate.
K ^{ol'''''}	Dark grey marl with sandstone and limestone in upper part.
K ^{ol''''''}	Grey to green sandstone interbedded with medium bedded, light grey limestone.
J ^{ol}	Light grey, thin to medium bedded limestone.
J ^{ol'}	Black to dark green, shale and sandstone interbedded with grey limestone.
C ¹	Red to purple, thick to medium bedded quartzitic sandstone. (LALUN FORM.).
PC-C ¹	Dark grey dolomitic with micaceous shale. (SOLTANIYEH FORM.).
PC ¹	Meta tuff, lapilli tuff, diabase, siltstone and sandstone interbedded with dolomite. (TAKNAR FORM.).

Rock of uncertain age	
PZ ₁	Dolomite, quartzite and shale.

Intrusive rocks	
dyk	Diabasic dyke
mn	Monzonite, quartz monzonite and granodiorite.

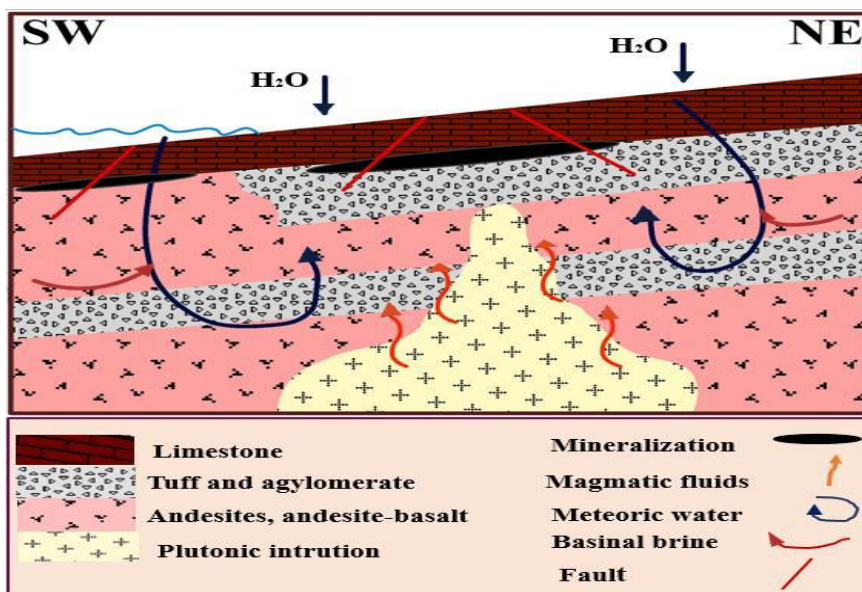
SYMBOLS	
Geographical	
	Asphalted road
	Non asphalted road
	Drainage
	Qanat
	Elevation in meters
	Village
Geological	
	Strik slip fault
	Thrust fault
	Inferred fault
	Fault (not specified)
	Bedding formline
	Structural section
	Mine in operation

شکل (۳-۵): موقعیت پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده کانسار مس کال ابری، بر روی بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ درونه [قائمی و هرمی، ۱۳۸۵].

۳-۴ رخداد کانه‌زایی در کانسار کال ابری

کانه‌زایی مس در منطقه مورد مطالعه متأثر از لیتولوژی سنگ‌های دربرگیرنده، عوامل ساختاری (گسل، درزه و شکاف)، محلول‌های گرمایی و همچنین حضور توده‌های نفوذی در عمق به عنوان عامل حرارتی می‌باشد. این کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی به عنوان فاکتور اساسی در قابلیت نقل و انتقال محلول‌های گرمایی چه در مقیاس ناحیه‌ای و چه در مقیاس معدنی عمل می‌نمایند و باعث تمرکز و تجمع سیالات کانه‌دار شده تا فرصتی برای رخداد و ته‌نشست ایجاد نمایند [Leach et al., 2005].

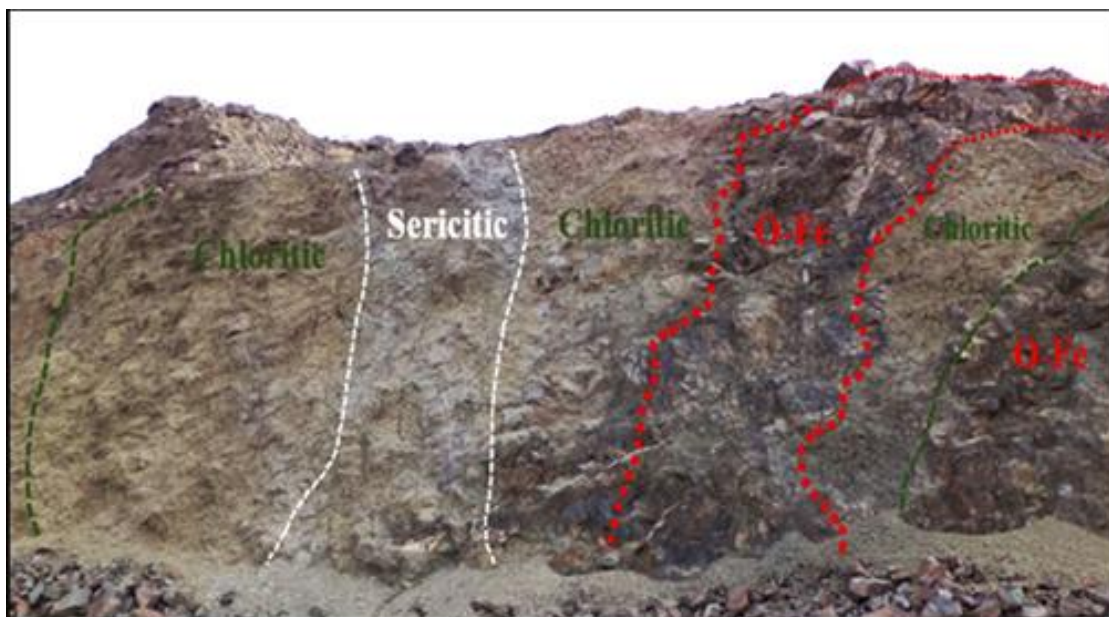
توالی آتشفشانی و درزه و شکستگی‌های فراوان؛ که شرایط لازم را برای نفوذ سیالات و شست و شو و ته‌نشینی کانه‌های فلزی فراهم آورده‌اند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. بر این اساس، می‌توان دو فاز کانه‌زایی در کانسار مس کال ابری در نظر گرفت؛ که فاز اول شامل کانه‌زایی سولفید (پیریت، کالکوپیریت و کالکوسیت اولیه) به صورت دانه پراکنده و پرکننده فضاهای خالی در واحد آذرآواری (توف و آگلومرا)، در مرحله دیازنز آغازین و تدفینی می‌باشد و فاز دوم؛ فاز کانه‌زایی اکسیدی و کربناتی (مالاکیت، آزوریت، کاکوسیت و اکسیدهای آهن) به صورت رگه- رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی در مرحله بالآمدگی و شروع فعالیت‌های هیدروترمالی است (شکل ۳-۶). بنابراین کانه‌زایی بعد از انسجام سنگ‌های دربرگیرنده، به صورت یک باند موازی با روند طبقات دربرگیرنده و درمرز واحد آهکی با سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌ای با روند NE-SW و همراه با درزه و شکستگی‌های فراوان رخ داده است، که نشانگر وضعیت چینه‌کران و اپی‌ژنتیک کانه‌زایی در این منطقه است [سلطانی، ۱۳۹۵].



شکل (۳-۶): الگوی تشکیل کانسار مس کال ابری به صورت شماتیک [سلطانی، ۱۳۹۵].

۳-۵ دگرسانی

کانسارهای گرمابی یکی از مهم‌ترین کانسارها هستند که تقریباً ۱۰۰ درصد فلزاتی چون سرب، روی، نقره و ۶۰ الی ۹۰ درصد مس، طلا و اورانیوم مورد نیاز جهان را تأمین می‌کنند [Arndt and Ganino, 2012]. دگرسانی گرمابی یکی از پدیده‌هایی است که در بررسی این کانسارها دارای اهمیتی ویژه است. شناسایی منطقه‌های دگرسانی که احتمالاً از نظر ژنتیکی به ذخایر معدنی وابسته باشند، گام مهمی در پی‌جویی ذخایر است [Gifkins et al., 2005]. در واحدهای آتشفشانی و آذرآواری منطقه مورد مطالعه انواع مختلفی از دگرسانی‌ها مشاهده شده است؛ که میزان و گسترش این دگرسانی‌ها با سنگ میزبان، نوع سیال و وضعیت درزه و شکستگی‌های منطقه مرتبط است. دگرسانی‌های کلریتی، سربستی و اکسیدهای آهن، نمونه‌هایی از دگرسانی‌های موجود در سنگ میزبان مس در منطقه می‌باشند (شکل ۳-۷).



شکل (۷-۳): تصویری از دگرسانی‌های کلریتی، سربستی و اکسیدهای آهن در مجاور یکدیگر اسلطنی،
[۱۳۹۵].

فصل چهارم

مدل سازی و تفسیر

داده‌های مقاومت ویژه و

IP

۴-۱ مقدمه

داده‌های برداشت شده یک سری داده خام می‌باشند؛ که دارای نوفه‌های مختلفی هستند و تفسیر مستقیم آنها نتایج مطلوبی در پی نخواهد داشت. به عبارت دیگر توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی این داده‌ها به‌طور مستقیم غیرممکن است. بنابراین تعیین رابطه بین داده‌های صحرائی به دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به عبارت دیگر، مدل‌سازی داده‌های برداشت شده برای توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری است. در مدل‌سازی ریاضی، روابط فیزیکی توسط یک سری معادلات دیفرانسیلی و معادلات انتگرالی بیان می‌شوند؛ به گونه‌ای که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود [موسوی، ۱۳۹۳].

۴-۲ روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی

مدل‌سازی ژئوفیزیکی به دو دسته کلی مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی تقسیم‌بندی می‌شود.

۴-۲-۱ مدل‌سازی فیزیکی

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

۴-۲-۲ روش‌های مدل‌سازی عددی

اولین وظیفه یک ژئوفیزیسیت درک داده‌های جمع‌آوری شده در صحرا و تفسیر آنها به صورت یک مدل زمین‌شناسی قابل قبول، در حد توان روش‌های مختلف ژئوفیزیکی برای انجام این وظیفه است. ژئوفیزیسیت‌ها برای درک این موضوع مسائل پیشرو را برای شاخه‌های مختلف ژئوفیزیک با استفاده از

معادلات مربوطه حل می‌کنند. بنابراین تئوری روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مجهز به ابزارهای مختلف ریاضی، مبنای حل مسائل پیشرو را تشکیل می‌دهد. تئوری این روش‌ها برای درک رفتار داده‌های ژئوفیزیکی از اهمیت شایانی برخوردار است. 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 ژئوفیزیک‌ها را از داخل زمین بهبود بخشیده است [Ward, 1990].

الف: مدل‌سازی پیشرو (مستقیم)

در مدل‌سازی پیشرو، ورودی فرآیند مدل‌سازی یک مدل آزمون (فرضی) از زمین می‌باشد و در طی فرآیند با توجه به معادلات حاکم بر مساله، داده‌های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به عنوان خروجی مدل ارائه می‌شوند. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترها) آنقدر ادامه می‌یابد تا پاسخ مدل برازش خوبی با داده‌های صحرائی پیدا کند؛ یعنی از مدل داده‌ها به دست آید. مدل‌سازی پیشرو بر مبنای روش آزمون و خطا انجام می‌شود. در این روش یک توزیع خاص برای اجزاء زیر-سطحی در نظر گرفته می‌شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شود، سپس پاسخ این مدل تحت آرایش الکترونی موردنظر محاسبه می‌شود [Dey and Morrison, 1979].

ب: مدل‌سازی معکوس

در مدل‌سازی معکوس سعی می‌شود تا با توجه به داده‌های برداشت شده، مدل تخمین زده شود. بقیه مراحل مدل‌سازی معکوس همانند مدل‌سازی پیشرو می‌باشد. در واقع تفاوت مدل‌سازی معکوس با مدل‌سازی پیشرو در نحوه انتخاب مدل اولیه است. انتخاب مدل در روش معکوس کمی سخت‌تر است؛ ولی پاسخ‌های حاصل به واقیت نزدیک‌تر است. همچنین تعداد تکرار برای کاهش خطا کمتر می‌باشد. به دلیل پیچیده‌تر بودن مدل در روش معکوس، زمان لازم برای محاسبه پاسخ‌های مدل و حجم

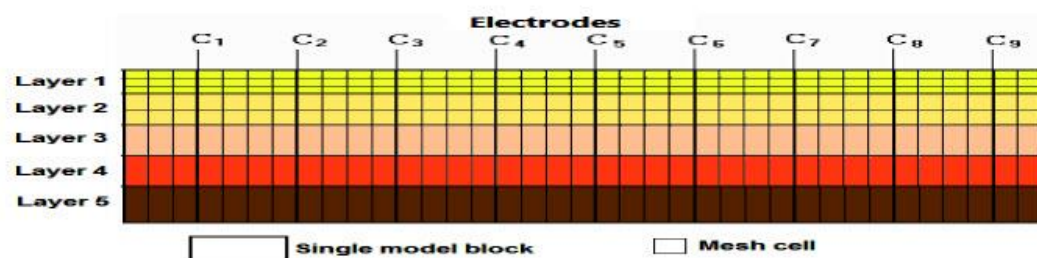
اشغالی بیشتر است [Loke, 2004]. در روش مقاومت ویژه الکتریکی پارامترهای مدل، مقادیر مقاومت ویژه سلول‌های مدل و داده‌ها، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده هستند [مطاعی، ۱۳۹۴].

در ادامه مقدمه‌ای بر نرم‌افزارهای RES2DINV و Zondres2d به عنوان ابزارهایی برای مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌سنجی و IP ذکر می‌شود.

۳-۴ نرم‌افزار RES2DINV

نرم‌افزار RES2DINV یک برنامه کامپیوتری است که به صورت اتوماتیک مدل‌های دوبعدی مقاومت ویژه و IP را برای ساختارهای زیر سطحی به کمک داده‌های حاصل از برداشت صحرائی، تهیه می‌کند [Loke, 2014].

مدل‌سازی دوبعدی در این نرم‌افزار با مدل‌سازی معکوس تعداد زیادی بلوک‌های مستطیلی انجام می‌شود؛ که شکل (۴-۱) آرایشی از این بلوک‌ها را نشان می‌دهد. توزیع و اندازه این بلوک‌ها بستگی به توزیع داده‌های برداشت دارد [Loke, 2014].



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

در این نرم‌افزار مدل‌سازی معکوس، با روش اجزاء محدود^۱ (FD) و تفاضل محدود^۲ (FE) برای تعداد بسیار بالای داده‌های صحرائی قابل انجام است. امکان تصحیحات توپوگرافی بر روی شبکه نیز مقدور می‌باشد. در روش معکوس‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، هدف ارائه مدلی است که بیشترین تطابق را با داده‌های صحرائی داشته باشد [Loke, 2012].

^۱ Finite Difference

^۲ Finite Element

روش اجزاء محدود برای زمین‌های دارای توپوگرافی، با توجه به شکل اجزاء یا مش‌های آن که بیشتر مثلثی و دوزنقه‌ای هستند، به کار برده می‌شود. روش تفاضل محدود چون اجزاء یا مش‌های آن مستطیلی هستند؛ برای زمین‌های بدون توپوگرافی استفاده می‌شود. از طرفی روش بهینه‌سازی حداقل مربعات هموار جهت محاسبه مقادیر مقاومت‌ویژه و IP در هر بلوک به کار برده می‌شود [Loke, 2014]. این نرم‌افزار آرایش‌های الکترودی همانند ونر، قطبی-قطبی، دوقطبی-دوقطبی، دوقطبی-ونر-شلومبرژه و بسیاری از آرایش‌های دیگر را پشتیبانی می‌کند.

روش بهینه‌سازی سعی در کاهش اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ویژگی زیر سطحی مورد نظر، مانند مقاومت‌ویژه، را دارد. این کار با مطابقت دادن مقادیر ویژگی فیزیکی مورد نظر در هر بلوک انجام می‌شود. اندازه‌گیری این اختلاف با خطای کمترین مربعات¹ نشان داده می‌شود. اگرچه مدلی با کمترین خطای RMS ممکن است تغییرات غیر واقعی و بزرگ از ویژگی فیزیکی مورد نظر نشان دهد و با ساختار زمین‌شناسی واقعی تفاوت زیادی داشته باشد. در حالت کلی یک کاربر محتاط مدلی را انتخاب می‌کند که در تکرارهای بعد آن تفاوت چشم‌گیری در مقدار RMS اتفاق نمی‌افتد [Loke, 2014]. این نکته با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی از منطقه مورد مطالعه، کاربر را در تعیین بهترین مدل یاری می‌کند؛ طوری که از مدل‌های با خطای بسیار کمتر نسبت به مدل انتخابی چشم‌پوشی می‌شود.

۴-۴ نرم‌افزار Zondres2D

نرم‌افزار Zondres2d یک برنامه کامپیوتری برای مدل‌سازی دو و نیم‌بعدی داده‌های برداشت شده با استفاده از روش تصویرنگاری الکتریکی است. مدل‌سازی دو و نیم‌بعدی یعنی، در حالی که ساختارهای زمین‌شناختی دوبعدی در نظر گرفته می‌شود؛ چشمه میدان سه‌بعدی است [Kaminsky, 2001-2013]. در این نرم‌افزار، روش اجزاء محدود به عنوان یک ابزار ریاضی جهت حل مسائل مستقیم

¹ Root mean square (RMS)

استفاده می‌شود. همچنین معکوس‌سازی توسط روش حداقل مربعات با قید نظم‌دهی انجام می‌شود. قید نظم‌دهی، پایداری در حل مسئله را افزایش می‌دهد و امکان دستیابی به مقادیر مقاومت ویژه و توزیع پتانسیل هموارتر را فراهم می‌آورد. از ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پشتیبانی از تمامی آرایش‌های الکترونی.
- امکان مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌های مقاومت ویژه و IP
- امکان مدل‌سازی داده‌های IP حوزه زمانی و حوزه فرکانسی و به دست آوردن پارامترهای مدل کُل-کُل^۱.
- کنترل کیفی داده‌های IP و مقاومت ویژه، حذف نوفه و ویرایش داده‌ها در صورت لزوم.
- روش‌های مختلف وارد کردن اطلاعات کمکی نظیر اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری و سایر روش‌های ژئوفیزیکی (به عنوان مثال مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی) جهت اعتبارسنجی و تفسیر دقیق‌تر مدل‌های ژئوالکتریکی.
- تخمین کیفی نتایج بر اساس آنالیز ماتریس حساسیت.
- نمایش خطوط هم‌پتانسیل و خطوط جریان به منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌های ژئوالکتریکی.
- قابلیت انجام تکرارهای نامحدود برای دستیابی به مدلی با خطای کمتر [لطیف کار، ۱۳۹۳].

۴-۵ عملیات صحرائی برداشت داده‌های مقاومت ویژه و IP

برداشت‌های صحرائی به منظور انجام مطالعات ژئوفیزیک با هدف اکتشاف سولفورهای مس در محدوده معدن مس کال ابری توسط شرکت زمین‌پرداز کویر انجام شده است. موقعیت مرکز برونزد در این محدوده توسط زمین‌شناسی منطقه معرفی و براساس این موقعیت و نیز کسب اطلاعات اولیه از وضعیت برونزد ماده معدنی در سطح زمین، همان‌گونه که در شکل (۴-۲) مشاهده می‌شود، راستای پروفیل‌ها طراحی شده است. در تعیین راستای پروفیل‌ها از روی برونزدها و یا مناطق مورد بحث به

¹ Cole- Cole

عوامل گوناگون از جمله شرایط توپوگرافی و نیز روند بی‌هنجاری احتمالی و یا روند رگه حاوی ماده معدنی باید توجه شود. سعی می‌شود حتی المقدور امتداد پروفیل‌ها عمود بر روند کانی‌سازی طراحی و نیز کمترین تأثیر از ناهمواری‌های توپوگرافی را دارا باشند. همچنین سعی می‌شود برونزد و یا بخش معدنی که در سطح دیده می‌شود، در منتهی‌الیه یک سوم اولیه در طول پروفیل قرار گیرد. روند کانه-زایی در منطقه تقریباً شرقی-غربی است. با توجه به ضخامت افق کانه‌زایی که کمتر از ۱۰ متر است؛ فاصله الکترودی برای همه پروفیل‌ها به جز پروفیل‌های P1 و P2، ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. فاصله الکترودی برای پروفیل‌های P1 و P2، ۲۰ متر می‌باشد. در این مطالعات از یک دستگاه اندازه-گیری شارژیبلیتته و مقاومت‌سنج ۳۲ کاناله ساخت شرکت GDD کانادا مدل GRx8-32 و یک دستگاه فرستنده جریان GDD با توان ۳۶۰۰ وات استفاده شده است. میزان شارژیبلیتته توسط این دستگاه با دقت ۰/۱ میلی‌ولت بر ولت در چهار پنجره زمانی اندازه‌گیری می‌شود. پروفیل‌های P1 تا P3 با امتداد تقریباً N29W عمود بر یک ناحیه کانی‌زایی با امتداد تقریباً جنوب غرب-شمال شرق و به صورت موازی با یکدیگر و با فواصل ۶۰ تا ۷۰ متر از یکدیگر در شکل (۴-۳) نشان داده شده‌اند. پروفیل‌های P4 و P5 با امتداد تقریباً شمالی-جنوبی عمود بر یک ناحیه کانی‌زایی با امتداد تقریباً شرقی-غربی و به صورت موازی با یکدیگر و با فواصل ۶۰ تا ۷۰ متر از یکدیگر اجرا شدند. پروفیل P6 موازی با پروفیل‌های P4 و P5 و در فاصله ۷۵۰ متری غرب پروفیل P5 با امتداد تقریباً NS عمود بر امتداد ناحیه کانه‌زایی شرقی-غربی که توسط این دو پروفیل قطع شده است، در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. جابه‌جایی الکترودهای پتانسیل تا $n=11$ صورت گرفته است. در این تحقیق از داده‌های مربوط به $n=11$ به منظور افزایش دقت و کاهش خطا، صرف‌نظر شده است.



شکل (۴-۲): نمایی از محدوده کال ابری و امتداد تقریبی تمامی پروفیل‌های اجرا شده در این محدوده [Google Earth].



شکل (۴-۳): نمایی از محدوده کال ابری و مسیر تقریبی پروفیل‌های P1, P2, P3 [Google Earth].



شکل (۴-۴): نمائی از محدوده کال ابری و مسیر تقریبی پروفیل‌های P4, P5, P6 [Google Earth].

۶-۴ تفسیر کمی و کیفی مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP توسط نرم‌افزارهای

Zondres2D و RES2DINV

به منظور تعیین موقعیت تقریبی قرارگیری زون‌های بی‌هنجاری، شبه مقاطع داده‌های مقاومت‌ویژه و IP برای هر یک از پروفیل‌ها توسط نرم‌افزار RES2DINV تهیه شده و تفسیر کیفی این شبه‌مقاطع در ادامه ارائه خواهد شد. مقاطع حاصل از مدل‌سازی معکوس هموار داده‌های مقاومت‌ویژه و IP، برای هر پروفیل به صورت جداگانه ارائه می‌شود و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و شواهد معدن‌کاری تفسیرهای لازم ارائه خواهند شد. همچنین به منظور مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌های به دست آمده، از نرم‌افزار Zondres2d نیز استفاده شده است. برداشت داده‌ها با استفاده از ترکیب آرایش‌های دو-قطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی صورت گرفته است؛ بنابراین آرایش مورد استفاده در نرم‌افزارها آرایش mix می‌باشد که ترکیب آرایش‌های گفته شده است. آرایش دوقطبی - دوقطبی برای $n=1$ تا $n=11$ و آرایش قطبی - دوقطبی برای $n=8$ تا $n=11$ یعنی فقط برای عمق‌های زیاد انجام شده است. تصحیحات توپوگرافی نیز حین مدل‌سازی انجام شده است.

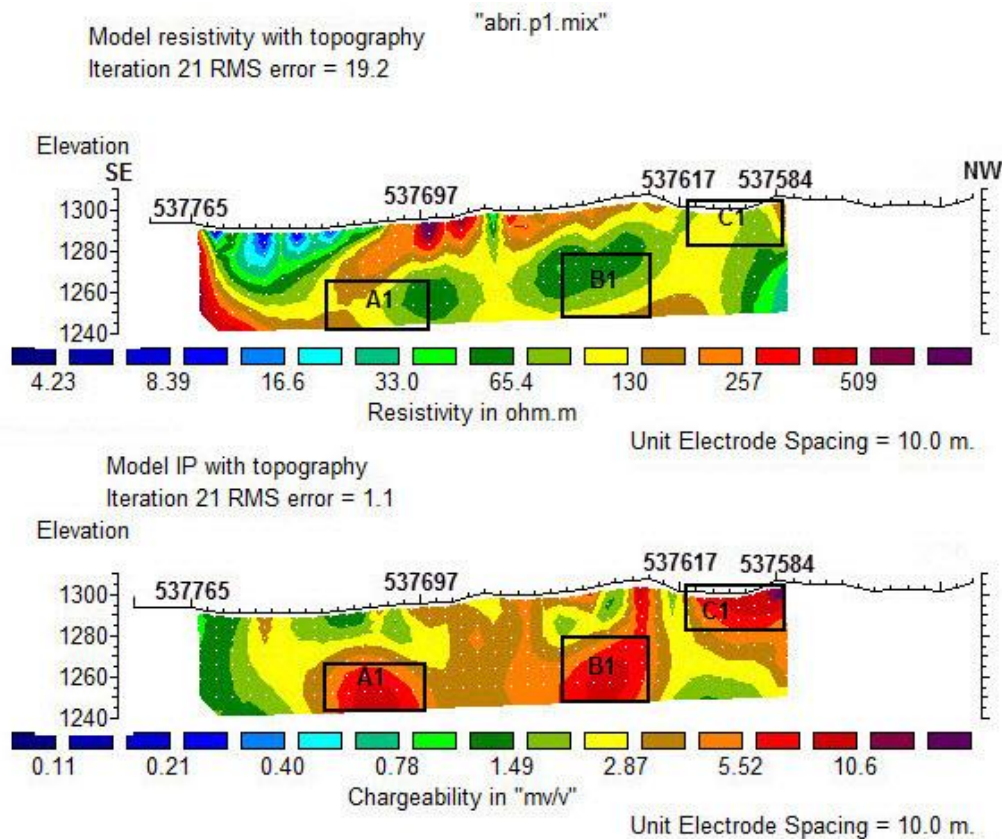
۴-۶-۱ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P1 توسط نرم-

افزار RES2DINV

شکل (۴-۵) تغییرات پارامترهای ژئوفیزیکی را در طول پروفیل P1 نشان می‌دهد. طول مورد بررسی در این پروفیل حدود ۳۸۰ متر است. با توجه به این که فاصله الکترودها در این پروفیل ۲۰ متر انتخاب شده است؛ عمق آن از سطح به حدود ۶۰ متر می‌رسد. امتداد این پروفیل N29W است و الکترودهای جریان در جنوب شرق و الکترودهای پتانسیل به سمت شمال غرب گسترده شده‌اند. با توجه به مشاهدات زمین‌شناسی، پروفیل‌های P1, P2, P3 یک زون کانه‌زایی که در کنتاکت آهک و آندزیت و یا در کنتاکت آهک و واحد آذرآواری، شکل گرفته است را قطع می‌کنند (شکل ۳-۵).

در منطقه مورد مطالعه، واحدهای آتشفشانی و آذرآواری به دلیل تخلخل و نفوذپذیری خوب، سنگ میزبان ماده معدنی می‌باشند. با توجه به ویژگی‌های سنگ میزبان که دارای مقاومت ویژه متوسط تا بالا است، انتظار می‌رود زون‌های بی‌هنجار به صورت مناطقی با مقاومت ویژه متوسط تا بالا و بارپذیری بالا مشخص شوند. مقاومت ویژه مس پایین و در حدود $1.7 \times 10^{-8} \Omega.m$ است؛ ولی نباید از مناطق بی-هنجار انتظار مقاومت ویژه پایین داشت؛ زیرا مقدار مس که به صورت رگه و رگچه در سنگ میزبان قرار گرفته است به اندازه‌ای نیست که پاسخ مقاومت ویژه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین مناطق با مقاومت ویژه متوسط تا بالا و بارپذیری بالا به عنوان بی‌هنجاری در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۴-۵) پارامترهای مقاومت ویژه (در بالا) و IP (در پایین) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای RMS ناشی از مدل‌سازی برای داده‌های مقاومت ویژه و IP به ترتیب ۱۹/۲ درصد و ۱/۱ درصد در تکرار بیست و یکم است. فاصله الکترودی نشان داده شده در این شکل ۱۰ متر است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد فاصله الکترودی در برداشت داده‌ها برای این پروفیل، ۲۰ متر است. علت این که فاصله الکترودی مورد استفاده در نرم‌افزار به ۱۰ متر کاهش یافته است، مربوط به پردازش داده‌ها در نرم‌افزار می‌باشد؛ بدین صورت که با کاهش فاصله الکترودی به نصف فاصله الکترودی مورد استفاده در

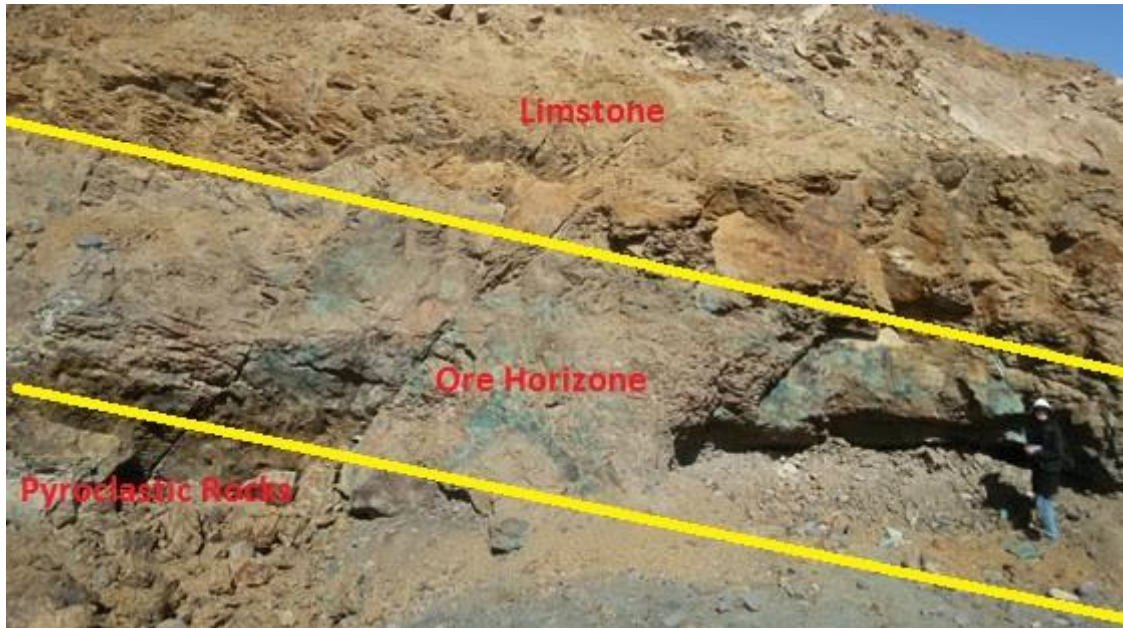
برداشت داده‌ها، خطای RMS کاهش می‌یابد. این تغییر فاصله الکترودی برای همه پروفیل‌ها انجام نشده است و تنها برای پروفیل‌هایی صورت گرفته است که خطا بالا بوده و نرم‌افزار توصیه نموده است.



شکل (۴-۵): مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در راستای پروفیل P1

همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود، دو زون با مقدار بارپذیری نسبتاً بالا (A1, B1) و یک زون با مقدار بارپذیری بالا (C1) وجود دارند. مقادیر به دست آمده برای بارپذیری بر حسب میلی‌ولت بر ولت و مقادیر به دست آمده برای مقاومت ویژه بر حسب اهم‌متر می‌باشند. بیشینه شارژپذیری اندازه‌گیری شده در این پروفیل به حدود ۱۳ میلی‌ولت بر ولت می‌رسد؛ که نشان‌دهنده کیفیت خوب میزان شارژپذیری در این ناحیه است. البته این مقدار در تمام بی‌هنجاری‌های این پروفیل دیده نمی‌شود. مقادیر مقاومت ویژه برای این سه زون، تا حدودی تأییدکننده بی‌هنجاری در این قسمت‌ها می‌باشند؛ زیرا همان‌طور که گفته شد در این منطقه، مقاومت ویژه متوسط رو به بالا می‌تواند نشان‌دهنده

مناطق بی‌هنجار باشد؛ که مربوط به سنگ میزبان از جنس توف و آگلومرا می‌باشد. از آن جایی که این مجموعه بی‌هنجاری‌ها در زیر رخنمون کانی‌زایی مس قرار گرفته است، می‌توان آن‌ها را به کانی-زایی مس نسبت داد شکل (۴-۶).



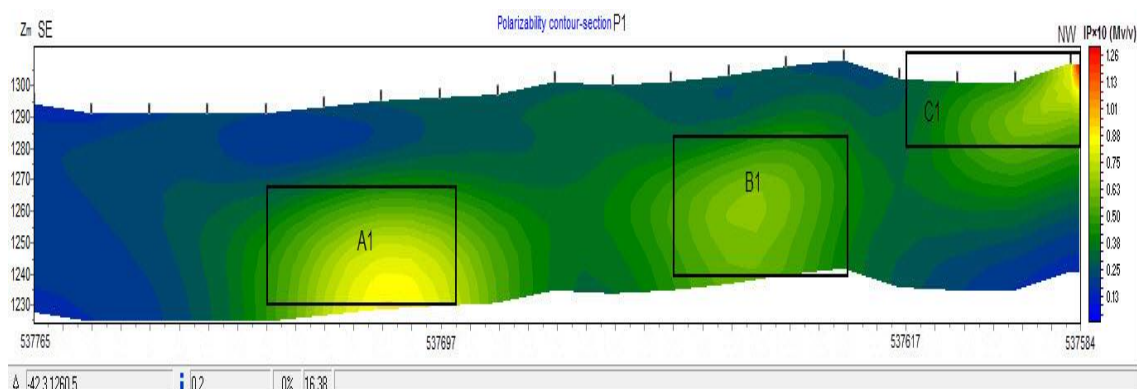
شکل (۴-۶): کانه‌زایی مس در یک سینه کار کانسار ابری. تمرکز مس به صورت اکسیدی در مرز دو واحد آذرآواری در زیر و آهک در بالا صورت گرفته است.

زون A1 از نقطه‌ای با مختصات (۵۳۷۷۲۶، ۳۹۰۶۴۴۳) تا نقطه‌ای با مختصات (۵۳۷۶۹۷، ۳۹۰۶۴۴۹) و در عمق حدود ۴۰ تا ۶۰ متری نسبت به سطح زمین گسترش یافته است. زون B1 در مختصات (۵۳۷۶۵۶، ۳۹۰۶۵۶۴) تا (۵۳۷۶۲۶، ۳۹۰۶۶۱۵) قرار گرفته است. در واقع این زون از سطح زمین شروع شده و تا عمق حدود ۳۰ متری به صورت قائم به درون زمین نفوذ می‌کند. این بی‌هنجاری از عمق ۳۰ متری به بعد عریض و افقی شده و به سمت جنوب حرکت می‌کند. با توجه به شواهد زمین-شناسی به احتمال زیاد بخش قائم این بی‌هنجاری خصوصاً در نزدیکی‌های سطح را می‌توان به کانی-زایی مس نسبت داد اما این که بخش بزرگتر این بی‌هنجاری که از عمق ۳۰ متری تا انتهای مقطع شروع می‌شود ناشی از کانه‌زایی مس است و یا این که علت دیگری (مانند مگنتیت موجود در منطقه) دارد، توسط حفاری مشخص می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳-۳) مشاهده می‌شود یک گسل

امتدالغز با روند تقریباً شرقی- غربی پروفیل‌های P1 و P2 را قطع می‌کند. اثر این گسل در مقطع IP در شکل (۴-۵)، در محدوده باریک زرد رنگ که بین زون‌های B1 و C1 قرار گرفته، نشان داده شده است. بنابراین با توجه به واقع بودن زون B1 در کنار گسل، احتمال این که ماده معدنی در اعماق بیشتر از ۶۰ متر نیز وجود داشته باشد، زیاد است. همچنین با در نظر گرفتن این موضوع که خطای مدل‌سازی با افزایش عمق افزایش می‌یابد نمی‌توان گفت که این بی‌هنجاری‌ها در انتهای مدل واقعا بسته شده است یا این که ادامه دارد. زون C1 با دارا بودن شدت بیشتر بارپذیری، در مختصات (۳۹۰۶۶۳۲، ۵۳۷۶۱۷) تا (۳۹۰۶۶۸۶، ۵۳۷۵۸۴) از سطح زمین تا عمق حدود ۱۵ متری گسترش یافته است. این زون احتمالاً دارای عیار بیشتری از ماده معدنی می‌باشد و می‌تواند به عنوان ناحیه‌ای امیدبخش از لحاظ کانه‌زایی بر روی این پروفیل معرفی شود.

۴-۶-۲ مدل IP به دست آمده از پروفیل P1 با استفاده از نرم‌افزار Zondres2D

همان‌گونه که در شکل (۴-۷) مشاهده می‌شود مقطع IP به دست آمده در نرم‌افزار Zondres2d، بی-هنجاری‌های نشان داده شده در شکل (۴-۵) را تأیید می‌کند. البته باید توجه داشت که خطای مدل-سازی در نرم‌افزار Zondres2d نسبت به نرم‌افزار RES2DINV بیشتر است. بنابراین تفسیر مقاطع حاصل از نرم‌افزار RES2DINV از اطمینان بیشتری برخوردار می‌باشد. زون‌های A1, B1 و C1 در مقطع حاصل از نرم‌افزار Zondres2d با طیف رنگی سبز تا زرد مشاهده می‌شوند. زون‌های گفته شده هم از لحاظ محل قرارگیری و هم از لحاظ شدت بارپذیری انطباق خوبی با زون‌های نشان داده شده در مقطع IP حاصل از نرم‌افزار RES2DINV برخوردارند. مقدار IP در A1 حدود ۱۰ میلی‌ولت بر ولت و در زون B1 حدود ۸ میلی‌ولت بر ولت و در زون C1 مقدار بیشینه اندازه‌گیری شده در این پروفیل (۱۳ Mv/v) می‌باشد.



شکل (۴-۷): مدل IP به دست آمده از نرم افزار Zondres2d (پروفیل P1)

۴-۶-۳ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P2 توسط

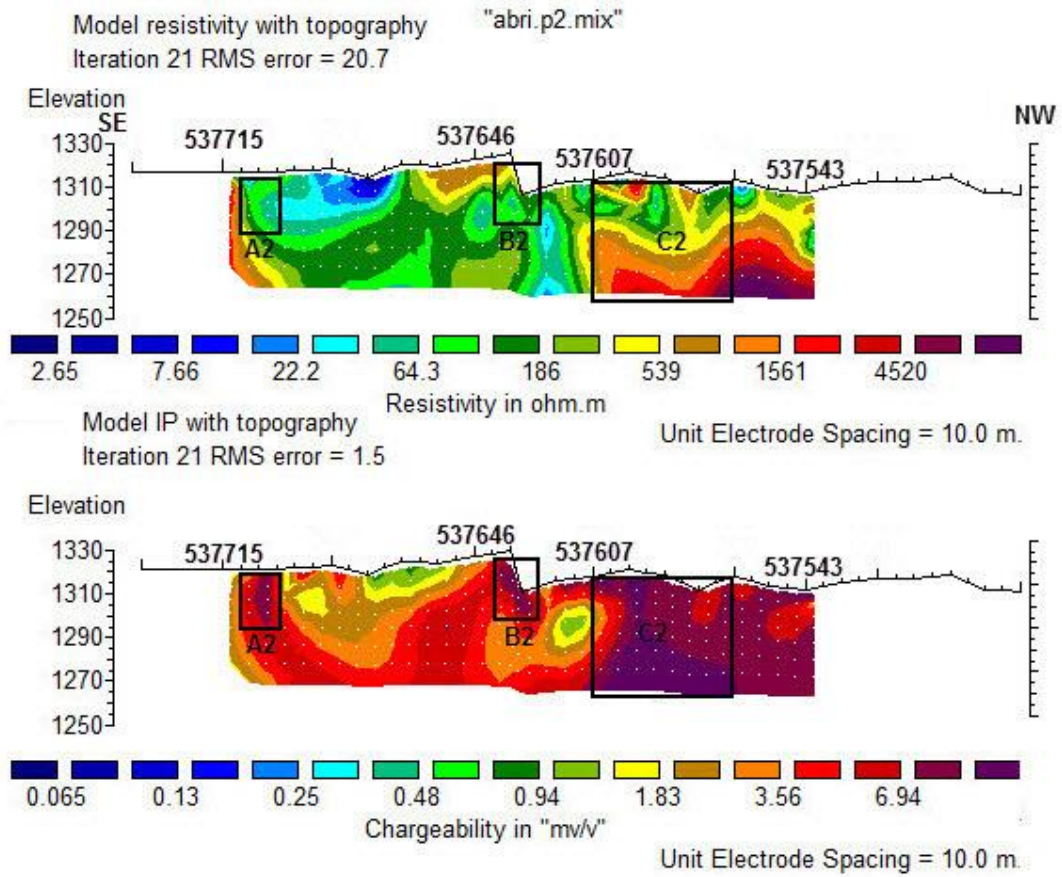
نرم افزار RES2DINV

شکل (۴-۸) تغییر پارامترهای مقاومت ویژه و IP را در طول پروفیل P2 نشان می‌دهد. طول مورد بررسی در این پروفیل نیز همانند پروفیل P1، ۳۸۰ متر و فاصله الکترودی در برداشت داده‌ها ۲۰ متر می‌باشد. در این پروفیل نیز به منظور کاهش خطای RMS، فاصله الکترودی به کار برده شده در نرم افزار ۱۰ متر است. عمق مورد بررسی در این پروفیل حدود ۷۰ متر می‌باشد. بیشینه شارژپذیری اندازه گیری شده در این پروفیل به حدود ۱۶ میلی‌ولت بر ولت می‌رسد. بررسی مقادیر IP اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که مقادیر بالای بارپذیری در نقاط محدودی در طول پروفیل دیده می‌شود و تقریباً تمامی داده‌های پلاریزاسیون القایی اندازه‌گیری شده در طول پروفیل P2، در حد مقدار زمینه است.

با توجه به طیف رنگی مشاهده شده در شکل (۴-۸)، می‌توان زون‌های A2, B2 و C2 را با داشتن مقادیر بالای بارپذیری به عنوان مناطق بی‌هنجار در نظر گرفت. زون A2 از نقطه‌ای به مختصات (۵۳۷۷۱۰، ۳۹۰۶۳۳۰) تا نقطه (۵۳۷۷۰۰، ۳۹۰۶۳۴۸) و از سطح زمین تا عمق حدود ۳۰ متری به صورت قائم گسترش یافته است. زون B2 به صورت یک ناحیه مقاوم و با شیب زیاد به سمت شمال-غربی، در مختصات (۵۳۷۶۴۰، ۳۹۰۶۴۵۱) تا (۵۳۷۶۲۱، ۳۹۰۶۴۸۶) در نزدیکی سطح زمین تا عمق حدود ۳۰ متری قرار گرفته است. زون C2 در مختصات (۵۳۷۶۰۷، ۳۹۰۶۵۱۵) تا (۵۳۷۶۵۸۳، ۳۹۰۶۵۸۳)

۵۳۷۵۶۵) از سطح زمین تا انتهای مقطع امتداد یافته است. همان گونه که در شکل نیز مشاهده می شود، زون C2 از سطح زمین تا عمق حدود ۳۵ متری به صورت یک رگه باریک و قائم است و از این عمق به بعد عریض می شود. در این زون از سطح زمین تا عمق حدود ۳۵ متری مقاومت ویژه متوسط و در اعماق بیشتر، مقاومت ویژه بالا مشاهده می شود که ممکن است با توجه به حضور آهک در مرزهای کانی زایی، این مقادیر متوسط تا بالای مقاومت ویژه تا حدودی تأییدکننده بی هنجاری مشاهده شده در مقطع بارپذیری باشند. مانند پروفیل P1 نمی توان درباره ادامه یافتن این بی هنجاری در اعماق بیشتر از ۷۰ متر به طور قطعی اظهار نظر کرد و نیاز به بررسی های دقیق تر می باشد.

با توجه به این که بیشتر مقادیر IP اندازه گیری شده در این پروفیل در حد مقدار زمینه است و همان گونه که در شکل (۴-۹) مشاهده می شود رخنمون کانی زایی مس در طول این پروفیل مشاهده نمی شود، نمی توان مناطق بی هنجار مشاهده شده در این مقطع را به طور قطعی به کانه زایی مس مرتبط دانست. ولی باید به این نکته نیز توجه داشت که شیب بی هنجاری B2 از شیب لایه های آهکی پیروی می کند و از آن جایی که رگه های کانه زایی مس در مرز آهک و آندزیت شکل گرفته اند؛ لذا با بررسی دقیق تر در زیر این لایه آهکی می توان به طور قطع درباره وجود یا عدم وجود مس در این قسمت اظهار نظر کرد.



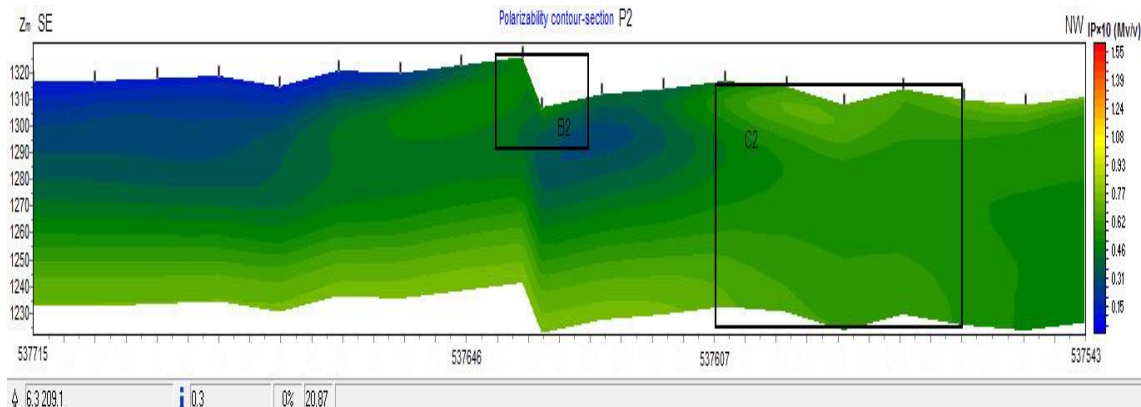
شکل (۴-۸): مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در راستای پروفیل P2



شکل (۴-۹): منطقه مورد مطالعه در طول پروفیل P2 (دید به سمت شمال). رخنمون کانی‌زایی مس در طول این پروفیل مشاهده نمی‌شود.

۴-۶-۴ مدل IP به دست آمده از پروفیل P2 با استفاده از نرم افزار Zondres2D

همان طور که در شکل (۴-۱۰) مشاهده می شود، مدل IP حاصل از نرم افزار Zondres2d تا حدودی تأییدکننده بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در مقطع IP حاصل از نرم افزار RES2DINV است. محل زون‌های B2 و C2 که بی‌هنجاری‌های نشان داده شده در شکل (۴-۸) می‌باشند؛ در شکل (۴-۱۰) نیز نشان داده شده است. این زون‌ها از لحاظ شدت و محل قرارگیری منطبق بر زون‌های نشان داده شده در شکل (۴-۸) می‌باشند. طیف رنگی قرار گرفته در محل این زون‌ها با رنگ سبز حاکی از وجود بی-هنجاری در این قسمت‌ها می‌باشد. زون A2 در شکل (۴-۱۰) حذف شده است. البته باید توجه داشت که بی‌هنجاری مشاهده شده در این مقطع محدود به زون‌های B2 و C2 نمی‌باشد و منطقه بزرگتری را در بر گرفته است. علت این امر و همچنین حذف زون A2 را می‌توان ناشی از خطای مدل‌سازی داده‌ها دانست.



شکل (۴-۱۰): مدل IP به دست آمده از نرم افزار Zondres2d (پروفیل P2)

۴-۶-۵ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از پروفیل P3 توسط

نرم افزار RES2DINV

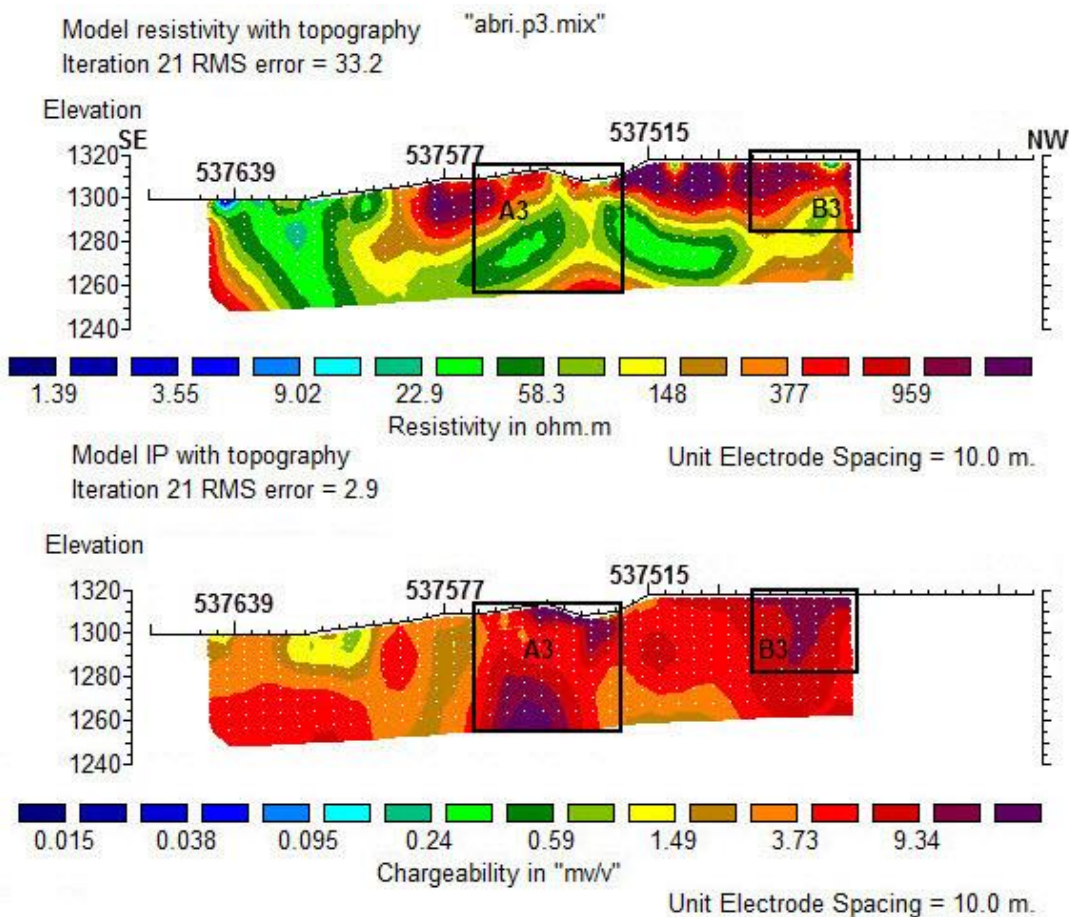
پروفیل P3 با طول ۲۰۰ متر و امتداد N29W به موازات پروفیل‌های قبلی مورد مطالعه قرار گرفته است. الکترودهای جریان در جنوب شرق و الکترودهای پتانسیل به سمت شمال غرب گسترده شده-

اند. با توجه به این که فاصله الکترودی مورد استفاده در برداشت این پروفیل ۱۰ متر است؛ عمق مورد بررسی به حدود ۸۰ متر می‌رسد.

بیشینه شارژپذیری در این پروفیل حدود ۲۹ میلی‌ولت بر ولت است؛ که نشان‌دهنده مقادیر بالای شارژپذیری در این ناحیه است. برخلاف پروفیل P2، مقادیر بالای IP در پروفیل P3 در نقاط بیشتری دیده می‌شود و نمی‌توان IP اندازه‌گیری شده در این پروفیل را در حد زمینه دانست. بر طبق اعداد به دست آمده در اندازه‌گیری‌ها بیشتر این مقادیر بالا، مربوط به عمق‌های زیاد و n‌های بالا است. بنابراین بی‌هنجاری‌هایی که در اعماق زیاد وجود دارند، از اهمیت بیشتری برخوردارند. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی، کانه‌زایی‌های موجود در پروفیل‌های P1، P2 و P3 در مرز آهک و آندزیت شکل گرفته‌اند. این نحوه قرارگیری ماده معدنی در محل پروفیل P3 به خوبی مشهود است. همان‌گونه که در شکل (۴-۱۱) مشاهده می‌شود دو بی‌هنجاری قابل توجه در این ناحیه وجود دارند. با توجه به مقادیر بالای بارپذیری به دست آمده در این ناحیه، بی‌هنجارهای مشاهده شده را می‌توان به حضور ماده معدنی مرتبط دانست. زون A3 در مختصات (۳۹۰۶۴۵۰، ۵۳۷۵۶۷) تا (۳۹۰۶۵۲۱، ۵۳۷۵۲۵) از سطح زمین تا انتهای مقطع به صورت دو ناحیه مقاوم مجزا قرار گرفته است. مقدار IP در این قسمت بالا و مقدار مقاومت‌ویژه نیز متوسط است. احتمالاً در این زون، همانند پروفیل‌های قبلی، عیار ماده معدنی به اندازه‌ای نبوده است که پاسخ مقاومت‌ویژه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین مقاومت‌ویژه متوسط و رو به افزایش این قسمت را می‌توان ناشی از حضور سنگ آهک با مقاومت‌ویژه بالا در مجاورت ماده معدنی دانست. همان‌گونه که در شکل نیز مشاهده می‌شود شیب ماده معدنی در مقطع IP در زون A3 از شیب سنگ آهک مقاوم در مقطع مقاومت‌ویژه پیروی می‌کند؛ که این مطلب می‌تواند دلیلی بر تأیید شکل‌گیری ماده معدنی در مرز آهک و آندزیت باشد.

زون B3 به صورت یک بی‌هنجاری کیفی شکل، در مختصات (۳۹۰۶۵۹۲، ۵۳۷۴۹۱) تا (۳۹۰۶۶۴۶، ۵۳۷۴۶۷) از سطح زمین تا عمق حدود ۴۰ متری گسترش یافته است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته

شد مقادیر بالای IP به دست آمده در عملیات برداشت این پروفیل، مربوط به اعماق زیاد است. بنابراین می‌توان بی‌هنجاری‌های عمقی را نسبت به بی‌هنجاری‌های سطحی با اطمینان بیشتری به ماده معدنی مرتبط دانست. پاسخ مقاومت‌ویژه در این زون، همانند زون A3 و پروفیل‌های P1 و P2 مقدار بالایی است. بنابراین عیار ماده معدنی به اندازه‌ای نبوده که پاسخ مقاومت‌ویژه را تحت تأثیر قرار دهد.

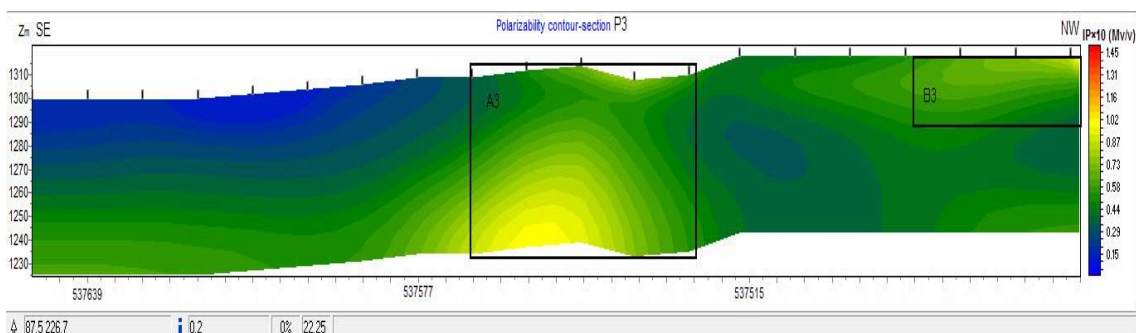


شکل (۴-۱۱): مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت‌ویژه در راستای پروفیل P3

۴-۶-۶ مدل IP به دست آمده از پروفیل P3 با استفاده از نرم‌افزار Zondres2D

زون A3 که به صورت یک بی‌هنجاری تقریباً دو قسمتی در شکل (۴-۱۱) نشان داده شد، در شکل (۴-۱۲) نیز قابل تشخیص می‌باشد. این زون با داشتن طیف رنگی سبز تا زرد تا حدود زیادی بی‌هنجاری مشاهده شده در شکل (۴-۱۱) را تأیید می‌کند. شدت بارپذیری در این بی‌هنجاری به حدود

۲۰ میلی‌ولت بر ولت می‌رسد. بنابراین می‌توان این قسمت را با توجه به مقدار بالای IP اندازه‌گیری شده در این پروفیل و همچنین انطباق مدل‌های حاصل از دو نرم‌افزار با دقت بالایی به کانی‌زایی مس مرتبط دانست. در شکل (۴-۱۲) بی‌هنجاری مشاهده شده در سمت راست مقطع، انطباق نسبتاً خوبی با قسمت متناظر با آن در مقطع IP حاصل از نرم‌افزار RES2DINV دارد، ولی حالت کیفی شکل بی-هنجاری را نمایش نمی‌دهد. شدت IP در زون B3 حدود ۱۴ میلی‌ولت بر ولت است که این مقدار در شکل (۴-۱۱) نیز مشاهده شده است.



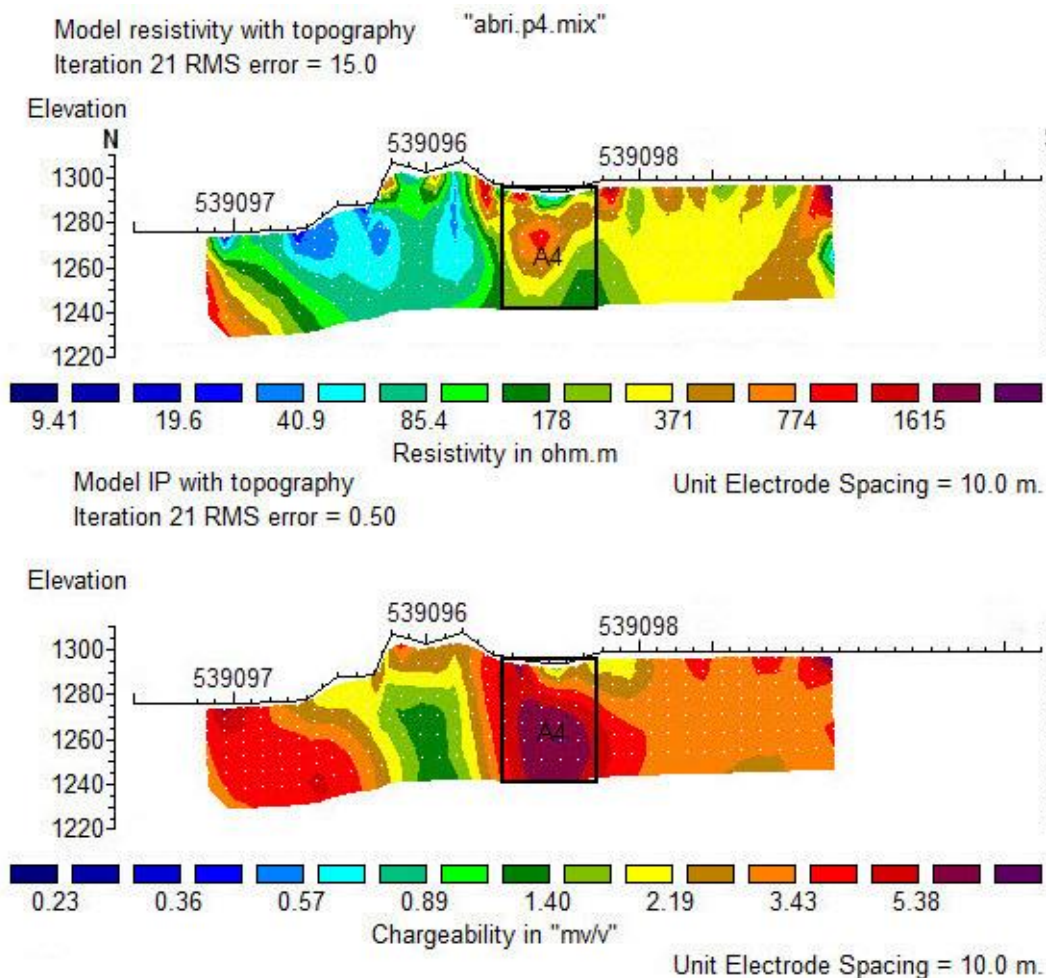
شکل (۴-۱۲): مدل IP به دست آمده از نرم‌افزار Zondres2d (پروفیل P3)

۴-۶-۷ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از پروفیل P4 توسط

نرم‌افزار RES2DINV

پروفیل‌های P4 و P5 با امتداد تقریباً NS عمود بر یک ناحیه کانه‌زایی با امتداد تقریباً شرقی-غربی و به صورت موازی با یکدیگر و با فواصل ۶۰ تا ۷۰ متر از یکدیگر در محدوده کال ابری اجرا شدند. این دو پروفیل یک زون کانه‌زایی که درون شکستگی‌های آندزیتی شکل گرفته را قطع می‌کند. شکل (۴-۱۳) تغییر پارامترهای ژئوفیزیکی را در طول پروفیل P4 نشان می‌دهد. طول مورد بررسی در این پروفیل حدود ۲۰۰ متر است و با توجه به این که فاصله الکترودها ۱۰ متر انتخاب شده؛ عمق آن از سطح به حدود ۷۰ متر می‌رسد. الکترودهای جریان در شمال و الکترودهای پتانسیل به سمت جنوب گسترده شده‌اند. بیشینه شارژپذیری اندازه‌گیری شده در این پروفیل حدود ۶ میلی‌ولت بر ولت می‌-

رسد؛ که نشان‌دهنده کیفیت ضعیف میزان شارژپذیری در این ناحیه است. بنابراین مقادیر IP اندازه-گیری شده در این پروفیل فراتر از مقدار زمینه نیست. همان‌طور که در شکل (۴-۱۴) مشاهده می‌شود منطقه مورد مطالعه در طول پروفیل‌های P4 و P5 دارای توپوگرافی نسبتاً خشن است؛ که تأثیر این توپوگرافی در مقاطع ژئوفیزیکی اعمال شده است.



شکل (۴-۱۳): مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در راستای پروفیل P4

شواهد زمین‌شناسی و جبهه کارهای قدیمی نشان می‌دهد که کانه‌زایی در محل پروفیل‌های P4, P5 و P6 در امتداد یک شکستگی تقریباً شرقی-غربی در دل آندزیت‌ها که دارای شیب به سمت جنوب است؛ شکل گرفته است. بی‌هنجاری A4 نیز در یک ناحیه مقاوم و شیب‌دار که شیب آن به سمت جنوب است، شکل گرفته است. زون A4 در مختصات (۳۹۰۸۹۷۸، ۵۳۹۰۹۷۰) تا (۳۹۰۸۹۱۷،

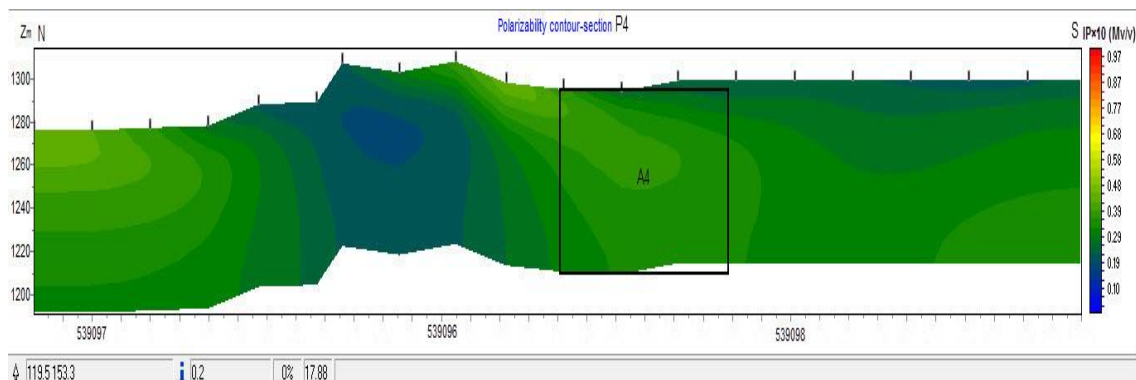
۵۳۹۰۹۷) از سطح زمین تا عمق حدود ۲۰ متری به صورت ضعیف شروع شده است و عرض آن به سمت عمق بیشتر، افزایش می‌یابد. هسته اصلی این بی‌هنجاری در عمق ۲۰ تا ۶۰ متری قرار گرفته است. با توجه به رخنمون یک لایه آلتیره و میزان بسیار پایین IP اندازه‌گیری شده در این پروفیل، بی‌هنجاری مشاهده شده در این مقطع را نمی‌توان با اطمینان به کانه‌زایی مس مرتبط دانست و نتیجه‌گیری قطعی در این زمینه مستلزم مطالعات دقیق‌تر و حفاری می‌باشد.



شکل (۴-۱۴): توپوگرافی موجود در منطقه مورد مطالعه در طول پروفیل‌های P4 و P5 (دید به سمت جنوب غرب)

۴-۶-۸ مدل IP به دست آمده از پروفیل P4 با استفاده از نرم‌افزار Zondres2D

همان‌گونه که در شکل (۴-۱۵) مشاهده می‌شود، مقطع IP حاصل از نرم‌افزار Zondres2d از انطباق خوبی با مقطع IP حاصل از نرم‌افزار RES2DINV برخوردار است. زون A4 در این شکل نیز در قسمت‌های عمقی عریض‌تر از قسمت‌های سطحی بوده و دارای شیب به سمت جنوب می‌باشد. در سمت چپ تصویر، طیف رنگی سبز منطبق با قسمت متناظر خود در شکل (۴-۱۳) با طیف رنگی قرمز می‌باشد. ولی از آنجایی که بیشینه بارپذیری اندازه‌گیری شده در این پروفیل ۶ میلی‌ولت بر ولت است، نمی‌توان این قسمت را به عنوان بی‌هنجاری در نظر گرفت.

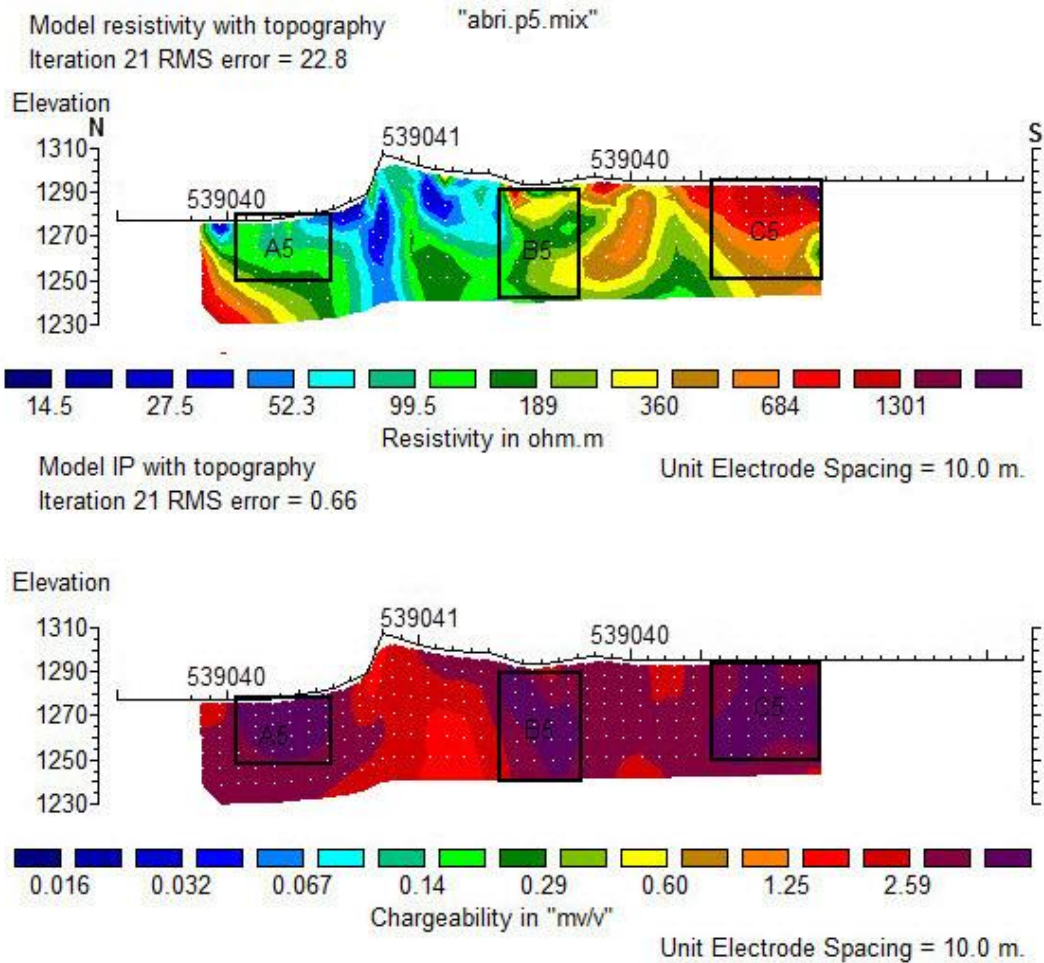


شکل (۴-۱۵): مدل IP به دست آمده از نرم افزار Zondres2d (پروفیل P4)

۹-۶-۴ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P5 توسط

نرم افزار RES2DINV

پروفیل P5 با طول ۲۰۰ متر و فاصله الکترودی ۱۰ متر با امتداد شمالی- جنوبی انجام شده است. الکترودهای جریان در شمال و الکترودهای پتانسیل به سمت جنوب گسترده شده‌اند. شکل (۴-۱۶) تغییر پارامترهای مقاومت ویژه و IP را در طول پروفیل P5 نشان می‌دهد. بیشینه شارژپذیری اندازه-گیری شده در طول این پروفیل به حدود ۶ میلی‌ولت بر ولت می‌رسد؛ که نشان‌دهنده مقادیر پایین بارپذیری در این قسمت می‌باشد. همانند پروفیل P4 مقدار IP اندازه‌گیری شده در امتداد این پروفیل، در حد مقدار زمینه است. مدل‌سازی داده‌های برداشت شده، زون‌های B5, A5 و C5 را به صورت بی-هنجاری در مقطع IP نشان می‌دهد. پاسخ مقاومت ویژه در این قسمت‌ها مقدار متوسط رو به بالایی است که احتمالاً به دلیل عیار بسیار پایین ماده معدنی، پاسخ مقاومت ویژه تحت تأثیر قرار نگرفته و کاهش نداشته است.



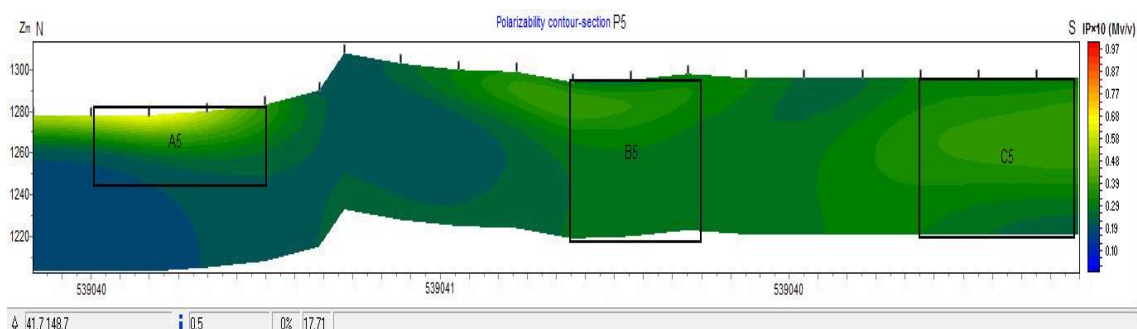
شکل (۴-۱۶): مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در راستای پروفیل P5

زون A5 در مختصات (۵۳۹۰۴۰، ۳۹۰۹۱۱۵) تا (۵۳۹۰۴۰، ۳۹۰۹۰۵۶) تا عمق حدود ۳۰ متری از سطح زمین شکل گرفته است. شدت IP در این زون از عمق ۳۰ متری به بعد کاهش یافته است. زون B5 در مختصات (۵۳۹۰۴۰، ۳۹۰۸۹۵۴) تا (۵۳۹۰۴۰، ۳۹۰۸۹۰۴) از سطح زمین تا انتهای مقطع گسترده شده است. زون C5 نیز در مختصات (۵۳۹۰۴۱، ۳۹۰۸۸۳۵) تا (۵۳۹۰۴۲، ۳۹۰۸۷۷۵) عمق حدود ۳۰ متری از سطح زمین گسترده شده است. مقدار مقاومت ویژه در این زون‌ها به دلیل عیار پایین ماده معدنی، متوسط رو به بالا است؛ که ناشی از مقاومت ویژه بالای سنگ میزبان کانه‌زایی می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، به دلیل شدت پایین بارپذیری اندازه‌گیری شده و همچنین وجود رخنمون یک لایه دگرسان شده در این پروفیل، بی‌هنجاری‌های فوق را نمی‌توان با اطمینان به حضور

ماده معدنی مس مربوط دانست و اظهار نظر قطعی درباره وجود و یا عدم وجود مس، مستلزم بررسی - های بیشتر و انجام حفاری در منطقه مزبور می باشد.

۴-۶-۱۰ مدل IP به دست آمده از پروفیل P5 با استفاده از نرم افزار Zondres2D

همان گونه که در شکل (۴-۱۷) مشاهده می شود زون های A5, B5 و C5 انطباق خوبی از لحاظ شدت بارپذیری و محل قرارگیری با بی هنجاری های موجود در مقطع IP حاصل از نرم افزار RES2DINV دارند. زون B5 همانند شکل (۴-۱۶) دارای شیب به سمت جنوب است. البته همان طور که قبلا نیز گفته شد به دلیل کیفیت بسیار پایین بارپذیری و همچنین وجود یک لایه دگرسان شده در امتداد این پروفیل، بی هنجاری های فوق را نمی توان به طور قطعی ناشی از حضور مس دانست.



شکل (۴-۱۷): مدل IP به دست آمده از نرم افزار Zondres2d (پروفیل P5)

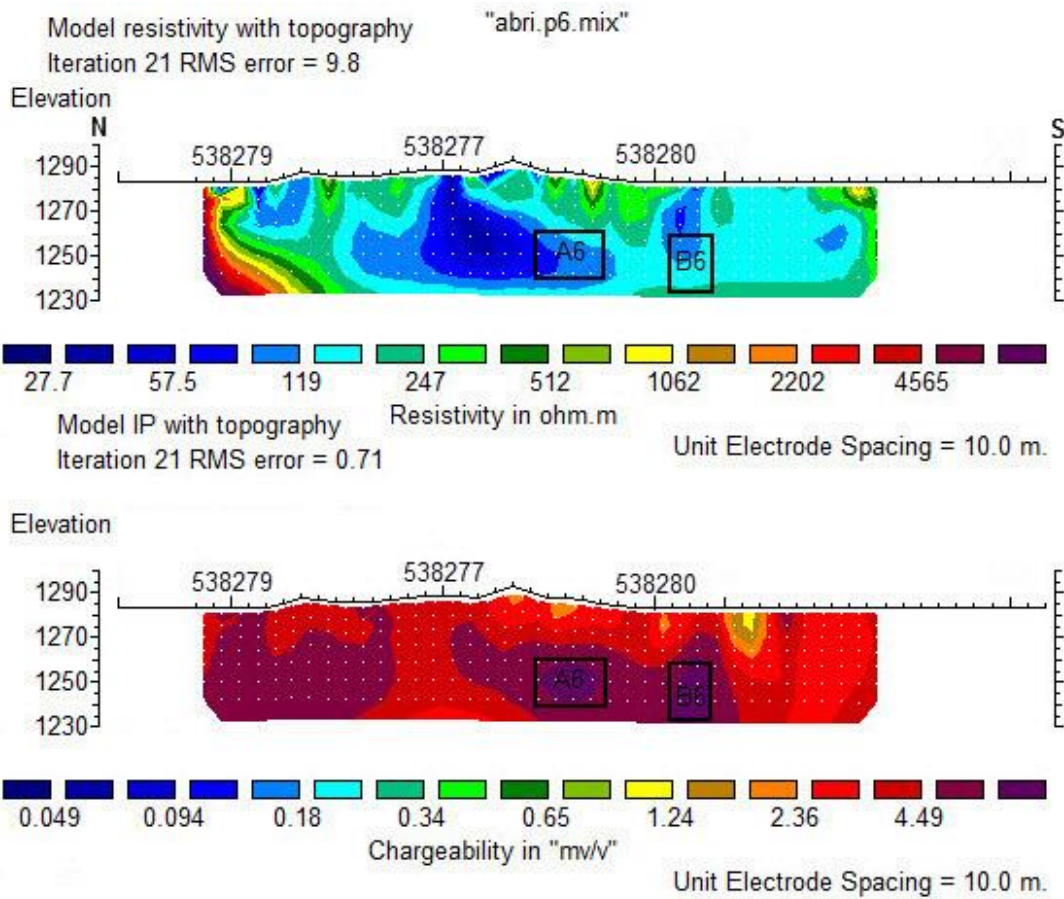
۴-۶-۱۱ تفسیر مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از پروفیل P6 توسط

نرم افزار RES2DINV

شکل (۴-۱۸) تغییرات پارامترهای ژئوفیزیکی را در طول پروفیل P6 نشان می دهد. طول مورد بررسی در این پروفیل حدود ۲۰۰ متر است و با توجه به این که فاصله الکترودی ۱۰ متر انتخاب شده است عمق برداشت از سطح زمین به حدود ۶۰ متر می رسد. امتداد این پروفیل NS است و الکترودهای جریان در شمال و الکترودهای پتانسیل به سمت جنوب گسترده شده اند. بیشینه IP اندازه گیری شده در این پروفیل حدود ۱۰ میلی ولت بر ولت می باشد؛ که نشان دهنده مقادیر بالای شارژپذیری در این

ناحیه است. دو بی‌هنجاری اصلی A6 و B6 در این سطح مقطع دیده می‌شود. بی‌هنجاری‌های A6 و B6 به ترتیب در مختصات‌های (۳۹۰۸۷۱۱، ۵۳۸۲۸۰) تا (۳۹۰۸۶۷۱، ۵۳۸۲۷۹) و (۳۹۰۸۶۳۰، ۵۳۸۲۸۰، تا (۳۹۰۸۶۱۰، ۵۳۸۲۸۱) در عمق حدود ۳۰ تا ۶۰ متری نسبت به سطح زمین در زیر یک ناحیه مقاوم شکل گرفته‌اند. اظهارنظر درباره ادامه یافتن بی‌هنجاری در انتهای مدل مستلزم برداشت با فواصل الکترودی بیشتر و مطالعات دقیق‌تر است.

با توجه به شباهت لایه‌بندی زمین که در مقاطع مقاومت‌ویژه پروفیل‌های P4, P5, P6 مشاهده می‌شود، ممکن است زون آتره که در پروفیل‌های P4 و P5 رخنمون دارد، در این پروفیل نیز وجود داشته باشد. همان‌طور که در مقطع مقاومت‌ویژه مشاهده می‌شود، دو بی‌هنجاری مورد مطالعه در این پروفیل دارای مقادیر مقاومت‌ویژه پایینی می‌باشند. از آنجایی که زون دگرسان شده نیز باعث کاهش مقاومت‌ویژه می‌شود به راحتی نمی‌توان بین بی‌هنجاری ناشی از کانه‌زایی مس و بی‌هنجاری ناشی از زون دگرسان شده تفکیک قائل شد. بنابراین نتیجه حفاری مشخص‌کننده منشأ این بی‌هنجاری خواهد بود.

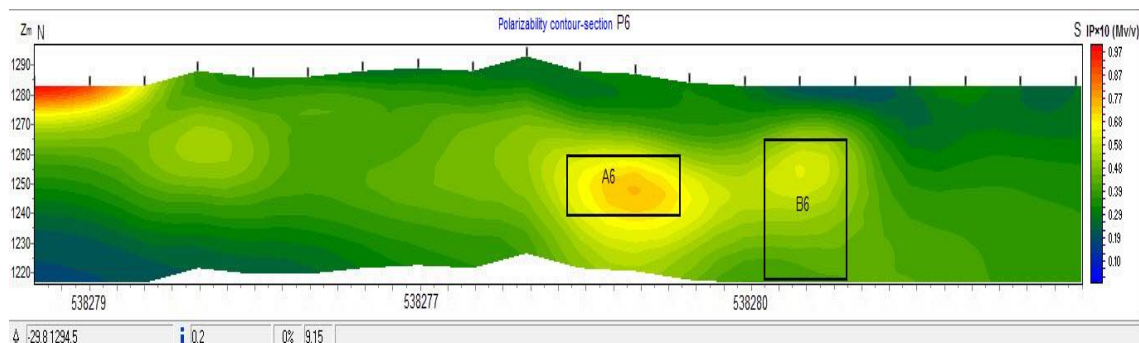


شکل (۴-۱۸): مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه در راستای پروفیل P6

۴-۶-۱۲ مدل IP به دست آمده از پروفیل P6 با استفاده از نرم افزار Zondres2D

بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در مقطع IP در شکل (۴-۱۹) از تطابق خوبی با بی‌هنجاری‌های موجود در مقطع IP در شکل (۴-۱۸) برخوردار می‌باشند، به‌گونه‌ای که زون‌های A6 و B6 در این مقطع با همان شدت بارپذیری و در همان مختصات نشان داده شده در شکل (۴-۱۸)، مشاهده می‌شوند؛ لذا می‌توانند تأییدکننده بی‌هنجاری‌های فوق محسوب شوند. البته همان‌طور که در تفسیر شکل (۴-۱۸) گفته شد، به دلیل احتمال حضور زون دگرسان شده در امتداد این پروفیل، بارپذیری نسبتاً بالای مشاهده شده در زون‌های A6 و B6 را نمی‌توان با اطمینان به کانه‌زایی مس مرتبط دانست. همچنین در سمت چپ تصویر بی‌هنجاری دیگری نیز در این مقطع مشاهده می‌شود که شدت IP آن (حدود ۱۰ میلی‌ولت بر ولت) بالاتر از شدت IP قسمت متناظر آن (حدود ۶ میلی‌ولت بر ولت) در شکل (۴-۴)

۱۸) می‌باشد که احتمالاً ناشی از خطای مدل‌سازی است. این قسمت در شکل (۴-۱۸) به دلیل داشتن مقدار IP زمینه به عنوان بی‌هنجاری در نظر گرفته نشده است.



شکل (۴-۱۹): مدل IP به دست آمده از نرم‌افزار Zondres2d (پروفیل P6)

۴-۷ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج حاصل از گمانه‌های حفر شده در

منطقه

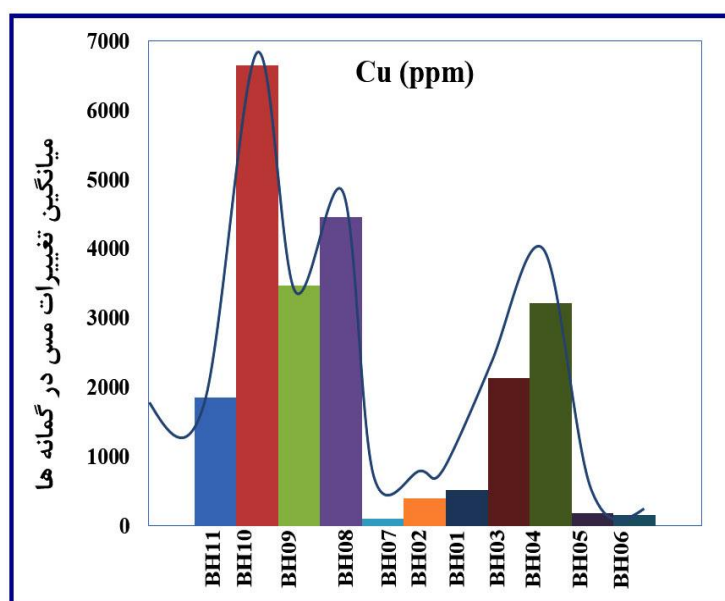
در منطقه مورد مطالعه حدود ۱۱ گمانه اکتشافی به منظور مشخص شدن عمق نفوذ کانی‌سازی مس (حداکثر تا عمق ۳۰ تا ۸۰ متر) در قسمت جنوبی منطقه کال ابری در مناطق پرتجمع ماده معدنی حفر شده است. در هر گمانه به ازای هر دو متر، نمونه برداری صورت گرفته است و نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌ها مقادیر مس در ۱۱ گمانه را نسبت به عمق بیان می‌کند. محل حفاری گمانه-ها منطبق بر مرز واحدهای آهکی با واحد آذرآواری می‌باشد (شکل ۴-۲۰). با توجه به شباهت ساختار زمین‌شناسی در محل قرارگیری گمانه‌ها و نحوه کانه‌زایی؛ که مرتبط با این ساختارها است، (کانه‌زایی در کنتاکت آهک و واحد آذرآواری)، و همچنین نزدیک بودن محل گمانه‌های فوق به پروفیل‌های P2, P1, و P3، می‌توان حضور مس در محل پروفیل‌های ژئوفیزیکی را نیز، نتیجه گرفت. همان‌گونه که در شکل (۴-۲۱) مشاهده می‌شود حداکثر مقدار مس در گمانه BH10 می‌باشد. پس از آن گمانه‌های BH8 و BH9 بالاترین مقدار مس را دارا می‌باشند.

گمانه BH1 با مختصات (۵۳۷۶۵۹، ۳۹۰۶۴۳۰) بر روی پروفیل P2، گمانه BH2 با مختصات (۵۳۷۷۱۱، ۳۹۰۶۴۷۲) بر روی پروفیل P3 و گمانه BH3 با مختصات (۵۳۷۷۱۱، ۳۹۰۶۴۷۲) بر روی

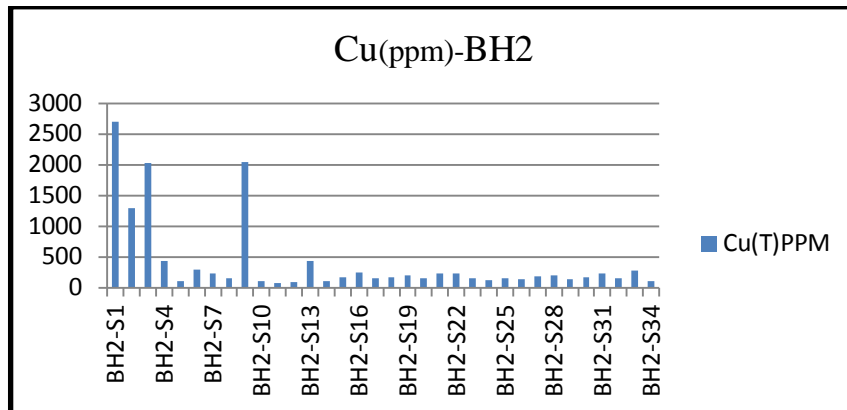
پروفیل P1 قرار می‌گیرند. در ادامه به مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌ها با نتایج حاصل از برخی گمانه‌ها پرداخته شده است. در شکل (۴-۲۲) نمودار تغییرات مس (بر حسب ppm) نسبت به عمق در گمانه BH2 نشان داده شده است. با توجه به این که در هر گمانه به ازای هر دو متر، نمونه‌برداری صورت گرفته است، ایستگاه BH2S1 معادل عمق دو متری و ایستگاه BH2S34 معادل عمق ۶۸ متری می‌باشند.



شکل (۴-۲۰): محل قرارگیری گمانه‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای. (گمانه BH1 بر روی پروفیل P2، گمانه BH2 بر روی پروفیل P3 و گمانه BH3 بر روی پروفیل P1 قرار گرفته‌اند).

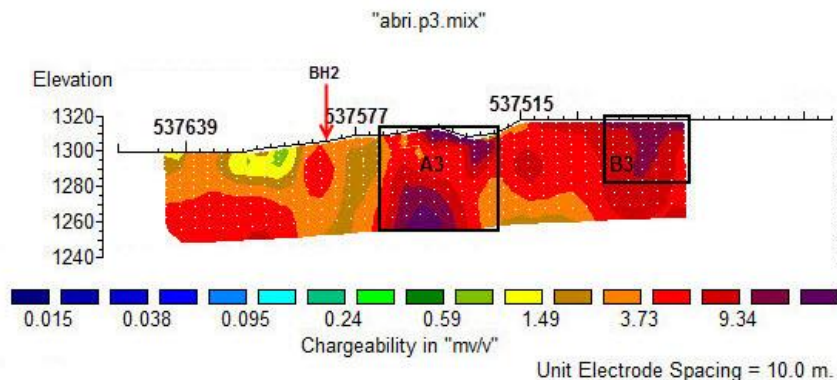


شکل (۴-۲۱): نمودار میانگین توزیع عنصر مس در نمونه‌های یازده گمانه بر حسب ppm [سلطانی، ۱۳۹۵].



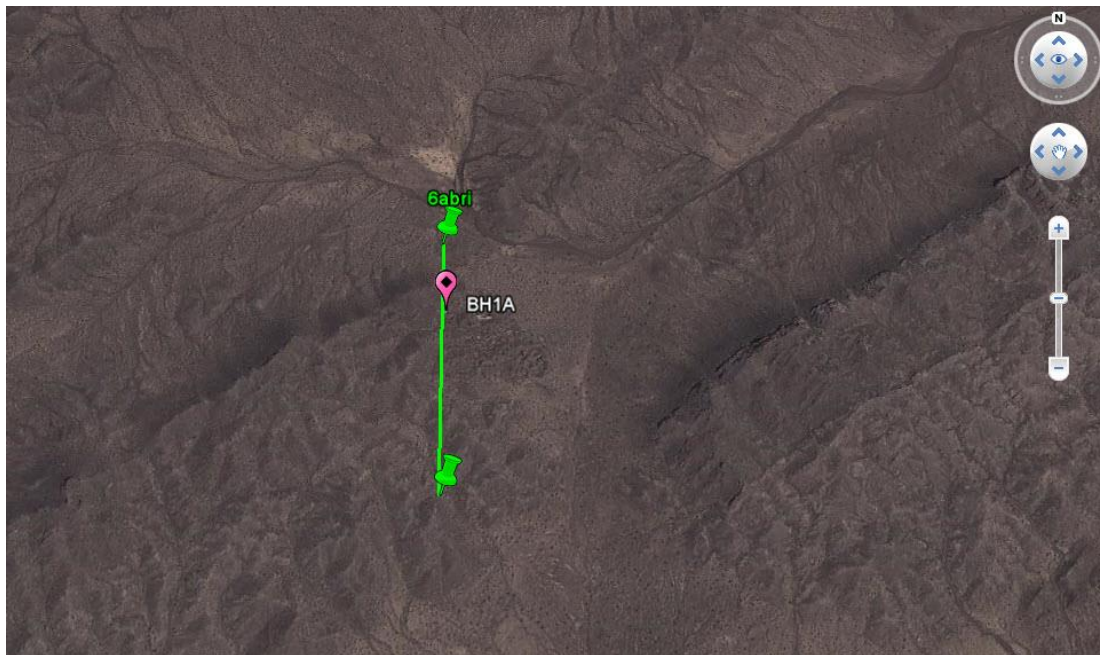
شکل (۴-۲۲): نمودار تغییرات مس (بر حسب ppm) نسبت به عمق در گمانه BH2

در شکل (۴-۲۳) محل قرارگیری گمانه BH2 بر روی مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی در راستای پروفیل P3 نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴-۲۲)، مقادیر بالای مس تا عمق ۲۰ متری از سطح زمین مشاهده می‌شود و در اعماق بیشتر، مقدار مس کاهش یافته است. شدت IP نشان داده شده در محل گمانه BH2 در شکل (۴-۲۳) نیز، مطابق با نمودار تغییرات مس در گمانه BH2 می‌باشد. بدین صورت که شدت IP تا عمق حدوداً ۲۰ متری نسبتاً بالا و از عمق ۲۰ متر به سمت پایین، کاهش یافته است. بنابراین اطلاعات گمانه BH2 می‌تواند تأییدی بر صحت مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی در راستای پروفیل P3 باشد.

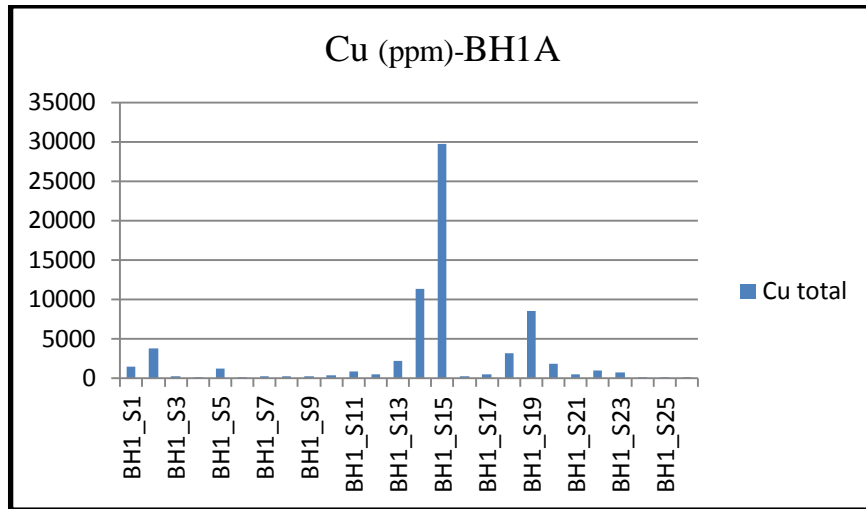


شکل (۴-۲۳): محل قرارگیری گمانه BH2 بر روی مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی در راستای پروفیل P3

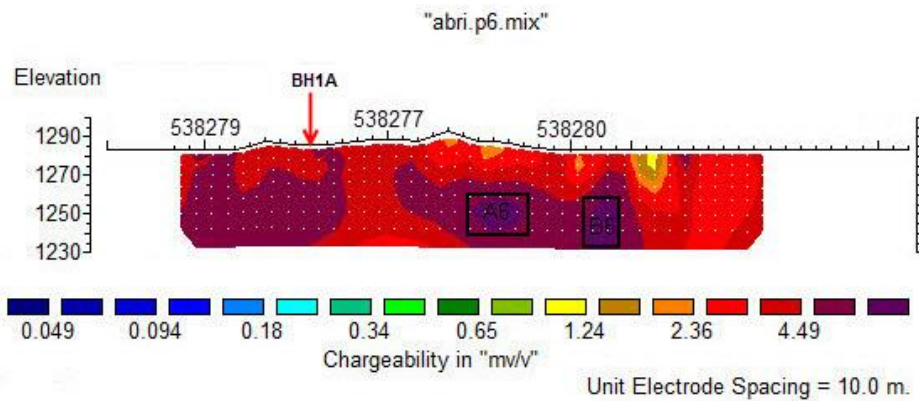
در منطقه مورد مطالعه، علاوه بر ۱۱ گمانه گفته شده، گمانه BH1A بر روی پروفیل P6 اجرا شده است (شکل ۴-۲۴). نمودار تغییرات مس (بر حسب ppm) نسبت به عمق در گمانه BH1A در شکل ۴-۲۵-های (۴-۲۵) نشان داده شده است. محل قرارگیری این گمانه بر روی مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی در راستای پروفیل P6 در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود، از سطح زمین تا عمق حدود ۲۵ متری، مقدار مس خیلی کم و از عمق ۲۵ متری به بعد، مقدار مس افزایش یافته است. شدت IP اندازه‌گیری شده در محل گمانه BH1A در شکل (۴-۲۶) از تطابق خوبی با نمودار تغییرات مس در گمانه BH1A برخوردار می‌باشد. بدین صورت که شدت بارپذیری از سطح زمین تا عمق حدوداً ۲۰ متری، پایین و از عمق ۲۰ متری به بعد، افزایش یافته است.



شکل (۴-۲۴): محل قرارگیری گمانه‌های BH1A و BH2A بر روی پروفیل P6



شکل (۴-۲۵): نمودار تغییرات مس (بر حسب ppm) نسبت به عمق در گمانه BH1A



شکل (۴-۲۶): محل قرارگیری گمانه BH1A بر روی مدل دوبعدی پلاریزاسیون القایی در راستای پروفیل P6

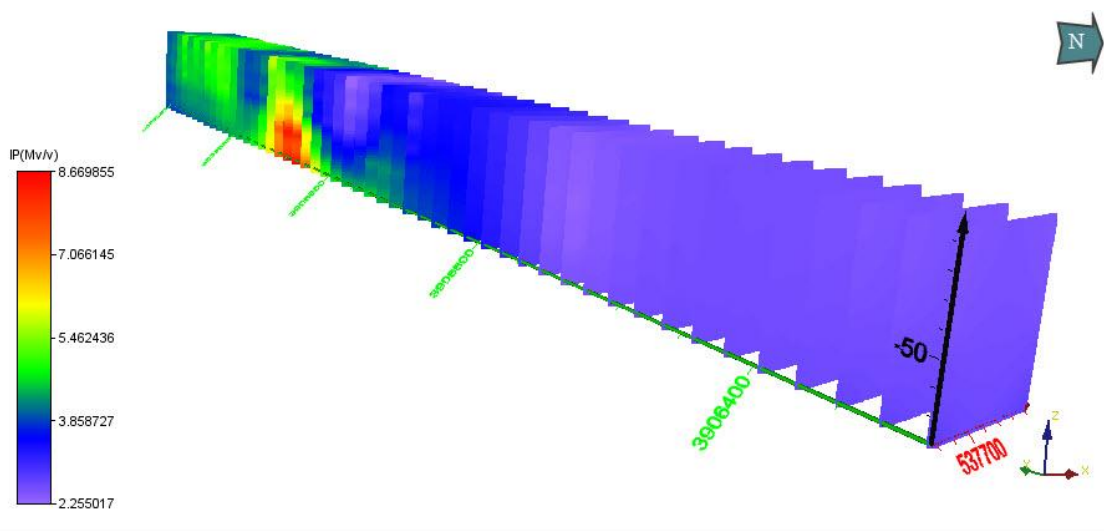
۴-۸ نمایش سه بعدی پروفیل‌ها توسط نرم‌افزار Voxler

توزیع مقاومت ویژه در زیر زمین به صورت سه بعدی است. از این رو به منظور دستیابی به یک دید کلی از نواحی بی‌هنجار، نمایش سه بعدی داده‌ها بسیار مفید است.

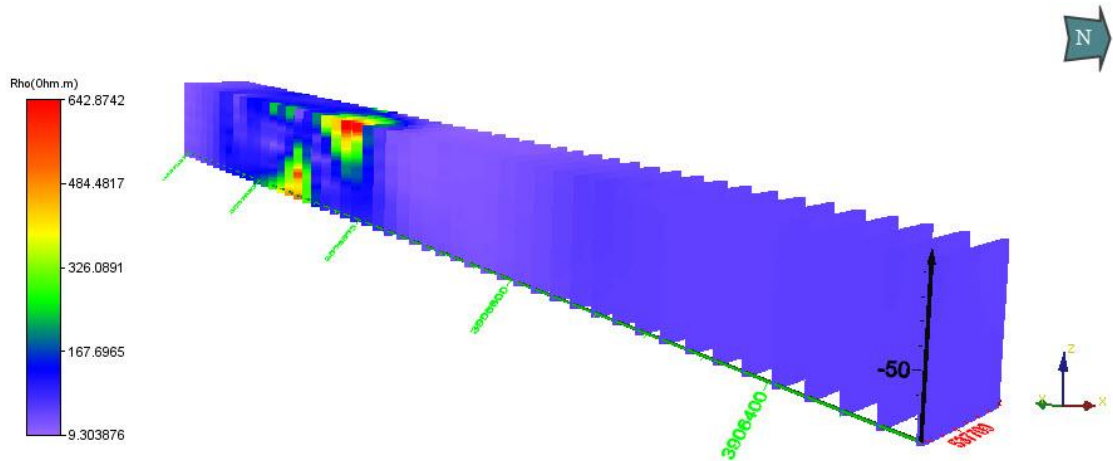
Voxler یک برنامه تجسم علمی سه بعدی است؛ که تفاسیر حجمی جهت‌دار را توجیه می‌کند و داده‌های سه بعدی را نمایش می‌دهد. در صورتی که تکیه آن بر حجم‌های سه بعدی است. این برنامه برای نمایش XYZC، که C یک متغیر در هر یک از جهت‌های X، Y و Z است، طراحی شده است. با برنامه

Voxler می‌توان خروجی‌های گرافیکی بسیار خوبی برای مدل واقعی سه‌بعدی ساخت. مدل‌ها می‌توانند بریده شوند و در هر زاویه‌ای نمایش داده شوند. برنامه Voxler چند روش شبکه‌بندی متفاوت دارد. تفاوت بین روش‌های شبکه‌بندی در الگوریتم ریاضی آنها برای محاسبه وزن در طی درونیابی گره شبکه می‌باشد. هر روش، داده را به‌طور متفاوتی نتیجه می‌دهد. پیش‌فرض این نرم‌افزار برای شبکه‌بندی، روش عکس فاصله می‌باشد [Golden Software Inc, 2012].

به منظور تجسم بهتر توزیع فضایی مقادیر IP و مقاومت ویژه بی‌هنجاری‌های پروفیل‌های P1, P2 و P3، مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده با نرم‌افزار Voxler در شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) به نمایش درآمده است. هر چند فاصله ۶۰ تا ۷۰ متری بین این سه پروفیل برای تفسیر سه‌بعدی زیاد است ولی با خطایی بیشتر از حالت معمول، می‌توان بی‌هنجاری‌های پروفیل‌های P1, P2 و P3 را به یکدیگر مرتبط دانست. همان‌طور که در شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸) مشاهده می‌شود، مناطق دارای شدت بارپذیری بالا و مقاومت ویژه متوسط تا بالا، تقریباً بر یکدیگر منطبق و نشان‌دهنده مناطق احتمالی کانه‌زایی می‌باشند.

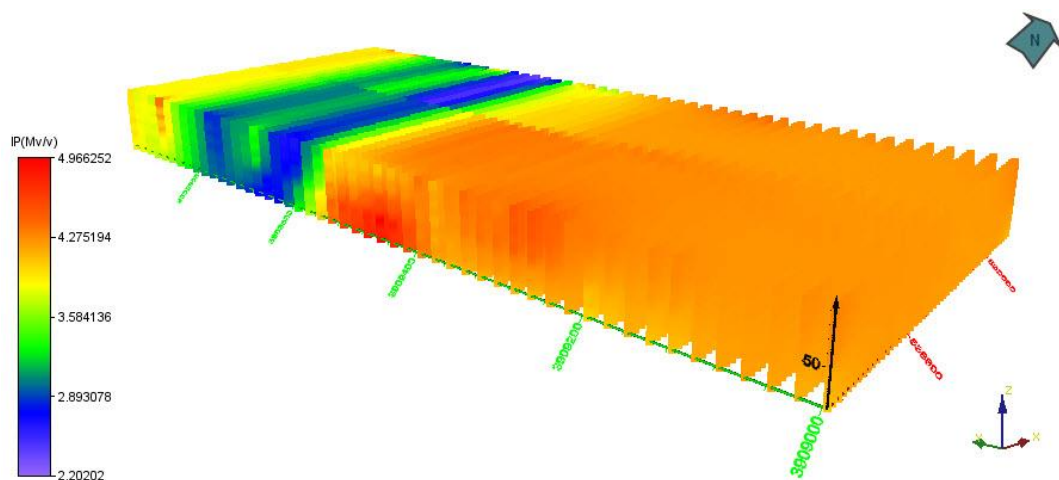


شکل (۴-۲۷): نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های IP پروفیل‌های P1, P2 و P3

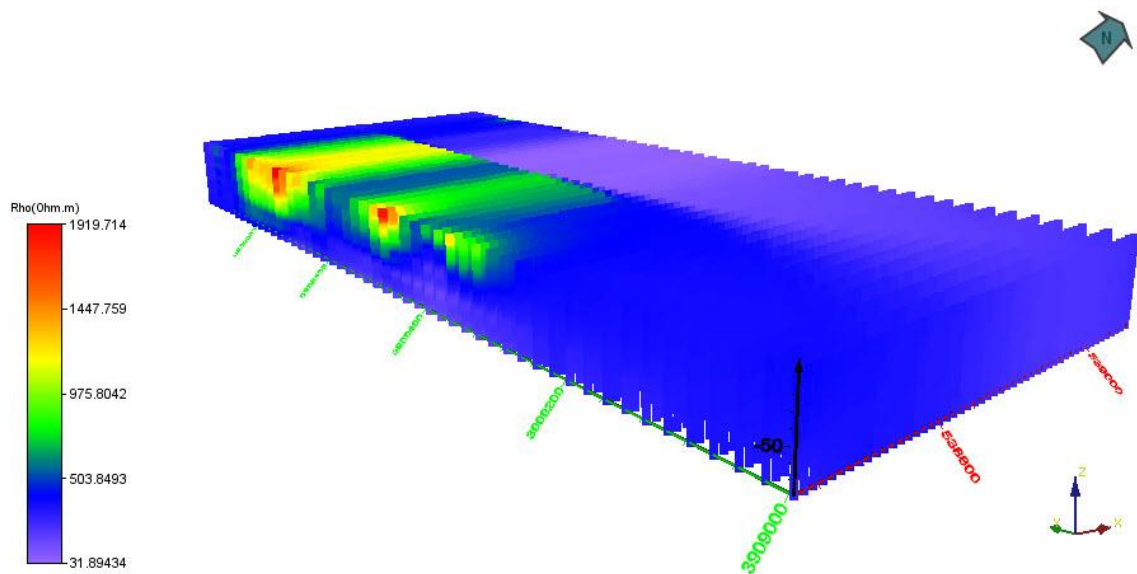


شکل (۴-۲۸): نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های مقاومت ویژه پروفیل‌های P1, P2 و P3

در شکل‌های (۴-۲۹) و (۴-۳۰) مقادیر IP و مقاومت ویژه بی‌هنجاری‌های پروفیل‌های P4, P5 و P6 به صورت مدل‌های سه‌بعدی به نمایش درآمده است. لازم به ذکر است که در این مدل‌ها به دلیل فاصله زیادی که بین پروفیل P6 و پروفیل P5 وجود دارد (۷۵۰ متر)، و همچنین فاصله ۶۰ تا ۷۰ متری بین پروفیل‌های P4 و P5 خطا بسیار افزایش یافته؛ لذا قابل اطمینان نمی‌باشند. از آن جایی که برای انجام مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار Res3dinv به منظور تهیه داده‌های ورودی نرم‌افزار Voxler، به حداقل سه پروفیل نیاز است؛ لذا به ناچار باید فاصله زیاد بین پروفیل‌ها را نادیده گرفت.



شکل (۴-۲۹): نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی معکوس داده‌های IP پروفیل‌های P4, P5 و P6



شکل (۴-۳۰): نمایش سه بعدی نتایج حاصل از مدل سازی سه بعدی معکوس داده های مقاومت ویژه پروفیل های P4, P5

و P6

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در این تحقیق برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و IP به منظور پتانسیل‌یابی کانسار-های سولفیدی مس در منطقه کال ابری واقع در روستای درونه، شهرستان بردسکن انجام شده است. تفسیر هم‌زمان نتایج روش‌های مذکور و تلفیق اطلاعات و داده‌های حاصله با اطلاعات به دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی می‌تواند تخمینی از زون‌های کانی‌سازی، عمق و گسترش کانی‌سازی فلزی را ارائه نماید.

۵-۲ نتیجه‌گیری

- نتایج مدل‌سازی انجام گرفته با استفاده از هر دو نرم‌افزار RES2DINV و Zondres2d به استثنای موارد جزئی، انطباق خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند.
- با وجود این که استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه و IP تا حدود زیادی در تشخیص زون‌های کانی‌سازی شده می‌تواند مؤثر باشد؛ اما در عین حال قادر به تعیین دقیق موقعیت این زون‌ها به خصوص در شرایط زمین‌شناسی پیچیده (مانند وجود زون آلتزه) نیست و نیاز به استفاده از اطلاعات کمکی نظیر زمین‌شناسی و داده‌های حفاری دارد.
- با استفاده از پارامتر IP می‌توان به حضور بخش‌هایی که در آنها احتمال کانی‌سازی بالا است؛ پی برد. هر چقدر شدت این پارامتر بیشتر باشد، احتمال کانی‌سازی، حضور سولفورها و حتی اکسیدهای مس بیشتر است. در اغلب مناطق میزان شدت IP اندازه‌گیری شده بین اعداد ۰ تا کمتر از ۵ میلی‌ولت بر ولت در نوسان بود؛ که نشان‌دهنده میزان IP زمینه است. در بخش‌های بی‌هنجار این میزان به بیش از ۵/۵ میلی‌ولت بر ولت می‌رسد.

- در اکثر مقاطع به دست آمده از مدل‌سازی معکوس داده‌های برداشت شده با آرایه دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی نواحی کانه‌زا دارای بارپذیری بالا و مقاومت ویژه متوسط تا بالا می‌باشند. این مناطق به عنوان مناطق احتمالی برای کانی‌سازی در نظر گرفته شد.
- در مقطع به دست آمده از پروفیل P1 که در شکل (۴-۴) آمده است بی‌هنجاری C1 با داشتن شدت بالای بارپذیری، می‌تواند نشان‌دهنده عیار بالای ماده معدنی باشد. بی‌هنجاری‌های A1 و B1 در زیر یک لایه مقاوم که از جنس آهک است، قرار گرفته‌اند. رخنمون‌های سطحی حاکی از شکل‌گیری کانه‌زایی در زیر لایه آهکی است. شدت بارپذیری اندازه‌گیری شده در امتداد این پروفیل نیز بالا و در حدود ۱۳ میلی‌ولت بر ولت می‌باشد. با توجه به موارد گفته شده زون‌های گفته شده را می‌توان به عنوان مناطق امیدبخش از لحاظ کانه‌زایی معرفی کرد.
- نتایج حاصل از مدل‌سازی بر روی پروفیل P2 که در شکل (۸-۴) آمده است نشان‌دهنده کانی‌سازی ضعیف سولفیدی در این منطقه می‌باشد؛ زیرا مقدار بارپذیری اندازه‌گیری شده در حد مقدار زمینه است. از آن جایی که شیب بی‌هنجاری‌ها از شیب لایه‌های آهکی پیروی می‌کند این مناطق را می‌توان به کانی‌زایی مس مرتبط دانست.
- شدت بارپذیری اندازه‌گیری شده در طول پروفیل P3 در مقایسه با سایر پروفیل‌ها بالاتر بوده و تا ۲۹ میلی‌ولت بر ولت می‌رسد. شیب بی‌هنجاری‌های نشان داده شده در شکل (۴-۱۱) نیز از شیب لایه‌های آهکی پیروی می‌کند. بنابراین بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در زون‌های A3 و B3 ناشی از حضور ماده معدنی با عیار بالا است.
- کانه‌زایی در محل پروفیل‌های P4, P5 و P6 در امتداد یک شکستگی تقریباً شرقی - غربی در دل آندزیت‌ها که دارای شیب به سمت جنوب است؛ شکل گرفته است. در مقطع به دست آمده از پروفیل P4 که در شکل (۴-۱۳) آمده است، بی‌هنجاری A4 نیز در یک ناحیه مقاوم و شیب‌دار که شیب آن به سمت جنوب است، شکل گرفته است. با توجه به این که شدت IP

اندازه‌گیری شده در حد مقدار زمینه است و همچنین رخنمون لایه آلت‌ره در این منطقه، زون A4 از لحاظ کانه‌زایی قابل اطمینان نمی‌باشد.

- همانند پروفیل P4، بی‌هنجاری‌های نشان داده شده در مقطع به دست آمده از پروفیل P5 که در شکل (۴-۱۶) آمده است، نیز درون یک ناحیه مقاوم از جنس آندزیت قرار گرفته‌اند. شدت بارپذیری اندازه‌گیری شده در امتداد این پروفیل در حد مقدار زمینه می‌باشد. رخنمون لایه آلت‌ره در امتداد این پروفیل نیز مشاهده می‌شود. با توجه به موارد گفته شده بی‌هنجاری‌های مشاهده شده ناشی از کانی‌سازی ضعیف ماده معدنی و یا وجود لایه آلت‌ره در منطقه می‌باشد.
- شدت IP اندازه‌گیری شده در امتداد پروفیل P6 بالاتر از پروفیل‌های P4 و P5 و حدود ۱۰ میلی‌ولت بر ولت است. برخلاف پروفیل‌های P4 و P5، بی‌هنجاری‌های نشان داده شده در شکل (۴-۱۸) دارای مقاومت‌ویژه پایینی می‌باشند که ناشی از عیار بالاتر ماده معدنی و یا حضور لایه آلت‌ره است.

۳-۵ پیشنهادات

در راستای به دست آوردن اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر از منطقه مورد مطالعه و اکتشاف بهتر بی‌هنجاری‌های شناسایی شده در مطالعه اخیر، پیشنهاداتی به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

- ۱- با توجه به رخنمون‌های مگنتیت و همچنین وجود لایه آلت‌ره در منطقه، بهتر است برداشت با روش مغناطیس‌سنجی نیز در این منطقه انجام شود تا محدوده کانی‌سازی مشخص گردد.
- ۲- با توجه به فاصله زیاد پروفیل‌ها از یکدیگر پیشنهاد می‌شود پروفیل‌های بیشتری در فاصله بین پروفیل‌های قبلی طراحی و برداشت داده‌ها صورت گیرد. این کار به تعیین شکل بی‌هنجاری‌ها، بالاتر بردن دقت تفسیر و همچنین تخمین میزان و عیار تقریبی ذخیره معدنی کمک قابل توجهی خواهد کرد. طراحی و برداشت پروفیل‌های بیشتر به‌خصوص در محل پروفیل P6 که در فاصله

۷۵۰ متری از پروفیل P5 قرار گرفته، امری لازم و ضروری است؛ زیرا تفسیر سه‌بعدی در شرایطی که پروفیل‌ها در فاصله بسیار زیادی از یکدیگر قرار دارند، به دلیل افزایش خطا، غیرممکن می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود حداقل دو پروفیل به صورت موازی با پروفیل P6 و در فاصله حداکثر ۵۰ متری از آن طراحی و اجرا شود.

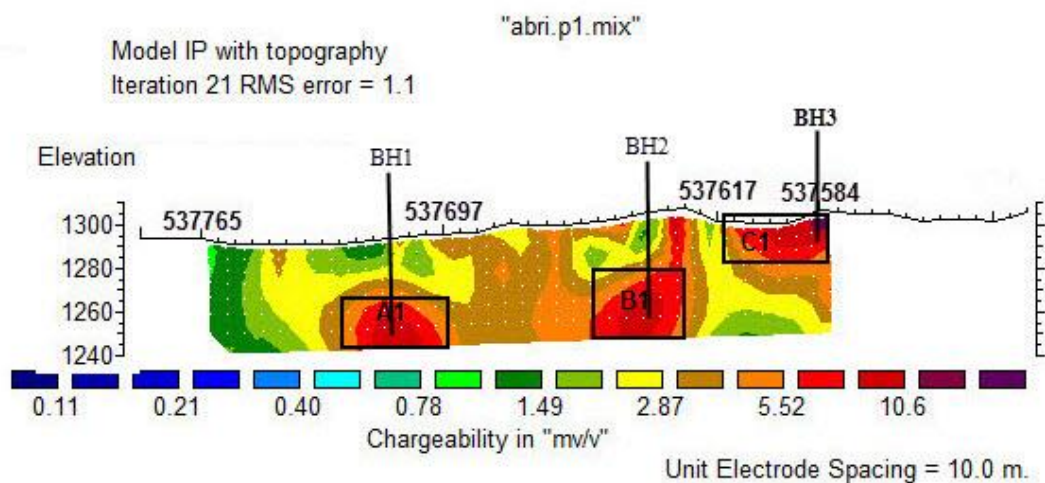
۳- پیشنهاد می‌شود در محیط‌های با ساختار زمین‌شناسی پیچیده (به‌طور مثال حضور لایه آلتیره)، که روش‌های مقاومت‌ویژه و IP ضعیف عمل می‌کنند، سعی شود عملیات ژئوفیزیکی با فواصل الکتروودی کوچک (مثلاً فاصله الکتروودی ۵ متر) به منظور برداشت نقاط بیشتر و مدل‌سازی دقیق‌تر استفاده شود.

۴- در نهایت با توجه به مدل‌سازی‌های صورت گرفته و مقاطع مشاهده شده، ۱۴ گمانه^۱ در منطقه جهت بررسی بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد می‌گردد. در جدول (۵-۱) موقعیت حفاری‌های پیشنهادی، به همراه شیب، عمق و مختصات تقریبی محل حفاری آورده شده است. موقعیت گمانه‌های پیشنهادی در شکل‌های (۵-۱)، (۵-۲)، (۵-۳)، (۵-۴)، (۵-۵) و (۵-۶) نشان داده شده است. در جدول (۵-۱) گمانه‌هایی که اهمیت بیشتری از لحاظ کانه‌زایی دارند و احتمالاً نشانگر عیار بیشتری از ماده معدنی می‌باشند به صورت **Bold** نوشته شده‌اند.

¹ Borehole

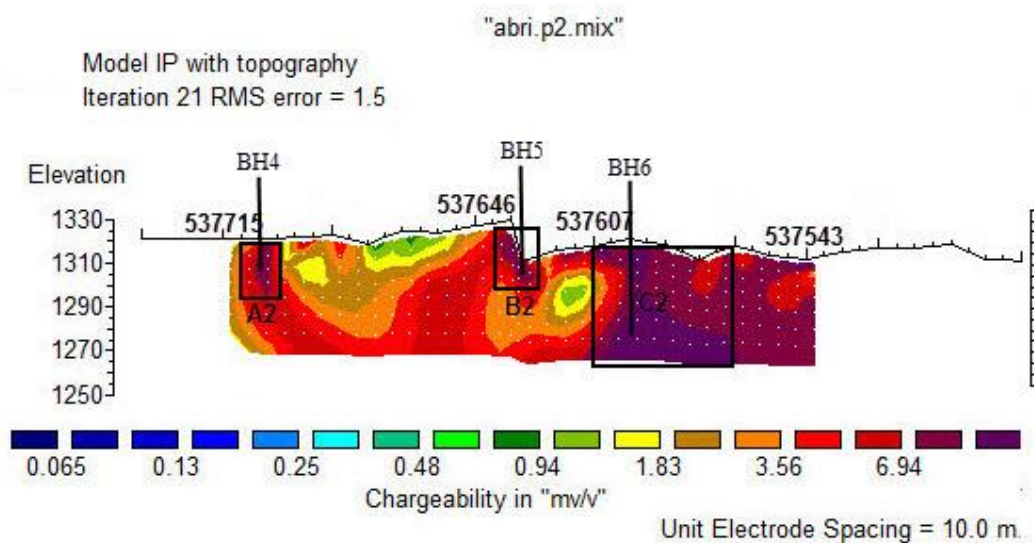
جدول (۵-۱): مشخصات حفاری‌های پیشنهادی

فاصله تقریبی محل حفاری از نقطه صفر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عمق حفاری (m)	شیب (درجه)	گمانه پیشنهادی	خط برداشت
۷۰	۳۹۰۶۴۶۷	۵۳۷۷۲۰	۴۰	۹۰	BH1	P1
۲۲۰	۳۹۰۶۵۹۸	۵۳۷۶۳۶	۴۵	۹۰	BH2	P1
۳۲۰	۳۹۰۶۶۸۶	۵۳۷۵۸۴	۱۵	۹۰	BH3	P1
-۲۰	۳۹۰۶۳۳۹	۵۳۷۷۰۵	۱۵	۹۰	BH4	P2
۱۴۰	۳۹۰۶۴۷۸	۵۳۷۶۲۶	۱۰	۹۰	BH5	P2
۲۰۰	۳۹۰۶۵۳۰	۵۳۷۵۹۴	۴۵	۹۰	BH6	P2
۱۶۰	۳۹۰۶۴۸۷	۵۳۷۵۴۵	۴۰	۹۰	BH7	P3
۳۱۰	۳۹۰۶۶۱۹	۵۳۷۴۷۹	۲۰	۹۰	BH8	P3
۱۷۰	۳۹۰۸۹۴۴	۵۳۹۰۹۵	۴۰	۹۰	BH9	P4
۱۰	۳۹۰۹۰۸۴	۵۳۹۰۴۰	۱۵	۹۰	BH10	P5
۱۷۰	۳۹۰۸۹۲۵	۵۳۹۰۳۹	۲۵	۹۰	BH11	P5
۳۰۰	۳۹۰۸۷۹۵	۵۳۹۰۴۱	۲۰	۹۰	BH12	P5
۱۷۰	۳۹۰۸۶۹۰	۵۳۸۲۸۱	۳۰	۹۰	BH13	P6
۲۴۰	۳۹۰۸۶۲۰	۵۳۸۲۸۰	۳۵	۹۰	BH14	P6



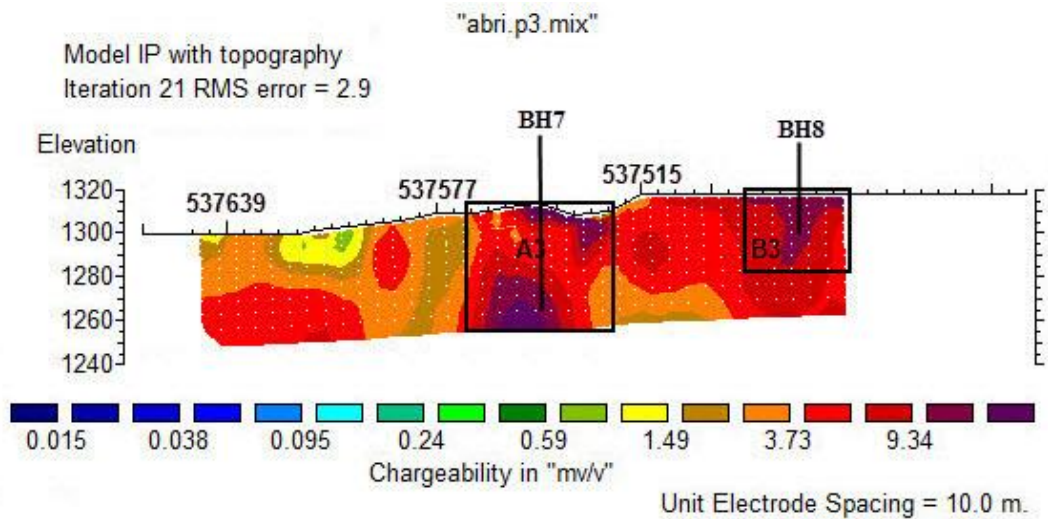
شکل (۵-۱): مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P1 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی

این پروفیل

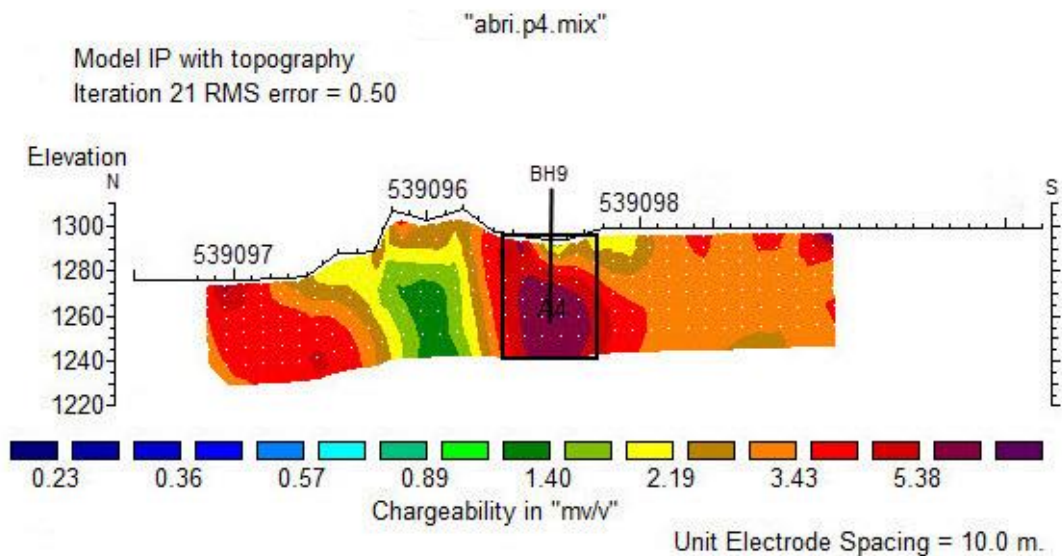


شکل (۵-۲): مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P2 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی

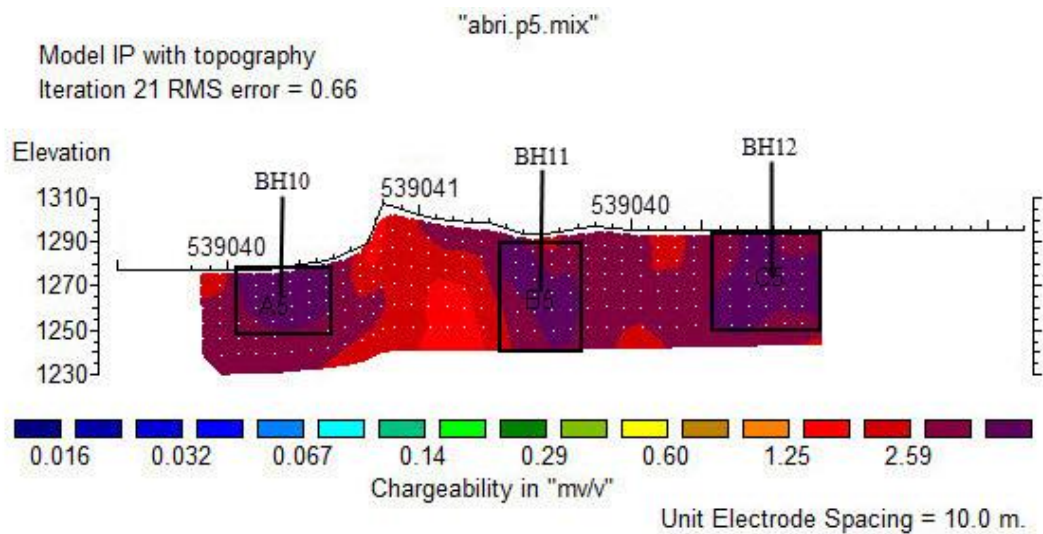
این پروفیل



شکل (۳-۵): مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P3 به همراه گمانه‌های پیشنهادی بر روی این پروفیل

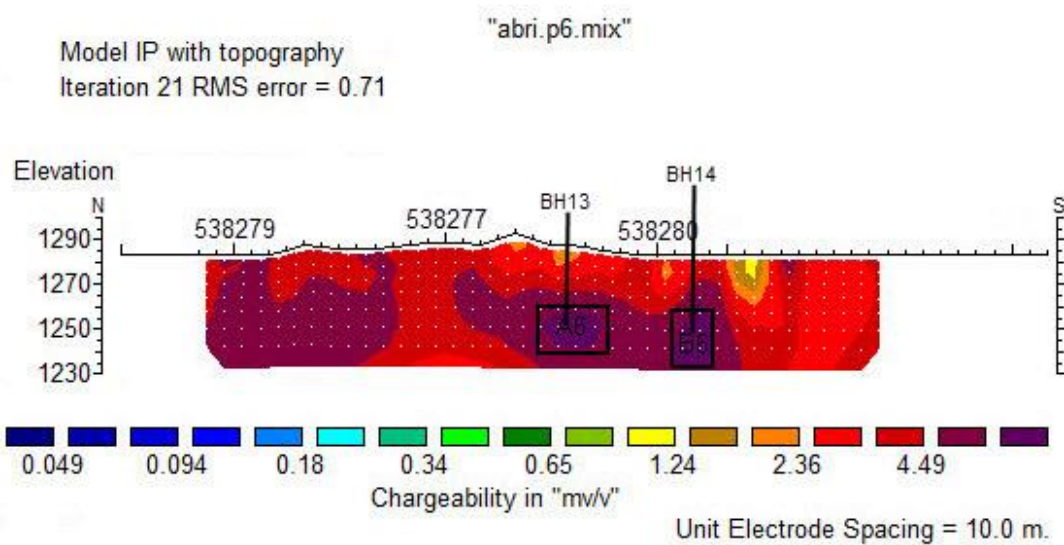


شکل (۴-۵): مقطع حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های IP برای پروفیل P4 به همراه گمانه پیشنهادی بر روی این پروفیل



شکل (۵-۵): مقطع حاصل از مدل سازی معکوس داده های IP برای پروفیل P5 به همراه گمانه های پیشنهادی بر روی

این پروفیل



شکل (۵-۶): مقطع حاصل از مدل سازی معکوس داده های IP برای پروفیل P6 به همراه گمانه های پیشنهادی بر روی

این پروفیل

منابع

پیروز ا، جهانبین م، رفعت‌هراب ع، احمدزاده غ و فردوسی ح، (۱۳۹۲)، "به تصویر کشیدن ناهمگنی - های جانبی واقع در زیر سطح زمین توسط به‌کارگیری 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 دوم، حاجب حسینی و زمردیان، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۶۹۶.

حاجب حسینی ح، زمردیان ح، (۱۳۷۵)، "ژئوفیزیک کاربردی"، مولف: تلفورد و همکاران، ۱۹۷۴، جلد دوم، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

حجت آ، رنجبر ح، (۱۳۹۰)، "اصول ژئوالکترونیک کاربردی"، چاپ اول، انتشارات ستایش، تهران، ۲۷۸.

حدیدی ع، کامکار روحانی ا و حیدری م، (۱۳۸۹)، "تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی برای اکتشاف سرب و روی در محدوده‌ی جنوبی شرق تکاب در محیط GIS از طریق منطق فازی"، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صفحه ی ۳۶۷-۳۷۱، تهران.

حسینی پاک ع، (۱۳۹۴)، "اصول اکتشافات ژئوشیمیایی (مواد معدنی)"، چاپ نهم، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۶۱۵.

رمضی ح، و مصطفایی ک، (۱۳۹۰)، "اکتشاف ژئوفیزیکی کانسار مس خونیک در خراسان جنوبی با استفاده از روش‌های الکترونیک"، اولین همایش ملی مس، ۲۰۰۷-۲۰۰۸، کرمان.

سلطانی ا، (۱۳۹۵)، پایان نامه ارشد: "کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار مس کال ابری، رهبری و چشمه مرضیه، شمال غرب درونه"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

قائم‌ی ف، موسوی حرمی ر، (۱۳۸۵)، "نقشه درونه ۱:۱۰۰۰۰"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

قربانی م، صالح پور آ، (۱۳۹۴)، "نقشه ۱:۵۰۰۰ زمین‌شناسی - معدنی محدوده کال ابری - بردسکن".

کریم‌پور م، ملک‌زاده آ و حیدریان م، (۱۳۸۷)، "اکتشاف ذخایر معدنی"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

کلاگری ع، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز، ص ۱۸۰.

لطیف‌کار م، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد: "برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون‌القایی و مقاومت‌ویژه به منظور شناسایی کانی‌زایی مس در منطقه خضرآباد- یزد"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مرادزاده ع، دولتی ارده جانی ف، کثیری ا و عرب امیری ع، (۱۳۸۶)، "مدل‌سازی وارون و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی کانسار سرب و روی تاش"، گردهمایی علوم زمین، تهران.

مرتضی‌نژاد غ، (۱۳۹۳)، "گزارش پایانی اکتشاف ژئوفیزیکی سولفورهای مس به روش‌های IP و مقاومت‌ویژه در معادن مس کال ابری و چشمه مرضیه"، شرکت زمین پرداز کویر

مطاعی ن، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه ارشد: "مدل‌سازی دوبعدی داده‌های ژئوالکتریک با روش‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی به منظور اکتشاف مس در محدوده خرانق یزد"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

موسوی ح، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد: "مدل‌سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون‌القایی و مقاومت‌ویژه به منظور اکتشاف ذخایر مس در منطقه هفت کوه کرمان"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مهدوی ف، (۱۳۸۳)، "روش‌های الکتریکی در اکتشافات ژئوفیزیکی حوزه‌های رسوبی عمیق"، مؤلف: یانگل اس اچ، ۱۹۹۶، انتشارات دانشگاه تهران.

Alavi M. (1991), "Sedimentary and structural characteristics of the PaleoTethys remnants in northeastern Iran", Geological Society of America Bulletin, 103(8), pp. 983-992.

Arndt N., Ganino C. (2012). "Metals and society". An Introduction to Economic Geology.

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.

Corvallis, O. R., (2000), "D.C. Resistivity methods", Northwest Geophysical Associates. Inc.

Dey, A., and Morrison, H.F. (1979). "Resistivity Modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures". Geophysical Prospecting 27, 106- 103

Gifkins C. C., Herrmann W., Large, R. R. (2005). "Altered volcanic rocks: A guide to description and interpretation".

Golden Software Inc, (2012), VOXLER, Ver 3 full user's guide.

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.

Kaminsky A., (2001-2013), "Program for two-dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods", Saint-Petersburg.

Knödel K., Lange G. and Voigt H. J., (2007), "Environmental geology: Handbook of field methods and case studies", Vol. 1, First Edition, Springer, Heidelberg, pp.206.

Leach D. L., Sangster D. F., Kelley K. D., Ross R. L., Garven G., Allen C. R. (2005). "Sediment-hosted Pb-Zn deposits: a global perspective". *Economic Geology*, 100, pp. 561-608.

Loke, M. H., (2004), "2-D and 3-D electrical imaging surveys".

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.

Loke, M. H. (2012). "Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys". Copy right (1996-2012).

Lowrie W., (2007), "Fundamentals of geophysics", Vol. 1, Second Edition, Cambridge University Press, UK.1, pp. 266.

Marshall, D. J., and Madden, T. R., (1959)," Induced Polarization", A study of its cause, *geophysics*, 790-816.

Maynard J. B. (2012). "Geochemistry of sedimentary ore deposits". Springer Science & Business Media.

Milsom J., (2007), "Field geophysics", Vol. 1, Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, Oxford, pp.100.

Okada, K., (1995). Geophysical exploration for epithermal gold deposits: Case studies from the Hishikari gold mine, Kagoshima, Japan, *The Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists*, 26, pp.78-83.

Reynolds J.M., (1997), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd.

Seigel, H.O. Hill, H.L. and Baird, J.G. (1968) "Discovery case history of the Pyramid ore bodies", pine point, northwest territories, Canada, *Geophysics*, 33, pp.645-656.

Seigel, H. O., (1959), "Mathematical formulation and type curves for induced polarization", 24, 3, pp 543-565.

Slater L. D. and Lesmes, D., (2002), IP interpretation in environmental investigations: *Geophysics, Soc. Of Expl. Geophys.*, 67, 77- 88.

Telford W. Geldart L. & Sheriff R. (1990). "An Introduction to Applied Geophysics" Cambridge University Press. New York.

Telford W.M. & Sheriff RE., (1991), "Applied Geophysics", 2nd Edition Cambridge University Press.

Ward, S. H., (1990) “**Resistivity and Induced Polarization Method in Geotechnical and Environmental Geophysics**”, SEG, vol. 1, pp. **147- 189**

Webb, M, and Rawston, P. (1995) “**The geophysics of the Ernest Henry Cu-Au deposit (N.W) Qld**”, Exploration Geophysics, 26, pp. **51-59**.

www.geomoto.com

Zonge Engineering and Research Organization, (1994), “**The application of Surface Electrical Geophysics to groundwater problems**”, Electrical Geophysics Seminar notes., pp. **2-15**.

Abstract

Kal-abri copper mine is located north of the village of the Daruneh near the city of Bardaskan in Khorasan Razavi Province. Kal-abri copper zone is in the northern edge of the central Iran and in the south of the ophiolitic Sabzevar zone. The main minerals of this copper deposit are visible that include the copper oxide and Sulfide minerals. In this study, induced polarization (IP) and electrical resistivity methods are used. Collecting data using the composition of dipole-dipole and pole-dipole with 10 and 20 meters electrode spacing has been carried out. In this study, a number of 1178 points has been implemented in six survey lines in Kal-abri zone. In this research, inverse modeling has been carried out on the collected geophysical data using RES2DINV and Zondres2d software packages and the results have been displayed in three-dimensional view by Voxler software. The results using geological information have led to the identification of copper mineralization zones in the area and determination of depth and dimensions of mineralization bodies in different places of the area. Based on the results obtained, copper mineralization zones have high chargeability and medium to high resistivity values and are in the contact with limestone and andesite formations, and also in the contact with limestone and Pyroclastic unit or in andesitic fractures. Based on the results, 14 exploration drilling boreholes have been suggested in order to reach copper mineralization at depth.

Keywords: Induced polarization, Electrical resistivity, Inverse modeling, Kal-abri, RES2DINV, Zondres2d, Voxler



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Geoelectric

**Modeling and Interpretation of resistivity and induced polarization
(IP) Data of Kal Abri Copper Zone- Bardeskan**

By: S. Arab-Ansari

Supervisors:

Dr.A. Arab-Amiri

Dr.A. Kamkar-Rouhani

Advisor:

Dr.F. fardoost

January 2017