

سَلَامٌ عَلَيْكُمْ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد اکتشاف مواد معدنی

مدل سازی اکتشافی و تفسیر داده های ژئوفیزیکی و زمین شناسی در کانسار

سرب و روی معدن چومالو، شمال غرب زنجان

نگارنده: آرش ربیعی صادق آبادی

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور:

دکتر سوسن ابراهیمی

بهمین ۹۶

شماره: ۸۰۳۹۲۲۰۷۶
تاریخ: ۹۴/۱۱/۱۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای آرش ربیعی صادق آبادی با شماره دانشجویی ۹۴۳۶۵۴۴ رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف تحت عنوان: مدل سازی اکتشافی و تفسیر داده های ژئوفیزیکی و زمین شناسی در کانسار سرب و روی معدن چومالو، شمال غرب زنجان که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

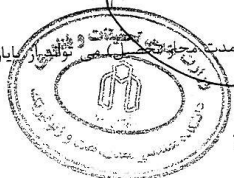
قبول (با درجه: خوب) مردود
 نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر علیرضا عرب امیری	۱- استاد راهنمای اول
	دانشیار	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	۲- استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر سوسن ابراهیمی	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر علی نجاتی کلاته	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر امیر پیروز	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



با احترام تقدیم به

مقدس ترین و اژه مادر لغت نامه ی دلم ؛

پدرم، استوار تکیه گاهم و اول استادم ؛ آن که الفبای زندگانی را به من آموخت.

مادرم، بی گران دریای فداکاری و عشق ؛ که وجودم برایش همه رنج بوده و وجودش برایم همه مهر.

برادر عزیزتر از جانم.

و همه ی آمان که دوستان دارم ...

تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش خدای راست، که ما را به ثنا و ستایش خود راه نمود و شایسته‌ی آن گردانید تا از سپاس‌گزاران احسان او باشیم.

اکنون که به یاری خداوند متعال موفق به دفاع از پایان‌نامه‌ی خویش شدم؛ بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌منت و خالصانه‌ی اساتید گران‌قدر جناب آقای دکتر علیرضا عرب‌امیری و آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که راهنمایی اینجانب را بر عهده داشته‌اند و استاد مشاورم سرکار خانم دکتر سوسن ابراهیمی، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. از جناب آقای مهندس ریاحی، مدیر عامل محترم شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید که امکانات استفاده از تجهیزات و حضور در برداشت‌های ژئوفیزیکی را فراهم نموده‌اند؛ کمال امتنان را دارم. از آقای مهندس شکری و آقای مهندس نجفی بابت راهنمایی‌هایشان تشکر می‌نمایم. همچنین از پدرم، مادرم، تمامی اساتید و دوستان عزیز که با الطاف صمیمانه‌ی خود طی این مسیر را بر من هموار کردند؛ قدردانم و برایشان در تمامی مراحل زندگی موفقیت و سلامتی آرزو می‌کنم.

در پایان از جناب آقای دکتر علی نجاتی کلاته و آقای دکتر ایرج پیروز به‌عنوان اساتید داور، که کمک به هرچه بهتر شدن این کار کردند؛ تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب آرش ربیعی صادق آبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن- اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی اکتشافی و تفسیر داده های ژئوفیزیکی و زمین شناسی در کانسار سرب و روی معدن چومالو، شمال غرب زنجان تحت راهنمایی آقای دکتر علیرضا عرب امیری و 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 پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه 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 بافت های آن ها) 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 افزارها و تجهیزات ساخته شده) 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

روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی هستند؛ که در پی جویی و اکتشاف ذخایر معدنی کاربرد وسیعی دارند. استفاده از دو یا چند روش اکتشافی در کنار یکدیگر و ترکیب آن‌ها با اطلاعات دیگری همچون مطالعات زمین‌شناسی، می‌تواند احتمال کشف و امکان دستیابی به مناطق امیدبخش را افزایش دهد. با توجه به شواهد کانی‌سازی فلزی و سولفیدی در منطقه مورد مطالعه (محدوده اکتشافی چومالو)، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی قطبش‌القایی (IP) و مقاومت‌ویژه الکتریکی به‌منظور پی‌جویی و اکتشاف کانی‌سازی‌های احتمالی و انجام مطالعات زمین‌شناسی از اهمیت بالایی برخوردار است.

محدوده اکتشافی چومالو در ۷۰ کیلومتری شمال غرب زنجان واقع شده است؛ که از نظر زمین‌شناسی در کمان ماگمایی البرز- آذربایجان و در پهنه فلزایی طارم- هشتجین قرار دارد. سنگ میزبان کانی‌سازی، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و توده نفوذی مونزونیتی الیگوسن می‌باشند؛ که در اثر تزریق توده نفوذی، متحمل دگرسانی‌های هیدروترمال پروپیلیتیک- کربناته، سیلیسی و سیلیسی- آرژیلیک شده‌اند. کانی‌سازی در منطقه به‌صورت رگه‌ای، رگچه‌ای، توده‌ای، پراکنده و جانشینی بوده و از روند گسل‌ها و شکستگی‌ها تبعیت می‌کند و شامل گالن، اسفالریت، سروزیت، کالکوپیریت و پیریت می‌باشد. بر اساس نتایج مطالعات زمین‌شناسی انجام شده در این پژوهش، خصوصیات کانی‌سازی منطقه چومالو از نوع کانسارهای سرب و روی هیدروترمال می‌باشد.

با توجه به مطالعات اولیه زمین‌شناسی و شواهد کانی‌سازی در منطقه، برداشت داده‌های IP و مقاومت‌ویژه ابتدا در قالب ۴ شبکه با آرایه مستطیلی به‌منظور تعیین محدوده‌های بی‌هنجار و سپس در قالب ۶ پروفیل با آرایه دوقطبی- دوقطبی به‌منظور اکتشاف محدوده‌های جانبی و عمقی این بی‌هنجاری‌ها، طراحی و انجام شد. پی‌جویی‌های صورت گرفته در منطقه منجر به آشکارسازی چند بخش مستعد

کانی‌سازی در منطقه گردید. سپس داده‌های IP و مقاومت‌ویژه برداشت‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای RES2DINV و ZondRes2D به‌روش وارون‌سازی هموار دوبعدی مورد پردازش و مدل‌سازی قرار گرفتند و نتایج حاصله بر اساس نتایج مطالعات زمین‌شناسی و اطلاعات به‌دست آمده از ترانشه‌ها، شواهد معدنکاری و رخنمون‌های سطحی، تعبیر و تفسیر و اعتبارسنجی شدند. همچنین به‌منظور دست‌یابی به منظر بهتری از نواحی بی‌هنجار زیرسطحی از مدل‌سازی وارون هموار سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار RES3DINV، استفاده شد. برای نمایش بهتر فضایی نتایج مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی، از نرم‌افزارهای Voxler و RockWorks نیز استفاده شده است. در نتیجه، یک بی‌هنجاری با راستای تقریبی شرقی-غربی در جنوب محدوده منطبق بر زون سیلیسی-برشی، و چند بی‌هنجاری با راستای تقریبی شمالی-جنوبی در شمال محدوده در ارتباط با شکستگی‌های نهشته‌های بازالتی گسترش یافته‌اند؛ که می‌توان آن‌ها را مرتبط با کانی‌سازی فلزی سرب و روی در منطقه دانست. نواحی بی‌هنجار با مقادیر بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین مشخص شده‌اند. شایان ذکر است مقادیر بالای بارپذیری برای برخی از بی‌هنجاری‌های شمالی احتمالاً به علت وجود پیریت پراکنده در عمق باشد. در نهایت بر اساس نتایج به‌دست آمده، ۱۳ نقطه برای حفاری پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: دگرسانی هیدروترمال، کانی‌سازی رگه‌ای، قطبش‌القایی (IP)، مقاومت‌ویژه الکتریکی،

آرایه دوقطبی-دوقطبی، چومالو، زنجان.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

کنفرانسی:

۱- ربیعی صادق آبادی آ، عربامیری ع، کامکار روحانی ا. و ابراهیمی س،، (۱۳۹۶ الف)، "مطالعات پتروگرافی، دگرسانی و کانه‌زایی کانسار سرب و روی چومالو، شمال غرب زنجان"، نهمین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

۲- ربیعی صادق آبادی آ، عربامیری ع، کامکار روحانی ا. و ابراهیمی س،، (۱۳۹۶ ب)، "برداشت، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های قطبش‌القایی (IP) و مقاومت‌ویژه در محدوده کانسار سرب و روی چومالو، شمال غرب زنجان"، نهمین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

علمی پژوهشی:

۱- ربیعی صادق آبادی آ، عربامیری ع، کامکار روحانی ا. و ابراهیمی س،، (۱۳۹۶ ج)، "مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی به‌منظور اکتشاف سرب و روی در منطقه چومالو، شمال غرب زنجان"، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی (JRAG)، دانشگاه صنعتی شاهرود.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ تاریخچه موضوع و مروری بر مطالعات انجام شده
۸	۳-۱ ضرورت و هدف از انجام تحقیق
۸	۴-۱ روش تحقیق
۱۰	۵-۱ ساختار پایان نامه
۱۳	فصل دوم: مبانی روش های مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی (IP)
۱۴	۱-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی
۱۴	۱-۱-۲ مقدمه
۱۴	۲-۱-۲ اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی
۱۶	۳-۱-۲ مقاومت ویژه مواد تشکیل دهنده زمین و عوامل مؤثر بر تغییر آن
۱۸	۴-۱-۲ روش های برداشت داده های مقاومت ویژه الکتریکی
۲۰	۵-۱-۲ کاربردهای روش مقاومت ویژه الکتریکی
۲۱	۶-۱-۲ مزایا و محدودیت های روش مقاومت ویژه الکتریکی
۲۳	۲-۲ روش قطبش القایی (IP)
۲۳	۲-۲-۲ اصول و منشأ IP
۲۵	الف) قطبش غشایی
۲۷	ب) قطبش الکترودی

۲۹	.....IP روش‌های اندازه‌گیری
۲۹	.....الف) اندازه‌گیری IP در حوزه زمان
۳۲	.....IP مزایا و محدودیت‌های روش
۳۳	.....IP نوفه‌ها در اندازه‌گیری‌های
۳۵	.....۳-۲ آرایه‌های الکتروودی در برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP
۳۶	.....۱-۳-۲ مقایسه آرایه‌های الکتروودی مختلف و انتخاب آرایه مناسب
۳۸	.....الف) آرایه مستطیلی
۳۹	.....ب) آرایه دوقطبی - دوقطبی
۴۳	.....فصل سوم: زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
۴۴	.....۱-۳ مقدمه
۴۴	.....۲-۳ موقعیت و شرایط جغرافیایی
۴۶	.....۳-۳ زمین‌شناسی ناحیه‌ای
۴۸	.....۴-۳ زمین‌شناسی منطقه‌ای
۵۴	.....۵-۳ دگرسانی سنگ میزبان
۵۶	.....۶-۳ کانی‌سازی در محدوده معدنی چومالو
۶۱	.....۷-۳ مدل کانی‌سازی
۶۳	.....فصل چهارم: برداشت، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP
۶۴	.....۱-۴ مقدمه
۶۵	.....۲-۴ عملیات برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP و تجهیزات مورد استفاده
۶۵	.....۱-۲-۴ نحوه انجام عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP

۶۷	۲-۲-۴ وسایل و تجهیزات مورد استفاده در برداشت
۷۲	۳-۴ مدل سازی و پردازش داده‌ها
۷۲	۱-۳-۴ روش‌های مدل سازی ژئوفیزیکی
۷۲	الف) مدل سازی فیزیکی
۷۲	ب) مدل سازی عددی
۸۰	۲-۳-۴ مدل سازی داده‌های صحرایی
۸۰	الف) نرم افزار RES2DINV
۸۳	ب) نرم افزار ZondRes2D
۸۳	ج) نرم افزار RES3DINV
۸۵	۳-۳-۴ پردازش داده‌ها
۹۰	۴-۴ تفسیر نتایج برداشت‌های ژئوفیزیکی در منطقه مورد مطالعه
۹۱	۱-۴-۴ تفسیر نقشه‌های هم‌مقدار مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری
۹۴	۲-۴-۴ تفسیر نتایج حاصل از مدل سازی وارون دوبعدی داده‌های برداشت شده
۹۴	الف) پروفیل DD 00-NS
۹۹	ب) پروفیل DD 75w-NS
۱۰۴	ج) پروفیل DD 150w-NS
۱۰۸	د) پروفیل DD 50n-EW
۱۱۲	ه) پروفیل DD 50s-EW
۱۱۶	و) پروفیل DD 150s-EW
۱۲۱	۳-۴-۴ بررسی نتایج حاصل از مدل سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه و IP

الف) پروفیل‌های شمالی- جنوبی	۱۲۱
ب) پروفیل‌های شرقی- غربی	۱۲۷
۴-۴-۴ نمایش سه‌بعدی تمامی داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و IP	۱۳۲
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۱۳۷
۱-۵ نتیجه‌گیری	۱۳۸
۲-۵ پیشنهادات	۱۴۱
منابع و مآخذ	۱۴۷

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۵	شکل ۱-۲: آرایه کلی الکترودی در بررسی‌های مقاومت‌ویژه الکتريکی
۲۴	شکل ۲-۲: دوره کامل اندازه‌گیری قطبش القایی در یک نقطه
۲۶	شکل ۳-۲: تنگ‌شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی و ایجاد قطبش غشایی
۲۷	شکل ۴-۲: ایجاد قطبش غشایی به دلیل وجود بار منفی ذرات رسی و المان رشته‌ای
۲۸	شکل ۵-۲: قطبش الکترودی، الف) شارش الکترولیتی، ب) ایجاد قطبش الکترودی
۳۱	شکل ۶-۲: اندازه‌گیری IP در روش زمان-حوزه‌ای
۳۸	شکل ۷-۲: آرایه مستطیلی و نحوه قرارگیری الکترودهای جریان و پتانسیل
۴۰	شکل ۸-۲: آرایه دوقطبی-دوقطبی و نحوه قرارگیری الکترودهای جریان و پتانسیل
۴۱	شکل ۹-۲: نمای کلی از برداشت داده‌ها با آرایه دوقطبی-دوقطبی و ترسیم شبه‌مقطع
۴۵	شکل ۱-۳: نقشه راهنمای راه‌ها جهت دسترسی به منطقه مورد مطالعه
۴۷	شکل ۲-۳: نقشه ساده شده تقسیم‌بندی ساختاری ایران که موقعیت محدوده چومالو
۴۸	شکل ۳-۳: الف) نمایش موقعیت پهنه فلززایی طارم-هشتجین در بخش غربی کمان ماگمایی البرز
۵۲	شکل ۴-۳: نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی ۱:۵۰۰۰ محدوده چومالو
۵۴	شکل ۵-۳: تصاویر میکروسکوپی از سنگ میزبان‌های کانی‌سازی در منطقه چومالو
۵۶	شکل ۶-۳: تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های سنگ میزبان کانی‌سازی در منطقه چومالو
۵۸	شکل ۷-۳: تصاویر ماکروسکوپی از ماده معدنی در منطقه چومالو
۶۰	شکل ۸-۳: تصاویر میکروسکوپی از کانه‌زایی در منطقه چومالو

- شکل ۳-۹: توالی پاراژنتیک مراحل کانی‌سازی در منطقه چومالو ۶۱
- شکل ۴-۱: موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی با آرایه مستطیلی ۶۶
- شکل ۴-۲: موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی با آرایه دوقطبی- دوقطبی ۶۶
- شکل ۴-۳: موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی ۶۷
- شکل ۴-۴: تجهیزات و وسایل ارسال جریان ۶۸
- شکل ۴-۵: دستگاه گیرنده GRx8-32 به‌همراه نمایشگر دستی ۶۹
- شکل ۴-۶: تصویر الکتروود غیرپلاریزه پتانسیل بر روی یکی از نقاط برداشت ۷۰
- شکل ۴-۷: عملیات برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در امتداد یکی از پروفیل‌های برداشت ۷۱
- شکل ۴-۸: تیم اجرای عملیات صحرایی در حین برداشت داده‌ها ۷۱
- شکل ۴-۹: مدل اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار RES2DINV ۸۲
- شکل ۴-۱۰: نحوه لایه‌بندی و بلوک‌بندی مدل سه‌بعدی زیر سطح زمین در نرم‌افزار RES3DINV ۸۴
- شکل ۴-۱۱: نحوه نمایش داده‌های مقاومت‌ویژه (در امتداد پروفیل DD 50s-EW) به‌منظور حذف یا کاهش نوفه‌های دستگاهی (الف) در نرم‌افزار RES2DINV و (ب) در نرم‌افزار ZondRes2D ۸۷
- شکل ۴-۱۲: نحوه نمایش داده‌های مقاومت‌ویژه (در امتداد پروفیل DD 50s-EW) به‌منظور حذف یا کاهش نوفه‌های تصادفی (الف) در نرم‌افزار RES2DINV و (ب) در نرم‌افزار ZondRes2D ۸۹
- شکل ۴-۱۳: نقشه هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری حاصل از برداشت با آرایه مستطیلی در محدوده مورد مطالعه ۹۱
- شکل ۴-۱۴: نقشه هم‌مقدار بارپذیری حاصل از برداشت با آرایه مستطیلی در محدوده مورد مطالعه ۹۲
- شکل ۴-۱۵: شبه‌مقاطع و مقطع دوعبدهی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD 00-NS ۹۵

- شکل ۴-۱۶: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی IP حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD 00-NS. ۹۵
- شکل ۴-۱۷: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به‌همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 00-NS حاصل از نرم‌افزار RES2DINV. ۹۶
- شکل ۴-۱۸: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 00-NS حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D. ۹۸
- شکل ۴-۱۹: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به‌همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 75w-NS حاصل از نرم‌افزار RES2DINV. ۱۰۰
- شکل ۴-۲۰: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 75w-NS حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D. ۱۰۳
- شکل ۴-۲۱: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به‌همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 150w-NS حاصل از نرم‌افزار RES2DINV. ۱۰۵
- شکل ۴-۲۲: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 150w-NS حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D. ۱۰۷
- شکل ۴-۲۳: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به‌همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 50n-EW حاصل از نرم‌افزار RES2DINV. ۱۰۹
- شکل ۴-۲۴: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 50n-EW حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D. ۱۱۱
- شکل ۴-۲۵: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به‌همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 50s-EW حاصل از نرم‌افزار RES2DINV. ۱۱۳
- شکل ۴-۲۶: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در

۱۱۵ ZondRes2D حاصل از نرم افزار DD 50s-EW طول پروفیل

شکل ۴-۲۷: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و ب) مدل IP

۱۱۷ RES2DINV حاصل از نرم افزار DD 150s-EW طول پروفیل در

شکل ۴-۲۸: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در

۱۲۰ ZondRes2D حاصل از نرم افزار DD 150s-EW طول پروفیل

شکل ۴-۲۹: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه برای پروفیل‌های

۱۲۲ شمالی - جنوبی

شکل ۴-۳۰: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شمالی -

۱۲۳ جنوبی

شکل ۴-۳۱: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه برای پروفیل‌های شمالی - جنوبی با

۱۲۵ Voxler نرم افزار

شکل ۴-۳۲: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شمالی - جنوبی با نرم افزار

۱۲۵ Voxler

شکل ۴-۳۳: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه برای پروفیل‌های شمالی - جنوبی با

۱۲۶ RockWorks برای مقادیر مقاومت ویژه بیش از ۶۰۰ اهم متر

شکل ۴-۳۴: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شمالی - جنوبی با نرم افزار

۱۲۶ RockWorks برای مقادیر بارپذیری بیش از ۱۰ میلی ثانیه

شکل ۴-۳۵: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه برای پروفیل‌های

۱۲۸ شرقی - غربی

شکل ۴-۳۶: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شرقی -

- ۱۲۹ غربی
- شکل ۴-۳۷: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل‌های شرقی- غربی با
- ۱۳۰ Voxler نرم‌افزار
- شکل ۴-۳۸: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شرقی- غربی با نرم‌افزار
- ۱۳۰ Voxler
- شکل ۴-۳۹: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل‌های شرقی- غربی با
- ۱۳۱ RockWorks نرم‌افزار برای مقادیر مقاومت‌ویژه بیش از ۲۵۰ اهم‌متر
- شکل ۴-۴۰: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شرقی- غربی با نرم‌افزار
- ۱۳۱ RockWorks برای مقادیر بارپذیری بیش از ۱۵ میلی‌ثانیه
- شکل ۴-۴۱: نمایش سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه همراه با توپوگرافی
- ۱۳۴ شکل ۴-۴۲: نمایش سه‌بعدی داده‌های بارپذیری همراه با توپوگرافی
- شکل ۴-۴۳: نمایش سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه برای مقادیر بیش از ۵۰۰ اهم‌متر
- ۱۳۵ شکل ۴-۴۴: نمایش سه‌بعدی داده‌های بارپذیری برای مقادیر بیش از ۱۰ میلی‌ثانیه
- شکل ۵-۱: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل DD 00-NS
- ۱۴۳ همراه با موقعیت گمانه‌های پیشنهادی
- شکل ۵-۲: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل DD 75w-NS
- ۱۴۳ همراه با موقعیت گمانه پیشنهادی
- شکل ۵-۳: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل DD 150w-NS
- ۱۴۳ همراه با موقعیت گمانه‌های پیشنهادی
- شکل ۵-۴: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل DD 50n-EW

همراه با موقعیت گمانه‌های پیشنهادی ۱۴۴

شکل ۵-۵: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل DD 50s-EW

همراه با موقعیت گمانه‌های پیشنهادی ۱۴۴

شکل ۵-۶: مدل IP حاصل از مدل‌سازی وارون توسط نرم‌افزار RES2DINV برای پروفیل DD 150s-EW

همراه با موقعیت گمانه‌های پیشنهادی ۱۴۴

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۸	جدول ۱-۲: مقاومت ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد معدنی متداول
۳۲	جدول ۲-۲: مقادیر بارپذیری برای برخی کانی‌های رسانا
۳۷	جدول ۳-۲: ارزیابی آرایه‌های الکترودی متداول با توجه به مهم‌ترین عوامل مؤثر
۱۴۵	جدول ۱-۵: مشخصات نقاط پیشنهادی برای حفاری‌های اکتشافی

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

گسترش فعالیت‌های اقتصادی در جوامع مختلف و پیشرفت روزافزون در زمینه‌های صنعتی، نیاز رو به افزایش صنایع به مواد اولیه مورد نیاز برای تولیدات را به همراه دارد. بر شخصی پوشیده نیست که ساختار تمدن بشری بر پایه وجود فلزات مهمی از قبیل آهن، مس، سرب، روی و غیره بنا شده و همچنین خوراک اصلی کارخانه‌های عظیم ذوب فلزات را مواد خام اولیه معدنی تشکیل می‌دهند؛ که عمدتاً همگی آن‌ها را باید از دل زمین بیرون آورد. بدیهی است که منابع سطحی این مواد تاکنون با استفاده از روش‌های ساده، کشف و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند و حتی برخی از آن‌ها به اتمام رسیده است. لذا با توجه به نقش بسیار مهم مواد معدنی در تأمین نیازهای اولیه صنایع مختلف و نیز پنهان بودن اغلب ذخایر معدنی، انتخاب و به‌کارگیری روش‌های اکتشافی مناسب و کم‌خطا برای اکتشاف و دستیابی به این ذخایر اهمیت بالایی دارد.

روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی هستند؛ که از اوایل قرن بیستم در زمینه اکتشافات معدنی به کار گرفته شده‌اند و بدون نیاز به دسترسی مستقیم به زیر زمین، اطلاعاتی از جمله هدایت الکتریکی^۱، حساسیت مغناطیسی^۲، چگالی^۳ و غیره مربوط به زیر سطح را در اختیار می‌گذارند. این روش‌ها امروزه با پیشرفت علم و فناوری و ساخت ابزارآلات جدید، کاربرد گسترده‌تری برای مقاصد اکتشافی یافته‌اند؛ و در مقایسه با روش‌های اکتشافی مستقیم از جمله حفاری، کم‌هزینه‌تر، سریع‌تر و غیر مخرب می‌باشند [Selley et al., 2005]. روش‌های ژئوفیزیکی شامل روش‌های متعددی از جمله مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی، لرزه‌ای، الکتریکی و الکترومغناطیسی هستند؛ که هر کدام نیز دارای چندین روش جانبی‌اند.

^۱ Electrical conductivity

^۲ Magnetic susceptibility

^۳ Density

روش‌های قطبش‌القایی^۱ (IP) و مقاومت‌ویژه الکتریکی که از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی‌اند؛ در شاخه روش‌های الکتریکی قرار می‌گیرند و کاربرد وسیعی در اکتشافات معدنی دارند.

روش IP یک روش کارآمد در اکتشاف فلزات پایه و شناسایی مناطق کانی‌سازی سولفیدی پراکنده^۲ است و در اکتشاف زون‌های کانی‌سازی شده رگه‌ای^۳ و توده‌ای^۴ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که نتایج مطالعات ژئوفیزیکی ذخایر فلزی متعدد، حاکی از ارتباط اکثر بی‌هنجاری‌های IP و مقاومت‌ویژه با یکدیگر است؛ لذا در اکثر موارد هم‌زمان با اندازه‌گیری‌های IP، مقادیر مقاومت‌ویژه نیز با روش مقاومت‌سنجی اندازه‌گیری و ثبت می‌شود [Telford et al., 1990]. در روش مقاومت‌سنجی، به‌منظور تعیین خواص الکتریکی مواد زیرسطحی و بررسی وضعیت ساختارهای زمین‌شناسی منطقه، پس از تولید و ارسال یک جریان الکتریکی مصنوعی به داخل زمین، اختلاف‌پتانسیل ناشی از این عمل با استفاده از آرایه‌های الکترودی مختلف ثبت می‌شود. با به‌کارگیری این روش در کنار روش IP، می‌توان علاوه بر تعیین مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری سنگ‌ها، اطلاعاتی مربوط به هندسه، ابعاد و ویژگی‌های الکتریکی منابع بی‌هنجار زیرسطحی به‌دست آورد [Kearey et al., 2002; Dentith and Mudge, 2014].

نتایج حاصل از برداشت داده‌های IP و مقاومت‌ویژه به‌صورت یک‌سری مقادیر عددی است؛ که تحت عنوان داده‌های مشاهده‌ای بیان می‌شوند. با توجه به این مهم که نتایج خام در اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی قادر به ارائه اطلاعات کمی از جمله عمق واقعی، ابعاد و یا توزیع مقاومت‌ویژه حقیقی در زیر زمین نمی‌باشند؛ لذا به‌منظور دستیابی به اطلاعات کمی، یافتن رابطه‌ای بین خواص فیزیکی سیستم مورد مطالعه (زمین) و نتایج حاصل از برداشت و یا استنباط این خواص بر مبنای داده‌های مشاهده‌ای،

^۱ Induced polarization (IP)

^۲ Disseminated

^۳ Vein type

^۴ Massive

مدل‌سازی داده‌ها بسیار ضروری است [Dey and Morrison, 1979]. قابل ذکر است؛ که هرکدام از روش‌های ژئوفیزیکی، از جمله روش IP و مقاومت‌سنجی، نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود را دارند؛ لذا استفاده از دو یا چند روش در کنار یکدیگر و نیز ترکیب آن‌ها با اطلاعات دیگری همچون مطالعات زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی)، به‌منظور کاهش کمبودهای هرکدام از این روش‌ها، افزایش کارایی آن‌ها و تفسیر دقیق‌تر نتایج، می‌تواند احتمال کشف و امکان دستیابی به مناطق امیدبخش را افزایش دهد.

۱-۲ تاریخچه موضوع و مروری بر مطالعات انجام شده

ابداع روش مقاومت‌سنجی توسط کنراد شلومبرژه^۱، در سال ۱۹۱۲ میلادی و طی انجام آزمایش‌های صحرایی صورت گرفت. استفاده از این روش در سال‌های ۱۹۲۳ و ۱۹۲۶، به‌ترتیب منجر به اکتشاف گاز در کشور رومانی و کشف گنبد‌های نمکی در فرانسه شد [مهدوی، ۱۳۸۳]. این روش کاربرد وسیعی در اکتشاف مواد معدنی و مطالعه منابع آب‌های زیرزمینی دارد [Reynolds, 2011].

پدیده IP نیز توسط شلومبرژه در سال ۱۹۱۳ کشف شد؛ اما استفاده عملی از این روش در مطالعات اکتشافی به اواخر سال ۱۹۴۰ باز می‌گردد. این روش برای اولین بار به‌همراه روش مقاومت‌سنجی در سال ۱۹۴۸ در اکتشاف ذخیره مس پورفیری سان مانوئل^۲ در آمریکا به‌کار گرفته شد. همچنین در سال ۱۹۶۵ استفاده از آن در منطقه پایین پوینت^۳ در کانادا منجر به شناسایی یک ذخیره سرب و روی شد [Seigel et al., 2007].

^۱ Conrad Schlumberger

^۲ San Manuel

^۳ Pine Point

کانسار سرب، روی و نقره سنچری^۱ واقع در شمال غرب کوئینزلند، در سال ۱۹۹۰ توسط توماس^۲ و همکاران، پس از چندین سال مطالعات میدانی و استفاده از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی کشف شد. در این محدوده پس از به‌کارگیری و عدم موفقیت روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در تعیین مناطق کانی‌سازی شده، از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه استفاده شد. در نتیجه، کانی‌سازی‌ها تا عمق حدود ۱۵۰ متری شناسایی شدند و حفاری‌های صورت گرفته صحت نتایج را تأیید کرد [Thomas et al., 1992].

بست^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۵، به‌منظور بررسی توانایی روش‌های IP و مقاومت‌ویژه در تشخیص کانی‌سازی‌های فلزی سولفیدی از جمله مس، سرب، روی، نقره و طلا، برداشت داده‌ها را با سه آرایه الکترودی دوقطبی- دوقطبی^۴، قطبی- دوقطبی^۵ و شلومبرژه معکوس^۶ در محل ۹ ذخیره معدنی اکتشاف شده در کانادا انجام دادند. در حالت کلی، موفقیت روش‌های IP و مقاومت‌ویژه در اکتشاف کانی‌سازی‌های مذکور به اثبات رسید؛ هرچند که دو آرایه دوقطبی- دوقطبی و شلومبرژه معکوس نتایج قابل‌اعتمادتری از خود نشان دادند [Best et al., 2015].

در سال ۲۰۱۶، اورارد^۷ و همکاران از روش‌های ژئوفیزیکی گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، IP و مقاومت‌ویژه به‌منظور اکتشافات عمقی رگه‌های سرب و روی در کانسار لانتزن^۸ در بلژیک استفاده کردند. بر مبنای این مطالعه، اطلاعات ارزشمندی از عمق و اندازه رگه‌ها با استفاده از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه به‌دست آمد؛ اما دو روش دیگر اطلاعات مفیدی را در اختیار نگذاشتند [Evrard et al., 2016].

^۱ Century

^۲ Thomas

^۳ Best

^۴ Dipole- dipole array

^۵ Pole- dipole array

^۶ Inverse Schlumberger array

^۷ Evrard

^۸ Lontzen

روش IP در ایران از اواخر سال‌های ۱۳۴۰ شمسی توسط شرکت‌های خارجی مانند CGG^۱ فرانسه در زمینه اکتشاف کانی‌های سولفیدی به کار گرفته شد [نوروزی، ۱۳۹۲]؛ در سال‌های بعد تا به امروز، متخصصان ژئوفیزیک ایرانی از این روش در مطالعات اکتشافی به‌ویژه مطالعات معدنی استفاده می‌کنند.

نوروزی و غلامی در سال ۱۳۸۲، به مطالعه اندیس معدنی مس سوناجیل در استان آذربایجان شرقی پرداختند. در این مطالعه از روش مغناطیس‌سنجی به‌منظور شناسایی پدیده‌های ساختمانی و بررسی ارتباط منشأ کانی‌سازی با توده‌های نفوذی، و از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه جهت شناسایی نواحی بی‌هنجار سطحی و بررسی عمقی آن‌ها استفاده شد. نتیجه مطالعات بیانگر وجود تطابقی خوب بین خطواره‌های گسلی شناسایی شده در روش مغناطیس‌سنجی با نتایج روش مقاومت‌ویژه می‌باشد؛ اما رابطه مشخصی بین کانی‌سازی و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی شناسایی نشد. در نهایت نقاطی منطبق بر نواحی با بارپذیری^۲ بالا و مقاومت‌ویژه کم، جهت حفاری پیشنهاد گردید [نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴].

مرادزاده و همکاران در سال ۱۳۸۶، به‌منظور اکتشاف کانسار سرب و روی تاش در شاهرود از روش‌های IP و مقاومت‌ویژه الکتریکی استفاده کردند. در این پژوهش پس از برداشت داده‌ها با آرایه دوقطبی-دوقطبی و مدل‌سازی وارون^۳ داده‌ها به‌صورت هموار و پارامتری، مناطقی با بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه پایین به‌عنوان مناطق احتمالی کانی‌سازی معرفی شدند [مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۶].

در سال ۱۳۹۱، حاجی‌میرزاجان و همکاران با ترکیب مطالعات زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و مطالعات ژئوفیزیکی به‌روش‌های IP، مقاومت‌سنجی و مغناطیس‌سنجی، به مطالعه یک سیستم پلی‌متال مس، قلع، سرب، روی و طلای رگه‌ای در منطقه رودگز در جنوب شرق گناباد پرداختند. نتیجه حاصل از

^۱ Compagnie Générale de Géophysique

^۲ Chargeability

^۳ Inversion

مطالعات ژئوفیزیکی، یک منطقه بی‌هنجار با بیشترین بارپذیری و کمترین بی‌هنجاری مغناطیسی را در مرکز محدوده مشخص کرد؛ که منطبق بر محل ناهنجاری ژئوشیمی در منطقه می‌باشد. دو گمانه‌ی حفرشده، تمرکز رگه‌های حاوی کانی‌سازی را در این محل تأیید کرد [حاجی‌میرزاجان و همکاران، ۱۳۹۲].

منطقه مورد مطالعه در بخش میانی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین قرار دارد. وجود آثار متعدد معدنکاری مس، سرب و روی در گستره این ورقه، بیانگر اهمیت معدنکاری در این ناحیه از دیرباز می‌باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط محققان و فعالیت‌های اکتشافی اخیر، رخداد‌های گوناگونی از کانه‌زایی فلزات پایه از جمله سرب، روی، مس و طلا در ناحیه گزارش شده است؛ که می‌توان به کانی‌سازی‌های رگه‌ای مس، سرب و روی در شمال‌غرب زنجان [خاکزاد و حاج‌علیلو، ۱۳۷۸]، کانی‌سازی رگه‌ای مس-طلای گلوچه [مهرابی و همکاران، ۱۳۸۹]، کانسار سرب و روی (مس) باریک آب [بازرگانی گیلانی و پرچکانی، ۱۳۸۹] و کانه‌زایی مس آق‌کند [فیضی و همکاران، ۱۳۹۵] اشاره کرد.

مطالعات اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین، از مهم‌ترین فعالیت‌های اکتشافی انجام شده مرتبط با منطقه مورد مطالعه می‌باشد؛ که ناهنجاری ژئوشیمیایی با درجه B را برای عناصری همچون آرسنیک (As) و آنتیموان (Sb) نشان می‌دهد و وجود کانی‌های سنگین از جمله گالن، طلا، باریت و غیره در منطقه به اثبات رسیده است [شرکت توسعه علوم زمین، ۱۳۸۲]. همچنین در مرحله اکتشاف عمومی، نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی محدوده در مقیاس ۱:۵۰۰۰ توسط آقازاده و براتی در سال ۱۳۹۵ تهیه شده است؛ که در طی این عملیات آثاری از معدنکاری قدیمی و کانی‌سازی‌هایی از سرب و روی و مس مشاهده شده است [آقازاده و براتی، ۱۳۹۵].

۱-۳ ضرورت و هدف از انجام تحقیق

هم‌زمان با پیشرفت‌های صنعتی کشورها و افزایش بازار تقاضا برای فلزات پایه، به‌کارگیری روش‌های کارآمد جهت اکتشاف این فلزات ضروری است. در چند دهه اخیر به‌طور گسترده از روش‌های ژئوفیزیکی، به‌ویژه روش‌های الکتریکی از جمله IP و مقاومت‌سنجی در اکتشاف فلزات پایه از قبیل سرب و روی استفاده شده است. از آنجا که مطالعات اولیه زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی به‌تنهایی قادر به اکتشاف نهایی مقاصد مورد نظر نمی‌باشند؛ لذا انجام مطالعات ژئوفیزیکی در کنار دیگر مطالعات، سعی در کاهش ریسک عملیات اکتشاف و مدیریت زمان و هزینه‌های آن دارد. با توجه به دلالت مطالعات اولیه زمین‌شناسی مبنی بر وجود کانی‌سازی فلزی و سولفیدی در منطقه و اهمیت محدوده چومالو از دید اکتشاف ذخایر فلزی، و همچنین توانایی روش‌های IP و مقاومت‌ویژه در مطالعات اکتشافی مرتبط با این‌گونه ذخایر، استفاده از این روش‌ها همراه با مطالعات زمین‌شناسی از اهمیت بالایی برخوردار است.

این پژوهش برآن است تا ضمن برداشت و تجزیه و تحلیل داده‌های خام صحرائی با استفاده از مدل‌سازی وارون هموار داده‌های IP و مقاومت‌ویژه، نتایج مطالعات ژئوفیزیکی را با توجه به نتایج مطالعات زمین‌شناسی منطقه (سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی) تفسیر نموده و در نهایت با مقایسه و ترکیب نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی، محدوده‌های بی‌هنجار، عمق و ضخامت توده‌های معدنی محتمل و همچنین وضعیت پیوستگی توده‌ها تعیین، و محل‌های مناسب برای حفاری اکتشافی پیشنهاد گردند.

۱-۴ روش تحقیق

پژوهش پیش رو بر مبنای مطالعات صحرائی و آزمایشگاهی استوار است. بر این اساس پس از انجام پیمایش صحرائی و کنترل واحدهای سنگی موجود در منطقه معدنی چومالو بر مبنای نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی ۱:۵۰۰۰ تهیه شده از محدوده، نمونه‌برداری از نهشته‌های آتشفشانی، توده نفوذی، پهنه‌های

دگرسان و کانی‌سازی‌های سطحی و زیرسطحی انجام شد و به‌منظور انجام مطالعات زمین‌شناسی شامل سنگ‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و تعیین ژنز ماده معدنی، تعداد ۸ مقطع نازک و ۹ مقطع صیقلی از نمونه‌ها تهیه و مطالعه شد.

همچنین با توجه به مطالعات اولیه زمین‌شناسی و شواهد کانی‌سازی در منطقه، عملیات صحرایی برداشت داده‌های IP و مقاومت‌ویژه ابتدا در قالب ۴ شبکه با آرایه مستطیلی^۱ و به‌صورت عمود بر ساختارهای زمین‌شناسی، به‌منظور تعیین تغییرات جانبی و گسترش سطحی محدوده‌های بی‌هنجار، با طول خط جریان ۸۰۰ متر، فواصل الکترودی ۲۰ متر و فاصله خطوط برداشت ۵۰ متر صورت گرفت؛ سپس ۶ پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی بر روی محدوده‌های بی‌هنجار به‌منظور بررسی عمقی آن‌ها، با فواصل الکترودی ۲۰ متر و فاکتور عددی (n) ۱ تا ۸ برداشت شد؛ داده‌های مربوط به توپوگرافی نیز در امتداد هر پروفیل ثبت شده‌اند. در مجموع ۱۶۳۹ ایستگاه برای هر روش IP و مقاومت‌ویژه برداشت گردید؛ که از این تعداد ۵۵۳ ایستگاه با آرایه مستطیلی و ۱۰۸۶ ایستگاه با آرایه دوقطبی-دوقطبی اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری مقادیر IP و مقاومت‌ویژه توسط دستگاه فرستنده جریان مدل Tx III و دستگاه گیرنده مدل GRx8-32 ساخت شرکت کانادایی GDD انجام شد. این عملیات توسط شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید به‌همراهی نگارنده به‌عنوان کارشناس اکتشاف این شرکت، در پاییز ۱۳۹۵ صورت گرفته است.

در ادامه، پس از بررسی نتایج به‌کارگیری آرایه مستطیلی به‌منظور شناسایی نواحی امیدبخش، مدل‌سازی داده‌های IP و مقاومت‌ویژه برداشت‌شده با آرایه دوقطبی-دوقطبی به‌روش وارون‌سازی هموار دوبعدی با استفاده از دو نرم‌افزار RES2DINV و ZondRes2D انجام می‌شود و تفسیر مربوط به هر پروفیل بر اساس نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است؛ که مقایسه و

^۱ Rectangle array

اعتبارسنجی نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی، بر اساس نتایج مطالعات زمین‌شناسی و اطلاعات به‌دست آمده از ترانسه‌ها، شواهد معدنکاری و رخنمون‌های سطحی مشاهده‌شده طی پیمایش‌های صحرایی صورت گرفته است. همچنین مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP و مقاومت‌ویژه به‌منظور دست‌یابی به منظر بهتری از نواحی بی‌هنجار زیرسطحی، برای هر دسته از پروفیل‌های موازی (۳ پروفیل شمالی- جنوبی و ۳ پروفیل شرقی- غربی) با استفاده از نرم‌افزار RES3DINV به‌روش وارون‌سازی هموار انجام می‌گیرد و نتایج مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Voxler و RockWorks در فضای سه‌بعدی نمایش داده می‌شوند. به‌علاوه برای نمایش بهتر نتایج مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی، در یک مرحله تمام مقاطع دوبعدی و در مرحله‌ی دیگر تمامی نتایج مدل‌سازی‌های سه‌بعدی برای پروفیل‌های موازی، با استفاده از نرم‌افزار RockWorks تلفیق می‌شوند و چند مدل سه‌بعدی از نتایج مدل‌سازی‌ها به‌دست می‌آید؛ سپس مدل‌هایی که تطابق بیشتری با دیگر نتایج دارند، ارائه می‌شوند. در نهایت با مقایسه و ترکیب نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی، محدوده‌های احتمالی کانی‌سازی سرب و روی مشخص می‌گردند و محل‌های مناسب برای حفاری پیشنهاد خواهند شد.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

پژوهش حاضر شامل پنج فصل می‌باشد؛ که فصل جاری به بیان مقدمه، تاریخچه موضوع و مروری بر مطالعات انجام شده، ضرورت و هدف از انجام تحقیق و همچنین روش تحقیق می‌پردازد. در فصل دوم، به بررسی روش‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و IP، اصول کلی این روش‌ها و مزایا و معایب هر یک و همچنین مبحث آرایه‌های الکترودی مورد استفاده در برداشت‌های صحرایی و آرایه‌های استفاده‌شده در انجام این پژوهش پرداخته شد. فصل سوم، به شرح زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، بررسی نتایج مطالعات زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی) و تعیین مدل کانی‌سازی اختصاص یافت. فصل چهارم شامل سه بخش مختلف است؛ بخش اول به شرح چگونگی انجام عملیات صحرایی

برداشت داده‌ها با دو آرایه مستطیلی و دوقطبی - دوقطبی، و تجهیزات و وسایل مورد استفاده در عملیات صحرائی پرداخته است. بخش دوم به مبحث مدل‌سازی و پردازش داده‌های برداشت‌شده با نرم‌افزارهای به‌کار رفته اختصاص دارد. بخش سوم نیز به ارائه نتایج برداشت داده‌ها با آرایه مستطیلی و به‌دنبال آن ارائه نتایج مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های برداشت‌شده، نمایش سه‌بعدی نتایج مدل‌سازی‌ها و تفسیر هرکدام از این مدل‌ها بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی می‌پردازد. در نهایت در فصل پنجم، نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در این پژوهش و پیشنهادهای لازم برای مطالعات بعدی ارائه شد.

فصل دوم: مبانی روش های مقاومت ویژه

الکتريکی و قطبش القایي (IP)

۲-۱ روش مقاومت ویژه الکتریکی

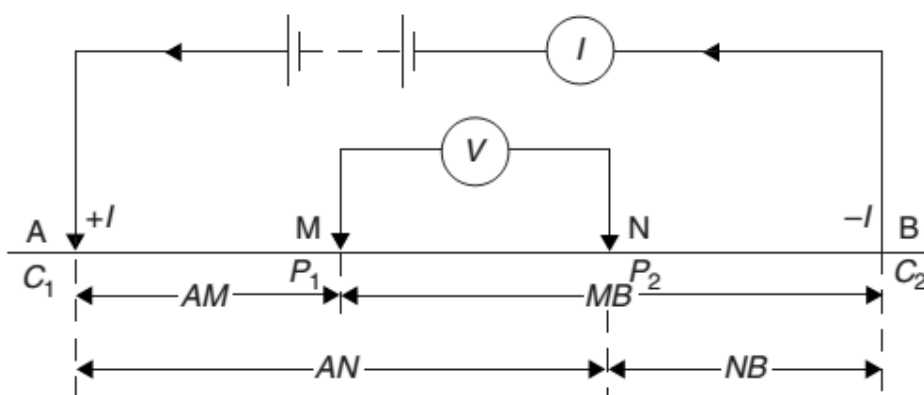
۲-۱-۱ مقدمه

روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ ابداع شدند؛ اما از دهه ۱۹۷۰ به بعد، به علت استفاده از پردازش‌های رایانه‌ای در تجزیه و تحلیل داده‌های آن، کاربرد گسترده‌تری یافتند. این روش‌ها علاوه بر اکتشاف معدن و مطالعه آب‌های زیرزمینی، در مطالعات مهندسی، مطالعات زیست‌محیطی و همچنین در کاوش‌های باستان‌شناسی جایگاه ویژه‌ای دارند. در روش مقاومت ویژه الکتریکی، از یک چشمه جریان مصنوعی برای اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود. بر این اساس، پس از ارسال یک جریان الکتریکی مصنوعی به داخل زمین، اختلاف پتانسیل ناشی از این عمل در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود؛ و انحراف از الگوی اختلاف پتانسیل مورد انتظار برای یک زمین همگن^۱، اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیرسطحی ارائه می‌دهد. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از روابط ریاضی، به مقاومت ویژه الکتریکی زمین تبدیل می‌شوند؛ و در نهایت اطلاعات به دست آمده مورد تعبیر و تفسیر قرار می‌گیرند [Kearey et al., 2002; Reynolds, 2011].

۲-۱-۲ اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی

در این روش از یک چشمه الکتریکی مصنوعی برای ارسال جریان به داخل زمین و اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه استفاده می‌شود. برای انجام این کار، یک جریان مستقیم (DC) و یا یک جریان متناوب (AC) با فرکانس پایین (معمولاً کمتر از ۱ هرتز) توسط دو الکتروود جریان A و B به زمین منتقل می‌شود؛ و سپس اختلاف پتانسیل ناشی از آن در سطح زمین توسط دو الکتروود پتانسیل M و N اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱-۲) [Knödel et al., 2007; Kirsch, 2009].

^۱ Homogeneous



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

اگر این اندازه‌گیری در یک محیط همگن و همسان‌گرد^۱ انجام شود، مقاومت‌ویژه الکتریکی به‌دست آمده، مقاومت‌ویژه واقعی (ρ_t) خواهد بود؛ اما اگر زمین ناهمگن باشد، مقاومت‌ویژه محاسبه‌شده را مقاومت‌ویژه ظاهری^۲ می‌نامند؛ که با (ρ_a) نشان داده می‌شود [Reynolds, 2011]. برداشت‌های صحرائی با هدف اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی زمین، عمدتاً بر روی زمین‌های ناهمگن که مقاومت‌ویژه الکتریکی آن‌ها در سه جهت محورهای مختصات تغییر می‌کند، انجام می‌شوند. در این برداشت‌ها بعد از تزریق یک جریان ثابت به داخل زمین و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل ایجاد شده در سطح زمین، می‌توان اندازه مقاومت‌ویژه ظاهری زمین را با استفاده از رابطه (۱-۲) محاسبه نمود [Loke, 2004]:

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

در این رابطه ρ_a مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری زمین (بر حسب اهم‌تر)، I شدت جریان الکتریکی (بر حسب آمپر) و ΔV اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری‌شده (بر حسب ولت) در سطح می‌باشد. همچنین به K

^۱ Isotrope

^۲ Apparent resistivity

ضریب هندسی^۱ (بر حسب متر) گویند؛ که بر اساس فاصله الکترودی و موقعیت الکترودها برای آرایه مورد استفاده شامل الکترودهای جریان A و B و الکترودهای پتانسیل M و N، با استفاده از رابطه (۲-۲) محاسبه می‌شود [Krisch, 2009]:

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

در این رابطه AM فاصله بین الکترودهای جریان A و الکترودهای پتانسیل M است. به همین ترتیب BM، AN و BN فواصل بین الکترودهای جریان و پتانسیل ذکر شده هستند. ضریب هندسی به نحوه قرارگیری الکترودها در هر آرایه بستگی دارد. همچنین مقدار مقاومت‌یژه اندازه‌گیری‌شده به فاصله الکترودی و وضعیت هندسی الکترودها وابسته است [Mooney, 1980].

دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه در برداشت‌های صحرائی، معمولاً مقدار مقاومت زمین (R) را اندازه‌گیری می‌کنند؛ که رابطه بین مقاومت‌ویژه الکتريکی ظاهری و مقاومت اندازه‌گیری‌شده توسط دستگاه طبق رابطه (۳-۲) تعریف می‌شود [Loke, 2004]:

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

۳-۱-۲ مقاومت‌ویژه مواد تشکیل‌دهنده زمین و عوامل مؤثر بر تغییر آن

از آنجا که جنس مواد تشکیل‌دهنده زمین در مناطق مختلف متغیر است، مقاومت‌ویژه الکتريکی لایه‌ها نیز با تغییراتی همراه خواهد بود. این خاصیت فیزیکی تابعی از چند ویژگی زمین می‌باشد؛ که شامل: (۱) ماهیت اجزا جامد (توزیع اندازه ذرات تشکیل‌دهنده و کانی‌شناسی)، (۲) نحوه قرارگیری فضاهای

^۱ Geometric factor

خالی (تخلخل، توزیع اندازه منافذ و ارتباط منافذ)، ۳) درجه اشباع‌شدگی آب (حجم آب)، ۴) مقاومت‌ویژه الکتریکی سیال (غلظت املاح) و ۵) دما است. این پارامترها با تغییر مقدار و از راه‌های مختلف باعث تغییر مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌شوند [Samouëlian et al., 2005].

فرآیندهای زمین‌شناسی و تکتونیکی از عوامل تأثیرگذار بر روی مقاومت‌ویژه می‌باشند. انحلال، گسلش، برش و هوازدگی معمولاً باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری سیالات می‌شود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت‌ویژه می‌گردد. رسوب کربنات کلسیم و سیلیس باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری سیالات می‌شود؛ بنابراین مقاومت‌ویژه افزایش می‌یابد. سخت‌شدگی سنگ‌ها در اثر تراکم و یا دگرگونی، باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود؛ که مقاومت‌ویژه را افزایش می‌دهد. همچنین نفوذ آب‌های شور باعث حضور بیشتر یون‌های هدایت‌کننده جریان شده و مقاومت‌ویژه را کاهش می‌دهد [Ward, 1990].

سن زمین‌شناسی سنگ‌ها نیز می‌تواند بر مقاومت‌ویژه آن‌ها تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال، برای یک سنگ آتشفشانی با سن کواترنر، ممکن است که دامنه تغییرات مقاومت‌ویژه از ۱۰ تا ۲۰۰ اهم‌متر باشد، در صورتی که احتمالاً معادل همین سنگ اما با سن پرکامبرین، دامنه وسیع‌تری از مقاومت‌ویژه را در بر می‌گیرد. علت این امر پرشدگی ثانویه خلل و فرج سنگ قدیمی‌تر و کاهش تخلخل و نفوذپذیری آن است [Reynolds, 2011].

در یک طبقه‌بندی کلی، می‌توان مواد را از نظر مقاومت‌ویژه به سه دسته تقسیم‌بندی کرد [Mooney, 1980]:

- مقاومت‌ویژه پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر)
- مقاومت‌ویژه متوسط (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم‌متر)
- مقاومت‌ویژه بالا (بیش از ۱۰۰۰ اهم‌متر)

در جدول (۱-۲) مقادیر مقاومت ویژه مربوط به برخی سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد مختلف زیر سطح زمین آمده است. با توجه به اطلاعات ارائه شده در این جدول، هم‌پوشانی قابل توجهی در مقادیر مقاومت ویژه مواد مختلف وجود دارد؛ که این امر باعث ابهاماتی در تفسیر مقاومت ویژه می‌شود. بنابراین به منظور شناسایی مقادیر مقاومت ویژه ساختارهای زمین‌شناسی مختلف و تفسیر دقیق‌تر نتایج، آگاهی از مقادیر مقاومت ویژه مربوط به مواد مختلف زیرسطحی و آشنایی با وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، کمک شایانی در رفع این ابهامات می‌نماید [Loke, 2004; Reynolds, 2011].

جدول ۱-۲: مقاومت ویژه بعضی از سنگ‌ها، کانی‌ها و مواد معدنی متداول [After Reynolds, 2011; After Loke, 2004].

مقاومت ویژه $[\Omega m]$	ماده مورد نظر	مقاومت ویژه $[\Omega m]$	ماده مورد نظر
$80 - 5 \times 10^3$	سنگ آهک	$10 - 5 \times 10^3$	ماسه سنگ
$10 - 100$	آب زیرزمینی	$500 - 5 \times 10^3$	دولومیت
0.2	آب دریا	$20 - 2 \times 10^3$	شیل
$1 - 100$	رس	$300 - 1/3 \times 10^6$	گرانیت
$2/9 \times 10^{-5} - 1/5$	پیریت	$10^2 - 2 \times 10^8$	کوارتزیت
$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$	گالن	$10 - 1/3 \times 10^7$	بازالت

۲-۱-۴ روش‌های برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی به‌طور عمده به دو روش انجام می‌گیرد. روش اول، روش گمانه‌زنی الکتریکی یا سونداژزنی الکتریکی قائم^۱ (VES) است؛ که هدف از آن بررسی عمقی مقاومت ویژه

^۱ Vertical electric sounding (VES)

در زیر یک نقطه می‌باشد. در این روش با ثابت نگاه‌داشتن مرکز آرایه مورد استفاده، فاصله الکترودی در هر مرحله افزایش می‌یابد و در نتیجه عمق کاوش افزایش می‌یابد [Knödel et al., 2007; Mooney, 1980]. در تفسیر این داده‌ها، فرض بر افقی بودن لایه‌های زیرسطحی و عدم وجود تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه می‌باشد؛ که عدم وجود این فرض در طبیعت باعث ایجاد خطا در تفسیر نتایج می‌شود [Loke, 2004].

روش دیگر، روش پروفیل‌زنی الکتریکی یا ترانسه‌زنی الکتریکی^۱ می‌باشد؛ که برای تشخیص تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش با ثابت نگاه‌داشتن فاصله الکترودی (که در نتیجه عمق کاوش تقریباً ثابت می‌ماند)، کل آرایه (کابل‌ها و الکترودها) بر روی یک مسیر مستقیم (طول پروفیل) جابجا می‌شود و اطلاعاتی از تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه، متناسب با عمق کاوش به دست می‌آید. در این روش فرض می‌شود که مقاومت‌ویژه در راستای عمود بر خط برداشت، تغییر نمی‌کند. در بسیاری از موارد به‌ویژه برای برداشت بر روی ساختارهای زمین‌شناسی طولی، این فرض صحیح است [Milsom and Eriksen, 2011; Loke, 2004].

امروزه با توجه به توسعه تجهیزات برداشت و امکان استفاده از سیستم‌های چندکاناله به‌جای تک‌کاناله و همچنین امکان پردازش‌های دوبعدی و سه‌بعدی داده‌ها با استفاده از روش‌های عددی مدل‌سازی معکوس، روش پروفیل‌زنی الکتریکی جایگزین روش گمانه‌زنی قائم الکتریکی شده است. این اقدام بیشتر به دلیل افزایش سرعت در عملیات برداشت صحرایی و پوشش یکنواخت نقاط داده در مقطع برداشت‌شده می‌باشد [رجائی و داودی‌راد، ۱۳۸۹].

لازم به ذکر است که برای انجام اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه در صحرا، آرایه‌های الکترودی متعددی وجود دارد و هرکدام از آن‌ها مزایا، معایب و حساسیت مخصوص به خود را دارند. توضیحات مربوط به این

^۱ Electrical profiling

آرایه‌ها و همچنین آرایه‌های مورد استفاده در عملیات صحرایی مربوط به این پژوهش، در انتهای این فصل و همراه با توضیحات مربوط به برداشت داده‌های IP ارائه شده است.

۲-۱-۵ کاربردهای روش مقاومت ویژه الکتریکی

روش مقاومت ویژه الکتریکی از جمله کارآمدترین روش‌های ژئوفیزیکی است؛ از جمله کاربردهای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [Mooney, 1980; Knödel et al., 2007]:

- ۱- اکتشاف مواد معدنی (سولفیدها، اکسیدها و به‌طور کلی کانی‌های با خاصیت فلزی)، تعیین ضخامت روباره هوازده، تعیین محل و ترسیم توزیع افقی نهشته‌ها
- ۲- آشکارسازی شکستگی‌ها و گسل‌ها (به‌ویژه شناسایی زون‌های خردشده و گسله مرتبط با کانی‌سازی‌های فلزی)
- ۳- مطالعه آب‌های زیرزمینی (تخمین عمق، ضخامت و خصوصیات سفره آب زیرزمینی، تعیین مرز آب شور و شیرین، شناسایی کانال‌های رودخانه‌ای مدفون)
- ۴- مطالعات مهندسی (تعیین ضخامت آبرفت و عمق سنگ بستر، شناسایی حفره‌های زیرسطحی، مطالعه ساختارهای زیرسطحی از نظر سنگ‌شناسی)
- ۵- مطالعات زیست‌محیطی (تعیین عمق و ضخامت باطله‌های مدفون، شناسایی آلودگی‌های زیرسطحی آب و خاک)
- ۶- مطالعات باستان‌شناسی (اکتشاف و ترسیم پی دیواره‌ها، شناسایی اجسام و اشیاء مدفون)
- ۷- مطالعات زمین‌گرمایی (به کمک ترسیم نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه، می‌توان مسیر خط گسلی که چشمه‌های آب گرم و آبفشان‌ها معمولاً در امتداد آن خارج می‌شوند، تشخیص داد)

۲-۱-۶ مزایا و محدودیت‌های روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

از مزایای روش مقاومت‌ویژه الکتریکی در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی و یا روش‌های اکتشافی مستقیم مانند حفاری، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [Mooney, 1980]:

- ۱- روش مقاومت‌ویژه، روشی نسبتاً سریع و آسان از نظر برداشت داده‌ها می‌باشد.
- ۲- هزینه نسبتاً پایین عملیات صحرایی (نسبت به روش‌های دیگر کم هزینه‌تر است).
- ۳- از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است (از این روش در هر زمان هم می‌توان برای پی‌جویی و هم برای اکتشاف اهداف زیرزمینی استفاده کرد).
- ۴- این روش در اکتشاف لایه‌های کم‌عمق و یا ناپیوستگی‌های قائم، که دارای تباین مقاومت‌ویژه قابل توجهی با محیط اطراف هستند، عملکرد خوبی دارد.

همچنین این روش نیز همانند روش‌های دیگر، دارای محدودیت‌ها و معایبی می‌باشد؛ که از جمله این

معایب می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [Mooney, 1980; Knödel et al., 2007]:

- ۱- دقت تخمین عمق، نسبت به روش‌های لرزه‌ای و روش‌های اکتشافی مستقیم کمتر است.
- ۲- به علت محدودیت‌های تزریق جریان الکتریکی به درون زمین و مشکلات عملیاتی مربوط به افزایش زیاد طول سیم‌ها، عمق نفوذ این روش محدود است.
- ۳- توپوگرافی و اثر تغییرات مقاومت‌ویژه مرتبط با ناهمگنی لایه‌های نزدیک به سطح، از جمله هوازدگی لایه‌ها و روباره‌های رسانا، موجب پراکندگی موضعی و تمرکز جریان در نزدیک سطح و در نتیجه پنهان ماندن اثر مقاومت‌ویژه لایه‌های عمیق‌تر می‌شود.
- ۴- پاسخ این روش اغلب به ساختارهای زمین‌شناسی ساده محدود می‌شود و در مناطقی که پیچیدگی ساختاری وجود دارد تفسیر داده‌ها با مشکل مواجه می‌شود.

- ۵- مدل‌های ژئوالکتریکی ممکن است معرف واقعیت زمین‌شناسی منطقه نباشند و چندین مدل زمین‌شناسی منطبق بر داده‌های برداشت‌شده وجود داشته باشد. به‌طور کلی تفسیر داده‌ها اغلب دارای ابهام است؛ در نتیجه اطلاعات زمین‌شناسی، داده‌های ژئوفیزیکی دیگر و داده‌های گمانه‌های اکتشافی (در صورت وجود)، به کاهش ابهامات موجود کمک شایانی می‌نمایند.
- ۶- در مناطق مسکونی و پرجمعیت، عوامل متعددی مثل فنس‌های فلزی کوبیده‌شده به زمین، کابل‌های زیرزمینی، خطوط انتقال برق، جریان حفاظت از خوردگی لوله‌ها، نشت‌های حاصل از تأسیسات صنعتی، ماشین‌ها و قطارها و به‌ویژه لوله‌های فلزی زیرزمینی می‌تواند داده‌های اندازه‌گیری‌شده را به نوفه^۱ آلوده کند.

^۱ Noise

۲-۲ روش قطبش القایی (IP)

۲-۲-۱ مقدمه

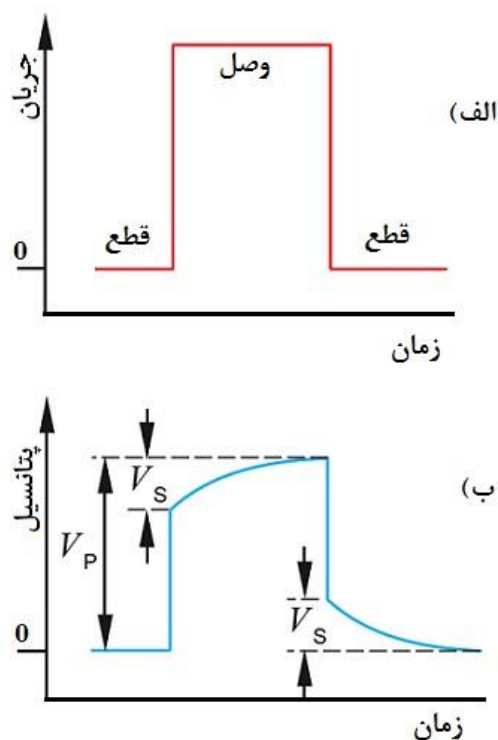
پدیده IP توسط شلومبرژه در سال ۱۹۱۳ کشف شد؛ اما استفاده عملی از این روش در مطالعات اکتشافی، به دلیل مسائل تکنیکی و دستگاهی، به اواخر سال ۱۹۴۰ باز می‌گردد [Seigel et al., 2007]. شلومبرژه در حین اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه متوجه شد که پس از قطع جریان، اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده توسط دو الکتروود پتانسیل فوراً صفر نمی‌شود؛ بلکه بعد از قطع جریان، ابتدا یک افت ناگهانی نشان می‌دهد، سپس به تدریج و در طی یک زمان معین به سمت صفر میل می‌کند. وی این اختلاف پتانسیل را قطبش تحریک شده^۱ نامید [کلاگری، ۱۳۸۹]. این روش کاربرد وسیعی در اکتشاف فلزات پایه دارد؛ و به صورت محدودتر در اکتشاف آب‌های زیرزمینی، مطالعات زمین‌گرایی و بررسی‌های زیست‌محیطی نیز استفاده می‌شود [Reynolds, 2011]. در برخی از مطالعات اکتشافی، روش IP در کنار روش مقاومت‌ویژه به کار می‌رود؛ تا اطلاعات جزئی‌تری از سنگ‌شناسی سنگ میزبان به دست آید. همچنین به طور معمول قدرت تفکیک مواد زیرسطحی با استفاده از این روش، نسبت به روش مقاومت‌ویژه بهتر است؛ زیرا بی‌هنجاری‌های IP در مقابل یک سطح زمین‌ه‌ی نسبتاً پایین اندازه‌گیری می‌شوند [Knödel et al., 2007; Sumner, 1972].

۲-۲-۲ اصول و منشأ IP

در روش IP، مشابه با روش مقاومت‌ویژه الکتریکی از یک آرایه الکتروودی استاندارد، شامل دو الکتروود جریان و دو الکتروود غیرپلاریزه پتانسیل استفاده می‌شود. در این روش، پس از قطع ناگهانی جریان ارسالی به درون زمین، معمولاً اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین الکتروودهای پتانسیل بلافاصله به صفر نمی‌رسد، بلکه

^۱ Provoked polarization

بعد از یک افت اولیه از حالت پایدار، به تدریج تخلیه می‌شود و به سمت صفر نزدیک می‌شود (شکل ۲-۲). علت این اتفاق ذخیره موقت بار توسط زمین و قطبش یافتن آن است. زمان این تخلیه معمولاً در حد چند ثانیه و حتی چند دقیقه می‌باشد. اگر جریان دوباره وصل شود، اختلاف پتانسیل بعد از یک افزایش اولیه، با گذشت یک بازه زمانی یکسان، به حداکثر مقدار خود می‌رسد [Telford et al., 1990].



شکل ۲-۲: دوره کامل اندازه‌گیری قطبش‌القایی در یک نقطه، الف) وصل و قطع جریان، ب) تغییرات پتانسیل در زمان اتصال جریان و پس از قطع آن [After Dentith and Mudge, 2014].

در شکل (۲-۲)، V_p پتانسیل ایجاد شده اولیه بین دو الکترود پتانسیل در زمان وصل کامل جریان و V_s پتانسیل ثانویه در زمان قطع جریان می‌باشد [Dentith and Mudge, 2014].

مطالعات انجام شده در ارتباط با پدیده IP نشان می‌دهد که در زمان شارش جریان به داخل زمین، مقداری انرژی در سنگ‌ها ذخیره می‌شود و پس از قطع جریان تخلیه می‌گردد. هرچند این انرژی از نظر

تئوری می‌تواند به شکل‌های مختلفی همچون مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی ذخیره شود؛ اما نتایج مطالعات آزمایشگاهی حاکی از آن است که این ذخیره انرژی در سنگ‌ها، اساساً توسط فرآیندهای الکتروشیمیایی انجام می‌شود [Kearey et al., 2009; Telford et al., 1990].

این انرژی ذخیره شده شیمیایی از دو عامل زیر ناشی می‌شود:

(۱) تغییر تحرک یون‌ها در سیالات موجود در سنگ

(۲) اختلاف بین هدایت یونی و الکترونی در صورت وجود کانی‌های فلزی

عامل اول تحت عنوان قطبش غشایی^۱ یا الکترولیتی شناخته می‌شود و معمولاً IP زمینه یا اثر IP نرمال نامیده می‌شود. این نوع قطبش در سنگ‌های فاقد کانی‌های فلزی رخ می‌دهد. عامل دوم به‌عنوان قطبش الکترودی^۲ یا ولتاژ اضافی^۳ شناخته می‌شود. معمولاً این قطبش بزرگ‌تر از قطبش زمینه بوده و به حضور کانی‌های فلزی در سنگ بستگی دارد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های قطبش القایی معمولی قادر به تفکیک اثرات ناشی از دو عامل مذکور نمی‌باشد [Telford et al., 1990]. در ادامه به توضیح این دو عامل پرداخته می‌شود:

الف) قطبش غشایی

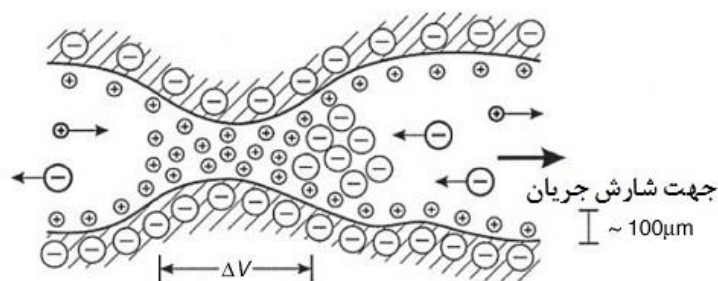
در صورت عدم وجود کانی‌های فلزی در سنگ، قطبش غشایی به‌عنوان عامل غالب در هدایت جریان و رسانندگی در سنگ می‌باشد. برای ایجاد این قطبش دو علت را می‌توان بیان کرد. علت اول تنگ شدن مقطع کانال‌های ارتباطی خلل و فرج سنگ، و علت دوم وجود کانی‌های رسی مانند ماسه سنگ‌های رسی

^۱ Membrane polarization

^۲ Electrode polarization

^۳ Overvoltage

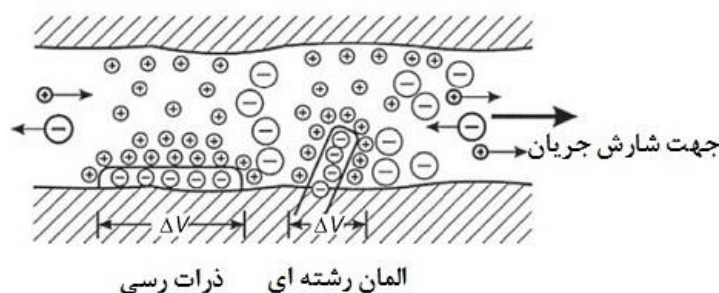
در داخل این کانال‌ها می‌باشد. در حالت اول، اکثر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها دارای بار منفی در سطح مشترک سنگ و الکترولیت داخل خلل و فرج می‌باشند. به این ترتیب بارهای مثبت الکترولیت به سمت سطح مشترک جذب شده و لایه بسیار نازکی از بار مثبت با ضخامت حدود ۱۰۰ میکرومتر تشکیل می‌شود. در این حالت بارهای منفی داخل الکترولیت از سطح فصل مشترک رانده می‌شوند. اگر قطر کانال ارتباطی در قسمتی از این کانال کم شود، در زمان اتصال جریان به زمین، این تنگ‌شدگی مانع شارش یون‌ها می‌شود. در این حالت یون‌های منفی، زون تنگ شده را ترک می‌کنند، ولی یون‌های مثبت در این زون افزایش می‌یابند و در نتیجه اختلاف پتانسیلی در طول این زون ایجاد می‌شود. سپس زمانی که جریان قطع شود، عدم تعادل ایجاد شده در تمرکز یون‌ها با برگشت به حالت عادی خود، پتانسیل IP را ایجاد می‌کند (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳: تنگ‌شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی و ایجاد قطبش غشایی [After Reynolds, 2011].

دومین علت ایجاد قطبش غشایی به حضور ذرات پراکنده رس یا کانی‌های رشته‌ای که موجب تمرکز بارهای منفی می‌شوند، مربوط است. در این حالت یون‌های مثبت به طرف بارهای منفی جذب می‌شوند و تمرکزی از ابر بارهای مثبت را در داخل خلل و فرج به وجود می‌آورند. در چنین حالتی اگر جریان الکتریکی به این سنگ متصل شود، بارهای منفی گیر می‌افتند و تنها بارهای مثبت می‌توانند جابجا شوند؛ که این امر باعث ایجاد اختلاف پتانسیل در این قسمت می‌شود. در نهایت با قطع جریان و بازگشت یون‌های مثبت

و منفی به حالت اولیه خود، پتانسیل IP ایجاد می‌شود (شکل ۲-۴) [Reynolds, 2011]. لازم به ذکر است؛ که شدت قطبش به‌طور ثابت با محتوای کانی‌های رسی افزایش نمی‌یابد؛ بلکه پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، مجدداً کاهش می‌یابد. علت این اتفاق، وجود گذرگاه‌های دیگر با سطح مقطع بزرگ‌تر و طول بسیار کوچک در ماده است؛ که در آن تجمع یون‌ها برای زمانی طولانی اتفاق نمی‌افتد. به‌عبارت‌دیگر، هم شارش جریان کل و هم قطبش کاهش می‌یابد. به‌علاوه اثر IP با درصد شوری الکترولیت موجود در خلل و فرج سنگ، افزایش می‌یابد [Telford et al., 1990].

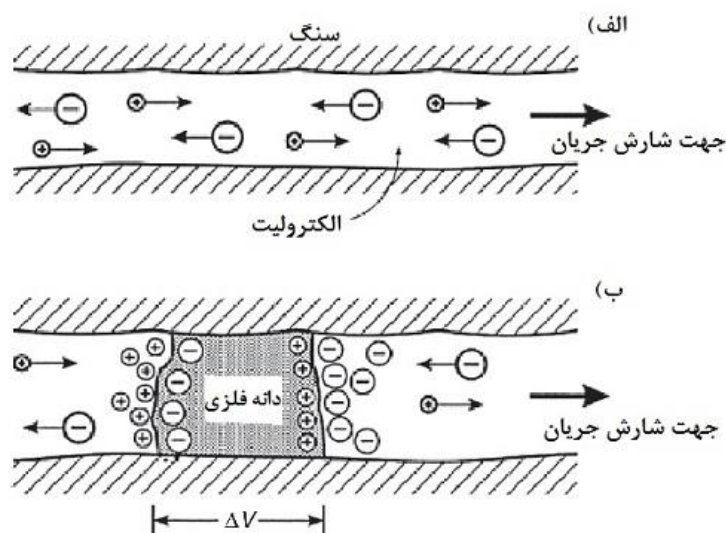


شکل ۲-۴: ایجاد قطبش غشایی به‌دلیل وجود بار منفی ذرات رسی و المان رشته‌ای موجود در دیواره کانال ارتباطی [After Reynolds, 2011].

ب) قطبش الکتروودی

قطبش الکتروودی در مواردی اتفاق می‌افتد، که کانی‌های فلزی در سنگ وجود داشته باشند. در این حالت بخشی از جریان به‌صورت الکترولیتی و بخشی به‌صورت الکترونی و از طریق کانی‌های رسانا منتقل می‌شود. در چنین شرایطی یک واکنش شیمیایی در فصل مشترک کانی و سیال رخ می‌دهد. شکل (۲-۵) دو حفره دارای خلل و فرج را در یک سنگ نشان می‌دهد. در حفره بالایی، شارش جریان به‌صورت الکترولیتی انجام می‌شود؛ اما در حفره پایینی، حضور یک کانی فلزی با بارهای سطحی با علامت مخالف در هر طرف، باعث تجمع یون‌های موجود در الکترولیت، در هر طرف کانی فلزی می‌شود. با توجه به این‌که سرعت شارش جریان در الکترولیت بسیار کندتر از کانی فلزی است، تجمع یون‌ها توسط ولتاژ خارجی

صورت می‌گیرد. سپس با قطع جریان، یون‌ها به حالت تعادل اولیه خود باز می‌گردند و باعث افت زودگذر ولتاژ می‌شوند. این اثر به‌عنوان قطبش الکترودی یا ولتاژ اضافی شناخته می‌شود [Telford et al., 1990].



شکل ۲-۵: قطبش الکترودی، (الف) شارش الکترولیتی، (ب) ایجاد قطبش الکترودی با حضور یک دانه فلزی در داخل خلل و فرج یک سنگ [After Reynolds, 2011].

تمام کانی‌هایی که قابلیت هدایت خوبی دارند (اغلب سولفیدهای فلزی، اکسیدها، گرافیت و غیره)، سهم بالایی در ایجاد این نوع IP ایفا می‌کنند. قابل ذکر است، بزرگی قطبش الکترودی به مقدار ولتاژ تزریقی، نوع ماده معدنی، درصد ماده معدنی، اندازه دانه‌ها، تخلخل، نوع الکترولیت و مقاومت سنگ‌های دربرگیرنده بستگی دارد. هرچه ماده معدنی هادی‌تر و درصد بالاتری داشته باشد، قطبش بزرگتر و هرچه کانی‌های موجود در متن سنگ میزبان پراکنده‌تر باشند، قطبش بالاتری را به‌همراه دارند. زیرا در این حالت سطح تماس برای تبادل الکترونی-یونی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این حالت، اهمیت بالای روش IP برای اکتشاف کانسارهای فلزی و به‌خصوص کانسارهای پراکنده را نشان می‌دهد. قطبش الکترودی با تخلخل رابطه عکس دارد؛ زیرا در این حالت مسیرهای بیشتری برای هدایت الکترولیتی ایجاد می‌شود و قطبش الکترودی کاهش می‌یابد [کلاگری، ۱۳۸۹].

۳-۲-۲ روش‌های اندازه‌گیری IP

در روش قطبش‌القایی همانند روش مقاومت‌ویژه، جریان به‌وسیله دو الکتروود جریان به درون زمین فرستاده می‌شود و سپس اثر قطبش‌القایی با الکتروودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها می‌تواند به یکی از روش‌های زیر انجام شود [Reynolds, 2011]:

- ۱- روش زمان-حوزه‌ای^۱: در این روش ولتاژ اضافی به‌عنوان تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود.
 - ۲- روش فرکانس-حوزه‌ای^۲: در این روش مقاومت‌ویژه ظاهری در دو فرکانس مختلف اندازه‌گیری می‌شود (به‌طور معمول از فرکانس‌های کمتر از ۱۰ هرتز استفاده می‌شود).
 - ۳- روش IP طیفی^۳(SIP): در این روش بزرگی مقاومت‌ویژه موهومی و فاز ولتاژ قطبش در محدوده وسیعی از فرکانس جریان ارسالی (معمولاً ۰/۳ تا ۴ کیلوهرتز) اندازه‌گیری می‌شود.
- در این مطالعه از روش IP در حوزه زمان، به‌منظور شناسایی کانی‌سازی‌های سرب و روی استفاده شده است؛ به همین دلیل در ادامه به توضیح بیشتر پیرامون این روش پرداخته می‌شود.

الف) اندازه‌گیری IP در حوزه زمان

هنگامی که جریان ارسال‌شده به زمین پس از مدت‌زمانی قطع شود، یک افت اولیه و ناگهانی ولتاژ شکل می‌گیرد (شکل ۲-۶-الف). اندازه کل ولتاژ مشاهده‌ای (V_0) در زمان وصل جریان برابر است با ولتاژ واقعی (V) ناشی از اعمال جریان به اضافه ولتاژ قطبش (V_p)، که در طی فرآیند قطبش ایجاد شده است. وقتی جریان اعمال‌شده قطع می‌شود، ولتاژ سریعاً به اندازه V افت می‌کند و یک ولتاژ اضافی (V_p) باقی

^۱ Time domain

^۲ Frequency domain

^۳ Spectral Induced Polarization

می‌ماند؛ که با گذشت زمان تخلیه می‌شود. اندازه‌گیری‌های IP در حوزه زمان، به صورت کمیت‌های مختلفی ارائه می‌شوند؛ که همه آن‌ها تغییرات ولتاژ را نسبت به زمان نشان می‌دهند.

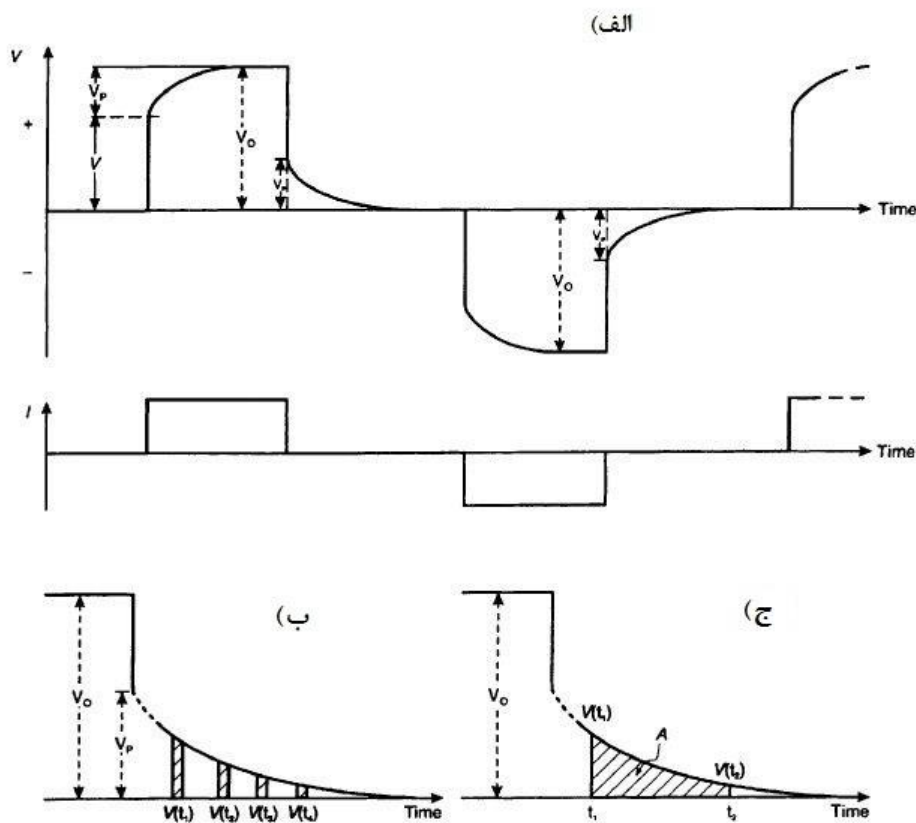
یکی از این کمیت‌ها اثر IP است؛ که به صورت نسبت ولتاژ قطبش (V_p) (در زمان قطع جریان) به ولتاژ مشاهده‌ای (V_0) (در زمان وصل جریان) تعریف می‌شود. این کمیت قطبش پذیری نامیده می‌شود و بر حسب میلی‌ولت بر ولت، یا درصد بیان می‌شود (رابطه ۴-۲).

$$M = V_p/V_0 \text{ (} mv/v \text{ or \%)} \quad (4-2)$$

با توجه به این که اندازه‌گیری V_p بلافاصله پس از قطع جریان بسیار مشکل است. بنابراین در یک زمان ثابت (به طور معمول ۰/۵ ثانیه) پس از قطع جریان، این اندازه‌گیری انجام می‌شود. اگر این اندازه‌گیری‌ها در دوره‌های زمانی بسیار کوتاه (حدود ۰/۱ ثانیه) در پنجره‌های زمانی مجزا (به طور معمول ۰/۵ ثانیه) صورت گیرند، منحنی تخلیه V_p را شکل می‌دهند؛ که انتگرال این مقادیر در ارتباط با زمان، نواحی زیر منحنی را نتیجه می‌دهد (شکل ۶-۲-ب و ج). در پایان با تقسیم انتگرال بر V_0 ، مقدار به دست آمده بارپذیری ظاهری (M_a) نامیده می‌شود؛ که واحد آن میلی‌ثانیه (msec) است (رابطه ۵-۲) [Reynolds, 2011].

$$M_a = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \frac{A}{V_0} \quad (5-2)$$

در این رابطه، A سطح زیر منحنی تخلیه در فاصله زمانی t_1 تا t_2 می‌باشد. مزیت بزرگ این انتگرال‌گیری و نرمال‌سازی از طریق تقسیم‌بندی V ، کاهش نوفه ناشی از جفت‌شدگی کابل‌ها و پتانسیل‌های زمینه است.



شکل ۲-۶: اندازه‌گیری IP در روش زمان-حوزه‌ای، الف) منحنی تغییرات پتانسیل در حالت شارژ و تخلیه و تغییرات جریان ارسالی به زمین، ب) کمیت قطبش پذیری (V_p) دقیقاً در زمان قطع جریان و اندازه‌گیری‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، ج) اندازه‌گیری بارپذیری ظاهری توسط ناحیه زیر منحنی [Reynolds, 2011].

اندازه‌گیری مقدار بارپذیری واقعی در هر نقطه به‌طور عملی امکان‌پذیر نیست؛ چون آنچه به‌عنوان پاسخ زمین اندازه‌گیری می‌شود، حاصل اثرگذاری بارپذیری واقعی و مقاومت ویژه واقعی تمام لایه‌ها و سنگ‌هایی است که بر اساس حیطة مورد بررسی دستگاه، اندازه‌گیری می‌شود [Reynolds, 2011]. لازم به ذکر است که در این پژوهش نیز، مقادیر بارپذیری ظاهری اندازه‌گیری شده است.

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

جدول ۲-۲: مقادیر بارپذیری برای برخی کانی‌های رسانا [After Telford et al., 1990].

کانی‌ها	بارپذیری [msec]	کانی‌ها	بارپذیری [msec]
پیریت	۱۳/۴	بورنیت	۶/۳
کالکوزیت	۱۳/۲	گالن	۳/۷
مس	۱۲/۳	مگنتیت	۲/۲
گرافیت	۱۱/۲	مالاکیت	۰/۲
کالکوپیریت	۹/۴	هماتیت	۰

۲-۲-۴ مزایا و محدودیت‌های روش IP

از جمله مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد

[Kearey et al., 2009; Telford et al., 1990]:

۱- روش IP به‌طور گسترده در اکتشافات فلزی، به‌ویژه اکتشاف کانی‌سازی‌های سولفیدی افشان به‌کار برده می‌شود. از آنجا که سولفیدهای افشان یا پراکنده در متن یک سنگ میزبان نارسانا در مجموع قابلیت رسانایی خوبی ندارند، و به‌خوبی با روش‌هایی همچون مقاومت‌ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس^۱ (EM) شناسایی نمی‌شوند؛ لذا روش IP روشی مناسب برای شناسایی این ذخایر به‌حساب می‌آید.

۲- در صورت رسانا بودن لایه‌های سطحی، آشکارسازی لایه‌های عمیق‌تر طی برداشت‌های مقاومت‌ویژه و EM دچار مشکل می‌شود. در این موارد روش IP موفقیت بیشتری نسبت به

^۱ Electromagnetic Method

روش‌های فوق دارد و کمتر تحت تأثیر روباره‌های رسانا قرار می‌گیرد.

۳- وجود پدیده قطبش غشایی، استفاده از روش IP در مطالعات آب‌های زیرزمینی و اکتشاف این ذخایر را فراهم می‌کند. با توجه به این که کانی‌های رسی دارای قطبش غشایی نسبتاً بالایی هستند، لذا روش IP برای اکتشاف لایه‌های غیرقابل نفوذ رسی و سفره‌های آبدار بسیار مناسب است. به‌علاوه به‌کارگیری این روش در زون‌های پرشی پر از آب، قطبش‌القایی نسبتاً بالایی از خود نشان می‌دهد.

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

- ۱- تفسیر کمی داده‌های IP خیلی پیچیده‌تر از روش مقاومت‌ویژه است.
- ۲- چشمه‌های ایجاد کننده بی‌هنجاری IP اغلب از نظر اقتصادی مهم نیستند (مانند رس‌ها، زون‌های خردشده حاوی آب، سنگ‌های حاوی گرافیت و یا پیریت). البته این مشکل تا حدودی با روش IP طیفی (SIP) برطرف شده است.
- ۳- در اکتشافات فلزی، قطبش الکتروودی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ اما طی برداشت‌های IP تمیز دادن اثر قطبش غشایی از قطبش الکتروودی غیرممکن است. در نتیجه وجود قطبش غشایی باعث کاهش کارایی برداشت IP در اکتشافات فلزی می‌شود، و به‌عنوان نوفه زمین‌شناسی شناخته می‌شود.

۲-۲-۵ نوفه‌ها در اندازه‌گیری‌های IP

در اندازه‌گیری‌های IP گاهی جریانات مزاحمی وجود دارد؛ که باعث مخدوش شدن نتایج اندازه‌گیری‌ها می‌شوند. لذا برای دستیابی به داده‌های با کیفیت، باید قبل از برداشت و تفسیر داده‌ها این عوامل مزاحم

را حذف و یا به حداقل رساند. این عوامل عبارتند از [کلاگری، ۱۳۸۹]:

۱- جریان پتانسیل خودزا^۱ (SP)

۲- جریان حاصل از جفت‌شدگی الکترومغناطیسی^۲

۳- جریان‌های تلوریک^۳

۴- جریان حاصل از قطبش الکترودهای پتانسیل

۵- نشت جریان از سیم‌ها به علت آسیب‌دیدگی روپوش عایق آن‌ها

جریان‌های طبیعی SP می‌توانند اختلاف پتانسیل‌هایی در حد چند ده میلی‌ولت تا چند صد میلی‌ولت را بین الکترودهای پتانسیل ایجاد کنند؛ و باعث ایجاد اغتشاش در اندازه‌گیری‌های IP شوند. هرچند این جریان‌ها اغلب اغتشاش زیادی در اندازه‌گیری‌ها ایجاد نمی‌کنند و اندازه‌گیری مقدار SP خود به‌عنوان یک روش ژئوفیزیکی، می‌تواند اطلاعات اکتشافی مفیدی ارائه دهد؛ اما این عامل را می‌توان قبل از اندازه‌گیری IP حذف یا تعدیل کرد [نوروزی، ۱۳۹۲]؛ که دستگاه‌های جدید به راحتی جریان SP را خنثی می‌کنند.

جریان حاصل از جفت‌شدگی الکترومغناطیسی از القای متقابل بین سیم‌های جریان و پتانسیل ایجاد می‌شود. اگر سیم‌های جریان در نزدیکی یا موازات سیم‌های پتانسیل قرار گیرند، در سیم‌های پتانسیل یک جریان القایی ایجاد می‌شود. این جریان باعث ایجاد یک ولتاژ جعلی در سیم‌های پتانسیل می‌گردد، که مرتبط با پدیده IP نیست. این عامل مزاحم یکی از نوفه‌های آزار دهنده در روش IP است. مواقعی که از آرایه‌های الکترودی با سیم‌های طویل و یا فرکانس بالا استفاده شود، اثر جفت‌شدگی می‌تواند خیلی بزرگ باشد. همچنین این اثر با افزایش رسانایی زمین، افزایش می‌یابد. برای کاهش این اثر، از آرایه‌های

^۱ Spontaneous Potential

^۲ EM coupling

^۳ Telluric currents

دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی، و معمولاً فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۰ هرتز استفاده می‌شود. با افزایش فاصله بین سیم‌های جریان و پتانسیل نیز می‌توان این اثر را کاهش داد. همچنین در مواقعی که به‌ناچار سیم‌ها از همدیگر عبور می‌کنند، عبور سیم‌ها از روی یکدیگر با زاویه قائم، اثر جفت‌شدگی را کاهش می‌دهد [Telford et al., 1990].

انتشار جریان‌های طبیعی در زمین یکی دیگر از عوامل ایجاد نوفه در اندازه‌گیری‌های IP است. این عامل را می‌توان با استفاده از اعمال یک فیلتر در داخل دستگاه محدود کرد [Reynolds, 2011]. علاوه بر این، چنانچه تأثیر جریان‌های تلوریک بر روی اندازه‌گیری IP شدید باشد؛ با افزایش تعداد قرائت‌ها در هر ایستگاه، می‌توان به سیگنال IP مناسب دست یافت. پتانسیل حاصل از قطبش الکترودهای پتانسیل نیز با به‌کارگیری الکترودهای قطبش ناپذیر^۱ خنثی می‌گردد [Telford et al., 1990]. همچنین در عملیات صحرائی باید از سالم بودن روپوش عایق کابل‌ها، به‌ویژه کابل‌های جریان اطمینان پیدا کرد؛ تا مانع از نشت جریان و ایجاد نوفه در اندازه‌گیری‌ها شود.

۲-۳ آرایه‌های الکترودی در برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP

موقعیت هندسی قرارگیری الکترودهای جریان و پتانسیل نسبت به یکدیگر را آرایه الکترودی گویند. برای انجام برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP، آرایه‌های الکترودی متعددی وجود دارد؛ که هر کدام از آن‌ها بر مبنای مزایا، معایب و حساسیت‌های مخصوص به‌خود مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه، آرایه‌های الکترودی مختلفی پیشنهاد شده است؛ که از این جمله می‌توان آرایه‌های ونر^۲، شلومبرژه، دوقطبی - دوقطبی، قطبی - دوقطبی، قطبی - قطبی^۳ و مستطیلی را نام برد. البته کاربرد

^۱ Nonpolarizing electrodes

^۲ Wenner

^۳ Pole- pole

آرایه‌های ونر، شلومبرژه و دوقطبی - دوقطبی بیشتر است [Loke, 2004]. برای اندازه‌گیری‌های IP نیز به‌طور قراردادی از آرایه‌های الکترودی به کار رفته در روش مقاومت‌ویژه استفاده می‌شود؛ هرچند که به‌صورت عملی، برداشت داده‌های IP اغلب با آرایه دوقطبی - دوقطبی صورت می‌گیرد [Milsom and Eriksen, 2011; Reynolds, 2011]. قابل ذکر است؛ که برداشت داده‌های IP نیز همانند برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، شامل هر دو روش پروفیل‌زنی جانبی و سونداژزنی عمودی می‌شود؛ با این تفاوت که برای برداشت داده‌های IP، وسایل و تجهیزات پیچیده‌تری نسبت به برداشت‌های مقاومت‌ویژه لازم است [Knödel et al., 2007].

۲-۳-۱ مقایسه آرایه‌های الکترودی مختلف و انتخاب آرایه مناسب

انتخاب یک آرایه الکترودی مناسب در برداشت‌های صحرائی، می‌تواند به فضای موجود برای گسترش آرایه، سختی و نیروی انسانی لازم برای استفاده از آن، و کارایی آرایه انتخابی در کاربرد مورد نظر وابسته باشد [Reynolds, 2011]. علاوه بر این، عوامل متعدد دیگری در مقایسه آرایه‌های الکترودی مختلف و انتخاب آرایه مناسب مؤثرند؛ که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از [Ward, 1990]:

- ۱- نسبت سیگنال به نوفه، ۲- جفت‌شدگی الکترومغناطیسی، ۳- حساسیت به موقعیت جانبی^۱، ۴- قابلیت تفکیک ساختارهای شیب‌دار، ۵- قدرت تفکیک‌پذیری ساختارهای افقی، ۶- عمق نفوذ، ۷- حساسیت به عمق آنومالی (عمق هدف)، ۸- حساسیت نسبت به شیب، ۹- حساسیت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات سونداژزنی، ۱۰- حساسیت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات پروفیل‌زنی، ۱۱- حساسیت به توپوگرافی سنگ‌بستر، ۱۲- حساسیت به اثرات جانبی^۲، ۱۳- حساسیت به روباره هادی، ۱۴- حساسیت به توپوگرافی.

^۱ Lateral Location

^۲ Lateral Effects

در جدول (۳-۲) ارزیابی مختصری از اولویت انتخاب آرایه‌های الکترونی مورد استفاده در برداشت‌ها، با توجه به تأثیر عوامل مذکور ارائه شده است.

جدول ۳-۲: ارزیابی آرایه‌های الکترونی متداول با توجه به مهم‌ترین عوامل مؤثر [After Ward, 1990].

آرایه	عامل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
گرادیان ^۱		۳	۳	۱	۱	۵	+	۵	۱	*	۵	۵	+	۱	+
دوقطبی-دوقطبی		۵	۱	۲	۴	۲	+	۲	۴	۴	۲	۱	+	۱	+
قطبی-دوقطبی		۴	۲	۳	۵	۳	+	۲	۵	۳	۱	۲	+	۱	+
شلومبرژه		۲	۴	۴	۲*	۱	+	۱	۲	۱	۳	۳*	+	۱	+
ونر		۱	۵	۵	۳*	۱	+	۱	۲	۲	۳	۳*	+	۱	+

در این جدول عدد ۱ بیانگر آن است؛ که آرایه مربوطه مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد؛ و عدد ۵ نشان می‌دهد که این آرایه با توجه به عامل مذکور، چندان مناسب نیست. همچنین اعداد ۲، ۳ و ۴ به ترتیب، اولویت‌های بعدی را برای انتخاب آن آرایه نشان می‌دهند. البته لازم به ذکر است؛ که اطلاعات کافی در رابطه با این عوامل و شرایط بسیار متنوعی که ارزیابی هر کدام از آن‌ها را برای آرایه‌های مختلف میسر سازد، در دسترس نیست. حتی برای برخی از عوامل، هیچ بررسی سیستماتیک و منظمی برای مجموعه گسترده‌ای از مدل‌های زیرزمینی صورت نگرفته است. لذا در مواردی که ارزیابی دقیقی صورت نگرفته و یا هیچ‌گونه قطعیت و مطالعات مستندی در دسترس نبوده، با علامت * یا + مشخص شده‌اند [Ward, 1990].

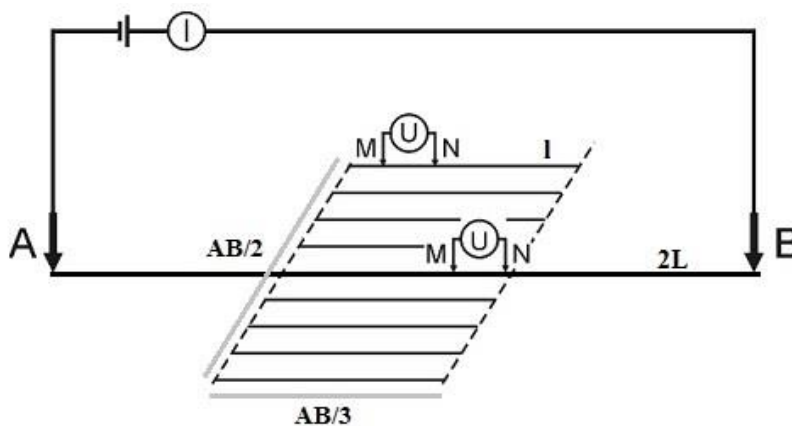
^۱ Gradient

با توجه به این که در این مطالعه از آرایه‌های مستطیلی و دوقطبی - دوقطبی برای برداشت داده‌های

IP و مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است؛ لذا به توضیح پیرامون این دو آرایه می‌پردازیم:

الف) آرایه مستطیلی

آرایه مستطیلی کاربرد زیادی در مطالعات IP دارد، و عمدتاً برای شناسایی محدوده کانی‌سازی به کار می‌رود [Milsom and Eriksen, 2011]. این آرایه شامل یک خط فرستنده جریان الکتریکی (AB) است؛ که با فاصله ثابت بر روی زمین پیاده می‌شود؛ و معمولاً این خط را عمود بر امتداد کانی‌سازی در نظر می‌گیرند. سپس اندازه‌گیری مقادیر IP و مقاومت ویژه با جابجایی الکترودهای پتانسیل M و N، واقع بر روی خط AB و پروفیل‌هایی به موازات آن انجام می‌شود؛ و این مقادیر را برای نقطه وسط MN در نظر می‌گیرند. به‌طور معمول خط MN و ایستگاه‌های اندازه‌گیری در داخل مستطیلی قرار دارند؛ که مرکز آن منطبق بر وسط فاصله AB است. این برداشت‌ها اغلب در مستطیلی به پهنای $AB/3$ و به طول $AB/2$ انجام می‌شوند (شکل ۷-۲). عمق نفوذ جریان به فاصله AB بستگی دارد و به‌طور تجربی برابر با $AB/4$ در نظر می‌گیرند [نوروزی، ۱۳۹۲؛ موسوی، ۱۳۹۳].



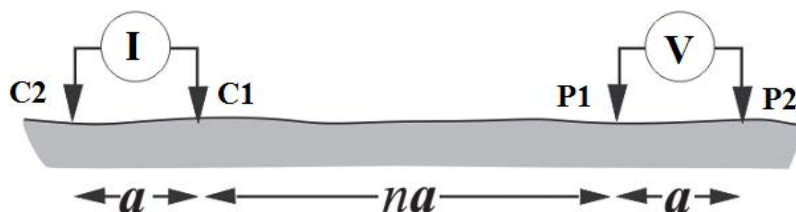
شکل ۷-۲: آرایه مستطیلی و نحوه قرارگیری الکترودهای جریان و پتانسیل برای برداشت داده‌ها [After Kirsch, 2009].

از جمله مزایای استفاده از آرایه مستطیلی آن است؛ که برای تعداد زیادی از اندازه‌گیری‌ها فقط الکترودهای پتانسیل و دستگاه گیرنده جابجا می‌شوند. در این حالت علاوه بر این که نیازی به جابجایی الکترودهای جریان، دستگاه فرستنده و دستگاه مولد جریان نیست و سرعت برداشت داده‌ها افزایش می‌یابد، مقدار جریان نیز برای اندازه‌گیری‌ها ثابت است؛ که این امر مزیتی برای دستیابی به داده‌های با کیفیت می‌باشد. در به‌کارگیری این آرایه بر اساس عمق احتمالی کانسار، طول خط فرستنده (AB) را ثابت و برابر با $2L$ انتخاب می‌کنند و به‌طور معمول نسبت فاصله فرستنده به گیرنده ($MN=l$) را بین ۱۰ تا ۵۰ در نظر می‌گیرند. عمق تجسس را می‌توان با افزایش فاصله L بیشتر کرد و بی‌هنجاری‌ها را در چندین عمق مختلف مورد بررسی قرار داد. البته در این حالت نسبت L/l افزایش می‌یابد؛ که باعث کوچک شدن سیگنال IP می‌شود. لذا برای اندازه‌گیری‌های دقیق، به دستگاه فرستنده قوی و دستگاه گیرنده حساس نیاز است. این آرایه برای شناسایی کانی‌سازی‌هایی با گسترش عمقی زیاد همچون کانی‌سازی‌های رگه‌ای عمقی و کانی‌سازی‌های پراکنده که در لایه‌های کم‌شیب و رسانا قرار دارند، پاسخ خوبی ارائه می‌دهد [نوروزی، ۱۳۹۲؛ موسوی، ۱۳۹۳]. البته آرایه مستطیلی در ارتباط با اهداف قائم باریک، قدرت تفکیک ضعیفی دارد و هیچ اطلاعاتی در مورد عمق هدف ارائه نمی‌دهد [Goldie, 2007]. همچنین نتایج اندازه‌گیری‌ها با این آرایه، اغلب به‌صورت نقشه‌های هم‌مقدار ارائه می‌گردد و تفسیرها نیز معمولاً به‌صورت کیفی انجام می‌شود [Kirsch, 2009].

ب) آرایه دوقطبی - دوقطبی

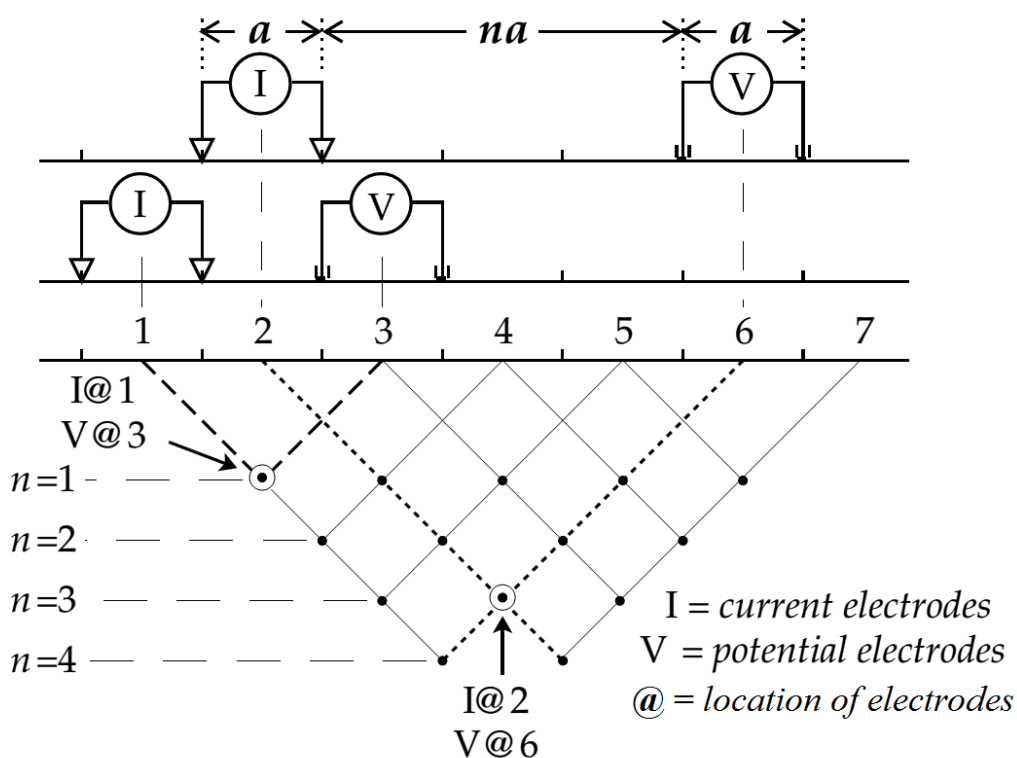
این آرایه قدرت تفکیک جانبی و قائم خوبی دارد و بهترین مشخصه آن، قدرت بالای تفکیک در ارتباط با اهداف قائم باریک است. اما عیب این آرایه، نسبت پایین سیگنال به نوفه در مقایسه با آرایه قطبی - دوقطبی یا آرایه مستطیلی است [Goldie, 2007]؛ بنابراین برای به‌دست آوردن داده‌های با کیفیت خوب، الکترودها باید به‌طور صحیح و مناسب به زمین وصل شوند و دستگاه نیز از حساسیت بالایی برخوردار باشد

[Knödel et al., 2009]. استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی به دلیل جدا بودن مدار جریان و ولتاژ و کاهش اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیسی، در برداشتهای IP متداول است [Milsom and Eriksen, 2011]. در این آرایه فواصل بین جفت الکترودهای جریان و پتانسیل برابر مقدار ثابت a می‌باشد و ضریب n ، نسبت فاصله بین دو الکتروود C1 و P1، به طول دوقطبی جریان (C2-C1) یا پتانسیل (P1-P2) است (شکل ۲-۸). برای اندازه‌گیری با این آرایه، فاصله a ابتدا در کوچک‌ترین واحد فاصله الکتروودی ثابت نگاه داشته می‌شود و اندازه‌گیری معمولاً با فاصله $1a$ شروع می‌شود. ضریب یا مقدار n پس از اندازه‌گیری در مقدار $n=1$ ، به مقدار $n=2$ افزایش می‌یابد؛ در حالی که فاصله دوقطبی جریان یا پتانسیل در $1a$ ثابت شده است. برای اندازه‌گیری‌های بعدی مقدار n به ۳ و همین‌طور به ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸ به منظور افزایش عمق اکتشاف، افزایش می‌یابد. یکی از معایب این آرایه قدرت سیگنال بسیار پایین آن برای مقادیر بالای ضریب n یا دشوار بودن اندازه‌گیری دقیق اختلاف پتانسیل به دلیل مقادیر بسیار پایین اختلاف پتانسیل است. یک روش برای رفع این مشکل، افزایش فاصله a بین هر یک از دوقطبی‌های جریان و پتانسیل، در زمان افزایش طول کلی این آرایه برای دستیابی به عمق بررسی بیشتر است؛ که این افزایش فاصله می‌تواند باعث کاهش افت پتانسیل در مقادیر بالای ضریب n شود. در صورت لزوم اندازه‌گیری‌ها می‌توانند با مقادیر بزرگ‌تر فاصله جفت دوقطبی جریان یا پتانسیل، و مقادیر مختلف n تکرار شوند. عمق متوسط اکتشاف با این آرایه به هر دو عامل n و a بستگی دارد [Loke, 2004].



شکل ۲-۸: آرایه دوقطبی- دوقطبی و نحوه قرارگیری الکترودهای جریان و پتانسیل [Milsom and Eriksen, 2011].

همان طور که در شکل (۹-۲) مشاهده می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری شده به نقطه تقاطع خطوط مایل که با زاویه ۴۵ درجه از مراکز دوقطبی جریان و پتانسیل رسم می‌شود، نسبت داده می‌شوند [Milsom and Eriksen, 2011]. مقادیر رسم شده مقادیر ظاهری (و نه واقعی) پارامتر اندازه‌گیری شده در آن عمق می‌باشد. در این حالت، شکل رسم شده شبه‌مقطع نامیده می‌شود؛ که یک تصویر مناسب، هرچند غیرواقعی، از حضور بی‌هنجاری‌ها را نشان می‌دهد؛ ولی اندازه تغییرات جانبی و عمودی حقیقی آن‌ها را نشان نمی‌دهد [Lowrie, 2007]. برای رسم یا به دست آوردن مقطع واقعی، لازم است داده‌های اندازه‌گیری شده، مدل‌سازی شوند و نتایج مدل‌سازی داده‌ها به صورت مقطع رسم گردند [Loke, 2004].



شکل ۹-۲: نمای کلی از برداشت داده‌ها با آرایه دوقطبی-دوقطبی و ترسیم شبه‌مقطع برای داده‌ها [Lowrie, 2007].

فصل سوم: زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

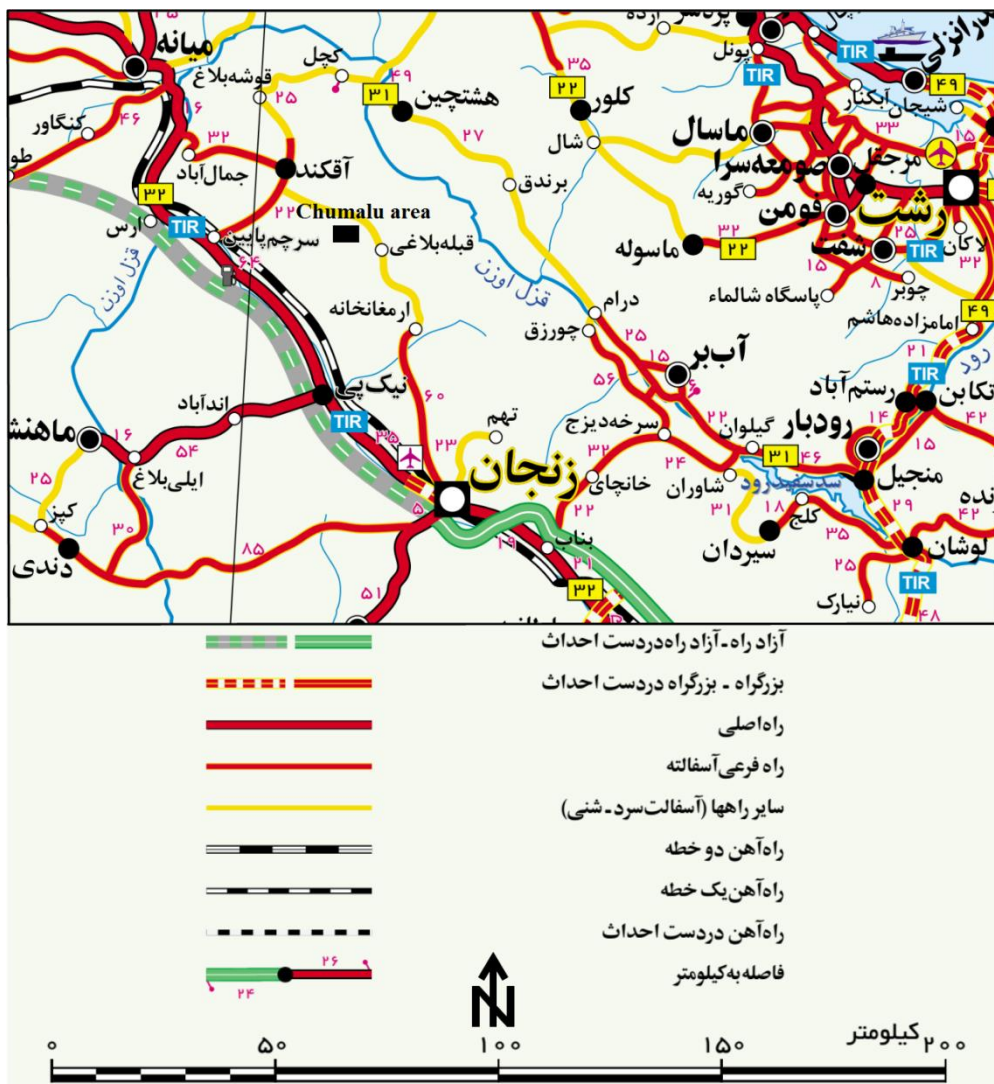
۳-۱ مقدمه

محدوده معدنی سرب و روی چومالو در ۷۰ کیلومتری شمال غرب زنجان واقع شده و از لحاظ زمین‌شناسی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین قرار گرفته است. این محدوده به وسعت ۱۱ کیلومتر مربع در محدوده طول شرقی "۳۲' ۱۱° ۴۸" تا "۴۰' ۱۳° ۴۸" و عرض شمالی "۲۶' ۷° ۳۷" تا "۲۰' ۹° ۳۷" واقع شده است. سنگ میزبان کانی‌سازی واحدهای آتشفشانی - نفوذی ائوسن - الیگوسن می‌باشند؛ که از نظر زمین‌شناسی در حوضه چندفلزی طارم - هشتجین قرار گرفته‌اند [Alavi, 1991]. این محدوده از لحاظ تقسیمات ساختاری جزء ایران مرکزی [Stöcklin; 1968] و یا بخشی از البرز باختری [نبوی، ۱۳۵۵] محسوب می‌شود.

به منظور انجام مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و تعیین ژنز ماده معدنی، نمونه‌برداری از نهشته‌های آتشفشانی، توده نفوذی، پهنه‌های دگرسان و کانی‌سازی‌های سطحی و زیرسطحی انجام شد.

۳-۲ موقعیت و شرایط جغرافیایی

محدوده مورد مطالعه در ۱۳ کیلومتری شمال غرب روستای قبله‌بلاغی و ۷ کیلومتری شمال غرب روستای داش‌بلاغ واقع شده است (شکل ۳-۱). مهم‌ترین راه دسترسی به محدوده، جاده آسفالتی زنجان - ارمغان‌خانه - قبله‌بلاغی است؛ که پس از طی مسافت حدود ۲۰ کیلومتر از مسیر ارمغان‌خانه - قبله‌بلاغی، به دو راهی داش‌بلاغ - قبله‌بلاغی رسیده و با طی ۷ کیلومتر از مسیر روستای داش‌بلاغ به طرف روستای چومالو و سپس با طی کردن ۲ کیلومتر جاده فرعی خاکی به سمت شمال، به محدوده چومالو منتهی می‌شود.



شکل ۳-۱: نقشه راهنمای راه‌ها جهت دسترسی به منطقه مورد مطالعه (محدوده چومالو در شمال غرب روستای قبله‌بلاغی با علامت مستطیل مشکی رنگ مشخص شده است) [گزارش نقشه راه‌ها، ۱۳۹۴].

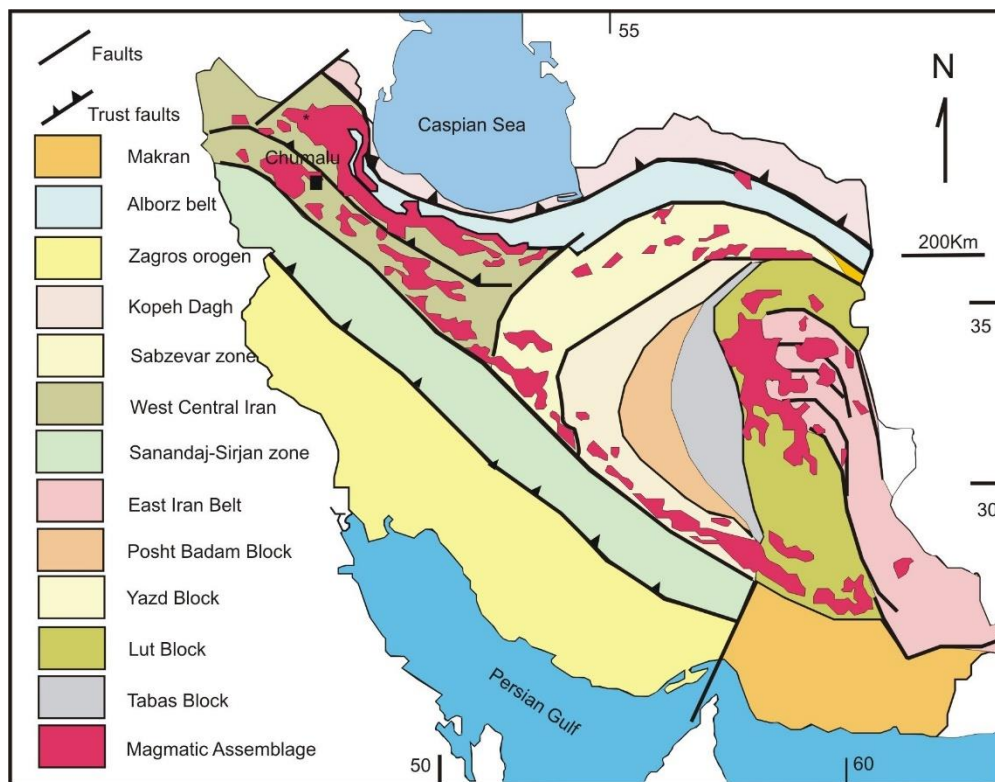
این محدوده دارای توپوگرافی نسبتاً هموار است و در نیمه شمالی آن، رسوبات آلویوم گسترش یافته‌اند. به همین دلیل، بخش‌های عمده محدوده به‌جز بخش‌های مرتفع و سنگلاخ، زمین کشاورزی و تحت کشت دیم می‌باشند. بیشترین ارتفاع در محدوده ۱۹۵۰ متر و کمترین ارتفاع ۱۸۲۰ متر می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه از نظر آب و هوایی جزء مناطق معتدل محسوب می‌شود. حداقل درجه حرارت در زمستان به ۲۵- درجه سانتی‌گراد و حداکثر درجه حرارت در فصل تابستان به حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد

می‌رسد. میانگین بارندگی برای محدوده در حدود ۳۴۰ میلی‌متر در سال است؛ که دو فصل زمستان و بهار بیشترین سهم را در بارش‌ها شامل می‌شوند. سیستم آبراهه‌ها در منطقه، در سرشاخه‌ها به صورت پنجه‌ای و در بخش‌های انتهایی به صورت موازی می‌باشد. همچنین از نقطه نظر پوشش گیاهی، عمده مناطق در محدوده تحت کشت محصولاتی همچون گندم، جو، نخود و یونجه به صورت دیم می‌باشند.

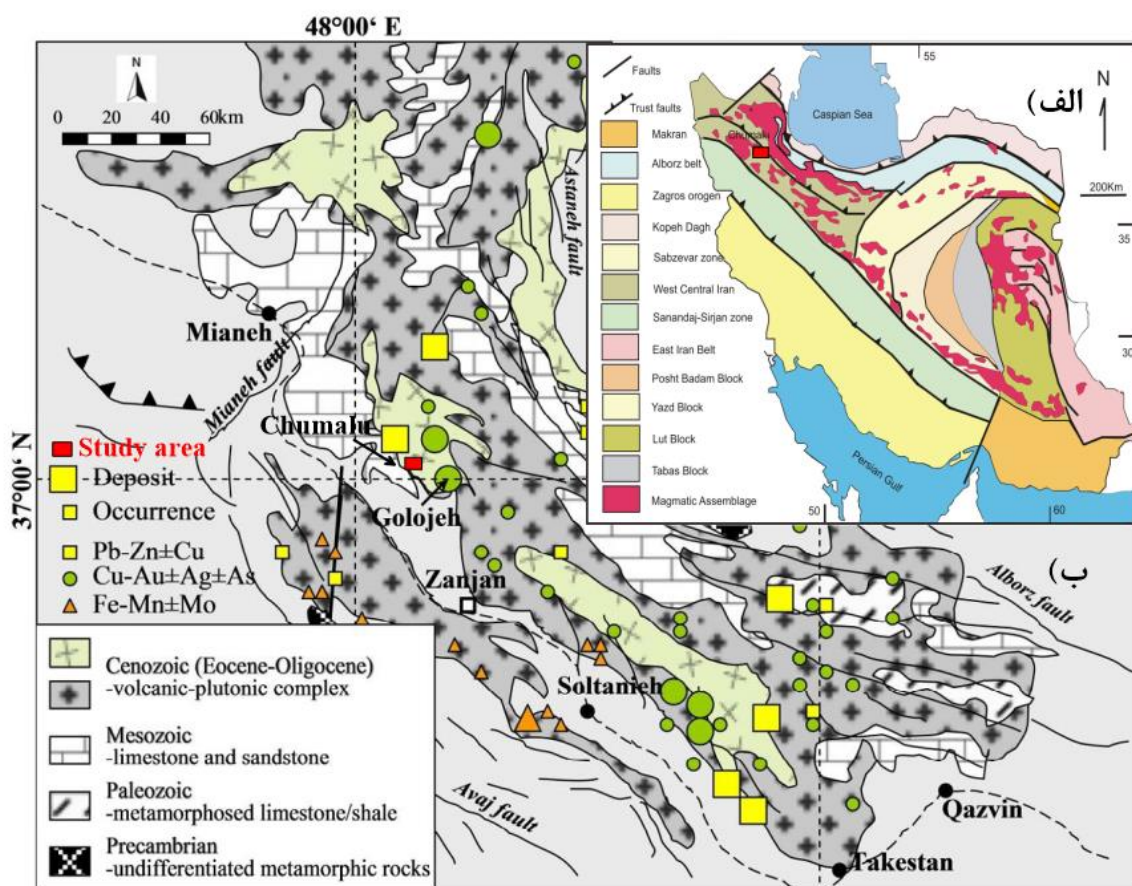
۳-۳ زمین‌شناسی ناحیه‌ای

محدوده اکتشافی چومالو در تقسیم‌بندی ساختاری ایران، بخشی از زیرپهنه طارم- هشتجین محسوب می‌شود؛ که در پهنه ساختاری کمان ماگمایی سنوزوئیک البرز- آذربایجان واقع شده است (شکل ۳-۲) [Alavi, 1991; Stöcklin; 1968]. ماگماتیسم البرز در ائوسن- الیگوسن منجر به تشکیل مجموعه عظیمی از سنگ‌های آذرین نفوذی، نیمه‌نفوذی و آذرآواری از قبیل گدازه‌های بازالتی، آندزیتی، داسیتی، ریولیتی، توف و نفوذی‌های نیمه‌عمیق شده؛ که اغلب میزبان کانه‌زایی‌های گوناگونی در منطقه می‌باشند. رخداد توده‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی با ماهیت کالک‌آلکان تا آلکان الیگوسن [حاج علیلو، ۱۳۷۸] به همراه رخداد‌های متنوع عناصر فلزی و غیر فلزی (مس، طلا، آهن، سرب و روی به همراه آلونیت، تراورتن و گچ) و وجود دگرسانی‌های وسیع نظیر سیلیسی، فلیک، آرژلیک حدواسط و پیشرفته، آلونیتی و پروپیلیتیک [هادی‌زاده، ۱۳۸۳] موجب شده تا حوضه فلزایی طارم- هشتجین از دیدگاه کانه‌زایی و زمین‌شناسی اقتصادی همواره جزئی از مناطق مستعد برای ردیابی رخداد‌های مختلف معدنی باشد [قربانی، ۱۳۸۶].



شکل ۳-۲: نقشه ساده شده تقسیم‌بندی ساختاری ایران که موقعیت محدوده چومالو در شمال غرب ایران با مربع مشکی مشخص شده است [After Alavi, 1991; After Stöcklin, 1968].

در پهنه طارم- هشتجین، روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی همسان با دیگر مناطق البرز غربی، راستای شمال غربی- جنوب شرقی را دارا هستند [قربانی، ۱۳۸۶]. این پهنه از قزوین (باختر طالقان) شروع می‌شود و تا شمال- شمال باختری میانه و شمال نواحی فروافتادگی منجیل ادامه می‌یابد و از جنوب به محور ابهر- زنجان- میانه محدود می‌شود. همچنین از دید ساختاری، این کمربند از شمال، جنوب و باختر به گسل‌های بزرگ سفیدرود (در شمال) و ادامه گسل تبریز- سلطانیه و سلطانیه- تاکستان (در جنوب) می‌رسد؛ و از سمت باختر توسط گسل آستارا- مریوان محدود می‌شود (شکل ۳-۳) [قربانی، ۱۳۸۷].



شکل ۳-۳: الف) نمایش موقعیت پهنه فلززایی طارم- هشتجین در بخش غربی کمان ماگمایی البرز [Alavi, 1991; Stöcklin, 1968] و ب) نمایی کلی از زمین‌شناسی پهنه طارم- هشتجین، موقعیت نشانه‌ها و ذخایر معدنی متعدد بر روی این پهنه و نمایش موقعیت محدوده مورد مطالعه با مربع قرمز رنگ [مهراپی و همکاران، ۱۳۹۳].

۳-۴ زمین‌شناسی منطقه‌ای

در بخش مرکزی پهنه طارم- هشتجین سری سنگ‌های آتشفشانی- نفوذی ائوسن- الیگوسن با روند تقریبی شمال‌غرب- جنوب‌شرق و هم‌روند با دیگر ساختارهای زمین‌شناسی البرز غربی، قرار دارد؛ که میزبان کانی‌سازی‌های متعددی از فلزات پایه و گرانبها از جمله سرب، روی، مس، طلا و نقره با ویژگی‌های مشابه از نظر سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی است. گسترش وسیع آثار معدنکاری مس، سرب و روی به‌صورت گودال و ترانشه در امتداد رگه‌های سیلیسی دارای آثار معدنی مس، سرب و روی موجود در

سنگ‌های آتشفشانی- نفوذی نشان از گسترش و اهمیت معدنکاری در این منطقه دارد. واحدهای رخنمون یافته در نقشه ۱:۵۰۰۰ محدوده اکتشافی چومالو [آقازاده و براتی، ۱۳۹۵]، شامل واحدهای آتشفشانی ائوسن، توده‌های نفوذی الیگوسن و نهشته‌های آبرفتی کواترنری می‌باشد (شکل ۳-۴). سنگ‌های آتشفشانی ائوسن توسط توده‌های نفوذی با ترکیب مونزودیوریت تا سینوگرانیتی و مونزونیت الیگوسن قطع شده‌اند؛ که روند تقریبی شمال غرب- جنوب شرق را نشان می‌دهد. توپوگرافی ملایم محدوده و پوشش قابل توجه رسوبات کواترنری در بخش‌های مرکزی و شمال غربی، از جمله ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی محدوده به‌شمار می‌رود. واحدهای رخنمون یافته در محدوده که از سمت شمال شرق به سمت جنوب غرب جوان می‌شوند، به ترتیب از قدیم به جدید به شرح زیر می‌باشند [آقازاده و براتی، ۱۳۹۵]:

- نهشته‌های پیروکسن آندزیتی (E^{pan}):

قدیمی‌ترین واحد سنگ‌شناختی در منطقه شامل نهشته‌های پیروکسن آندزیت خاکستری رنگ ائوسن می‌باشد؛ که به صورت تپه ماهوری در بخش شمال شرقی محدوده رخنمون دارند. این سنگ‌ها توسط توده‌های نفوذی مونزودیوریتی و مونزونیتی قطع شده‌اند. نفوذ این توده‌ها سبب دگرگونی مجاورتی در حاشیه نهشته‌های مذکور شده است.

- نهشته‌های اولیوین بازالتی (E^{oba}):

بر روی نهشته‌های پیروکسن آندزیتی، سنگ‌های آتشفشانی اولیوین بازالت خاکستری تیره ائوسن قرار دارند؛ که کنتاکت گسلی با واحد قدیمی‌تر نشان می‌دهند و تحت نفوذ توده‌های نفوذی الیگوسن قرار گرفته‌اند. این واحد که به صورت تپه ماهوری در بخش‌های میانی محدوده دیده می‌شود، میزبان رگه‌های کانه‌دار بوده و در اثر چرخش سیالات در سیستم‌های شکستگی و همچنین نفوذ توده‌های موجود در منطقه، دچار دگرسانی پروپیلیتیک و در بخش‌هایی سیلیسی و گاهاً کربناتی شده است.

- نهشته‌های ریولیتی - ایگنیمبریتی (E^{th}):

نهشته‌های ریولیتی - ایگنیمبریتی خاکستری روشن ائوسن در بخش جنوبی و مرکزی محدوده با روند شرقی - غربی رخنمون دارند. این واحد در مجاورت توده نفوذی الیگوسن با ترکیب مونزونیتی کمی دگرگون شده و متحمل دگرسانی پروپلیتیک گردیده است. مرز زیرین این واحد با واحد قدیمی‌تر مشخص نیست، اما مرز بالایی آن با واحد جوان‌تر عادی می‌باشد.

- نهشته‌های بازالتی (E^{ba}):

نهشته‌های بازالتی ریز بلور خاکستری تیره ائوسن، بر روی نهشته‌های ریولیتی تشکیل شده‌اند؛ که در بخش جنوبی نقشه مشاهده می‌شوند. این واحد هم‌رند با واحدهای قدیمی‌تر و جوان‌تر می‌باشد، و بخش‌هایی از آن توسط زمین‌های کشاورزی پوشیده شده است.

- نهشته‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی (E^{an}):

جوان‌ترین واحد آتشفشانی با ترکیب آندزیت و تراکی آندزیت قهوه‌ای ائوسن می‌باشد؛ که در بخش جنوبی محدوده رخنمون دارد. نهشته‌های فوق بر روی سنگ‌های بازالتی به‌طور هم‌شیب قرار دارند و تا بخش‌های خارج از محدوده اکتشافی نیز توسعه یافته‌اند.

همچنین سه توده نفوذی در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند:

- توده مونزودیوریت پورفیری (Md):

این توده در شمال‌شرق محدوده رخنمون دارد و باعث ایجاد دگرگونی مجاورتی محدود در نهشته‌های پیروکسن آندزیتی شده است.

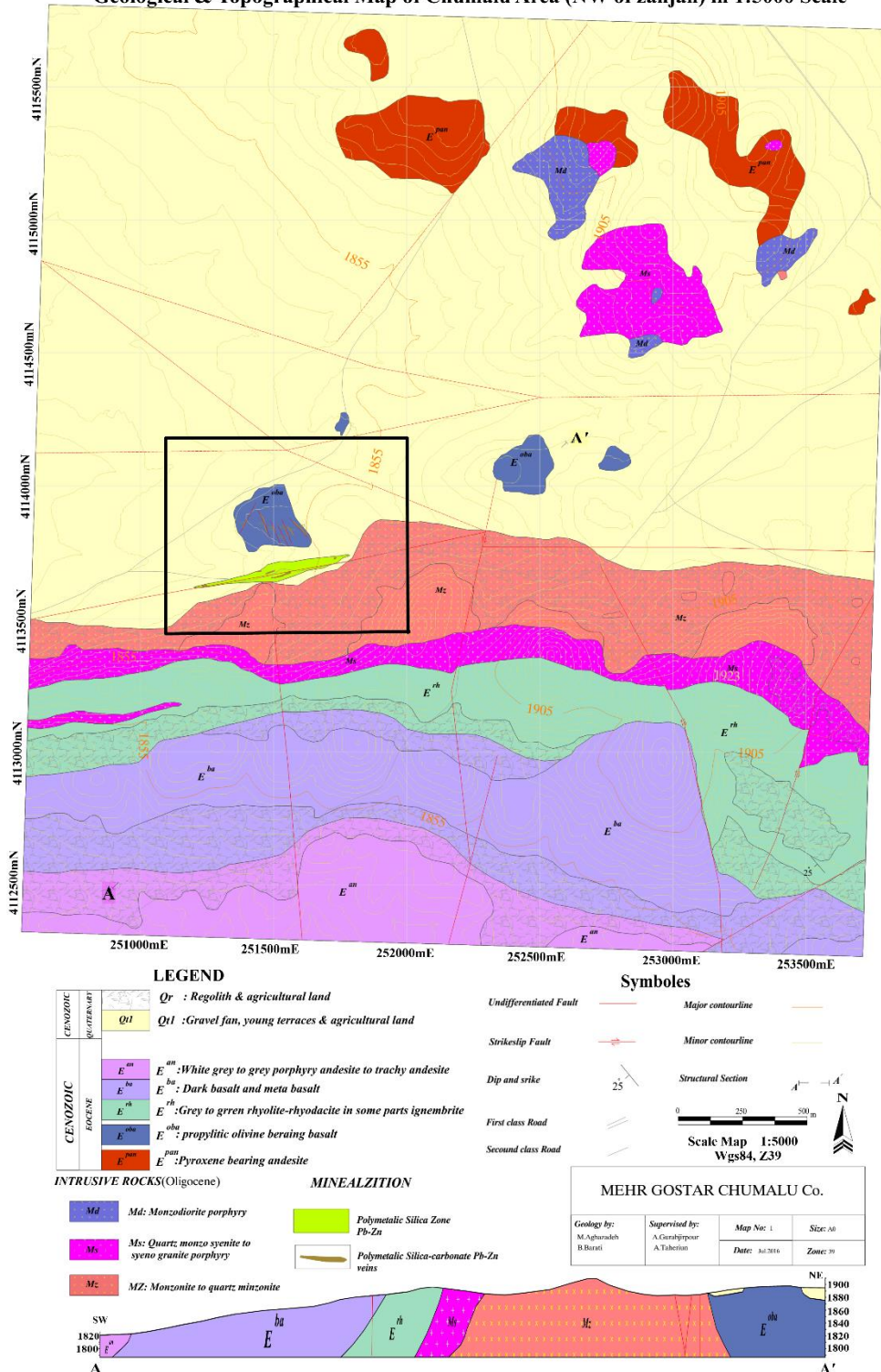
- توده کوارتز مونزوسینیت تا سینوگرانیت پورفیری (Ms):

این توده در قسمتی از شمال شرق محدوده و به صورت گسترده تر در مرکز محدوده اکتشافی رخنمون یافته است. نفوذ این توده در نهشته‌های ریولیتی - ایگنیمبریتی باعث ایجاد دگرگونی در این واحد شده است.

- توده مونزونیت تا کوارتز مونزونیت (Mz):

این توده در مرکز منطقه واقع شده است؛ و نزدیک ترین رخنمون به رگه‌های کانه‌دار می‌باشد. روند این توده شرقی - غربی بوده و قسمت‌هایی از آن زمین‌های کشاورزی است.

Geological & Topographical Map of Chumalu Area (NW of Zanjan) in 1:5000 Scale



شکل ۳-۴: نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی ۱:۵۰۰۰ محدوده چومالو (مستطیل مشکی رنگ موقعیت محدوده مورد مطالعه) [آقازاده و براتی، ۱۳۹۵].

پس از انجام پیمایش صحرایی و کنترل واحدهای سنگی موجود در منطقه معدنی چومالو بر مبنای نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی ۱:۵۰۰۰ محدوده، نمونه‌برداری از نهشته‌های آتشفشانی، توده نفوذی، پهنه‌های دگرسان و کانی‌سازی‌های سطحی و زیرسطحی انجام شد و به‌منظور انجام مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و تعیین ژنز ماده معدنی تعداد ۸ مقطع نازک و ۹ مقطع صیقلی از نمونه‌ها تهیه شد و مطالعه گردید. مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام شده در محدوده اکتشافی چومالو نشان می‌دهد؛ که سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی در منطقه شامل واحد آتشفشانی اولیوین بازالت (E^{oba}) و توده نفوذی مونزونیت و کوارتز مونزونیت (Mz) است. ویژگی‌های سنگ‌شناسی این دو واحد به شرح زیر است:

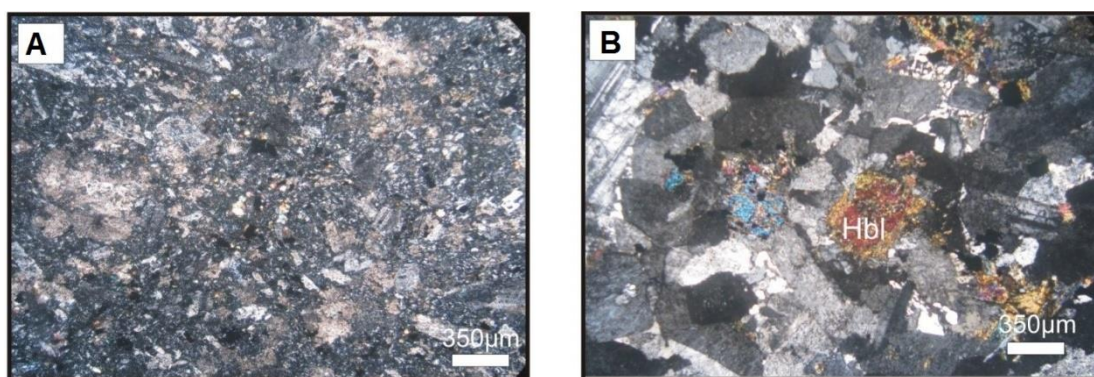
(۱) واحد اولیوین بازالت

این واحد با بافت پورفیری در یک خمیره شیشه‌ای- میکرولیتی تشکیل شده است (شکل ۳-۵-۱A)؛ که میکرولیت متشکل از کریستال‌های ریز پلاژیوکلاز، پیروکسن و کانی‌های تیره می‌باشد. بلورهای اولیوین به‌صورت وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار ۱۰ درصد سنگ را تشکیل داده است؛ که ابعاد آن گاه تا ۰/۳ میلی‌متر هم می‌رسد و غالباً به کلریت و اپیدوت تجزیه شده است. بلورهای پیروکسن (اوژیت) به‌صورت وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار با فراوانی تا ۵ درصد تشکیل شده و اغلب به کلریت، اپیدوت و سریسیت تجزیه شده است. پلاژیوکلاز نیز با فراوانی ۱۰ تا ۲۰ درصد حضور دارد و غالباً به رس، سریسیت، کلریت و اپیدوت تجزیه گردیده است. مجموع کانی‌های ثانویه به‌همراه رگچه‌های کلریتی و کربناتی در سنگ میزبان، نشان دهنده دگرسانی پروپیلیتیک- کربناتی است.

(۲) واحد کوارتز مونزونیت

این واحد از کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، کوارتز و ارتوز تشکیل شده است (شکل ۳-۵-۱B). پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سینتتیک با ابعاد متوسط تشکیل شده، که به سریسیت تجزیه شده است. بیوتیت

قهوه‌ای رنگ که تجزیه‌شدگی کمتری را نشان می‌دهد و هورنبلند که آثار تجزیه‌شدگی به کلریت و اپیدوت را نشان می‌دهد، از دیگر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ می‌باشند. کوارتز با فراوانی تا ۱۰ درصد در سنگ مشاهده می‌شود و کانی‌های تیره با فراوانی ۳ تا ۵ درصد به صورت وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار به صورت پراکنده در سنگ میزبان تشکیل شده‌اند. کانی‌های ثانویه حاصل از تجزیه‌شدگی پلاژیوکلاز و هورنبلند حاکی از دگرسانی پروپیلیتیک می‌باشد.



شکل ۳-۵: تصاویر میکروسکوپی از سنگ میزبان‌های کانی‌سازی در منطقه چومالو؛ (A) واحد اولیوین بازالیت با بلورهای کوچک اولیوین، پلاژیوکلاز و پیروکسن که به اپیدوت، سریسیت و کلریت تبدیل شده است؛ (B) واحد کوارتز مونزونیت، بلورهای پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و هورنبلند که به کلریت تجزیه شده است. (هورنبلند: Hbl). حروف اختصاری نشانگر کانی‌ها، از [Whitney and Evans, 2010].

۳-۵ دگرسانی سنگ میزبان

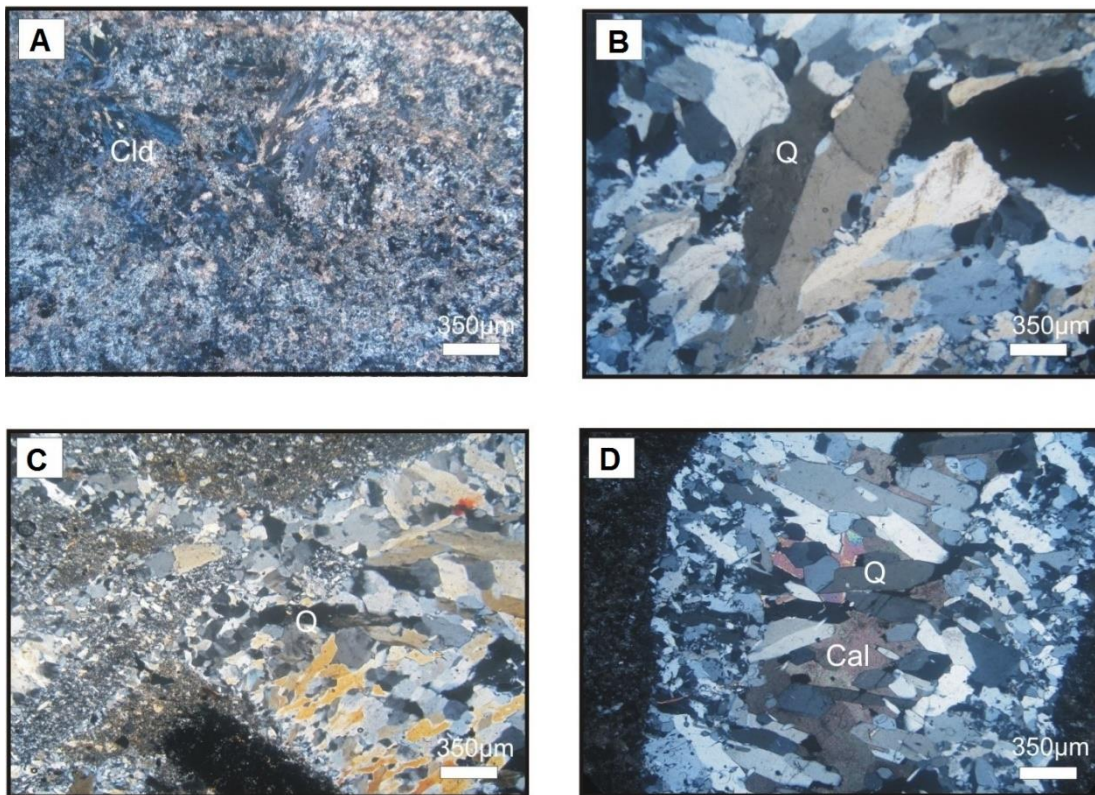
دگرسانی هیدروترمال در منطقه چومالو از گسترش وسیعی برخوردار بوده و محدود به رخنمون‌های معدنی نیست. بر اساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی سه نوع دگرسانی در ابعاد محلی و ناحیه‌ای در محدوده چومالو قابل تشخیص است؛ که واحدهای آتشفشانی و ماگمایی منطقه را تحت تاثیر قرار داده است. شدت دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی و ماگمایی میزبان کانی‌سازی متفاوت بوده و از مرکز زون‌های کانه‌ساز به سمت حاشیه کاهش می‌یابد. مهم‌ترین دگرسانی‌های شناسایی شده در منطقه شامل دگرسانی سیلیسی، سیلیسی-آرژلیک و پروپیلیتیک-کربناتی می‌باشند. قابل ذکر است که با توجه به

پوشش زمین‌های کشاورزی در کل منطقه، تفکیک این دگرسانی‌ها و مشاهده آن‌ها در سطح به راحتی امکان پذیر نمی‌باشد.

دگرسانی پروپیلیتیک که با نفوذ توده مونزونیتی در منطقه، با شدت‌های مختلف در سنگ میزبان بازالتی و به مقدار کمتر در بخش‌هایی از توده نفوذی به صورت ناحیه‌ای تشکیل شده است. این دگرسانی با حضور کانی‌های کلریت، سربیسیت، اپیدوت، کوارتز و کربنات قابل تشخیص است (شکل ۳-۶-۳-A). پلاژیوکلاز به طور قابل ملاحظه‌ای به سربیسیت، و هورنبلند به کلریت و اپیدوت تبدیل شده است. همچنین رگچه‌های کلریتی- اپیدوتی و سربستی و رگچه‌های کربناته در داخل سنگ میزبان مشاهده می‌شوند.

دگرسانی سیلیسی و در بعضی نواحی زون سیلیسی- برشی در قسمت‌های مرکزی محدوده تشکیل شده است؛ که با کانه‌زایی مرتبط می‌باشد (شکل ۳-۶-۳-B,C). شاخصه این دگرسانی رگچه‌های سیلیسی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر همراه با قطعات برشی است؛ که داخل برش‌ها عمدتاً از کوارتز و قطعات ولکانیکی تشکیل شده است.

دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک که در ارتباط با کانی‌سازی در محدوده می‌باشد، عمدتاً در سنگ میزبان بازالتی در نزدیکی رگه‌های کانی‌سازی و همچنین در زون سیلیسی- برشی کانه‌دار قابل مشاهده است (شکل ۳-۶-۳-D). شدت این دگرسانی در سنگ میزبان بازالتی و در نزدیکی رگه‌ها به گونه‌ای است که بافت سنگ و کانی‌ها به طور کامل از بین رفته است. کوارتز مهم‌ترین کانی این زون، به صورت رگچه‌ای و با ضخامت متغیر ۱ تا ۵ میلی‌متر سنگ را پر کرده است.



شکل ۳-۶: تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های سنگ میزبان کانی‌سازی در منطقه چومالو؛ (A) دگرسانی پروپیلیتیک در واحد اولیوین بازالت به طوری که بافت سنگ از بین رفته و کانی‌های اولیه سنگ به کلریت، اپیدوت، سریسیت و کربنات تبدیل شده‌اند؛ (B) دگرسانی سیلیسی که بلورهای درشت و ریز کوارتز را نشان می‌دهد؛ (C) دگرسانی سیلیسی-برشی که قطعات برش را همراه با بلورهای کوارتز نشان می‌دهد؛ (D) دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک، رگه سیلیسی با بلورهای شانه‌ای کوارتز که فضای داخل آن با کربنات پر شده و در زمینه رسی (قسمت‌های تیره حاشیه تصویر) واقع شده است. (کلریت: Cld، کلسیت: Cal، کوارتز: Q، هورنبلند: Hbl). حروف اختصاری نشانگر کانی‌ها، از [Whitney and Evans, 2010].

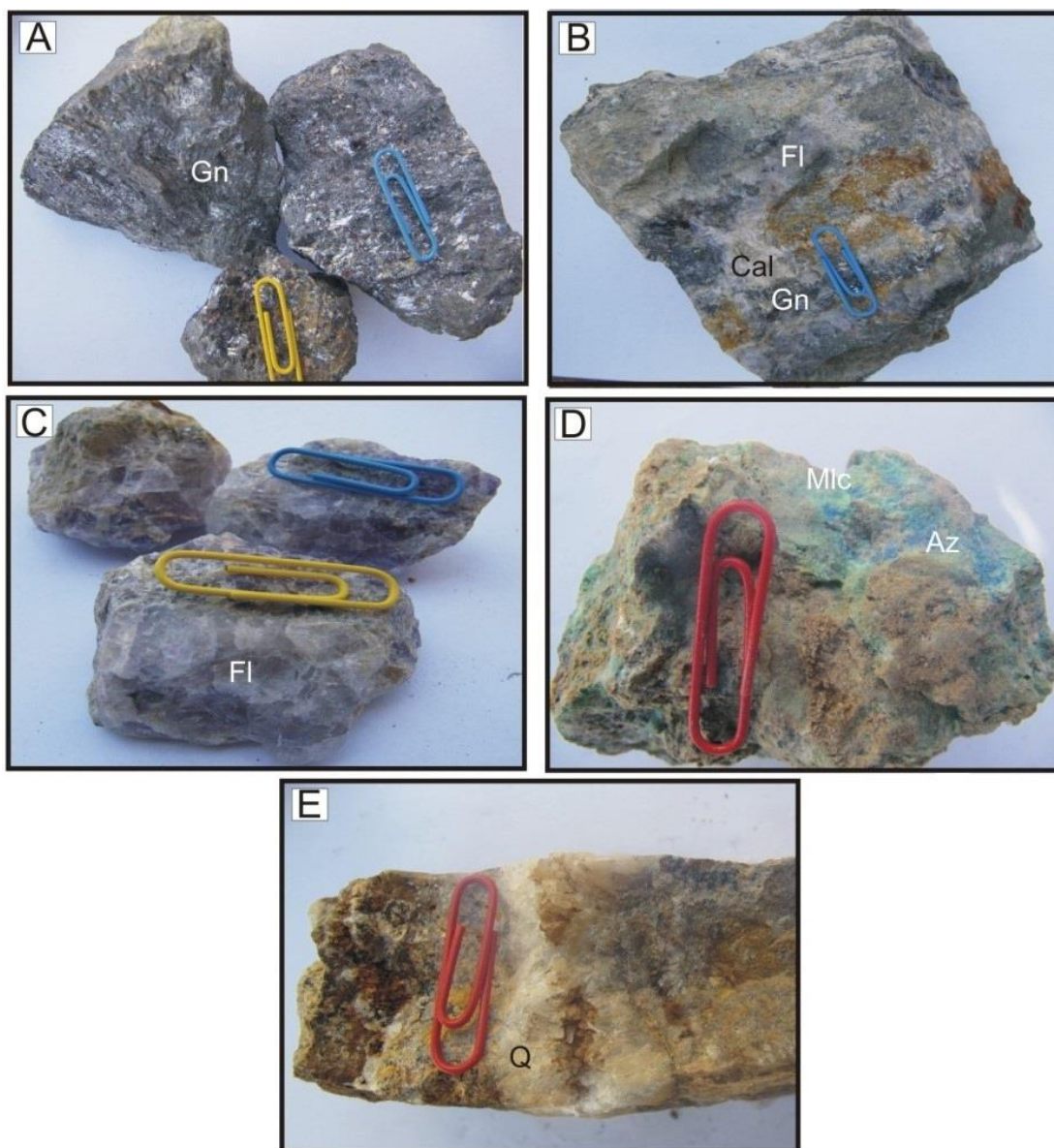
۳-۶ کانی‌سازی در محدوده معدنی چومالو

بر اساس مطالعات انجام شده، کانی‌سازی در محدوده معدنی چومالو به صورت رگه‌ای و هیدروترمال، در امتداد زون‌های گسلی و شکستگی‌ها و در دو روند مختلف صورت گرفته است. پاراژنر عمده عنصری را سرب و روی و فلوتور به همراه مس، طلا و نقره تشکیل می‌دهند؛ که میزان مولیبدن و آنتیموان نیز در برخی نمونه‌ها بالاست. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد؛ که مقادیر میانگین، $\text{Cu} = 0.14\%$, $\text{Zn} = 2\%$, $\text{Pb} = 2.4\%$ و نقره و طلا $\text{Ag} = 45 \text{ ppm}$ و $\text{Au} = 484 \text{ ppb}$ می‌باشد [آقازاده و براتی، ۱۳۹۵].

کانی‌سازی اول به‌صورت یک زون سیلیسی- برشی همراه با دگرسانی سیلیسی، سیلیسی- آرژیلیک و پروپیلیتیک است؛ که شامل کانه‌زایی سرب و روی به‌همراه مس، نقره و طلا می‌باشد. این زون با ضخامت متغیر ۱ تا ۲۰ متر و با روند N70E، به‌طور پیوسته طولی بالغ بر ۶۰۰ متر را داراست. این رگه منطبق بر یک سیستم گسلی اصلی در منطقه با همین روند می‌باشد.

کانی‌سازی دوم تقریباً عمود بر روند کانی‌سازی اول و در شمال آن، شامل چند دسته رگه با فواصل نزدیک از هم که همراه با دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک، پروپیلیتیک و پروپیلیتیک- کربناته بوده و شامل کانه‌زایی سرب و روی به‌همراه مس، مولیبدن و طلا می‌باشد. این رگه‌ها با روند تقریبی شمال‌غرب- جنوب‌شرق در شکستگی‌های موجود در این قسمت تشکیل شده‌اند. این شکستگی‌ها در واقع گسل‌های منشعب از سیستم گسلی اصلی در منطقه هستند؛ که کوچک‌تر از گسل اصلی بوده و باعث ایجاد رگه‌هایی با طول و عرض کمتر شده‌اند. این رگه‌ها با طول متغیر ۲۰ تا ۶۰ متر، دارای ضخامت کانی‌سازی از ۱۰ سانتی‌متر تا ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشند. توسعه این سیستم رگه‌ها به‌سمت غرب به‌واسطه عملکرد گسلی با روند شرقی- غربی تا شمال‌غرب- جنوب‌شرق محدود شده است، هرچند که به‌سمت شرق این سیستم رگه‌ها ادامه دارند [آقازاده و براتی، ۱۳۹۵].

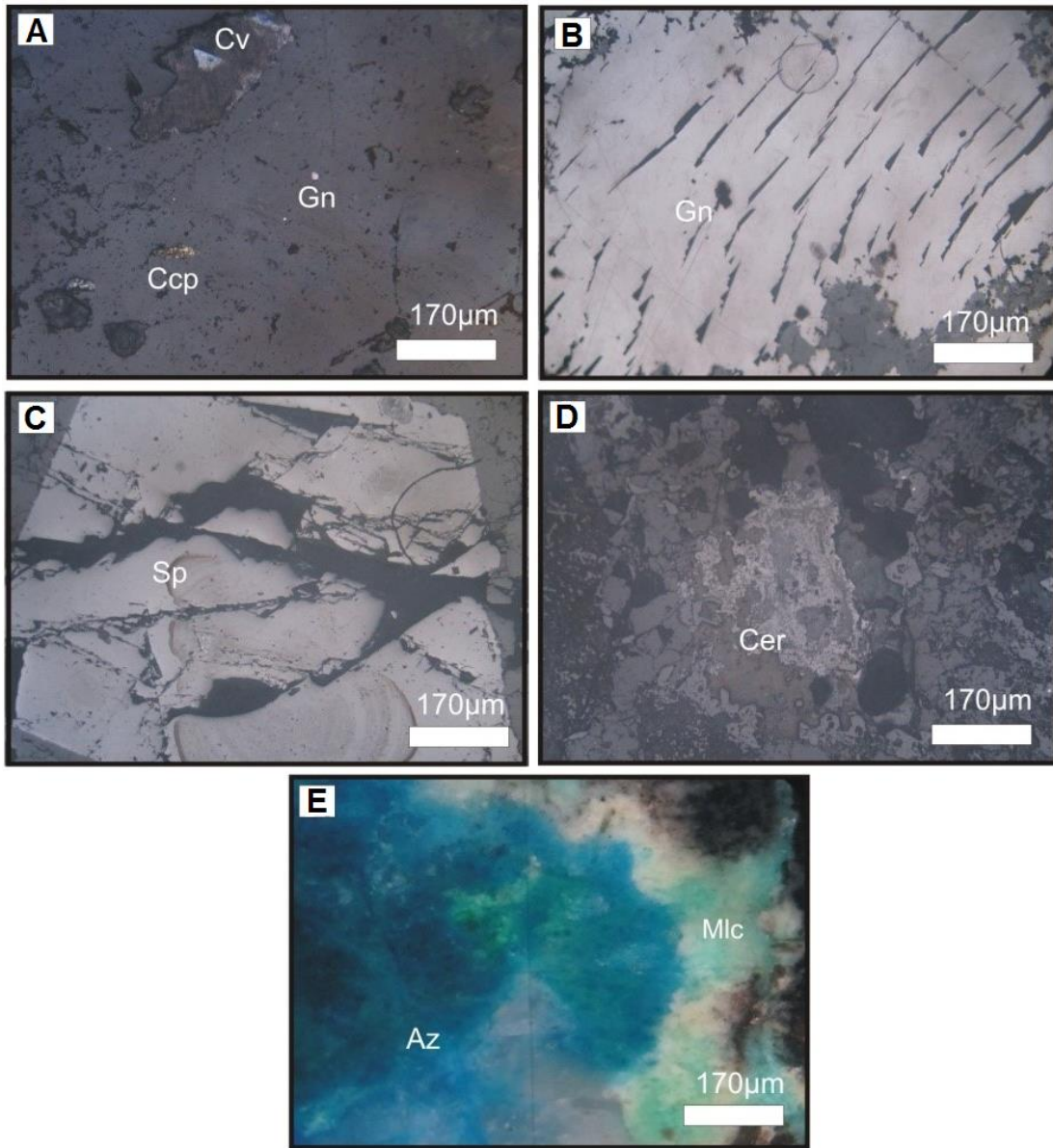
مطالعات صحرایی و میکروسکوپی نشان از تشکیل کانی‌سازی در دو مرحله هیپوژن و سوپرژن دارد. ماده معدنی به‌صورت گالن و مقادیر کمتری اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت همراه با کانی‌های باطله مانند کلسیت، کوارتز و فلوریت تشکیل شده است (شکل ۳-۷-۳ A, B, C)؛ که تحت شرایط سوپرژن به مالاکیت، آزوریت و هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده است (شکل ۳-۷-۳ D). کوارتز، کلسیت و فلورین به‌صورت رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و شانهای تشکیل شده‌اند؛ که نشان دهنده محیط هیدروترمال می‌باشد (شکل ۳-۷-۳ E).



شکل ۳-۷: تصاویر ماکروسکوپی از ماده معدنی در منطقه چومالو؛ (A) کانی‌سازی گالن موجود در رگه‌های غنی از سرب؛ (B) رگچه‌های کانی‌سازی سرب به همراه کلسیت و فلوریت در سنگ میزبان آتشفشانی؛ (C) کریستال‌های درشت فلوریت همراه با مقادیر کمی از ماده معدنی؛ (D) کانی‌سازی بخش سوپرژن که شامل مالاکیت، آزوریت و هیدروکسید آهن می‌باشد؛ (E) رگچه پر شده با کریستال‌های شانه‌ای کوارتز. (گالن: Gn، کلسیت: Cal، کوارتز: Q، مالاکیت: Mlc، آزوریت: Az، فلورین: Fl). حروف اختصاری نشانگر کانی‌ها، از [Whitney and Evans, 2010].

کانی‌سازی در مرحله هیپوژن شامل کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیریت می‌باشد. کالکوپیریت به صورت دانه‌های نیمه‌وجه‌دار با ابعاد کمتر از ۱۰۰ میکرون با فراوانی کمتر از ۱ درصد به صورت پراکنده

در متن سنگ تشکیل شده است؛ که در مواردی از حاشیه به کولیت در حال تجزیه شدن می‌باشد (شکل ۳-۸-۱). پیریت نیز با ابعاد بسیار کوچک (کمتر از ۵۰ میکرون) با فراوانی کمتر از ۱ درصد و به صورت بی‌وجه در متن سنگ پراکنده است. گالن کانی اصلی و مهم کانی‌سازی در منطقه می‌باشد؛ که به صورت وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار با ابعاد تا ۵ میلی‌متر و فراوانی ۱۰ درصد تشکیل شده است (شکل ۳-۸-۲). این کانی به صورت توده‌ای، دانه‌ای، رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی، همراه با کلسیت و فلوریت تشکیل شده است. اسفالریت به ابعاد تا ۰/۵ میلی‌متر به صورت دانه‌ای در مجاورت گالن تشکیل شده است؛ که فراوانی آن ۳ درصد می‌باشد (شکل ۳-۸-۳). در مرحله سوپرژن در بعضی قسمت‌ها گالن به سروریت تجزیه شده، که حاصل جانشینی ثانویه می‌باشد (شکل ۳-۸-۴). همچنین در این مرحله کالکوپیریت به مالاکیت و آزوریت تجزیه شده است (شکل ۳-۸-۵). توالی پاراژنتیکی کانی‌ها و مراحل تشکیل کانی‌سازی در شکل (۳-۹) آورده شده است.



شکل ۳-۸: تصاویر میکروسکوپی از کانه‌زایی در منطقه چومالو؛ (A) دانه‌های بسیار کوچک کالکوپیریت که در مواردی به کوولیت تبدیل شده است؛ (B) بلورهای درشت گالن که به صورت توده‌ای تشکیل شده‌اند؛ (C) بلور وجه‌دار اسفالریت؛ (D) کانی گالن که به سروزیت تبدیل شده است؛ (E) بلورهای درشت مالاکیت و آزوریت در زون سوپرژن. (گالن: Gn، اسفالریت: Sp، مالاکیت: Mlc، سروزیت: Cer، آزوریت: Az، کوولیت: Cv، کالکوپیریت: Ccp). حروف اختصاری نشانگر کانی‌ها، از [Whitney and Evans, 2010].

Mineral	Hypogene Stage		Supergene Stage
	Early	Late	
Chlorite	-----		
Sericite	—————		
Epidote	-----		
Quartz	—————		
Calcite	-----	—————	
Fluorite	-----	—————	
Pyrite	—————		
Chalcopyrite	—————		
Gelena	—————		
Sphalerite	—————		
Cerussite			—————
Covellite			—————
Malachite			—————
Azorite			—————
Geothite			—————

شکل ۳-۹: توالی پاراژنتیک مراحل کانی‌سازی در منطقه چومالو.

۳-۷ مدل کانی‌سازی

رخداد معدنی سرب و روی‌دار چومالو در سنگ میزبان آتشفشانی اولیوین بازالت و بخشی از توده نفوذی مونزونیتی صورت گرفته است؛ که این سنگ‌ها در اثر تزریق توده نفوذی، متحمل دگرسانی‌های هیدروترمال پروپیلیتیک، پروپیلیتیک-کربناته، سیلیسی و سیلیسی-آرژلیک شده‌اند. حضور بافت‌های شانه‌ای در کوارتز، پرکننده فضای خالی در کلسیت و فلوریت، و برش‌های سیلیسی نشان دهنده حضور محلول‌های هیدروترمال است؛ که چرخش این محلول‌ها در زون‌های گسلی و شکستگی‌ها باعث تشکیل کانی‌سازی در منطقه شده است. کانی‌سازی به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای، توده‌ای، پراکنده و جانشینی بوده و

از روند گسل‌ها و شکستگی‌ها تبعیت می‌کند؛ که شامل گالن، اسفالریت، سرزیت، کالکوپیریت و پیریت می‌باشد. خصوصیات کانی‌سازی چومالو با توجه به ساختار رگه‌ای آن، بافت‌های تشکیل‌دهنده کانی‌سازی، دگرسانی‌های موجود و نوع ماده معدنی، از نوع کانسارهای سرب و روی هیدروترمال است.

فصل چهارم: برداشت، مدل سازی و تفسیر

داده های مقاومت ویژه الکتریکی و IP

مرحله برداشت داده‌های صحرایی، از جمله مهم‌ترین مراحل انجام یک پروژه اکتشافی محسوب می‌شود. در این مرحله سعی بر آن است تا داده‌هایی با کیفیت خوب و با حداقل نوفه ممکن برداشت شوند؛ زیرا در غیر این صورت حتی پیشرفته‌ترین روش‌های پردازش و تفسیر، کارآیی چندانی ندارند. داده‌های برداشت‌شده در این مرحله یک‌سری داده‌های خام می‌باشند؛ که دارای نوفه‌های مختلفی هستند و تفسیر مستقیم این داده‌ها، قادر به ارائه هیچ‌گونه اطلاعات کمی در مورد عمق حقیقی، ابعاد و یا توزیع مقاومت‌ویژه حقیقی در زیر زمین نمی‌باشد. لذا با توجه به این که هدف اصلی اکتشافات ژئوفیزیکی کاربردی رسیدن به یک تصویر دقیق از ویژگی‌های زیر زمین است و ساختارهای واقعی در اکثر موارد دارای پیچیدگی زیادی هستند؛ تعیین رابطه بین داده‌های حاصل از برداشت صحرایی و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه ضروری است. به عبارت ساده‌تر؛ داده‌های برداشت‌شده برای توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، باید مدل‌سازی شوند [Dey and Morrison, 1979].

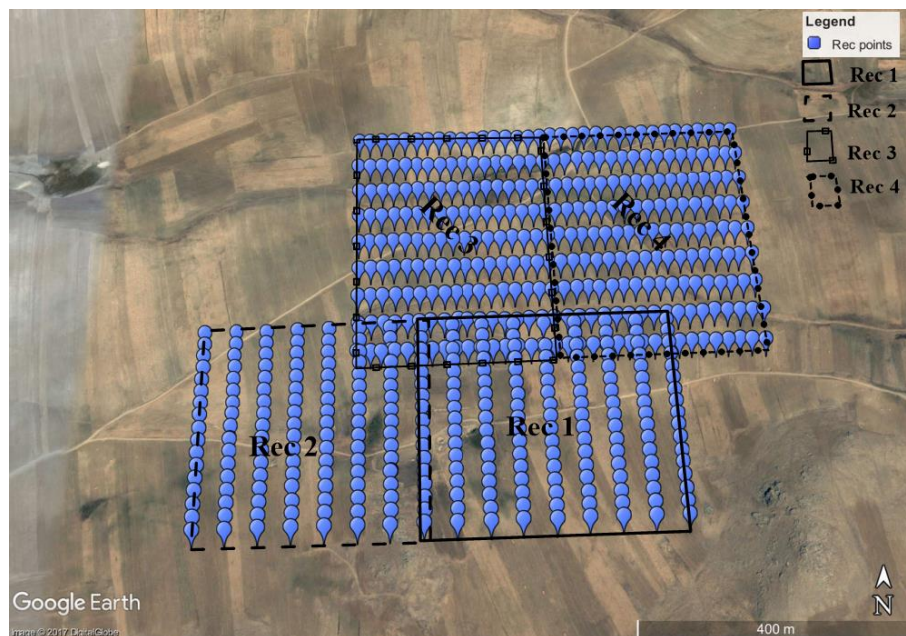
مدل‌سازی، به فرآیند شبیه‌سازی بی‌هنجاری مشاهده‌شده با یک بی‌هنجاری محاسبه‌شده، به کمک روش‌های تقریبی عددی و تحلیلی از یک مدل فرضی در زیر زمین و تخمین پارامترهای هندسی و فیزیکی آن بی‌هنجاری گفته می‌شود [Hinze, 1990]. در پایان، بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی مورد تفسیر قرار می‌گیرند؛ که این تفسیر شامل مشخص کردن موقعیت مکانی، شکل و خصوصیات منبع زیرسطحی می‌باشد [Stocco et al., 2009]. همچنین با استفاده از نرم‌افزارهای وارون‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP، می‌توان تفسیر سریع‌تر و دقیق‌تری برای داده‌های برداشت‌شده ارائه داد [White et al., 2003]. لذا در این پژوهش از برداشت‌های ژئوفیزیکی، مدل‌سازی و تفسیر نتایج آن‌ها به منظور شناسایی و تعیین محدوده‌های جانبی و عمقی بی‌هنجاری‌ها و بررسی وضعیت پیوستگی توده‌های معدنی محتمل استفاده شده است.

۲-۴ عملیات برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP و تجهیزات مورد استفاده

۱-۲-۴ نحوه انجام عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP

با توجه به مطالعات اولیه زمین‌شناسی و شواهد کانی‌سازی در منطقه معدنی چومالو، عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به‌منظور شناسایی نواحی بی‌هنجار و بررسی عمقی آن‌ها صورت گرفت. این برداشت‌ها ابتدا در قالب ۴ شبکه با آرایه مستطیلی (دو شبکه شمالی- جنوبی و دو شبکه شرقی- غربی) و به‌صورت عمود بر ساختارهای زمین‌شناسی، به‌منظور تعیین تغییرات جانبی و گسترش سطحی محدوده‌های بی‌هنجار، با طول خط جریان ۸۰۰ متر، فواصل الکترودی ۲۰ متر و فاصله خطوط برداشت ۵۰ متر انجام شد. سپس ۶ پروفیل با آرایه دوقطبی- دوقطبی (۳ پروفیل شمالی- جنوبی و ۳ پروفیل شرقی- غربی) بر روی محدوده‌های بی‌هنجار به‌منظور بررسی عمقی کانی‌سازی با فواصل الکترودی ۲۰ متر و فاکتور عددی (n) ۱ تا ۸ برداشت شد. داده‌های مربوط به توپوگرافی نیز در امتداد هر پروفیل ثبت شده‌اند. خطوط مبنا^۱ در این برداشت به موازات ساختارهای زمین‌شناسی و به طول‌های ۷۵۰ متر و ۴۰۰ متر به‌ترتیب برای شبکه‌های شمالی- جنوبی و شرقی- غربی در نظر گرفته شده است؛ و پروفیل‌ها عمود بر خطوط مبنا به طول‌های ۴۶۰ متر تا ۸۰۰ متر، با فواصل ۷۵ متر و ۱۰۰ متر از یکدیگر به‌ترتیب برای پروفیل‌های شمالی- جنوبی و شرقی- غربی انتخاب شده‌اند (شکل‌های (۱-۴) تا (۳-۴)). لازم به ذکر است؛ که طول پروفیل‌ها بسته به بی‌هنجاری‌های دیده شده ضمن برداشت تغییر کرده است. در مجموع ۱۶۳۹ ایستگاه برای هر روش مقاومت‌ویژه و IP برداشت گردید؛ که از این تعداد ۵۵۳ ایستگاه با آرایه مستطیلی و ۱۰۸۶ ایستگاه با آرایه دوقطبی- دوقطبی اندازه‌گیری شده است.

^۱ Base Line

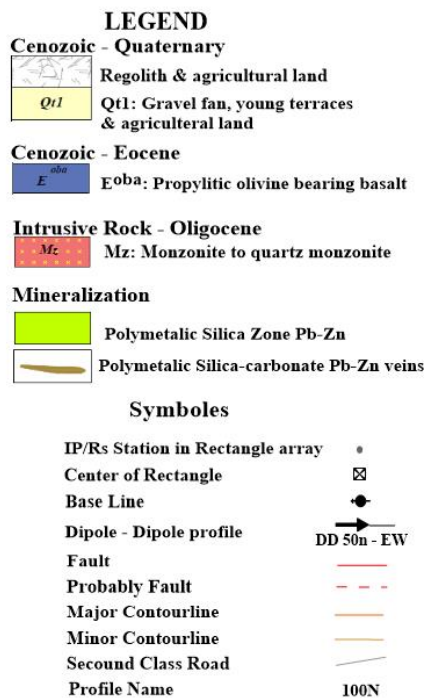
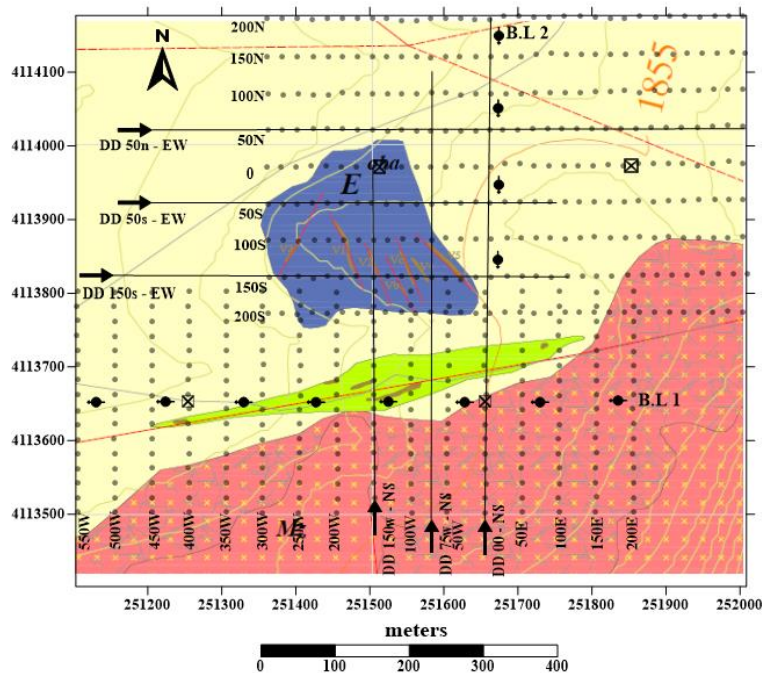


شکل ۴-۱: موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی با آرایه مستطیلی، بر روی تصویر ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه [www.google.com/earth].



شکل ۴-۲: موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی با آرایه دوقطبی-دوقطبی، بر روی تصویر ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه [www.google.com/earth].

Geophysical Surveying Stations on Geological & Topographical Map of Study Area



شکل ۳-۴: موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه.

۲-۲-۴ وسایل و تجهیزات مورد استفاده در برداشت

با توجه به اهمیت استفاده از وسایل و تجهیزات مناسب برای برداشت داده‌های با کیفیت، در این پژوهش نیز سعی شد؛ تا از دستگاه‌ها و تجهیزات پیشرفته و مناسب استفاده شود.

در این عملیات برای برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP، از دستگاه فرستنده GDD TXIII 1800W و دستگاه گیرنده GDD GRx8-32 ساخت کشور کانادا، ژنراتور ۶ کیلوواتی، قرقره‌های کابل‌ها و الکترودهای جریان و پتانسل استفاده شد. دستگاه فرستنده TXIII برای برداشت‌های حوزه زمان IP طراحی شده است و جریان مورد نیاز خود را از ژنراتور دریافت می‌کند (شکل ۴-۴-الف و ب). این دستگاه قابلیت استفاده از جریان‌های بالا (تا ۱۰ آمپر) برای برداشت در زمین‌های با رسانندگی زیاد، و امکان افزایش ولتاژ (تا ۲۴۰۰ ولت) برای برداشت در زمین‌های بسیار مقاوم را داراست. از مزایای دیگر این

دستگاه می‌توان به امکان برداشت در شرایط دمایی بالا (تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد) و داشتن حساسیت بالا برای توقف ارسال جریان (در حد میکروثانیه) در مواردی که بین کابل‌ها و الکترودها اتصال کوتاه اتفاق افتد و یا ارتباط آن‌ها دچار مشکل شود، اشاره کرد.



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

دستگاه گیرنده GRx8-32 یک دستگاه سبک و قابل حمل است (شکل ۴-۵). این دستگاه دارای یک نمایشگر دستی است؛ که می‌توان آن را از طریق کابل مخصوص و یا بلوتوث به دستگاه گیرنده متصل کرد و سپس تنظیمات اولیه مورد نیاز برای برداشت داده‌ها (مانند آرایه مورد نظر یا تعداد تکرار هر قرائت) را برای دستگاه گیرنده تعریف کرد. همچنین از طریق این نمایشگر می‌توان هم‌زمان با برداشت داده‌ها، اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین الکترودهای پتانسیل، میزان بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و در نهایت شبه‌مقطع داده‌های برداشت شده را مشاهده نمود. قابلیت ذخیره‌سازی دستگاه، ۵۱۲۰۰۰ قرائت به همراه جزئیات کامل پارامترهای اندازه‌گیری شده و به راحتی تمامی این اطلاعات را می‌توان به حافظه خارجی از جمله فلش مموری انتقال داد. این دستگاه از آرایه‌های الکترودی چندقطبی یا چند دوقطبی (مانند دوقطبی - دوقطبی، قطبی - دوقطبی، قطبی - قطبی، شلومبرژه، ونر و مستطیلی) پشتیبانی می‌کند و دارای ۲۰ پنجره قابل برنامه‌ریزی با انعطاف‌پذیری بالا در نمایش منحنی تخلیه IP است.



شکل ۴-۵: دستگاه گیرنده GRx8-32 به همراه نمایشگر دستی.

در این برداشت، از کابل‌های مناسب و دارای روکش عایق به‌منظور حفظ ایمنی و برداشت داده‌های با کیفیت خوب استفاده شد. همچنین از الکترودهای فلزی برای انتقال جریان و از الکترودهای غیرپلاریزه پتانسیل برای برداشت داده‌ها استفاده شد (شکل ۴-۶). به‌علاوه برای انتقال بهتر جریان ارسالی به زمین، مقدار حدود ۱۰ لیتر محلول آب و نمک در محل تمامی الکترودهای جریان ریخته می‌شد.



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

عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در محدوده معدنی چومالو واقع در شمال غرب استان زنجان، توسط شرکت زمین‌شناسی مهندسی و علوم زمین امید به‌همراهی نگارنده به‌عنوان کارشناس اکتشاف این شرکت، به مدت ۱۶ روز در آذرماه ۱۳۹۵ انجام شد. در شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸)، تصاویری در مورد توپوگرافی محدوده، دستگاه‌ها، تجهیزات و نحوه انجام عملیات صحرایی آورده شده است.



شکل ۴-۷: عملیات برداشت داده‌های مقاومت ویژه و IP در امتداد یکی از پروفیل‌های برداشت، تجهیزات و دستگاه فرستنده (سمت راست تصویر)، و توپوگرافی نسبتاً هموار محدوده (دید به سمت جنوب شرق).



شکل ۴-۸: تیم اجرای عملیات صحرائی در حین برداشت داده‌ها، دستگاه گیرنده و کابل‌های پتانسیل، و توپوگرافی نسبتاً هموار محدوده (دید به سمت شمال غرب).

۳-۴ مدل‌سازی و پردازش داده‌ها

داده‌های برداشت‌شده در عملیات صحرایی یک‌سری داده‌های خام می‌باشند؛ که توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی این داده‌ها امکان‌پذیر نیست. بنابراین مدل‌سازی داده‌های برداشت‌شده به‌منظور تعیین رابطه بین داده‌های صحرایی و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه، ضروری است [Dey and Morrison, 1979]. به‌علاوه در این مرحله برای دستیابی به مدلی دقیق‌تر لازم است داده‌های برداشت‌شده در عملیات صحرایی، قبل و یا بعد از انجام مدل‌سازی مورد پردازش قرار گیرند. در ادامه به توضیح مختصری پیرامون روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی، روش مورد استفاده در این پژوهش و نرم‌افزارهای مربوطه برای انجام مدل‌سازی، و پردازش‌های مورد نیاز بر روی داده‌ها می‌پردازیم.

۳-۴-۱ روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی

مدل‌سازی ژئوفیزیکی به دو دسته کلی مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی تقسیم می‌شود:

الف) مدل‌سازی فیزیکی

در روش مدل‌سازی فیزیکی، ساختار زمین در یک مقیاس آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌شود. این روش بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. به‌علاوه شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی، به‌خوبی شرایط غیرقابل پیش‌بینی زمین را فراهم نمی‌کند. بنابراین با پیشرفت علوم رایانه، این روش عمدتاً جای خود را به مدل‌سازی‌های عددی به‌کمک برنامه‌های رایانه‌ای داده است [Dey and Morrison, 1979].

ب) مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی عددی، روابط فیزیکی با استفاده از یک‌سری معادلات ریاضی بیان می‌شوند و می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات تعیین نمود [Dey and Morrison, 1979]. این روش ارتباط مستقیمی با درک طبیعت داده‌های ژئوفیزیکی دارد و در نهایت تصویری از درون زمین ارائه

می‌دهد. در واقع هدف از این مدل‌سازی، بازسازی مدلی از زمین بر اساس داده‌های صحرایی است. مدل‌سازی عددی به دو روش صورت می‌گیرد [Roy, 2008]:

۱- روش مستقیم یا پیشرو^۱

۲- روش وارون یا معکوس^۲

۱- مدل‌سازی پیشرو (مستقیم)

در مدل‌سازی پیشرو، ورودی فرآیند مدل‌سازی یک مدل آزمون (فرضی) از زمین است و در طی فرآیند با توجه به معادلات حاکم بر مسئله، داده‌های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به‌عنوان خروجی مدل ارائه می‌شوند. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترهای مدل) آن‌قدر ادامه می‌یابد تا پاسخ مدل، برازش خوبی با داده‌های صحرایی پیدا کند. مدل‌سازی پیشرو بر مبنای آزمون و خطا انجام می‌شود و از طریق مدل، می‌توان به داده‌ها رسید. در این روش یک توزیع خاص برای اجزای زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شود؛ سپس پاسخ این مدل تحت آرایش الکترونی مورد نظر محاسبه می‌شود [Dey and Morrison, 1979]. برای مدل‌هایی با هندسه ساده، مسئله پیشرو به‌صورت تحلیلی قابل حل است. در عمل چون زمین واقعی دارای هندسه پیچیده‌ای است؛ برای محاسبه پاسخ مدل باید از یک روش عددی مثل روش تفاضل محدود^۳، اجزاء محدود^۴، معادلات انتگرال^۵، تحلیل شبکه و غیره استفاده کرد [Roy, 2008].

^۱ Forward Modeling

^۲ Inverse Modeling

^۳ Finite difference method

^۴ Finite element method

^۵ Integral equation method

۲- مدل سازی وارون (معکوس)

روش های مدل سازی پیشرو کند و ضعیفانند؛ به علاوه بی هنجاری های زیرسطحی عمدتاً دارای ساختاری پیچیده می باشند. بنابراین مدلی باید ارائه شود که با تعداد پارامتر محدود، قابل کنترل باشد؛ تا بتوان با تغییر این پارامترها بهترین مدل منطبق بر داده های صحرایی، خصوصیات زمین شناسی و دیگر اطلاعات منطقه را به دست آورد. لذا روش مدل سازی وارون معرفی می شود. در این روش بر خلاف روش مدل سازی پیشرو، از طریق داده های اندازه گیری شده (مشاهده ای)، مدل زمین تخمین زده می شود [Loke and Barker, 1996]. فرآیند مدل سازی وارون، عکس مدل سازی پیشرو می باشد؛ بدین ترتیب که در هر مرحله تکرار، با اعمال یک سری عملیات پیچیده ریاضی بر روی داده های برداشت شده، پارامترهای فیزیکی مدل به دست می آید. در واقع فرآیند وارون سازی شامل قرائت اولیه داده های خام برداشت شده، تصحیح پارامترهای وارون سازی (در صورت لزوم) و انجام وارون سازی می باشد [Meju, 1994]. برای حل مسائل وارون روش های عددی متعددی وجود دارد؛ که می توان به روش کمترین مربعات^۱، روش رگرسیون ریج^۲، روش های تصادفی^۳، روش شبکه عصبی^۴ و غیره اشاره کرد [Roy, 2008].

برای مدل سازی و تفسیر داده های ژئوفیزیکی، مسائل پیشرو باید قبل از ورود به بحث مسائل وارون حل شوند؛ چون مقایسه ای داده های محاسبه شده (که حاصل مدل سازی پیشرو است) با داده های اندازه گیری شده، یک جزء کامل از الگوریتم وارون سازی می باشد. بنابراین روش های وارون از یک روش مدل سازی پیشرو در بدنه خود استفاده می کنند و با استفاده از الگوریتم های تکرار خاص و روش های مختلف بهینه سازی همچون روش کمترین مربعات، تغییرات مناسب را در مدل پیش فرض خود ایجاد می کنند؛ تا خطای برازش داده ها در محدوده قابل قبولی قرار گیرد [Roy, 2008; Scales et al., 2001].

^۱ Least Squares method

^۲ Ridge Regression method

^۳ Stochastic methods

^۴ Neural Network method

در تمام روش‌های بهینه‌سازی، مدل اولیه در فرآیندی تکرارشونده به‌صورتی بهبود می‌یابد تا اختلاف بین داده‌های برداشت‌شده (y) و پاسخ‌های مدل (f) کاهش یابد. داده‌های برداشت‌شده به‌صورت رابطه (۱-۴) نشان داده می‌شوند:

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (1-4)$$

که m تعداد قرائت‌ها است. پاسخ‌های مدل را نیز می‌توان به‌طور مشابه نشان داد (رابطه ۲-۴):

$$f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (2-4)$$

همچنین پارامترهای مدل به‌صورت بردار زیر ارائه می‌شوند (رابطه ۳-۴):

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

که n تعداد پارامترهای مدل است. به‌علاوه تفاوت بین داده‌های برداشت‌شده و پاسخ‌های مدل از بردار تفاضل g که به‌صورت زیر است، محاسبه می‌شود (رابطه ۴-۴):

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

در روش بهینه‌سازی کمترین مربعات، مدل اولیه طوری بهینه می‌شود تا مجموع مربعات خطا (E)، که تفاضل بین مقادیر پاسخ‌های مدل و داده‌های برداشت‌شده است، کمینه شود (رابطه ۵-۴):

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

به‌منظور کاهش خطا از معادله گوس-نیوتن استفاده می‌شود. بدین وسیله پارامترهایی از مدل که

باید تغییر کند تا مجموع مربعات خطا (E) کاهش یابد، باید مشخص شوند [Loke and Barker, 1995]:

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

Δq بردار تغییرات پارامترهای مدل و J ماتریس ژاکوبین (با اندازه $m \times n$) مشتقات جزئی است. عناصر ماتریس ژاکوبین به صورت $J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$ هستند؛ که تغییر در i امین پاسخ مدل به دلیل تغییر در j امین پارامتر مدل است. پس از محاسبه بردار تغییر پارامتر (Δq)، مدل جدید از رابطه (4-7) محاسبه می‌شود:

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

به دلیل کاستی‌های معادله گوس-نیوتن، این روش کمتر مورد استفاده قرار گرفته و در عوض از روش بهبودیافته آن با عنوان مارکوارت - لوبنرگ^۱ استفاده می‌شود (رابطه 4-8) [Loke and Barker, 1995]:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (8-4)$$

در رابطه فوق J ماتریس ژاکوبین^۲ و λ فاکتور تعدیل^۳ است. این روش با عنوان رگرسیون ریج نیز شناخته می‌شود. در وارون‌سازی داده‌های سونداژ که مدل از تعداد لایه‌های کمتری تشکیل شده است، این روش به خوبی پاسخ می‌دهد؛ اما در مواردی که پارامترهای مدل زیاد باشند، مانند مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، مدل تولیدشده با روش رگرسیون ریج، توزیع مقاومت ویژه نامنظم همراه با مناطقی با مقاومت ویژه بسیار بالا یا پایین خواهد داشت. برای رفع این مشکل معادله کمترین مربعات گوس-نیوتن بار دیگر به صورت رابطه زیر بهینه شده، به نحوی که تغییرات فضایی در پارامترهای مدل را کمینه می‌کند (رابطه 4-9) [Loke and Barker, 1995]:

^۱ Marquardt-levenberg

^۲ Jacobwin

^۳ Damping factor

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T - \lambda F q_k \quad (9-4)$$

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (10-4)$$

در رابطه (۱۰-۴)، C_x ، C_y و C_z ماتریس‌های هموارسازی در جهت‌های x ، y و z هستند؛ همچنین α_x ، α_y و α_z وزن‌های نسبی داده‌شده به فیلترهای هموارسازی در جهت‌های ذکر شده می‌باشند. رابطه (۱۰-۴)، مربع تغییرات فضایی یا سختی مقادیر مقاومت ویژه مدل را نیز کمینه می‌کند. در واقع این همان روش بهینه‌سازی هموارسازی است. روش مذکور مدلی با تغییرات تدریجی مقاومت ویژه تولید می‌کند. استفاده از این روش وارون‌سازی برای مناطقی مناسب است که تغییرات زمین‌شناسی آن‌ها به صورت تدریجی بوده و ناگهانی نباشد. در شرایطی که مناطق در زیر سطح به صورت درونی همگن هستند، ولی با محیط پیرامون خود متفاوت بوده و دارای مرزهای تند می‌باشند، بهینه‌شده رابطه (۹-۴) که به روش وارون‌سازی بلوکی معروف است، جواب‌های به مراتب قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد؛ که به صورت رابطه (۱۱-۴) تعریف می‌شود [Loke and Barker, 1995]:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (11-4)$$

$$F = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (12-4)$$

در رابطه (۱۲-۴)، R_d و R_m ماتریس‌های وزنی هستند.

برای محاسبه مقاومت ویژه سه روش وجود دارد؛ که شامل روش تحلیلی، روش جز مرزی^۱ و روش اجزاء محدود و تفاضل محدود می‌شود. روش تحلیلی دقیق‌ترین روش است؛ ولی استفاده از این روش

^۱ Boundary element method

محدود به چند شکل هندسی ساده (کره و استوانه) است. روش جز مرزی از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است اما در این روش نیز تعداد نواحی با مقدار مقاومت ویژه متفاوت، محدود است (معمولاً کمتر از ۱۰ لایه). در بررسی‌های مهندسی و زیست‌محیطی می‌توان توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح را به صورت اختیاری در نظر گرفت. در نتیجه روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود تنها گزینه‌های کاربردی هستند. دو روش مذکور می‌توانند زیر سطح را به هزاران سلول با مقاومت ویژه‌های متفاوت تقسیم کنند [Loke, 2004].

- روش‌های عددی برای حل مسائل وارون

روش‌های عددی مختلفی برای حل مسائل وارون‌سازی توسعه یافته‌اند. از میان این روش‌ها، روش کمترین مربعات به دلیل سادگی ریاضی، از پرطرفدارترین روش‌ها می‌باشد. همچنین به دلیل به کارگیری این روش در الگوریتم نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش، به توضیح آن پرداخته می‌شود. شایان ذکر است؛ که مدل‌سازی عددی وارون خود به دو زیر شاخه هموار و پارامتری تقسیم می‌شود. در این پژوهش از روش مدل‌سازی وارون هموار استفاده شده است.

در فرآیند مدل‌سازی، ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز می‌باشد [Loke and Barker, 1996]. مدل اولیه در نرم‌افزار RES2DINV یک مدل همگن متناسب با داده‌های مشاهده‌ای است؛ به گونه‌ای که منجر به تغییرات شدید در مراحل تکرار نشود. پس از تخمین مدل اولیه، این مدل باید تصحیح شود؛ تا انطباق قابل قبولی با داده‌های برداشت‌شده صحرائی پیدا کند. برای این منظور، می‌توان از روش کمترین مربعات گوس- نیوتن^۱ و یا روش شبه‌نیوتن^۲ استفاده کرد.

^۱ Gauss- Newton

^۲ Quasi- Newton

روش کمترین مربعات گوس - نیوتن

یکی از روش‌های معمول برای حل مسائل غیرخطی، روش بهینه‌سازی گوس-نیوتن می‌باشد. این روش به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل وارون‌سازی از جمله در نرم‌افزار RES2DINV به کار می‌رود [Sasaki, 1992]. روش مدل‌سازی وارون کمترین مربعات گوس-نیوتن در سه مرحله انجام می‌شود. مرحله ابتدایی، شامل محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری برای مدل به کار گرفته شده می‌باشد. این مرحله با استفاده از روش تفاضل محدود یا روش اجزاء محدود انجام می‌شود. مرحله دوم، شامل محاسبه ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی می‌باشد و در نهایت مرحله سوم، حل سیستم معادلات خطی می‌باشد. این مراحل به‌صورت تناوبی تکرار می‌شوند تا هم‌خوانی مناسبی بین مدل فرض شده با مدل صحرایی ایجاد شود و یا برنامه به حداکثر تکرار تعریف شده خود برسد [Loke and Barker, 1996].

روش شبه‌نیوتن

در روش گوس-نیوتن، ماتریس ژاکوبین در هر مرحله تکرار محاسبه می‌شود، اما در روش شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره این ماتریس به‌وسیله استفاده از یک روش به‌روزرسانی اجتناب می‌شود. در واقع این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر این ماتریس برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد، مشتقات جزئی می‌توانند به‌طور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن به‌عنوان مدل اولیه، محاسبه شوند.

هرچند که روش شبه‌نیوتن روشی سریع‌تر از روش گوس-نیوتن است و حافظه کمتری از رایانه را اشغال می‌کند؛ اما مزیت استفاده از روش گوس-نیوتن، نزدیک بودن مدل ساخته شده به‌وسیله نرم‌افزار با مدل زمینی در همان تکرارهای اولیه می‌باشد [Loke and Barker, 1996]. در مدل‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش نیز، از روش گوس-نیوتن به‌منظور وارون‌سازی داده‌ها استفاده شده است.

۴-۳-۲ مدل سازی داده های صحرائی

در این پژوهش به منظور مدل سازی دوبعدی داده های برداشت شده از نرم افزارهای RES2DINV و ZondRes2D، و به منظور مدل سازی سه بعدی داده ها از نرم افزار RES3DINV استفاده شده است. در هر سه نرم افزار یک روش بهینه سازی وجود دارد؛ که از طریق تعدیل مقاومت ویژه بلوک های مدل، اختلاف بین مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسبه شده را کاهش می دهد. مقدار این اختلاف توسط ریشه میانگین مربعات^۱ (RMS) خطا بیان می شود. در ادامه توضیح مختصری از شیوه مدل سازی و برخی ویژگی های این نرم افزارها ارائه می گردد.

الف) نرم افزار RES2DINV

این نرم افزار یک برنامه رایانه ای ساده و کاربردی با امکانات متنوع برای مدل سازی وارون دوبعدی داده های مقاومت ویژه و IP است. در این نرم افزار مدل مورد استفاده به عنوان مدل اولیه، شامل یک سری بلوک های مستطیلی دوبعدی می باشد (شکل ۴-۹). در این مدل تعداد بلوک ها با تعداد نقاط داده ها در شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری برابر است؛ که به یک شیوه مشابه منظم شده اند. همچنین عمق مراکز بلوک ها در محاسبه عمق میانگین تحت بررسی برای بازه های الکترونی مختلف، مورد استفاده قرار گرفته اند [Loke and Barker, 1996]. عملیات مدل سازی در این نرم افزار بر اساس روش بهینه سازی کمترین مربعات خطا انجام می شود و در حین فرآیند مدل سازی، مقادیر مقاومت ویژه واقعی برای بلوک های مدل مشخص می شود. معادله این روش در رابطه (۴-۱۳) آورده شده است [Loke, 2004]:

$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g \quad (4-13)$$

در این رابطه λ فاکتور تعدیل، J ماتریس ژاکوبین، d بردار آشفتگی مدل و g بردار همگرایی می باشد؛

^۱ Root Mean Square

و F عبارت است از:

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (14-4)$$

در رابطه فوق f_x فیلتر هموارسازی افقی و f_z فیلتر هموارسازی عمودی می‌باشد. می‌توان فاکتور تعدیل و فیلترهای هموارسازی را برای انواع مختلف داده‌ها تنظیم نمود؛ که برای فاکتور تعدیل ابتدا یک مقدار بزرگ انتخاب می‌شود (λ_0)، و بعد از هر مرحله تکرار این مقدار کاهش می‌یابد تا به حد کمینه برسد (λ_m)؛ که معمولاً ۰/۱ مقدار اولیه است (رابطه ۴-۱۵).

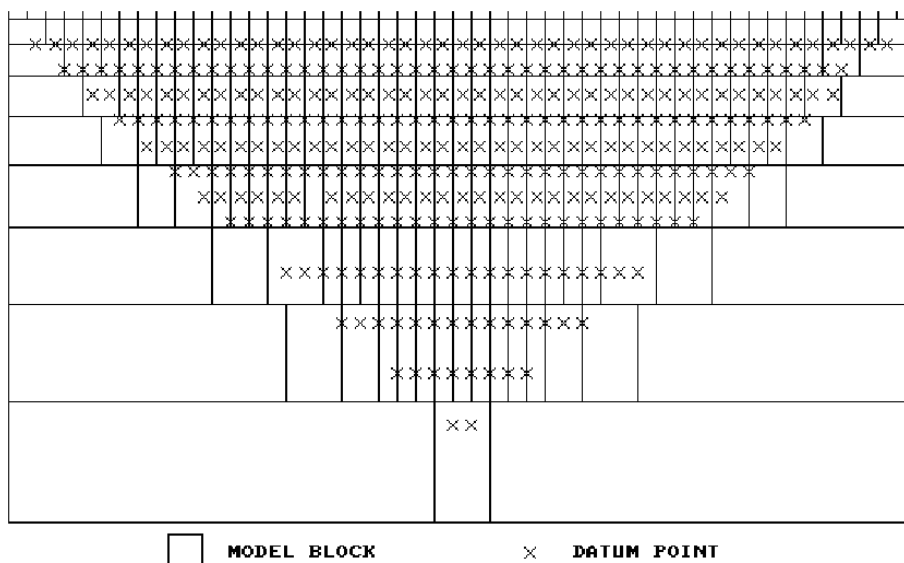
$$F = \lambda_m = 0.1\lambda_0 \quad (15-4)$$

مقدار λ_0 به سطح نوفه منطقه بستگی دارد. هرچه سطح نوفه بیشتر باشد، مقدار اولیه فاکتور تعدیل هم بیشتر است. روش بهینه‌سازی در این نرم‌افزار به‌طور اساسی سعی در کاهش اختلاف بین مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و محاسبه شده دارد؛ که این اختلاف توسط خطای RMS بیان می‌شود و برنامه در هر مرحله تکرار، خطای RMS را محاسبه می‌کند. مقدار خطای جذر میانگین مربعات توسط معادله زیر تعریف می‌شود (رابطه ۴-۱۶) [Zohdy, 1989]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_{0j} - \rho_{ej}}{\rho_{0j}} \right)^2}{N}} \times 100 \quad (16-4)$$

در این رابطه ρ_{0j} ، ژامین مقاومت‌ویژه مشاهده شده (اندازه‌گیری شده)، ρ_{ej} نیز ژامین مقاومت‌ویژه محاسبه شده و N تعداد داده‌ها است. قابل ذکر است که در تمامی حالت‌ها، مدلی با کمترین خطای RMS نزدیک‌ترین مدل به واقعیت نمی‌باشد و ممکن است تغییرات غیر واقعی و بزرگ از ویژگی فیزیکی مورد نظر نشان دهد و با ساختارهای زمین‌شناسی واقعی تفاوت زیادی داشته باشد. لذا مدلی باید انتخاب شود که در تکرارهای بعدی آن تفاوت چشم‌گیری در مقدار خطای RMS اتفاق نمی‌افتد [Loke, 2004].

ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS



شکل ۴-۹: مدل اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار RES2DINV [Loke, 2004].

در نرم‌افزار RES2DINV مدل‌سازی وارون با دو روش اجزاء محدود و تفاضل محدود برای داده‌های صحرائی قابل انجام است. روش اجزاء محدود برای زمین‌های دارای توپوگرافی، و روش تفاضل محدود برای زمین‌های بدون توپوگرافی استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به صورت هم‌زمان صورت می‌گیرد. داده‌های مقاومت‌ویژه و IP حاصل از به‌کارگیری آرایه‌های الکترودی و نر، شلومبرژه، قطبی-قطبی، دوقطبی-دوقطبی، دوقطبی و حتی آرایه‌های غیر متعارف در این نرم‌افزار قابل مدل‌سازی هستند. هدف از وارون‌سازی داده‌های برداشتی ارائه مدلی است؛ که دارای بیشترین تطابق با داده‌های صحرائی باشد. در حقیقت مدل به‌دست آمده بیانگر یک پاسخ ریاضی مطابق با ساختارهای زمین‌شناسی می‌باشد. در مراحل تکرار فرآیند وارون‌سازی، پارامترهای مدل آن قدر تغییر می‌کنند تا بیشترین تطابق بین پاسخ مدل ارائه شده و داده‌های صحرائی حاصل گردد. همچنین لازم است مدل به‌دست آمده با داده‌های زمین‌شناسی تطبیق داده شود؛ تا صحت آن از نظر زمین‌شناسی مورد تأیید قرار گیرد [Loke, 2004].

ب) نرم افزار ZondRes2D

این نرم افزار برای مدل سازی دو و نیم بعدی داده های برداشت شده با استفاده از روش تصویرنگاری الکتریکی طراحی شده است. منظور از مدل سازی دو و نیم بعدی، در نظر گرفتن ساختارهای زمین شناسی به صورت دوبعدی است؛ در حالی که چشمه میدان سه بعدی می باشد. در این نرم افزار، روش اجزاء محدود به عنوان یک ابزار ریاضی برای حل مسائل مستقیم استفاده می شود. همچنین وارون سازی با روش حداقل مربعات با قید نظم دهی انجام می شود. قید نظم دهی پایداری در حل مسئله را افزایش می دهد و امکان دستیابی به مقادیر مقاومت ویژه و توزیع پتانسیل هموارتر را فراهم می کند. این نرم افزار امکان مدل سازی به هر دو روش مستقیم و وارون برای داده های مقاومت ویژه و IP را دارد و از تمامی آرایه های الکترودی پشتیبانی می کند. از دیگر ویژگی های این نرم افزار می توان به قابلیت انجام تکرارهای نامحدود برای دستیابی به مدلی با خطای کمتر، امکان مدل سازی داده های IP حوزه زمانی و حوزه فرکانسی، کنترل کیفی داده های مقاومت ویژه و IP، حذف نوفه و ویرایش داده ها در صورت لزوم و امکان ورود اطلاعات کمکی از جمله اطلاعات زمین شناسی، حفاری و یا سایر روش های ژئوفیزیکی (به عنوان مثال، داده های مغناطیس سنجی و گرانی سنجی) به منظور اعتبارسنجی و تفسیر دقیق تر مدل های ژئوالکتریکی اشاره کرد [Kaminsky, 2012].

در این پژوهش، از نرم افزار ZondRes2D به منظور مقایسه نتایج مدل سازی با نرم افزار RES2DINV

و بررسی مجدد موضوع استفاده شده است.

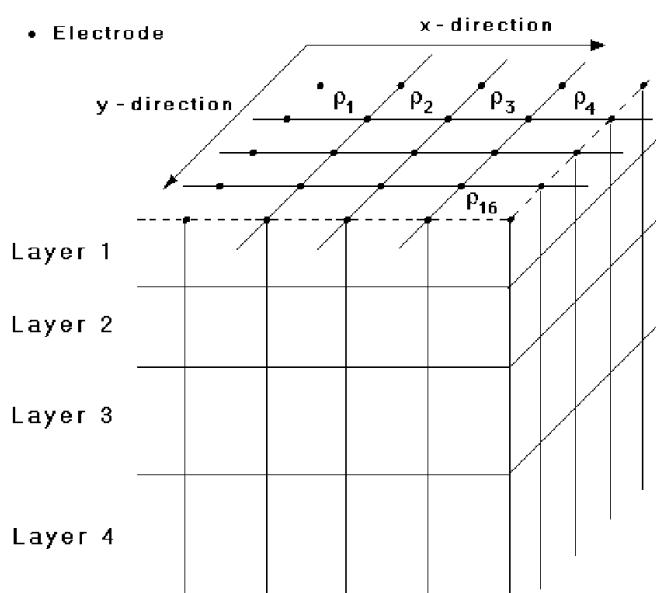
ج) نرم افزار RES3DINV

نرم افزار RES3DINV یک برنامه رایانه ای برای مدل سازی وارون سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP

است. در این نرم افزار برای حل مسئله وارون سازی، ساختار زیرسطحی مدل مورد نظر مطابق شکل

(۴-۱۰) به چندین لایه تقسیم بندی می شود؛ سپس هر لایه نیز به تعدادی بلوک های (سلول های) مکعب

مستطیل شکل، که هر یک از آن‌ها دارای مقاومت ویژه متفاوت اما مجهول هستند، تقسیم می‌شود. هر چه سلول‌ها به اجزای کوچک‌تری تقسیم شوند، تعداد پارامترهای مدل و زمان مورد نیاز برای وارون‌سازی به‌نحو چشم‌گیری افزایش می‌یابد. هدف از این مدل‌سازی وارون، تعیین مقاومت ویژه هر یک از سلول‌های مدل (مقاومت ویژه واقعی) به‌نحو است؛ که پاسخ مدل تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه داشته باشد [Loke, 2005].



شکل ۴-۱۰: نحوه لایه‌بندی و بلوک‌بندی مدل سه‌بعدی زیر سطح زمین در نرم‌افزار RES3DINV [Loke, 2005].

این نرم‌افزار در فرآیند مدل‌سازی از روش کمترین مربعات خطا استفاده می‌کند. معادله این روش

به‌صورت رابطه (۴-۱۷) بیان می‌شود [Loke, 2005]:

$$(J^T J + \lambda C^T C) \Delta p = J^T \Delta d \quad (۴-۱۷)$$

در این رابطه $C^T C$ به‌صورت رابطه (۴-۱۸) تعریف می‌شود:

$$C^T C = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (۴-۱۸)$$

که f_x و f_z به ترتیب فیلتر هموارسازی افقی و عمودی در مدل‌سازی هستند. این روش، سعی در کاهش اختلاف بین مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده دارد؛ که این اختلاف اندازه‌گیری‌شده، توسط خطای RMS بیان می‌شود. تصمیم‌گیری برای انتخاب مدلی با کمترین تغییرات در مقدار RMS، دقیقاً مشابه با شرایط مورد نظر در نرم‌افزار RES2DINV می‌باشد. محاسبات عددی در فرآیند مدل‌سازی نرم‌افزار RES3DINV از هر دو روش اجزاء محدود و تفاصل محدود قابل انجام است. همچنین برای انجام بهینه‌سازی می‌توان از روش گوس-نیوتن و یا شبه‌نیوتن استفاده کرد. استفاده از روش شبه‌نیوتن، ده مرتبه سریع‌تر از روش گوس-نیوتن است و حافظه کمتری از رایانه را برای انجام محاسبات به خود اختصاص می‌دهد؛ اما روش گوس-نیوتن دقیق‌تر است و به‌خصوص برای نواحی‌ای که اختلاف مقاومت‌ویژه بین آن‌ها زیاد است، جواب بهتری را ارائه می‌دهد. البته این برنامه قابلیت استفاده از روش گوس-نیوتن در دو یا سه تکرار اول و سپس استفاده از روش شبه‌نیوتن را نیز در اختیار کاربر قرار می‌دهد [Loke, 2005].

قابل ذکر است که مدل‌سازی‌های سه‌بعدی به دو صورت درونیابی داده‌های پروفیل‌های موازی، و وارون‌سازی داده‌های برداشت سه‌بعدی امکان‌پذیر می‌باشد [Zhou et al., 2001]. در این پژوهش از روش اول استفاده شده است و داده‌های پروفیل‌های دوبعدی موازی در تولید یک مجموعه داده سه‌بعدی مقاومت‌ویژه و IP به‌کار گرفته شده‌اند.

۳-۳-۴ پردازش داده‌ها

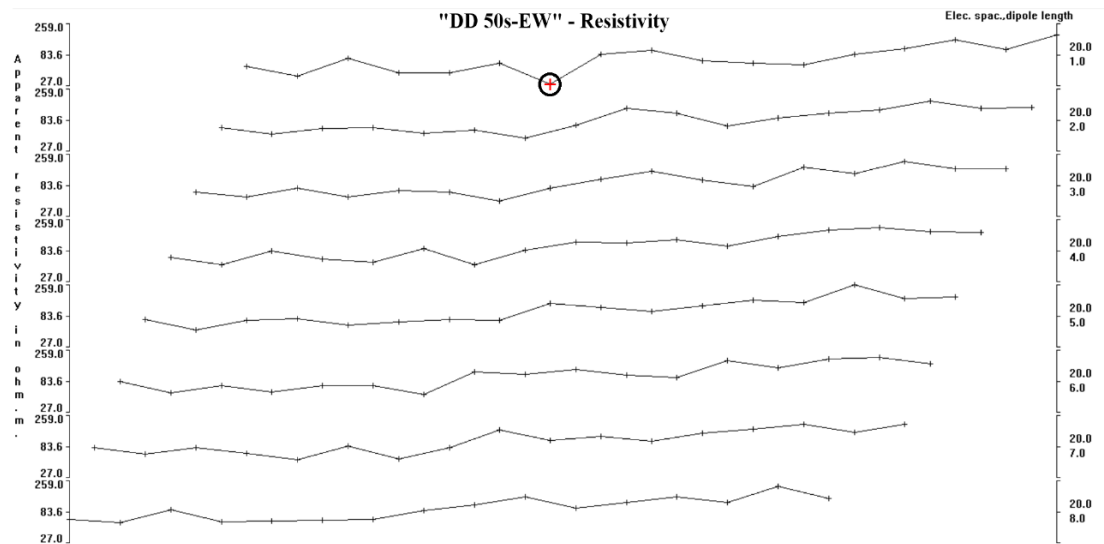
مرحله پردازش عمده‌تاً قبل از انجام فرآیند مدل‌سازی روی داده‌ها اعمال می‌شود؛ با این حال در مواردی بعد از انجام مدل‌سازی به‌منظور افزایش دقت مدل خروجی، لازم است پردازش‌هایی مانند حذف داده‌های حاوی نوفه تصادفی قابل توجه صورت گیرد.

در عملیات صحرایی انجام شده در منطقه مورد مطالعه، در مجموع ۱۶۳۹ نقطه اندازه‌گیری برای هر روش مقاومت‌ویژه و IP برداشت گردید؛ که از این تعداد ۵۵۳ نقطه با آرایه مستطیلی و ۱۰۸۶ نقطه با آرایه دوقطبی - دوقطبی اندازه‌گیری شده است. به‌منظور دستیابی به نتایج بهتر و مدلی واقعی‌تر، الزامی است؛ که داده‌های برداشت‌شده با هر دو آرایه مذکور، قبل و یا در حین انجام بررسی و مدل‌سازی مورد پردازش قرار گیرند. از آنجا که بررسی نتایج برداشت‌های مستطیلی با رسم نقشه‌های هم‌مقدار انجام می‌شود؛ لذا پردازش داده‌ها در این مرحله به بررسی داده‌های برداشت‌شده برای حذف داده‌های پرت، قبل از رسم نقشه‌های هم‌مقدار محدود می‌شود و مهم‌ترین پردازش داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در مرحله مدل‌سازی، شامل حذف نوفه‌ها و تعدیل اثر توپوگرافی می‌باشد.

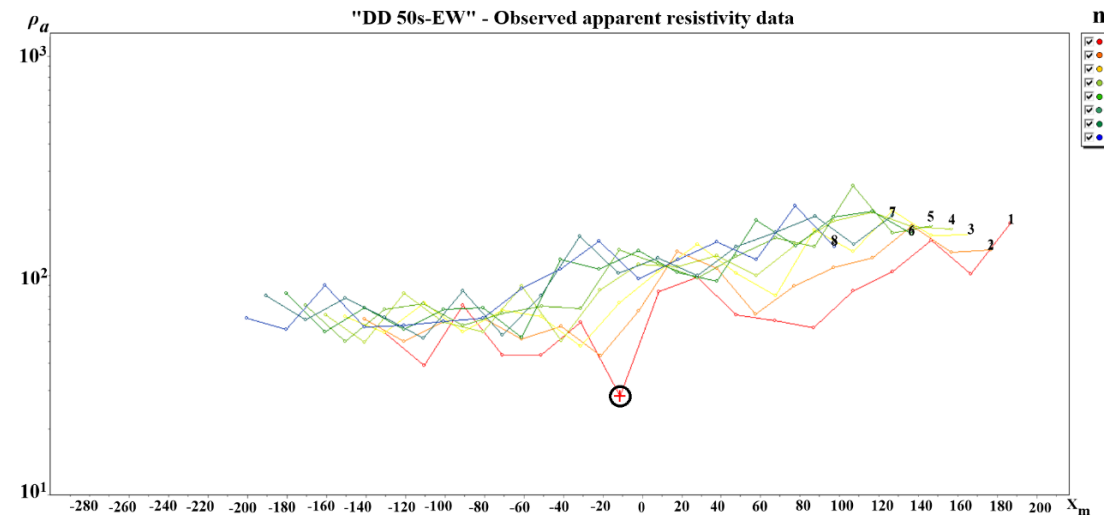
برای به‌دست آوردن یک مدل مناسب و نزدیک به واقعیت، داده‌های برداشت‌شده باید از کیفیت بالایی برخوردار باشند. در این میان نوفه‌ها سبب ایجاد تأثیر منفی بر روی کیفیت داده‌ها می‌شوند؛ که خود به دو دسته‌ی نوفه‌های سیستماتیک (دستگاهی) و نوفه‌های تصادفی تقسیم‌بندی می‌شوند. نوفه‌های دستگاهی معمولاً به‌دلیل مناسب نبودن برخی از پیکربندی‌ها (مشکلات دستگاهی) در طی انجام عملیات برداشت ایجاد می‌شوند. ایجاد این نوع از نوفه‌ها، می‌تواند ناشی از خرابی در کابل‌ها، اتصال ضعیف الکترودها با زمین، فراموش کردن اتصال گیره به الکترودها و غیره باشد. این نوفه‌ها معمولاً در تعداد محدودی از قرائت‌ها حضور دارند و به‌خوبی در مجموعه داده‌ها مشخص می‌شوند اما نوفه‌های تصادفی ایجاد شده، شامل اثرات ناشی از جریان‌های تلوریک می‌باشند و بر همه داده‌ها تأثیر می‌گذارند. این نوفه‌ها می‌توانند سبب این شوند که قرائت‌ها بالاتر یا پایین‌تر از مقادیر آن‌ها در هنگام عدم حضور نوفه باشند [Loke, 2013].

در نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش، امکان حذف و یا کاهش قابل ملاحظه هر دو نوع از نوفه‌ها فراهم شده است. بدین منظور، نوفه‌های دستگاهی را می‌توان قبل از شروع فرآیند مدل‌سازی

دوبعدی، به صورت دستی از مجموعه داده‌ها حذف و یا تغییرات آن‌ها را نسبت به داده‌های مجاور هموار کرد. در شکل (۴-۱۱- الف و ب) نحوه نمایش داده‌ها (به عنوان مثال داده‌های مقاومت ویژه در امتداد پروفیل DD 50s-EW) به منظور بررسی و حذف داده‌های حاوی نوفه دستگاهی در هر دو نرم افزار ZondRes2D و RES2DINV نشان داده شده است.



(الف)

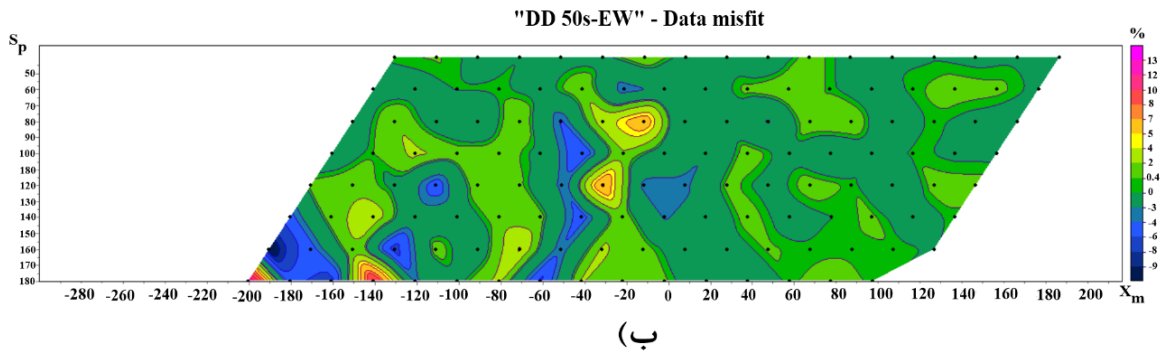
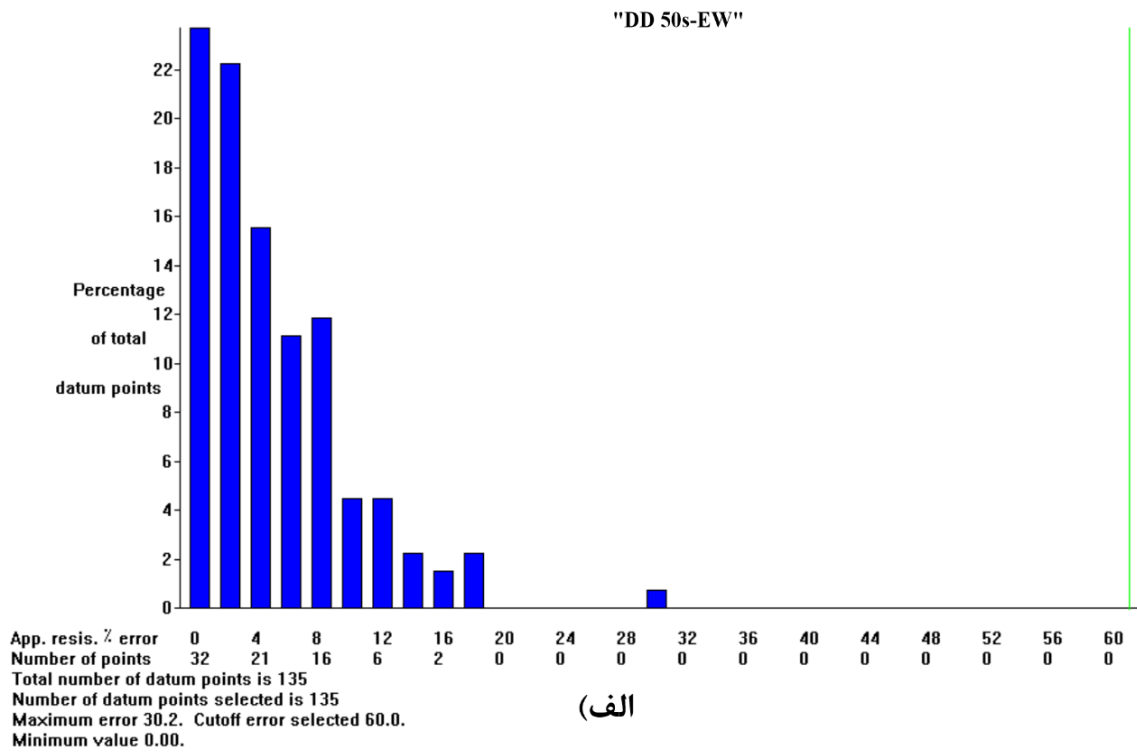


(ب)

شکل ۴-۱۱: نحوه نمایش داده‌های مقاومت ویژه (در امتداد پروفیل DD 50s-EW) به منظور حذف یا کاهش قابل ملاحظه نوفه‌های دستگاهی (الف) در نرم افزار RES2DINV و (ب) در نرم افزار ZondRes2D

همچنین داده‌های حاوی نوفه تصادفی را می‌توان پس از وارون‌سازی در نرم‌افزار RES2DINV به صورت نمودار میله‌ای و در نرم‌افزار ZondRes2D به صورت شبه‌مقطع با عنوان Data misfit نمایش داد. در واقع نمودار میله‌ای نمایانگر توزیع درصد اختلاف بین لگاریتم داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده می‌باشد و با اعمال محدوده مجاز برای پذیرش داده‌ها می‌توان داده‌های با درصد خطای قابل توجه را از سایر داده‌ها حذف کرد. به علاوه شبه‌مقطع Data misfit، برآورد همگرایی بین مقادیر مشاهده‌شده و محاسبه‌شده برای هر اندازه‌گیری است و بر حسب درصد بیان می‌شود. در این حالت نیز می‌توان داده‌هایی با درصد خطای بالا را از مجموعه داده‌ها حذف کرد [Loke, 2004; Kaminsky, 2012]. در شکل (۴-۱۲- الف و ب) نحوه نمایش داده‌ها (به عنوان مثال داده‌های مقاومت‌ویژه در امتداد پروفیل DD 50s-EW) به منظور بررسی و حذف داده‌های حاوی نوفه تصادفی در هر دو نرم‌افزار RES2DINV و ZondRes2D آورده شده است. همچنین حذف نوفه تصادفی پس از وارون‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار RES3DINV نیز مشابه با نرم‌افزار RES2DINV و از طریق بررسی نمودار میله‌ای امکان‌پذیر است. لازم به ذکر است که داده‌های برداشت‌شده در این عملیات، به دلیل استفاده از دستگاه‌ها و تجهیزات پیشرفته و مناسب و همچنین دقت کافی در امر برداشت، از کیفیت مطلوبی برخوردارند و در موارد اندکی نیاز به حذف داده‌های بد بود.

یکی دیگر از پردازش‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP، تعدیل اثر توپوگرافی می‌باشد. تأثیر این عامل بر روی داده‌های IP، به افزایش یا کاهش فاصله الکترودهای سطحی از منشأ بی‌هنجاری زیرسطحی محدود می‌شود؛ و عمدتاً تغییرات توپوگرافی بر روی اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه اثرگذار است. در نرم‌افزارهای مورد استفاده، گزینه‌های مختلفی برای وارد کردن داده‌های ایستگاه‌های دارای توپوگرافی وجود دارد. این نرم‌افزارها مدل‌سازی توپوگرافی را بر اساس روش اجزاء محدود انجام می‌دهند؛ که نسبت به روش تفاضل محدود دقت و کارایی بیشتری دارد [Loke, 2013].



شکل ۴-۱۲: نحوه نمایش داده‌های مقاومت‌ویژه (در امتداد پروفیل DD 50s-EW) به‌منظور حذف یا کاهش قابل ملاحظه نوفه‌های تصادفی الف) در نرم‌افزار RES2DINV و ب) در نرم‌افزار ZondRes2D

۴-۴ تفسیر نتایج برداشت‌های ژئوفیزیکی در منطقه مورد مطالعه

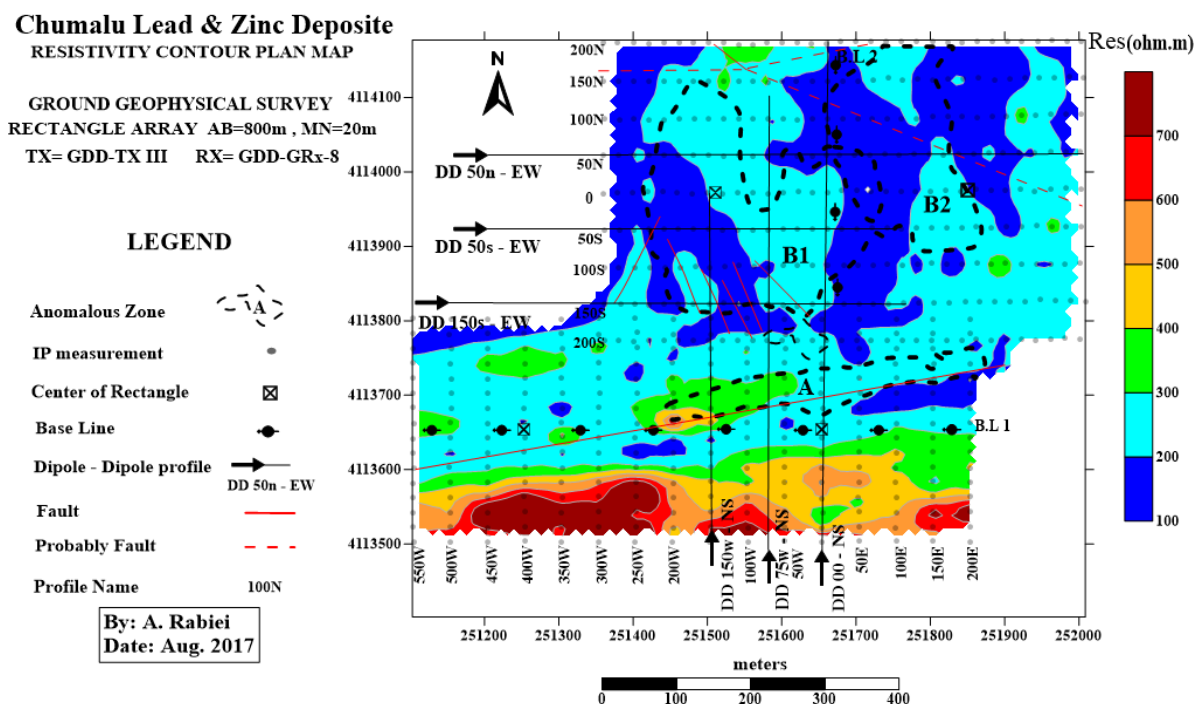
اطلاعات حاصل از به‌کارگیری هر روش ژئوفیزیکی باید به اطلاعات زمین‌شناسی برگردانده شود؛ و ارائه یک تفسیر کامل از یک‌طرف به تجربه کافی در مسائل ژئوفیزیک وابسته است و از طرف دیگر مستلزم دسترسی به اطلاعات جامعی از زمین‌شناسی منطقه می‌باشد [Reynolds, 2011]. تفسیر داده‌های برداشت‌شده در منطقه می‌تواند به‌صورت کیفی و کمی صورت گیرد. هرکدام از این تفسیرها بر اساس شرایط موجود در منطقه و روش برداشت داده‌ها به‌کار گرفته می‌شود. هدف از تفسیر کیفی، شرح وضعیت توزیع پارامترهای مورد بررسی در روش مورد استفاده می‌باشد؛ در حالی که در تفسیر کمی، لازم است تا مقادیر عددی این پارامترها به‌درستی تعیین شود [آریامنش و احمدی، ۱۳۹۱].

همان‌طور که در ابتدای فصل بیان شد، برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP ابتدا در قالب ۴ شبکه با استفاده از آرایه مستطیلی و سپس در قالب ۶ پروفیل با استفاده از آرایه دوقطبی - دوقطبی انجام شد. در این نوشتار، ابتدا به تفسیر کیفی نقشه‌های هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری حاصل از برداشت آرایه مستطیلی می‌پردازیم؛ این نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Surfer 13 تهیه شدند. سپس تفسیر کمی مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون برای برداشت داده‌ها با آرایه دوقطبی - دوقطبی ارائه خواهند شد. مدل‌سازی وارون دوبعدی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به‌همراه توپوگرافی، با استفاده از نرم‌افزارهای RES2DINV و ZondRes2D برای شش پروفیل مذکور صورت گرفت. داده‌های خام صحرایی پس از ورود به نرم‌افزار و انجام تصحیحات اولیه مورد نیاز از جمله حذف داده‌های پرت، با روش وارون‌سازی کمترین مربعات خطا، مدل‌سازی شده و نتایج حاصله به‌صورت مقاطع دوبعدی ارائه می‌شوند. قابل ذکر است که در تمام مدل‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار RES2DINV، به‌دلیل تغییرات شدید مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری در نزدیکی سطح، به‌منظور دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر، از شبکه‌بندی با نصف فاصله الکترودی (۱۰ متر) استفاده شده است. نتایج مطالعات ژئوفیزیکی در منطقه با نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی

ترکیب شدند و تفسیر مربوط به هر پروفیل بر اساس نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی و اطلاعات به‌دست آمده از ترانشه‌ها، شواهد معدنکاری و رخنمون‌های سطحی مشاهده‌شده طی پیمایش‌های صحرائی ارائه می‌گردد. همچنین مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP برای هر دسته از پروفیل‌های موازی (۳ پروفیل شمالی - جنوبی و ۳ پروفیل شرقی - غربی)، به‌روش کمترین مربعات خطا با استفاده از نرم‌افزار RES3DINV انجام شد و نتایج حاصله در ادامه آورده خواهند شد.

۴-۱-۴ تفسیر نقشه‌های هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری

برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به‌منظور تعیین تغییرات جانبی و گسترش سطحی محدوده‌های بی‌هنجار، با استفاده از آرایه مستطیلی انجام شد. نتایج حاصل از برداشت داده‌ها به‌صورت نقشه‌های هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری رسم شده است (شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴).










شکل ۴-۱۳: نقشه هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری حاصل از برداشت با آرایه مستطیلی در محدوده مورد مطالعه به‌همراه موقعیت پروفیل‌های برداشت.

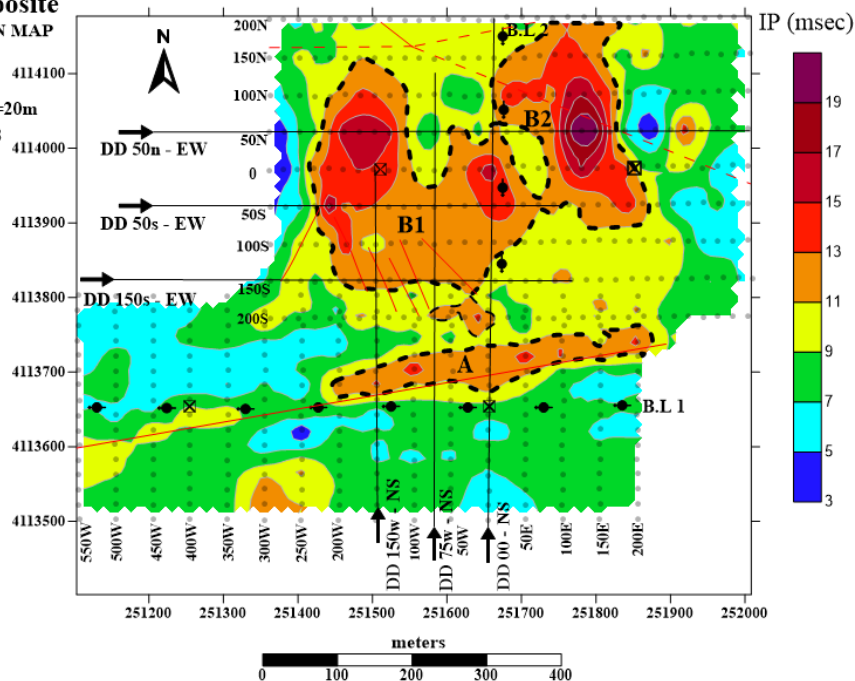
Chumalu Lead & Zinc Deposit CHARGEABILITY CONTOUR PLAN MAP

GROUND GEOPHYSICAL SURVEY 4114100
RECTANGLE ARRAY AB=800m , MN=20m
TX= GDD-TX III RX= GDD-GRx-8

LEGEND

- Anomalous Zone 
- IP measurement 
- Center of Rectangle 
- Base Line 
- Dipole - Dipole profile  DD 50n - EW
- Fault 
- Probably Fault 
- Profile Name 100N

By: A. Rabiei
Date: Aug. 2017



شکل ۴-۱۴: نقشه هم‌مقدار بارپذیری حاصل از برداشت با آرایه مستطیلی در محدوده مورد مطالعه به‌همراه موقعیت پروفیل‌های برداشت.

در نقشه هم‌مقدار بارپذیری، حداکثر شدت بارپذیری اندازه‌گیری‌شده در منطقه ۲۲ میلی‌ثانیه، و حداقل شدت اندازه‌گیری‌شده برابر ۳ میلی‌ثانیه است؛ که بر روی نهشته‌های آبرفتی جوان و فاقد کانه‌زایی قرار دارد (شکل ۴-۱۴). همچنین بر اساس نقشه هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری، تغییرات مقاومت‌ویژه بین ۸۵ اهم‌متر تا ۱۲۹۰ اهم‌متر است؛ که بیشترین مقادیر مربوط به بخش‌های جنوبی منطقه و بر روی توده نفوذی کوارتز مونزونیتی می‌باشد (شکل ۴-۱۳).

با توجه به نقشه هم‌مقدار بارپذیری (شکل ۴-۱۴)، بی‌هنجاری‌های منطقه را می‌توان به دو زون B و A تقسیم کرد. زون B که در شمال منطقه قرار دارد و دارای روند شمالی- جنوبی است، خود به دو بخش B2 با بیشترین مقدار بارپذیری بین پروفیل‌های 200N تا 100S شرقی- غربی و B1 بین پروفیل‌های 150N تا 150S شرقی- غربی تقسیم می‌شود. بر اساس انطباق نقشه زمین‌شناسی و نقشه هم‌مقدار

بارپذیری، قسمت‌های غربی زون B بر روی نهشته‌های اولیوین بازالتی منطبق است؛ که این نهشته‌ها میزبان رگه‌های کانهدار بوده و شواهد و آثار کانی‌سازی و معدنکاری در این قسمت مشاهده می‌شود. به‌علاوه با توجه به قرارگیری کامل قسمت‌های شرقی زون B بر روی آبرفت (شکل ۴-۳)، به احتمال قوی نهشته‌های اولیوین بازالت در این منطقه به‌وسیله رسوبات عهد حاضر پوشیده شده‌اند و بی‌هنجاری زون B را در زیر آبرفت ایجاد می‌کنند. همچنین زون A در جنوب زون B و در مرکز منطقه بین پروفیل‌های 200E تا 200W شمالی- جنوبی، با یک روند شرقی- غربی تا شمال‌شرق- جنوب‌غرب قرار گرفته است. از نظر شدت بارپذیری، این زون نسبت به زون B اهمیت کمتری دارد و گستردگی آن نیز از زون B کمتر است. در نقشه زمین‌شناسی این زون انطباق خوبی با زون سیلیسی- برشی داشته و منطبق بر سیستم گسلی اصلی در منطقه با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی است. در نقشه هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری، بی‌هنجاری B دارای مقاومت‌ویژه پایین تا متوسط و بی‌هنجاری A دارای مقاومت‌ویژه متوسط است (شکل ۴-۱۳).

در نهایت پس از بررسی نقشه‌های هم‌مقدار بارپذیری و مقاومت‌ویژه ظاهری و تعیین محدوده‌های بی‌هنجار، برای بررسی عمقی بی‌هنجاری‌ها، ۶ پروفیل با آرایش دوقطبی- دوقطبی (۳ پروفیل شمالی- جنوبی و ۳ پروفیل شرقی- غربی) با فواصل الکتروودی ۲۰ متر بر روی بی‌هنجاری‌های منطقه برداشت شد. موقعیت این پروفیل‌ها بر روی نقشه‌های هم‌مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری و بارپذیری (شکل‌های ۴-۱۳) و (۴-۱۴) آورده شده است. در ادامه به بررسی نتایج این برداشت‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۴-۲ تفسیر نتایج حاصل از مدل سازی وارون دوبعدی داده های برداشت شده

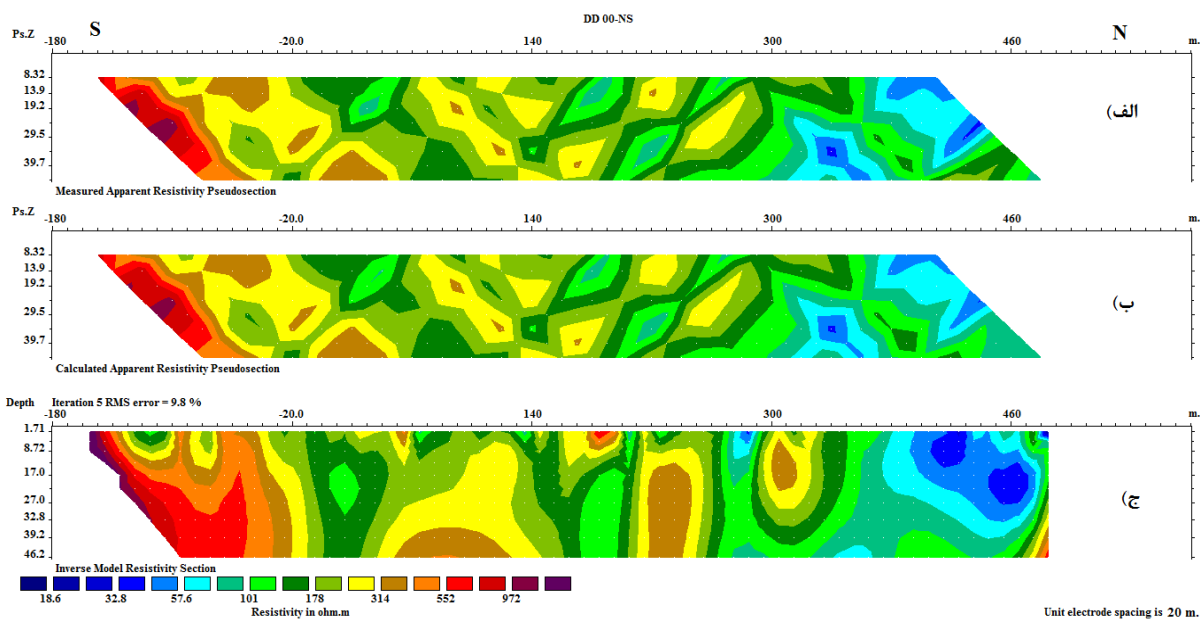
به منظور بررسی عمقی کانی سازی های احتمالی در منطقه، برداشت داده های مقاومت ویژه و IP در امتداد ۶ پروفیل بر روی محدوده های بی هنجار، با استفاده از آرایه دوقطبی - دوقطبی صورت گرفت. سپس تجزیه و تحلیل داده های خام صحرایی با استفاده از مدل سازی وارون دوبعدی داده ها به کمک نرم افزارهای RES2DINV و ZondRes2D انجام شد و تفسیر مربوط به هر پروفیل بر اساس نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و زمین شناسی صورت گرفت. در ادامه به شرح این تفسیرها می پردازیم.

الف) پروفیل DD 00-NS

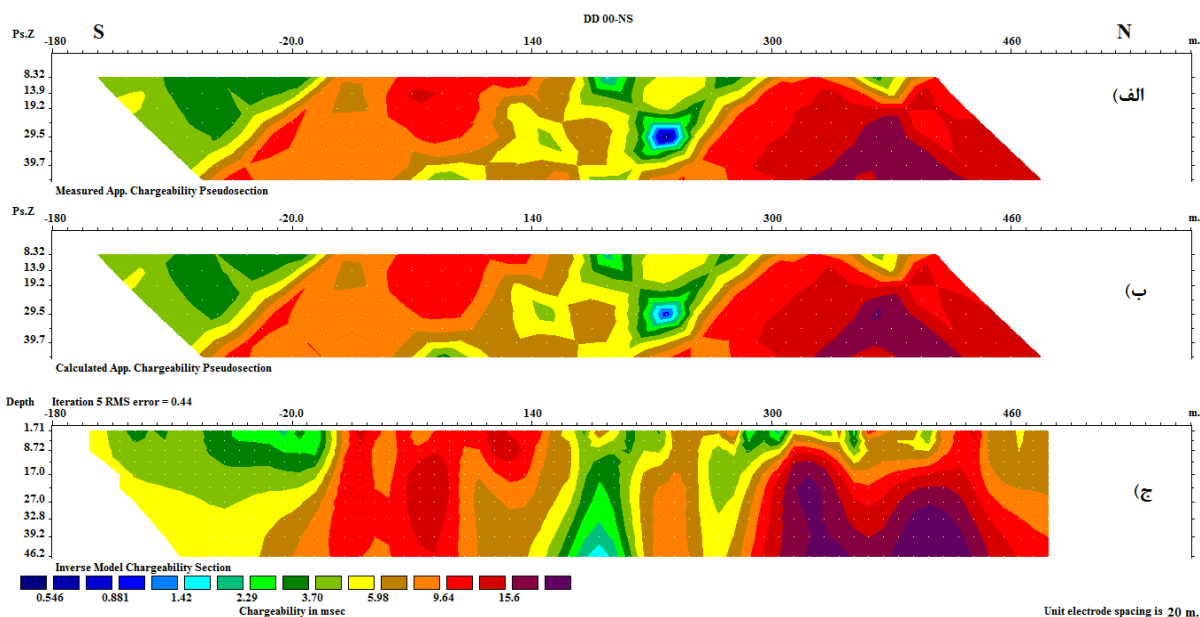
- تفسیر مدل های حاصل از نرم افزار RES2DINV

پروفیل DD 00-NS با طول ۷۶۰ متر، اولین پروفیل برداشت شده در منطقه چومالو می باشد؛ که به منظور بررسی عمقی نواحی بی هنجار شناسایی شده در برداشت های مستطیلی، هر دو بی هنجاری A و B را در امتداد شمالی - جنوبی پوشش می دهد (شکل ۴-۱۴). فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۲۳۲ نقطه که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی ثانیه اندازه گیری شده است. شکل های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به ترتیب شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از مدل سازی وارون مربوط به پروفیل DD 00-NS را نشان می دهند. قابل ذکر است؛ که برای پروفیل های بعدی به دلیل رعایت اختصار از نشان دادن شبه مقاطع صرف نظر شده است. همچنین مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از مدل سازی وارون این پروفیل به همراه توپوگرافی در شکل (۴-۱۷) آورده شده است. خطای RMS ناشی از مدل سازی داده های این خط برداشت با تعداد ۵ مرحله تکرار در نرم افزار RES2DINV، برای مدل مقاومت ویژه الکتریکی برابر ۹/۸ درصد و برای مدل IP برابر ۰/۴۴ درصد است. دلیل اصلی خطای RMS بیشتر برای مدل مقاومت ویژه تغییرات زیاد مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده در طول پروفیل DD 00-NS، و خطای RMS کمتر

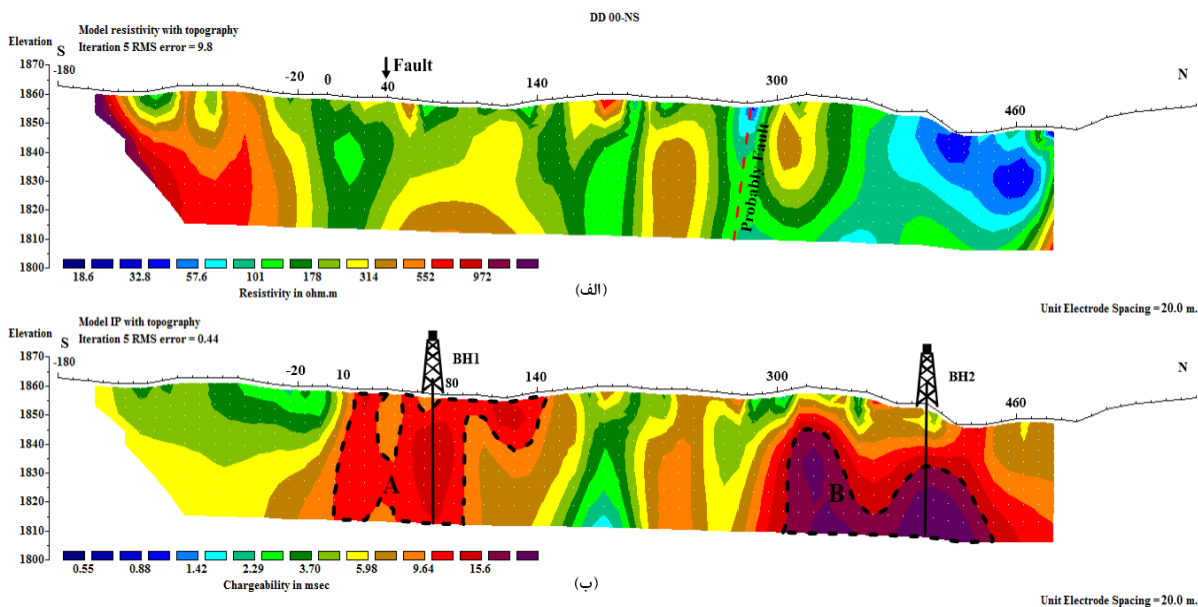
برای مدل IP به علت تغییرات کمتر بارپذیری اندازه‌گیری شده در طول این پروفیل می‌باشد.



شکل ۴-۱۵: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD 00-NS؛ (الف) شبه‌مقطع داده‌های اندازه‌گیری شده، (ب) شبه‌مقطع داده‌های محاسبه‌شده، (ج) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون.



شکل ۴-۱۶: شبه‌مقاطع و مقطع دوبعدی IP حاصل از مدل‌سازی وارون در طول پروفیل DD 00-NS؛ (الف) شبه‌مقطع داده‌های اندازه‌گیری شده، (ب) شبه‌مقطع داده‌های محاسبه‌شده، (ج) مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون.



شکل ۴-۱۷: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 00-NS حاصل از نرم‌افزار RES2DINV.

بر اساس نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های IP، دو زون A و B به‌عنوان نواحی احتمالی بی‌هنجار مشخص شده‌اند (شکل ۴-۱۷-ب). گسترش جانبی بی‌هنجاری A با بارپذیری بیش از ۱۰ میلی‌ثانیه، از ایستگاه ۵ تا ۱۴۵ شمالی است؛ که از سطح زمین تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری در مرکز این زون در عمق حدود ۲۰ متری در زیر ایستگاه ۷۰ شمالی به ۱۵ میلی‌ثانیه می‌رسد. از دیدگاه سنگ‌شناسی و بر اساس پیمایش‌های صحرایی در امتداد این پروفیل، این بی‌هنجاری منطبق بر زون سیلیسی-برشی کانه‌دار در منطقه می‌باشد؛ که وجود قطعات کانی‌سازی در دیواره و کف ترانشه حفرشده در فاصله حدود ۱۰ متری در سمت غرب ایستگاه ۷۰ شمالی، می‌تواند تأییدی بر حضور این بی‌هنجاری در سطح باشد. همچنین در فاصله حدود ۷۰ متری در سمت شرق ایستگاه ۷۰ شمالی شواهدی از معدنکاری قدیمی مشاهده شد؛ که احتمال می‌رود زون سیلیسی-برشی در فاصله‌ی بین ترانشه حفرشده و شواهد معدنکاری به‌صورت پیوسته می‌باشد. در مدل مقاومت ویژه (شکل ۴-۱۷-الف)، این زون منطبق بر مناطقی با مقاومت ویژه متوسط (تا حدود ۵۰۰ اهم‌متر) بوده که می‌تواند ناشی از

ماهیت زون سیلیسی- برشی واقع در این قسمت و وجود دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک باشد. احتمالاً در این زون عیار و گستردگی ماده معدنی به اندازه‌ای نبوده که پاسخ مقاومت‌ویژه را به صورت مؤثری کاهش دهد؛ و کانی‌سازی بیشتر به حالت سولفیدی پراکنده انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه، بیشترین مقادیر مقاومت‌ویژه (تا حدود ۱۹۰۰ اهم‌متر) مرتبط با توده نفوذی کوارتز مونزونیتی است؛ که بی‌هنجاری بالای مقاومت‌ویژه را در سمت چپ این مدل در فاصله ایستگاه ۵۰ تا ۱۵۵ جنوبی ایجاد کرده است (شکل ۴-۱۷-الف). همچنین با توجه به انطباق موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه و محل قرارگیری پروفیل DD 00-NS بر روی این نقشه (شکل ۴-۳)، یک گسل در نزدیکی ایستگاه ۴۰ شمالی وجود دارد؛ که تا حدودی در مدل مقاومت‌ویژه نمایان شده است. به‌علاوه یک گسل احتمالی نیز بر اساس نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در امتداد این پروفیل شناسایی شده است؛ که می‌تواند مرتبط با کانی‌سازی در منطقه باشد. محل این گسل بر روی مدل مقاومت‌ویژه مشخص شده است (شکل ۴-۱۷-الف).

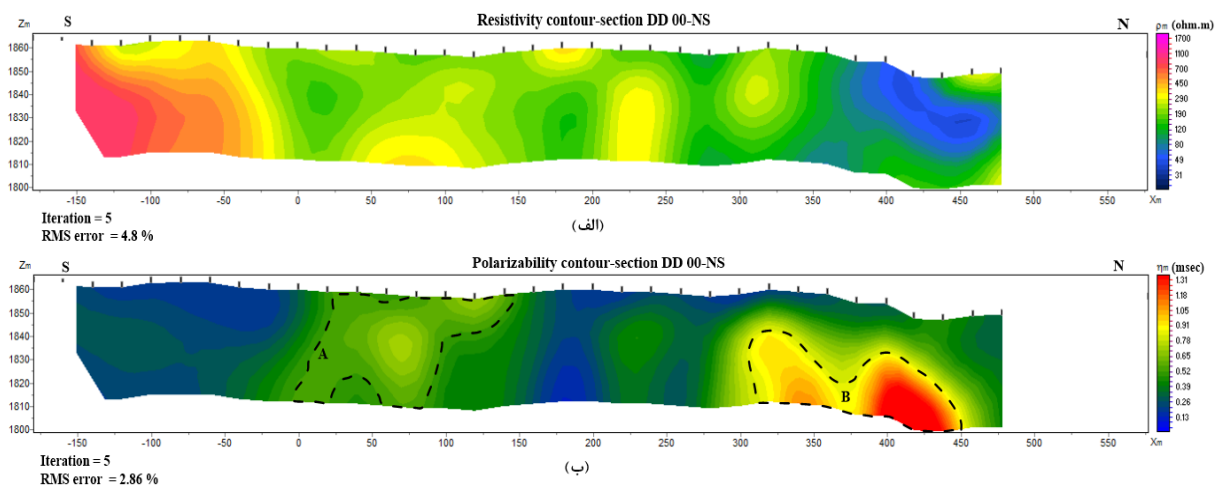
گسترش جانبی بی‌هنجاری B با بارپذیری بیش از ۱۵ میلی‌ثانیه، از ایستگاه ۳۱۰ تا ۴۴۵ شمالی می‌باشد؛ که از عمق حدود ۱۲ متر در زیر ایستگاه ۳۲۰ شمالی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد (شکل ۴-۱۷-ب). بیشترین مقدار بارپذیری در زیر ایستگاه ۴۰۰ شمالی و در عمق حدود ۴۵ متری از سطح زمین به ۲۸ میلی‌ثانیه می‌رسد. از نظر سنگ‌شناسی و بر اساس پیمایش‌های صحرایی در امتداد این پروفیل، این بی‌هنجاری در واحد اولیوین بازالت قرار دارد. این واحد در امتداد این پروفیل، عمدتاً به‌وسیله رسوبات عهد حاضر پوشیده شده است. بی‌هنجاری B در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۱۷-الف) دارای مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین (حدود ۶۰ تا ۳۵۰ اهم‌متر) بوده که می‌تواند ناشی از کانی‌سازی فلزی در شکستگی‌های نهشته‌های اولیوین بازالتی و وجود دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک باشد. در مقام مقایسه برای بی‌هنجاری B نسبت به بی‌هنجاری A، احتمال می‌رود کانی‌سازی فلزی در ارتباط با بی‌هنجاری B با

عیار بالاتر، به صورت رگه‌ای و حضور سولفیدهای توده‌ای صورت گرفته است. به علاوه کاهش مقاومت ویژه در بخش‌های نزدیک به سطح زمین در این قسمت، می‌تواند به علت وجود دگرسانی‌های موجود در منطقه باشد؛ اگرچه وجود یک لایه آبرفت با مقاومت ویژه کم و آبدار بر روی این بخش‌ها نیز می‌تواند باعث کاهش مقاومت ویژه شود.

با توجه به باز بودن هر دو زون بی‌هنجار A و B در جهت افزایش عمق و قرارگیری هر دو بی‌هنجاری در کنار گسل، احتمال گسترش این زون‌ها در اعماق بیش از ۴۶ متر نیز وجود دارد.

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D

شکل (۴-۱۸)، مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه و IP در نرم‌افزار ZondRes2D را نمایش می‌دهد. در شکل (۴-۱۸-ب) زون‌های مشخص شده‌ی A و B به عنوان مناطق احتمالی کانی‌زایی در نظر گرفته شده‌اند؛ که این زون‌ها از لحاظ گستردگی، عمق و مکان جای‌گیری انطباق نسبتاً خوبی با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار RES2DINV نشان می‌دهند (شکل ۴-۱۷-ب).



شکل ۴-۱۸: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 00-NS حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D.

بیشترین مقدار بارپذیری برای زون A در مرکز آن در زیر ایستگاه ۷۰ شمالی می‌باشد و این زون در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۱۸-الف) منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط است. همچنین بیشترین مقدار بارپذیری برای زون B مربوط به عمق بیش از ۴۵ متری در زیر ایستگاه ۴۰۰ شمالی است؛ که این زون در مدل مقاومت‌ویژه منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین می‌باشد. مدل مقاومت‌ویژه نیز برای این پروفیل انطباق نسبتاً خوبی با مدل مقاومت‌ویژه حاصل از نرم‌افزار RES2DINV دارد (شکل ۴-۱۷-الف). شایان ذکر است؛ که مدل‌سازی در نرم‌افزار ZondRes2D با هموارسازی بیشتری نسبت به نرم‌افزار RES2DINV انجام می‌شود. به‌علاوه در اینجا به دلیل این که نرم‌افزار RES2DINV جواب بهتری برای مدل‌سازی داده‌ها ارائه داده است، بیشتر بر نتایج این نرم‌افزار تأکید شده و از نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار ZondRes2D به‌منظور مقایسه نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار RES2DINV و بررسی مجدد موضوع استفاده شده است.

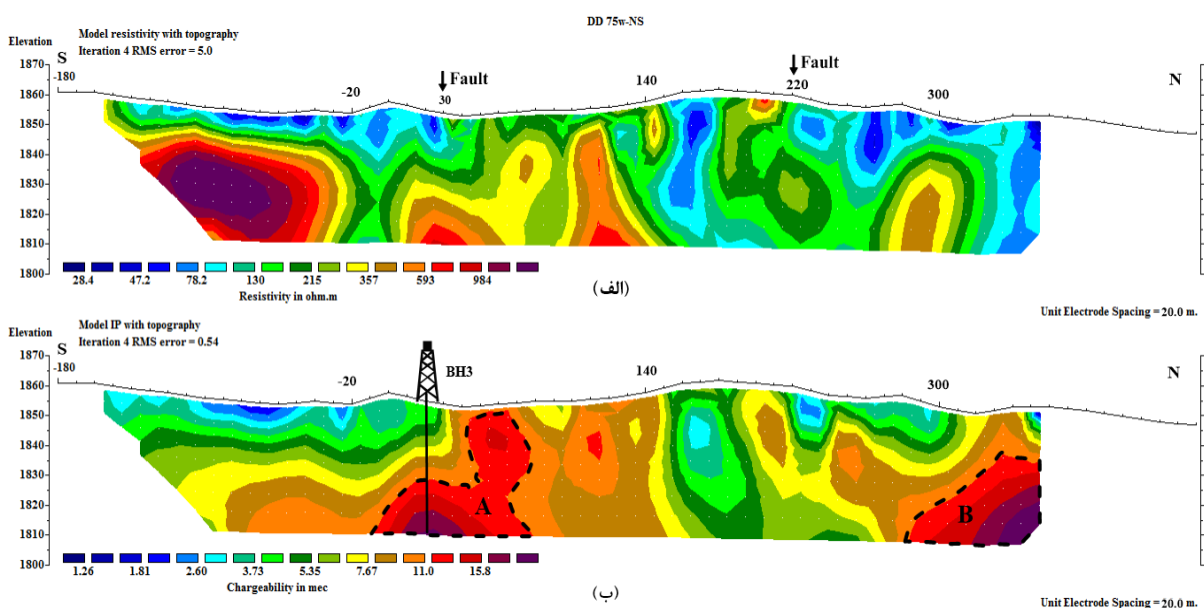
با توجه به تفسیرهای فوق و نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌ها با نرم‌افزارهای مذکور، و همچنین ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی و مطالعات زمین‌شناسی، دو نقطه حفاری به‌منظور بررسی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌های احتمالی A و B پیشنهاد می‌گردد (شکل ۴-۱۷-ب).

ب) پروفیل DD 75w-NS

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار RES2DINV

پروفیل DD 75w-NS با طول ۶۲۰ متر و امتداد شمالی-جنوبی، در فاصله ۷۵ متری غرب پروفیل DD 00-NS و به‌موازات آن برداشت شده است. هدف از طراحی و برداشت این پروفیل، بررسی عمقی نواحی بی‌هنجار A و B شناسایی شده در برداشت‌های مستطیلی بوده است؛ که موقعیت این پروفیل نسبت به بی‌هنجاری‌های فوق در شکل (۴-۱۴) نمایش داده شده است. فاصله نقاط برداشت در امتداد این

پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۱۸۳ نقطه می‌شود؛ که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری بر حسب اهم‌متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شده است. شکل (۴-۱۹) مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از مدل‌سازی وارون برای این پروفیل به‌همراه توپوگرافی را نمایش می‌دهد. خطای RMS ناشی از مدل‌سازی داده‌های این خط برداشت با تعداد ۴ مرحله تکرار در نرم‌افزار RES2DINV، برای مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی برابر ۵ درصد و برای مدل IP برابر ۰/۵۴ درصد است.



شکل ۴-۱۹: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به‌همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 75w-NS حاصل از نرم‌افزار RES2DINV.

با توجه به شکل (۴-۱۹ ب)، دو زون A و B با بارپذیری بیش از ۱۱ میلی‌ثانیه به‌عنوان نواحی احتمالی بی‌هنجار در امتداد این پروفیل مشاهده می‌شوند. بی‌هنجاری A با گسترش جانبی از ایستگاه ۱۰ جنوبی تا ۸۰ شمالی، از عمق حدود ۴ متری در نزدیکی سطح زمین در حوالی ایستگاه ۶۰ شمالی تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون مربوط به عمق حدود ۴۵ متری در زیر ایستگاه ۲۰ شمالی است؛ که به ۱۸ میلی‌ثانیه می‌رسد. از دیدگاه سنگ‌شناسی، این بی‌هنجاری منطبق بر

زون سیلیسی- برشی کانه‌دار در منطقه است. در پیمایش‌های صحرایی در امتداد این پروفیل، رخنمون این زون و همچنین قطعات سیلیسی حاوی کانی‌های گالن و مالاکیت در فاصله حدود ۱۵ متری در سمت غرب ایستگاه ۳۰ شمالی مشاهده شد؛ که احتمال وجود بی‌هنجاری عمقی A را افزایش می‌دهد. در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۱۹- الف) نیز این زون دارای مقاومت‌ویژه متوسط (تا حدود ۶۰۰ اهم‌متر) بوده که می‌تواند ناشی از ماهیت زون سیلیسی- برشی و وجود دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک در این قسمت باشد. احتمالاً عیار و گستردگی ماده معدنی در این زون به اندازه‌ای نبوده که پاسخ مقاومت‌ویژه را به‌صورت مؤثری کاهش دهد؛ و کانی‌سازی بیشتر به حالت سولفیدی پراکنده صورت گرفته است. با توجه به نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در طول دو پروفیل DD 00-NS و DD 75w-NS، احتمالاً این بی‌هنجاری ادامه‌ی بی‌هنجاری A در پروفیل DD 00-NS (شکل ۴-۱۷- ب) به سمت غرب است؛ همچنین بر اساس شواهد زمین‌شناسی احتمال می‌رود که این بی‌هنجاری در فاصله‌ی بین دو پروفیل DD 00-NS و DD 75w-NS به‌صورت پیوسته باشد.

با توجه به شکل (۴-۱۹- الف) مقادیر بالای مقاومت‌ویژه (تا حدود ۱۷۵۰ اهم‌متر) در سمت چپ مدل مقاومت‌ویژه، می‌تواند مرتبط با توده نفوذی کوارتز مونزونیتی در جنوب این پروفیل باشد. همچنین قابل ذکر است؛ که پایین بودن مقادیر مقاومت‌ویژه در مناطق سطحی سمت چپ پروفیل احتمالاً ناشی از وجود یک لایه‌ی آبرفت با مقاومت‌ویژه کم و آبدار بر روی این بخش‌ها است. البته مقادیر پایین مقاومت‌ویژه در این بخش و به‌ویژه در بخش‌های سمت راست پروفیل علاوه بر وجود یک لایه آبرفت، احتمالاً به‌دلیل وجود دگرسانی‌های موجود در منطقه و همچنین وجود درز و شکستگی‌های مرتبط با کانی‌سازی نیز می‌باشد. همچنین با توجه به انطباق موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه و محل قرارگیری پروفیل DD 75w-NS بر روی این نقشه (شکل ۴-۳)، یک گسل در نزدیکی ایستگاه ۳۰ شمالی و یک گسل در نزدیکی ایستگاه ۲۲۰ شمالی وجود دارد؛ که تا حدودی در

مدل مقاومت ویژه نمایان شده‌اند و می‌توانند مرتبط با کانی‌سازی در منطقه باشند. با توجه به قرارگیری زون بی‌هنجار A در کنار گسل و باز بودن این زون در جهت افزایش عمق، احتمال گسترش این بی‌هنجاری در اعماق بیش از ۴۶ متر نیز وجود دارد.

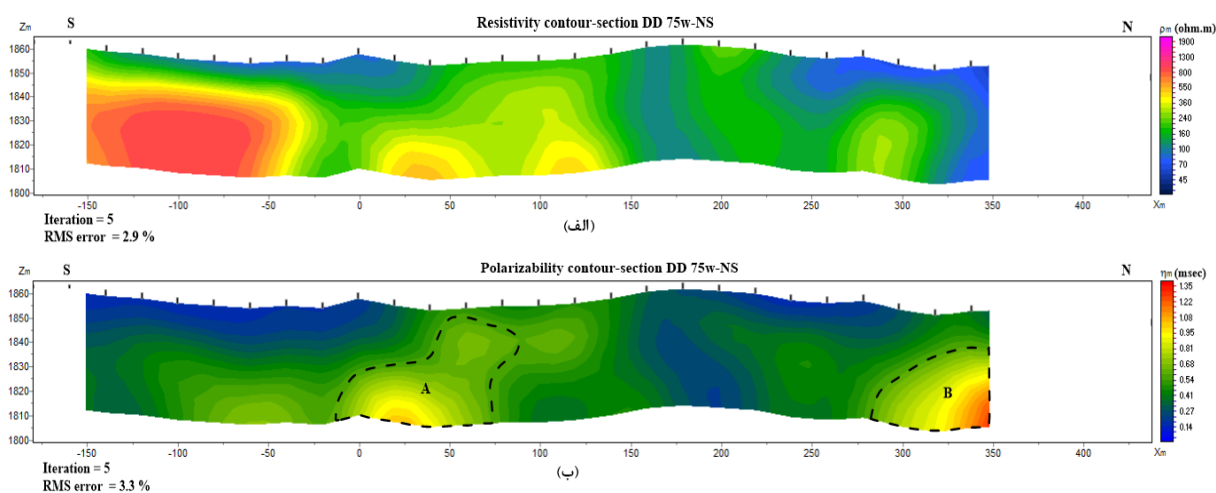
بی‌هنجاری احتمالی B برای پروفیل DD 75w-NS در فاصله ایستگاه ۲۸۰ شمالی تا انتهای پروفیل واقع شده است. این بی‌هنجاری از عمق ۱۷ متری در زیر ایستگاه ۳۴۰ شمالی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد (شکل ۴-۱۹-ب). زون بی‌هنجار B در جهت عمق و افزایش فاصله به سمت شمال همچنان ادامه دارد؛ که به دلیل محدود بودن طول پروفیل قابل پیگیری نیست. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون در زیر ایستگاه ۳۴۰ شمالی و در عمق حدود ۴۵ متری به ۲۲ میلی‌ثانیه می‌رسد. از دیدگاه سنگ‌شناسی، این بی‌هنجاری در واحد اولیوین بازالت قرار دارد و در مدل مقاومت ویژه (شکل ۴-۱۹-الف) دارای مقاومت ویژه متوسط تا پایین (حدود ۷۰ تا ۴۰۰ اهم‌متر) است؛ که می‌تواند متعلق به کانی‌سازی فلزی متراکم در درز و شکاف نهشته‌های اولیوین بازالتی و وجود دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک باشد. بر اساس پیمایش‌های صحرائی در امتداد این پروفیل، شواهدی از کانی‌سازی رگه‌ای با ضخامت کم، حاوی کانی‌های گالن، اسفالریت و سروزیت و در ارتباط با درز و شکستگی نهشته‌های بازالتی، در دیواره ترانشه حفرشده در نزدیکی ایستگاه ۲۲۰ شمالی مشاهده شد. بر این اساس و با توجه به گسل خوردگی واحد بازالتی در این قسمت، می‌توان حضور کانی‌سازی در بی‌هنجاری عمقی B را انتظار داشت. بر اساس نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و IP در طول دو پروفیل DD 00-NS و DD 75w-NS، احتمال می‌رود که این زون بی‌هنجار با قسمت جنوبی بی‌هنجاری B در پروفیل DD 00-NS (شکل ۴-۱۷-ب) مرتبط باشد و احتمال پیوستگی این بی‌هنجاری در فاصله‌ی بین دو پروفیل مذکور وجود دارد.

در مقام مقایسه برای بی‌هنجاری B نسبت به بی‌هنجاری A و همچنین بر اساس شواهد زمین‌شناسی، احتمال می‌رود کانی‌سازی در بی‌هنجاری B با عیار بیشتر، به صورت رگه‌ای و حضور سولفیدهای توده‌ای

صورت گرفته است. همچنین با توجه باز بودن بی‌هنجاری B در جهت افزایش عمق، احتمال گسترش این بی‌هنجاری در اعماق بیش از ۴۶ متر نیز وجود دارد.

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D

شکل (۴-۲۰)، مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در نرم‌افزار ZondRes2D را نمایش می‌دهد. زون‌های مشخص شده‌ی A و B در شکل (۴-۲۰ ب) به‌عنوان بی‌هنجاری‌های احتمالی در نظر گرفته شده‌اند. این زون‌ها از لحاظ گستردگی، عمق و مکان جای‌گیری انطباق نسبتاً خوبی با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار RES2DINV نشان می‌دهند (شکل ۴-۱۹ ب). بیشترین مقدار بارپذیری برای بی‌هنجاری A مربوط به عمق حدود ۴۷ متری در زیر ایستگاه ۲۰ شمالی می‌باشد؛ که این زون در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۰ الف) منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط است. بیشترین مقدار بارپذیری برای زون B نیز مربوط به عمق حدود ۴۷ متری در زیر ایستگاه ۳۴۰ شمالی است و این زون در مدل مقاومت‌ویژه منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین می‌باشد. مدل مقاومت‌ویژه نیز برای این پروفیل انطباق نسبتاً خوبی با مدل مقاومت‌ویژه حاصل از نرم‌افزار RES2DINV دارد (شکل ۴-۱۹ الف).



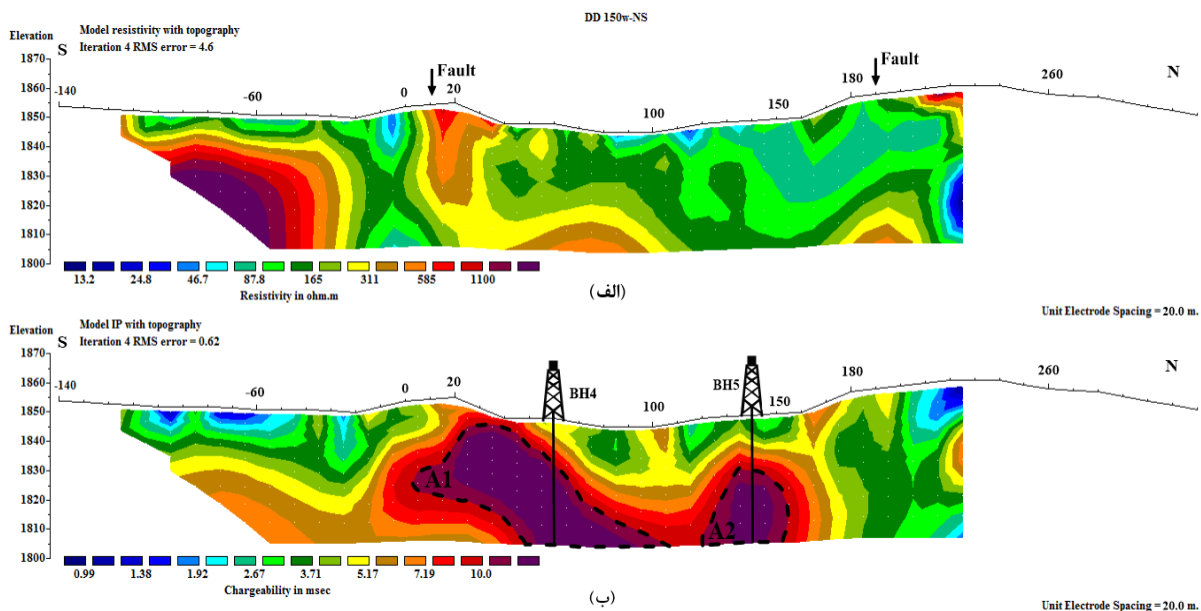
شکل ۴-۲۰: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 75w-NS حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D.

با توجه به تفسیرهای فوق و نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌ها با نرم‌افزارهای مذکور، و همچنین ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی و مطالعات زمین‌شناسی، یک نقطه حفاری به‌منظور بررسی دقیق‌تر بی‌هنجاری احتمالی A پیشنهاد می‌گردد (شکل ۴-۱۹-ب). همچنین نقطه حفاری پیشنهادی برای بررسی بی‌هنجاری احتمالی B، بر اساس نتایج برداشت در امتداد پروفیل دیگری که این بی‌هنجاری را در امتداد شرقی- غربی مورد بررسی قرار می‌دهد، در ادامه ارائه خواهد شد. به‌علاوه برای بررسی دقیق بی‌هنجاری A با توجه به قرارگیری این بی‌هنجاری در نزدیکی سطح زمین، می‌توان در محل حضور این بی‌هنجاری یک ترانسه پیشنهاد کرد.

ج) پروفیل DD 150w-NS

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار RES2DINV

پروفیل DD 150w-NS با طول ۴۶۰ متر و امتداد شمالی- جنوبی، به‌موازات پروفیل DD 75w-NS و در فاصله ۷۵ متری غرب آن برداشت شده است. هدف از طراحی و برداشت این پروفیل، بررسی عمقی ناحیه بی‌هنجار شناسایی‌شده‌ی A در برداشت‌های مستطیلی بوده است؛ که موقعیت این پروفیل نسبت به بی‌هنجاری فوق در شکل (۴-۱۴) نمایش داده شده است. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۱۱۲ نقطه که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری بر حسب اهم‌متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شده است. شکل (۴-۲۱) مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از مدل‌سازی وارون برای این پروفیل به‌همراه توپوگرافی را نمایش می‌دهد. خطای RMS ناشی از مدل‌سازی داده‌های این خط برداشت با تعداد ۴ مرحله تکرار در نرم‌افزار RES2DINV، برای مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی برابر ۴/۶ درصد و برای مدل IP برابر ۰/۶۲ درصد است.



شکل ۴-۲۱: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها؛ (الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و (ب) مدل IP به همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 150w-NS حاصل از نرم افزار RES2DINV.

بر اساس نتایج مدل سازی داده‌های IP، دو زون A1 و A2 با بارپذیری بیش از ۱۰ میلی ثانیه به عنوان نواحی احتمالی بی‌هنجار بر روی پروفیل DD 150w-NS مشخص شده‌اند (شکل ۴-۲۱-ب). بی‌هنجاری احتمالی A1 در فاصله ایستگاه ۰ تا ۱۰۵ شمالی قرار دارد؛ که از عمق حدود ۶ متری در زیر ایستگاه ۴۰ شمالی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این بی‌هنجاری مربوط به عمق حدود ۳۹ متری در زیر ایستگاه ۶۰ شمالی است؛ که به ۱۴ میلی ثانیه می‌رسد. همچنین گسترش جانبی بی‌هنجاری احتمالی A2 از ایستگاه ۱۲۰ تا ۱۵۰ شمالی می‌باشد؛ که از عمق حدود ۲۰ متری در زیر ایستگاه ۱۴۰ شمالی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این بی‌هنجاری در زیر ایستگاه ۱۴۰ شمالی و در عمق حدود ۳۲ متری از سطح زمین به ۱۳ میلی ثانیه می‌رسد. در مدل مقاومت ویژه (شکل ۴-۲۱-الف)، هر دو زون بی‌هنجار منطبق بر مناطقی با مقاومت ویژه متوسط می‌باشند؛ که از نظر سنگ‌شناسی می‌تواند ناشی از ماهیت زون سیلیسی-برشی واقع در این قسمت و وجود دگرسانی سیلیسی-آرژلیک باشد. رخنمون این زون و قطعات سیلیسی

حاوی کانی‌های گالن، مالاکیت و سروریت در دیواره ترانشه حفر شده در فاصله ایستگاه ۱۰ تا ۲۰ شمالی در پیمایش‌های صحرائی مشاهده شد؛ که احتمال وجود بی‌هنجاری عمقی در این قسمت را افزایش می‌دهد. احتمال می‌رود که کانی‌سازی در ارتباط با این بی‌هنجاری‌ها نیز بیشتر به حالت پراکنده صورت گرفته باشد و عیار و گستردگی ماده معدنی به اندازه‌ای نبوده که پاسخ مقاومت‌ویژه را به صورت مؤثری کاهش دهد. بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در طول این پروفیل و مقایسه آن‌ها با نتایج مدل‌سازی برای دو پروفیل DD 00-NS و DD 75w-NS (شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۹)، احتمال می‌رود دو زون بی‌هنجار A1 و A2 ادامه‌ی زون بی‌هنجار A در دو پروفیل قبلی باشند؛ که به سمت غرب محدوده گسترش یافته و احتمالاً بی‌هنجاری فوق (A) در فاصله‌ی این سه پروفیل به صورت پیوسته می‌باشد. قابل ذکر است نتایج مشاهدات صحرائی و شواهد زمین‌شناسی، پیوستگی زون سیلیسی-برشی کانه‌دار با یک روند تقریبی شرقی-غربی را تا حد بالایی نشان می‌دهد؛ هرچند به دلیل پوشش منطقه با زمین‌های کشاورزی، این زون در صحرا به طور کامل قابل پیگیری نمی‌باشد.

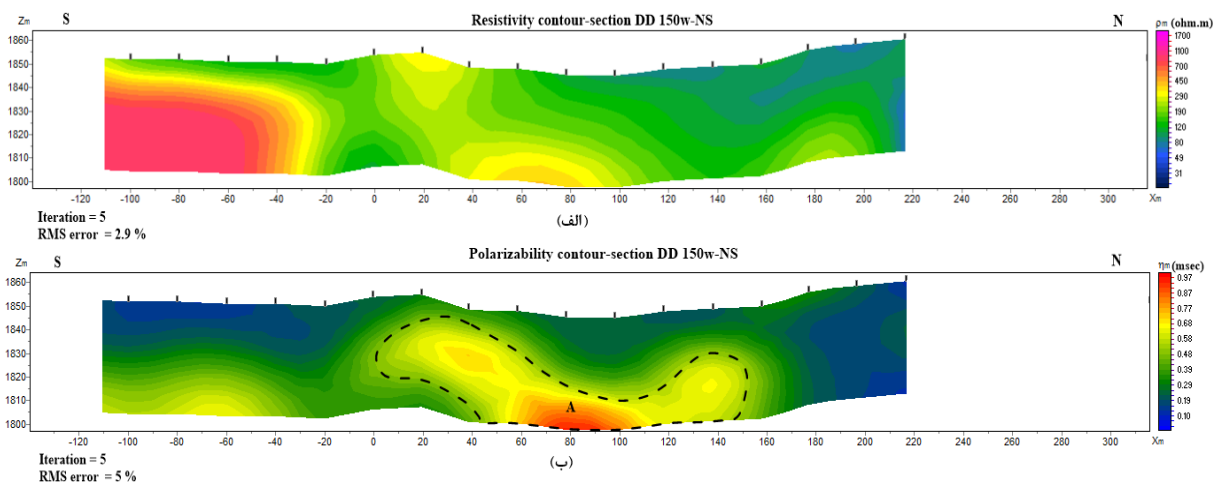
با توجه به انطباق موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه و محل قرارگیری پروفیل DD 150w-NS بر روی این نقشه (شکل ۴-۳)، دو گسل در نقشه زمین‌شناسی منطقه در طول این پروفیل وجود دارد؛ که می‌تواند با کانی‌سازی مرتبط باشند و تا حدودی در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۱-الف) نمایان شده‌اند. البته تعیین محل دقیق این گسل‌ها بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد و محل این گسل‌ها بر روی ایستگاه‌های برداشت در طول این پروفیل، بر اساس محل قرارگیری آن‌ها در نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص شده است. همچنین مقادیر بالای مقاومت‌ویژه (تا حدود ۱۸۵۰ اهم‌متر) در سمت چپ مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۱-الف)، می‌تواند مرتبط با توده نفوذی کوارتز مونزونیتی در جنوب منطقه باشد. به علاوه پایین بودن مقادیر مقاومت‌ویژه در برخی از مناطق سطحی احتمالاً به دلیل وجود یک لایه‌ی آبرفت با مقاومت‌ویژه

کم و آبدار در این مناطق است؛ هرچند که درز و شکستگی‌ها و دگرسانی‌های موجود در منطقه نیز می‌تواند باعث کاهش مقادیر مقاومت‌ویژه گردد.

با توجه به قرارگیری زون بی‌هنجار A1 در کنار گسل و شیب این بی‌هنجاری به سمت شمال پروفیل (به سمت بی‌هنجاری A2)، و همچنین با توجه به باز بودن هر دو زون بی‌هنجار A1 و A2 در جهت افزایش عمق، احتمال پیوستگی دو زون مذکور و گسترش این زون‌ها در اعماق بیش از ۴۶ متر وجود دارد.

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D

شکل (۴-۲۲)، مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در نرم‌افزار ZondRes2D را نمایش می‌دهد. در شکل (۴-۲۲-ب) زون A به‌عنوان بی‌هنجاری احتمالی در نظر گرفته شده است. این زون منطبق بر دو زون A1 و A2 در شکل (۴-۲۱-ب) می‌باشد؛ که از لحاظ گستردگی، عمق و مکان جای‌گیری انطباق نسبتاً خوبی با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار RES2DINV نشان می‌دهد (شکل ۴-۲۱-ب). مدل IP حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D احتمال پیوستگی دو زون بی‌هنجار A1 و A2



شکل ۴-۲۲: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 150w-NS حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D.

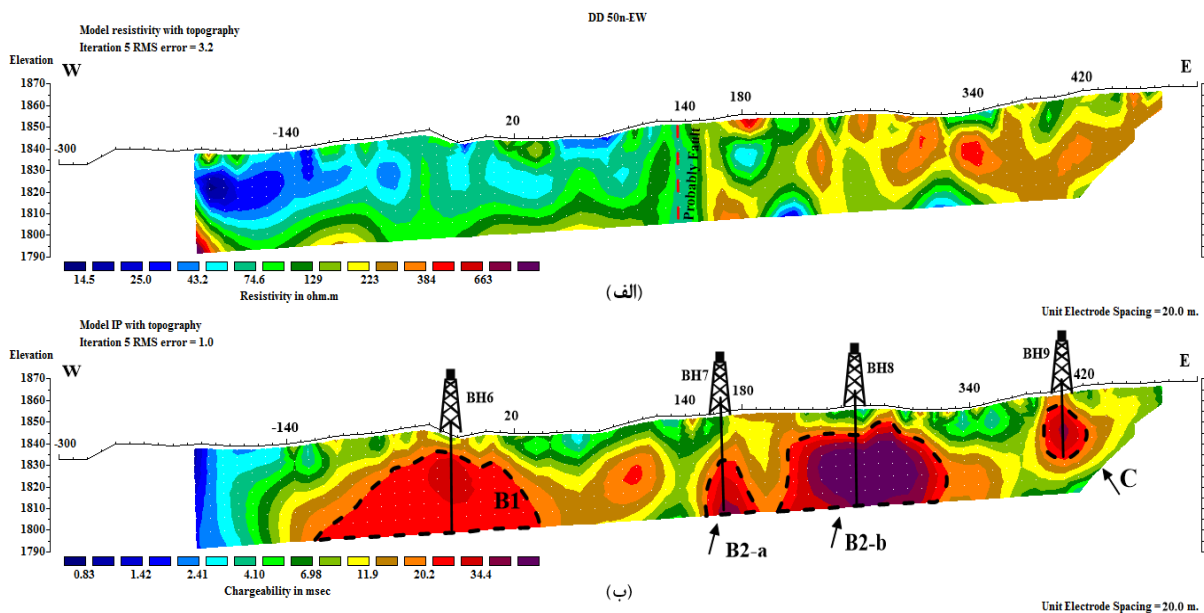
و گسترش این زون‌ها در اعماق بیشتر را، قوی‌تر به تصویر کشیده است. بیشترین مقادیر بارپذیری برای زون A مربوط به عمق بیش از ۴۰ متری و در فاصله‌ی ایستگاه‌های ۶۰ تا ۱۰۰ شمالی می‌باشد. این زون در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۲- الف) منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط است. مدل مقاومت‌ویژه نیز برای این پروفیل انطباق نسبتاً خوبی با مدل مقاومت‌ویژه حاصل از نرم‌افزار RES2DINV نشان می‌دهد (شکل ۴-۲۱- الف).

با توجه به تفسیرهای فوق و نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌ها با نرم‌افزارهای مذکور، و همچنین ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی و مطالعات زمین‌شناسی، دو نقطه حفاری به‌منظور بررسی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌های احتمالی A1 و A2 پیشنهاد می‌گردد (شکل ۴-۲۱- ب).

د) پروفیل DD 50n-EW

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار RES2DINV

پروفیل DD 50n-EW با طول ۸۰۰ متر و امتداد شرقی- غربی، شمالی‌ترین پروفیل برداشت‌شده در منطقه می‌باشد. هدف از طراحی و برداشت این پروفیل، بررسی عمقی نواحی بی‌هنجار شمالی (B1 و B2) شناسایی‌شده در برداشت‌های مستطیلی بوده است؛ که موقعیت این پروفیل نسبت به بی‌هنجاری‌های فوق در شکل (۴-۱۴) نمایش داده شده است. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۲۴۸ نقطه که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری بر حسب اهم‌متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شده است. شکل (۴-۲۳) مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از مدل‌سازی وارون برای این پروفیل به‌همراه توپوگرافی را نمایش می‌دهد. خطای RMS ناشی از مدل‌سازی داده‌های این خط برداشت با تعداد ۵ مرحله تکرار در نرم‌افزار RES2DINV، برای مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی برابر ۳/۲ درصد و برای مدل IP برابر ۱ درصد است.



شکل ۴-۲۳: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها؛ (الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و (ب) مدل IP به همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 50n-EW حاصل از نرم افزار RES2DINV.

با توجه به شکل (۴-۲۳-ب)، چهار زون B1، B2-a، B2-b و C با بارپذیری بیش از ۲۰ میلی ثانیه به عنوان بی‌هنجاری‌های احتمالی بر روی پروفیل DD 50n-EW مشخص شده‌اند. بی‌هنجاری احتمالی اول (B1) در فاصله ایستگاه ۱۲۰ غربی تا ۳۵ شرقی قرار دارد؛ که از عمق حدود ۱۰ متر در زیر ایستگاه ۳۰ غربی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون مربوط به عمق حدود ۱۷ متری در زیر ایستگاه ۲۵ غربی است؛ که به ۳۳ میلی ثانیه می‌رسد. از دیدگاه سنگ‌شناسی و بر اساس پیمایش‌های صحرایی در امتداد پروفیل، این بی‌هنجاری در واحد اولیوین بازالت قرار دارد؛ که این واحد در امتداد این پروفیل عمدتاً به وسیله رسوبات عهد حاضر پوشیده شده است. مقدار تغییرات مقاومت ویژه در محل حضور بی‌هنجاری B1 حدود ۴۰ تا ۲۵۰ اهم متر می‌باشد (شکل ۴-۲۳-الف)؛ که می‌تواند ناشی از گسل خوردگی و خردشدگی بالای سنگ میزبان بازالتی، تشکیل رگه‌های کانی‌سازی فلزی در درز و شکاف‌های موجود، حضور سولفیدهای توده‌ای و وجود دگرسانی سیلیسی-آرژلیک در این قسمت باشد.

بی‌هنجاری احتمالی دوم (B2-a) با گسترش جانبی از ایستگاه ۱۵۵ تا ۱۹۰ شرقی، از عمق حدود ۲۲ متر در زیر ایستگاه ۱۷۰ شرقی شروع و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون در زیر ایستگاه ۱۶۵ شرقی و در عمق حدود ۴۵ متری از سطح زمین به ۴۰ میلی‌ثانیه می‌رسد. با توجه به موقعیت قرارگیری دو پروفیل DD 50n-EW و DD 00-NS نسبت به یکدیگر (شکل ۴-۱۴)، این بی‌هنجاری منطبق بر بی‌هنجاری B در انتهای پروفیل DD 00-NS است (شکل ۴-۱۷-ب)؛ که در این پروفیل، گسترش جانبی آن در راستای شرقی- غربی در مقطع مدل IP شناسایی شده است.

بی‌هنجاری احتمالی سوم (B2-b) در فاصله ایستگاه ۲۱۰ تا ۳۲۰ شرقی قرار دارد؛ که از عمق حدود ۸ متر در زیر ایستگاه ۲۸۰ شرقی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر گسترش دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون در عمق حدود ۳۳ متری در زیر ایستگاه ۲۶۰ شرقی به ۶۶ میلی‌ثانیه می‌رسد.

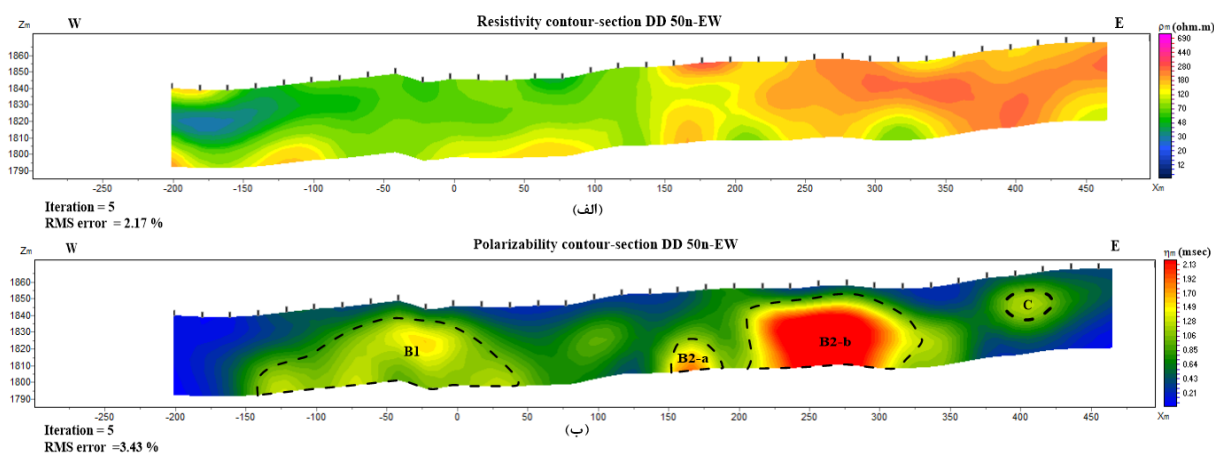
بی‌هنجاری احتمالی C کوچک‌ترین بی‌هنجاری از نظر گسترش بر روی پروفیل DD 50n-EW می‌باشد. این بی‌هنجاری در فاصله ایستگاه ۳۹۰ تا ۴۲۰ شرقی واقع شده است؛ که از عمق حدود ۶ متر در زیر ایستگاه ۴۰۵ شرقی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۳۰ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون مربوط به عمق حدود ۱۷ متری در زیر ایستگاه ۴۰۵ شرقی است؛ که به ۳۸ میلی‌ثانیه می‌رسد. در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۳-الف)، هر سه زون B2-a، B2-b و C منطبق بر مناطقی با مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین (حدود ۵۰ تا ۳۵۰ اهم‌متر) می‌باشند؛ که می‌تواند متعلق به کانی‌سازی فلزی سولفیدی در شکستگی‌های نهشته‌های اولیوین بازالتی و وجود دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک باشد. قابل ذکر است؛ که مقادیر پایین‌تر مقاومت‌ویژه برای بی‌هنجاری غربی (B1) نسبت به بی‌هنجاری‌های B2-a، B2-b و C، احتمالاً به دلیل گسل خوردگی و خردشدگی بیشتر سنگ میزبان در این قسمت، گسترش بیشتر دگرسانی سیلیسی- آرژیلیک و وجود یک لایه آبرفت با مقاومت‌ویژه کم و آبدار بر روی این بخش‌ها است. همچنین با توجه به مقطع مدل IP در امتداد این پروفیل (شکل ۴-۲۳-ب) و نتایج مطالعات زمین‌شناسی مبنی بر وجود پیریت

در نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه، احتمال می‌رود که مقادیر بالای بارپذیری برای بی‌هنجاری‌های مشخص شده بر روی این پروفیل، به‌ویژه مناطق مرکزی بی‌هنجاری B2-b به علت حضور پیریت باشد.

بر اساس نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۳- الف)، یک گسل احتمالی در حوالی ایستگاه ۱۳۵ شرقی قابل تشخیص است؛ که محل آن بر روی مدل مقاومت‌ویژه مشخص شده است و می‌تواند مرتبط با کانی‌سازی باشد. با توجه به باز بودن زون‌های بی‌هنجار B1، B2-a و B2-b در جهت افزایش عمق و همچنین قرارگیری زون بی‌هنجار B2-a در نزدیکی گسل احتمالی، احتمال گسترش این زون‌ها در اعماق بیش از ۴۶ متر نیز وجود دارد.

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D

شکل (۴-۲۴)، مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در نرم‌افزار ZondRes2D را نمایش می‌دهد. در شکل (۴-۲۴- ب) چهار زون B1، B2-a، B2-b و C به‌عنوان بی‌هنجاری‌های احتمالی مرتبط با کانی‌زایی در نظر گرفته شده‌اند. این بی‌هنجاری‌ها از لحاظ گستردگی، عمق و مکان جای‌گیری انطباق نسبتاً خوبی با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار RES2DINV نشان می‌دهند (شکل ۴-۲۳- ب).



شکل ۴-۲۴: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 50n-EW حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D.

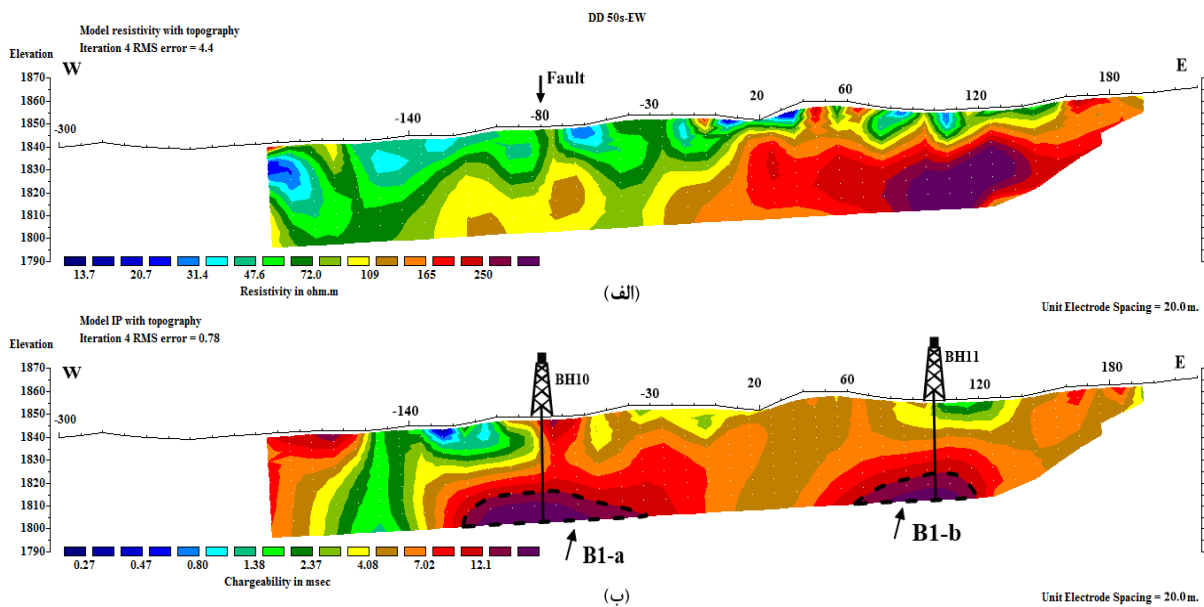
همچنین مدل مقاومت ویژه نیز برای این پروفیل انطباق نسبتاً خوبی با مدل مقاومت ویژه حاصل از نرم افزار RES2DINV دارد (شکل ۴-۲۳- الف)؛ و نتایج حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP با نرم افزار RES2DINV، تا حد بالایی در نرم افزار ZondRes2D تأیید می شوند.

با توجه به تفسیرهای فوق و نتایج حاصل از مدل سازی داده ها با نرم افزارهای مذکور، و همچنین ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی و مطالعات زمین شناسی، چهار نقطه حفاری به منظور بررسی دقیق تر بی هنجاری های احتمالی B1، B2-a، B2-b و C پیشنهاد می گردد (شکل ۴-۲۳- ب). به علاوه برای بررسی دقیق بی هنجاری B1 و B2-b، با توجه به پوشش این بی هنجاری ها به وسیله رسوبات و قرارگیری در نزدیکی سطح زمین، می توان در محل حضور هر بی هنجاری یک ترانسه پیشنهاد کرد.

ه) پروفیل DD 50s-EW

- تفسیر مدل های حاصل از نرم افزار RES2DINV

پروفیل DD 50s-EW با طول ۵۲۰ متر، به موازات پروفیل DD 50n-EW و در فاصله ۱۰۰ متری جنوب آن برداشت شده است. این پروفیل برای بررسی عمقی بی هنجاری B1 شناسایی شده در برداشت های مستطیلی، نواحی مرکزی این بی هنجاری را در امتداد شرقی- غربی پوشش می دهد (شکل ۴-۱۴). فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۱۳۵ نقطه می شود؛ که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی ثانیه اندازه گیری شده است. شکل (۴-۲۵) مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه و IP حاصل از مدل سازی وارون برای این پروفیل به همراه توپوگرافی را نمایش می دهد. خطای RMS ناشی از مدل سازی داده های این خط برداشت با تعداد ۴ مرحله تکرار در نرم افزار RES2DINV، برای مدل مقاومت ویژه الکتریکی برابر ۴/۴ درصد و برای مدل IP برابر ۰/۷۸ درصد است.



شکل ۴-۲۵: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و ب) مدل IP به همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 50s-EW حاصل از نرم افزار RES2DINV.

با توجه به شکل (۴-۲۵ ب)، دو بی‌هنجاری احتمالی بر روی پروفیل DD 50s-EW وجود دارد. بی‌هنجاری احتمالی اول (B1-a) با گسترش جانبی از ایستگاه ۳۰ تا ۱۲۰ غربی، از عمق حدود ۳۲ متری در زیر ایستگاه ۸۰ غربی شروع می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون مربوط به عمق حدود ۴۵ متری در زیر ایستگاه ۸۰ غربی است؛ که به ۲۳ میلی‌ثانیه می‌رسد. از نظر سنگ‌شناسی، این بی‌هنجاری در واحد اولیوین بازالت قرار دارد. مقدار مقاومت ویژه در محل حضور بی‌هنجاری B1-a حدود ۸۰ تا ۱۲۰ اهم‌متر می‌باشد (شکل ۴-۲۵ الف)؛ که می‌تواند متعلق به کانی‌سازی فلزی سولفیدی متراکم در درز و شکاف نهشته‌های بازالتی و وجود دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک باشد.

بی‌هنجاری احتمالی دوم (B1-b) در فاصله ایستگاه ۶۰ تا ۱۲۰ شرقی قرار دارد؛ که از عمق حدود ۳۵ متری در زیر ایستگاه ۱۰۵ شرقی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر گسترش می‌یابد. بیشترین مقدار بارپذیری برای بی‌هنجاری B1-b در زیر ایستگاه ۱۰۰ شرقی و در عمق حدود ۴۵ متری از سطح زمین، به

۱۹ میلی‌ثانیه می‌رسد. از دیدگاه سنگ‌شناسی و بر اساس پیمایش‌های صحرائی در امتداد پروفیل، این بی‌هنجاری نیز در واحد اولیوین بازالت قرار دارد؛ البته پوشش منطقه به‌وسیله رسوبات مانع از بررسی دقیق شواهد احتمالی کانی‌سازی در سطح شده است. مقدار مقاومت‌ویژه در محل حضور این بی‌هنجاری حدود ۲۰۰ تا ۳۵۰ اهم‌متر است (شکل ۴-۲۵-الف)؛ که می‌تواند متعلق به کانی‌سازی فلزی سولفیدی در نهشته‌های اولیوین بازالتی و وجود دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک باشد. با توجه به موقعیت قرارگیری دو پروفیل DD 50s-EW و DD 75w-NS نسبت به یکدیگر (شکل ۴-۱۴)، این بی‌هنجاری منطبق بر بی‌هنجاری B در انتهای پروفیل DD 75w-NS است (شکل ۴-۱۹-ب)؛ که گسترش جانبی آن در راستای شرقی-غربی در مقطع مدل IP این پروفیل شناسایی شده است. همچنین بر اساس نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در طول دو پروفیل DD 50n-EW و DD 50s-EW، احتمالاً هر دو زون بی‌هنجار B1-a و B1-b ادامه‌ی بی‌هنجاری B1 در پروفیل DD 50n-EW (شکل ۴-۲۳-ب) به‌سمت جنوب باشند و احتمال می‌رود که در فاصله‌ی بین دو پروفیل مذکور به‌صورت پیوسته می‌باشند.

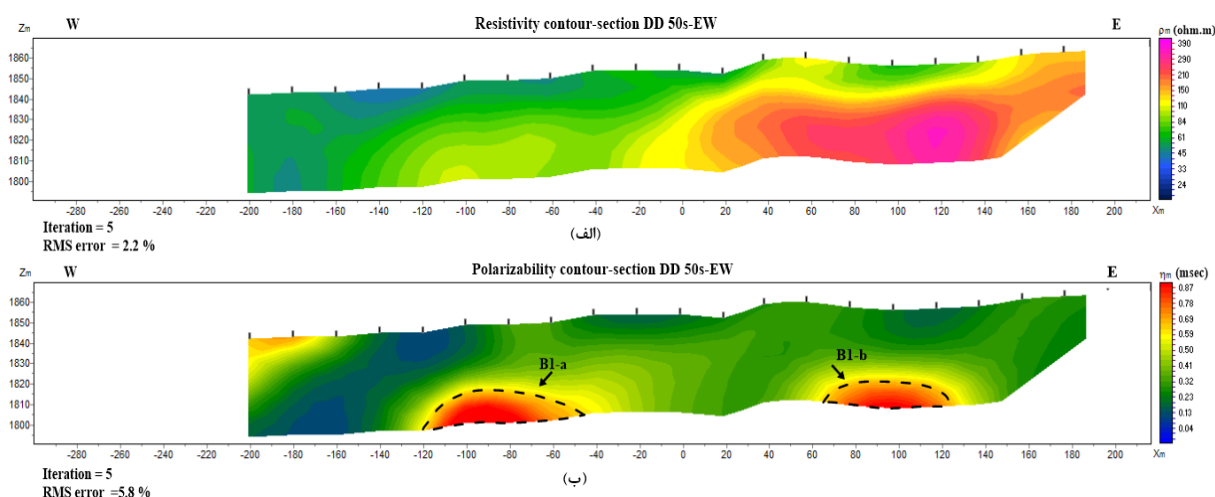
با توجه به مقطع مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۵-الف) و کمتر بودن مقاومت‌ویژه بی‌هنجاری B1-a نسبت به بی‌هنجاری B1-b، احتمال داده می‌شود؛ که کاهش مقاومت‌ویژه در این قسمت ناشی از عیار و گستردگی بیشتر ماده معدنی، وجود درز و شکاف‌های بیشتر در محل حضور بی‌هنجاری B1-a و گسترش بیشتر دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک در این قسمت باشد. به‌علاوه افت مقاومت‌ویژه در مناطق سطحی این پروفیل، احتمالاً به علت وجود یک لایه آبرفت با مقاومت‌ویژه کم و آبدار و همچنین وجود دگرسانی‌های موجود در منطقه می‌باشد.

با توجه به انطباق موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه و محل قرارگیری پروفیل DD 50s-EW بر روی این نقشه (شکل ۴-۳)، یک گسل در نزدیکی ایستگاه ۸۰ غربی وجود دارد؛ که می‌تواند مرتبط با کانی‌سازی در این قسمت باشد.

با توجه به باز بودن زون‌های بی‌هنجاری B1-a و B1-b در جهت افزایش عمق و همچنین قرارگیری بی‌هنجاری B1-a در کنار گسل، احتمال گسترش این زون‌ها در اعماق بیش از ۴۶ متر نیز وجود دارد.

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D

شکل (۴-۲۶)، مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در نرم‌افزار ZondRes2D را نمایش می‌دهد. در شکل (۴-۲۶-ب) زون‌های مشخص شده‌ی B1-a و B1-b به‌عنوان بی‌هنجاری‌های احتمالی بر روی پروفیل DD 50s-EW در نظر گرفته شده‌اند. این زون‌ها از لحاظ گستردگی، عمق و مکان جای‌گیری انطباق نسبتاً خوبی با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار RES2DINV نشان می‌دهند (شکل ۴-۲۵-ب). در مدل مقاومت‌ویژه حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D (شکل ۴-۲۶-الف)، بی‌هنجاری B1-a منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط و بی‌هنجاری B1-b منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه نسبتاً بالا می‌باشد؛ که این نتایج نیز انطباق نسبتاً خوبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه برای این پروفیل در نرم‌افزار RES2DINV (شکل ۴-۲۵-الف) نشان می‌دهند.



شکل ۴-۲۶: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل DD 50s-EW حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D.

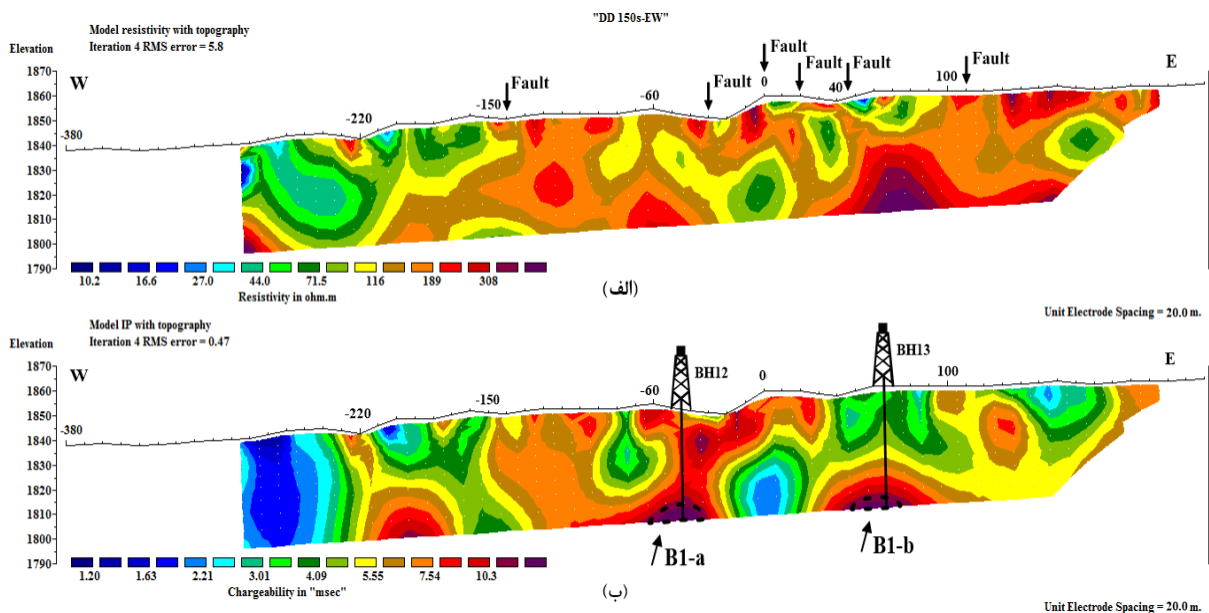
با توجه به تفسیرهای فوق و نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌ها با نرم‌افزارهای مذکور، و همچنین ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی و مطالعات زمین‌شناسی، دو نقطه حفاری به‌منظور بررسی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌های احتمالی B1-a و B1-b پیشنهاد می‌گردد (شکل ۴-۲۵-ب).

و) پروفیل DD 150s-EW

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار RES2DINV

پروفیل DD 150s-EW آخرین پروفیل برداشت‌شده در منطقه چومالو می‌باشد. این پروفیل با طول ۶۰۰ متر و امتداد شرقی- غربی، به موازات پروفیل DD 50s-EW و در فاصله ۱۰۰ متری جنوب آن برداشت شده است. هدف از طراحی و برداشت این پروفیل، بررسی عمقی قسمت‌های جنوبی بی‌هنجاری B1 شناسایی‌شده در برداشت‌های مستطیلی بوده است. موقعیت پروفیل DD 150s-EW نسبت به بی‌هنجاری B1 در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است. فاصله نقاط برداشت در امتداد این پروفیل ۲۰ متر است و جمعاً شامل ۱۷۶ نقطه که در هر نقطه دو پارامتر مقاومت‌ویژه ظاهری بر حسب اهم‌متر و بارپذیری ظاهری بر حسب میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شده است. شکل (۴-۲۷) مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP حاصل از مدل‌سازی وارون برای این پروفیل به‌همراه توپوگرافی را نمایش می‌دهد. خطای RMS ناشی از مدل‌سازی داده‌های این خط برداشت با تعداد ۴ مرحله تکرار در نرم‌افزار RES2DINV، برای مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی برابر ۵/۸ درصد و برای مدل IP برابر ۰/۴۷ درصد است.

بر اساس نتایج مدل‌سازی داده‌های IP، دو زون نسبتاً کوچک B1-a و B1-b به‌عنوان بی‌هنجاری‌های احتمالی بر روی پروفیل DD 150s-EW مشخص شده‌اند (شکل ۴-۲۷-ب). بی‌هنجاری احتمالی B1-a در فاصله ایستگاه ۳۵ تا ۶۵ غربی قرار دارد؛ که از عمق حدود ۳۹ متری در زیر ایستگاه ۴۵ غربی آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه دارد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون مربوط به عمق حدود



شکل ۴-۲۷: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها؛ (الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و (ب) مدل IP به همراه توپوگرافی در طول پروفیل DD 150s-EW حاصل از نرم افزار RES2DINV.

۴۵ متری در زیر ایستگاه ۴۵ غربی است؛ که به ۱۵ میلی ثانیه می‌رسد. از دیدگاه سنگ‌شناسی، بی‌هنجاری B1-a در واحد اولیوین بازالت قرار دارد. بر اساس پیمایش‌های صحرائی در امتداد این پروفیل، شواهدی از معدنکاری در فاصله‌ی بین ایستگاه ۰ تا ۲۰ غربی، و شواهدی از کانی‌سازی رگه‌ای با ضخامت کم (حالی کانی‌های گالن، اسفالریت و سروزیت در درز و شکاف سنگ میزبان)، در دیواره ترانشه حفر شده در فاصله حدود ۱۰ متری در سمت شمال ایستگاه ۲۰ غربی مشاهده شد؛ که می‌تواند تأییدی بر حضور بی‌هنجاری عمقی B1-a و وجود کانی‌سازی سولفیدی در این قسمت باشد. همچنین در مدل مقاومت ویژه (شکل ۴-۲۷-الف) مقدار مقاومت ویژه در محل حضور این بی‌هنجاری حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ اهم متر است؛ که می‌تواند متعلق به کانی‌سازی فلزی سولفیدی در درز و شکاف‌های نهشته‌های بازالتی و وجود دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک باشد.

گسترش جانبی بی‌هنجاری احتمالی B1-b از ایستگاه ۴۵ تا ۷۵ شرقی می‌باشد؛ که از عمق حدود ۴۲

متری آغاز می‌شود و تا عمق حدود ۴۶ متر ادامه می‌یابد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این زون، در زیر ایستگاه ۶۵ شرقی و عمق حدود ۴۵ متری از سطح زمین، به حدود ۱۳/۵ میلی‌ثانیه می‌رسد. از دیدگاه سنگ‌شناسی و بر اساس پیمایش‌های صحرایی در امتداد این پروفیل، این بی‌هنجاری نیز در واحد اولیوین بازالت قرار دارد؛ و شواهدی از کانی‌سازی در دیواره‌ی دو ترانشه حفرشده در محل ایستگاه‌های ۵۰ و ۷۰ شرقی مشاهده شد. کانی‌سازی در این قسمت نیز به‌صورت رگه‌ای و کم‌ضخامت، در درز و شکاف سنگ میزبان بازالتی تشکیل شده است؛ که شامل کانی‌های گالن، اسفالریت و سرروزیت می‌شود. همچنین کانی‌های کوارتز، کلسیت و فلوریت نیز به‌عنوان باطله همراه ماده معدنی مشاهده شدند. بر این اساس احتمال می‌رود؛ که بی‌هنجاری احتمالی B1-b در ارتباط با کانی‌سازی رگه‌ای عمقی باشد. این بی‌هنجاری در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۷-الف)، منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه نسبتاً بالا (حدود ۲۵۰ تا ۴۵۰ اهم‌متر) است. شایان ذکر است؛ مقادیر کمتر مقاومت‌ویژه برای بی‌هنجاری B1-a در مقایسه با بی‌هنجاری B1-b، احتمالاً به علت عیار و گستردگی بیشتر ماده معدنی، شکستگی و خردشدگی بیشتر سنگ میزبان بازالتی و گسترش بیشتر دگرسانی سیلیسی-آرژیلیک در محل حضور بی‌هنجاری B1-a می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در امتداد این پروفیل و مقایسه آن‌ها با نتایج مدل‌سازی برای پروفیل DD 50s-EW (شکل ۴-۲۵)، احتمال می‌رود؛ که هر دو زون بی‌هنجار B1-a و B1-b بر روی پروفیل DD 150s-EW، ادامه‌ی زون‌های بی‌هنجار B1-a و B1-b بر روی پروفیل DD 50s-EW (شکل ۴-۲۵-ب) به‌سمت جنوب باشند و احتمالاً در فاصله‌ی بین این دو پروفیل به‌صورت پیوسته می‌باشند. همچنین با توجه به افزایش عمق قرارگیری بی‌هنجاری‌ها در پروفیل DD 150s-EW نسبت به پروفیل DD 50s-EW، احتمالاً شیب این بی‌هنجاری‌ها به‌سمت جنوب منطقه می‌باشد.

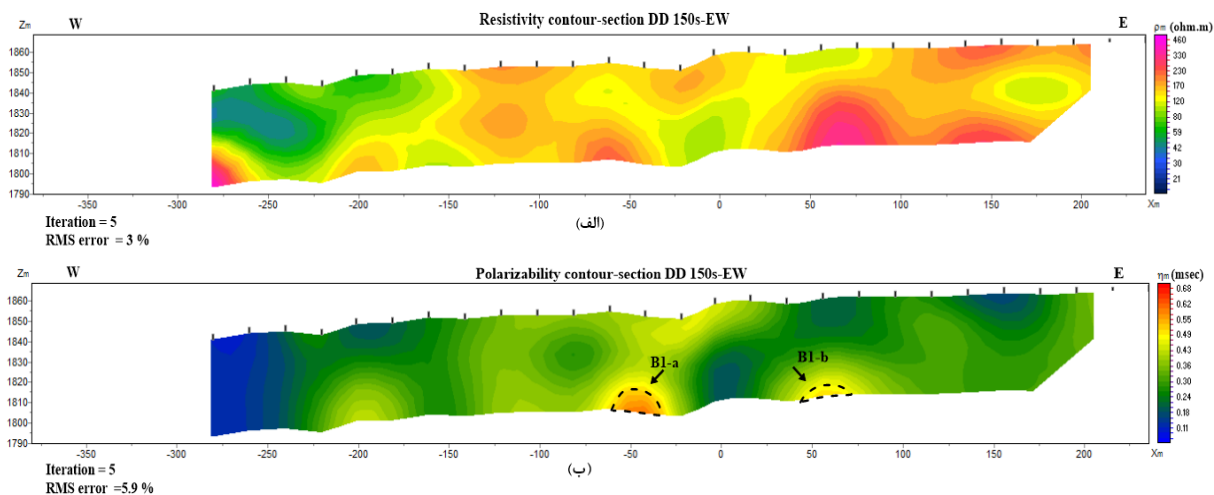
با توجه به انطباق موقعیت ایستگاه‌های برداشت ژئوفیزیکی بر روی نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه و محل قرارگیری پروفیل DD 150s-EW بر روی این نقشه (شکل ۴-۳)، شش گسل در نقشه

زمین‌شناسی منطقه در طول این پروفیل وجود دارد؛ که می‌توانند با کانی‌سازی مرتبط باشند. این گسل‌ها به ترتیب در محل دو ایستگاه ۱۴۰ و ۳۰ غربی و ایستگاه‌های ۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۱۰ شرقی قرار دارند؛ که محل آن‌ها بر روی مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۷-الف) مشخص شده است. برخی از این گسل‌ها تا حدودی در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۱-الف) نمایان شده‌اند؛ اما تعیین محل دقیق این گسل‌ها بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد و محل این گسل‌ها بر روی ایستگاه‌های برداشت در طول این پروفیل، بر اساس محل قرارگیری آن‌ها در نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص شده است. شواهدی از معدنکاری و کانی‌سازی در ارتباط با این گسل‌ها در محل ایستگاه‌های ۰، ۲۰ و ۵۰ شرقی در پیمایش‌های صحرائی در امتداد این پروفیل مشاهده شد.

با توجه به باز بودن زون‌های بی‌هنجار B1-a و B1-b در جهت افزایش عمق و همچنین وجود گسل‌های مرتبط با کانی‌سازی در طول این پروفیل، احتمال گسترش این زون‌ها و وجود کانی‌سازی در اعماق بیش از ۴۶ متر نیز وجود دارد.

- تفسیر مدل‌های حاصل از نرم‌افزار ZondRes2D

شکل (۴-۲۸)، مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در نرم‌افزار ZondRes2D را نمایش می‌دهد. در شکل (۴-۲۸-ب) دو زون B1-a و B1-b به‌عنوان بی‌هنجاری‌های احتمالی در نظر گرفته شده‌اند؛ که از لحاظ گستردگی، عمق و مکان جای‌گیری انطباق نسبتاً خوبی با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار RES2DINV نشان می‌دهند (شکل ۴-۲۷-ب). در مدل مقاومت‌ویژه (شکل ۴-۲۸-الف)، بی‌هنجاری B1-a منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط و بی‌هنجاری B1-b منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه نسبتاً بالا می‌باشد؛ که این نتایج نیز انطباق نسبتاً خوبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه برای این پروفیل در نرم‌افزار RES2DINV (شکل ۴-۲۷-الف) نشان می‌دهند.



شکل ۴-۲۸: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها؛ الف) مدل مقاومت ویژه الکتریکی و ب) مدل IP در طول پروفیل ZondRes2D حاصل از نرم افزار DD 150s-EW

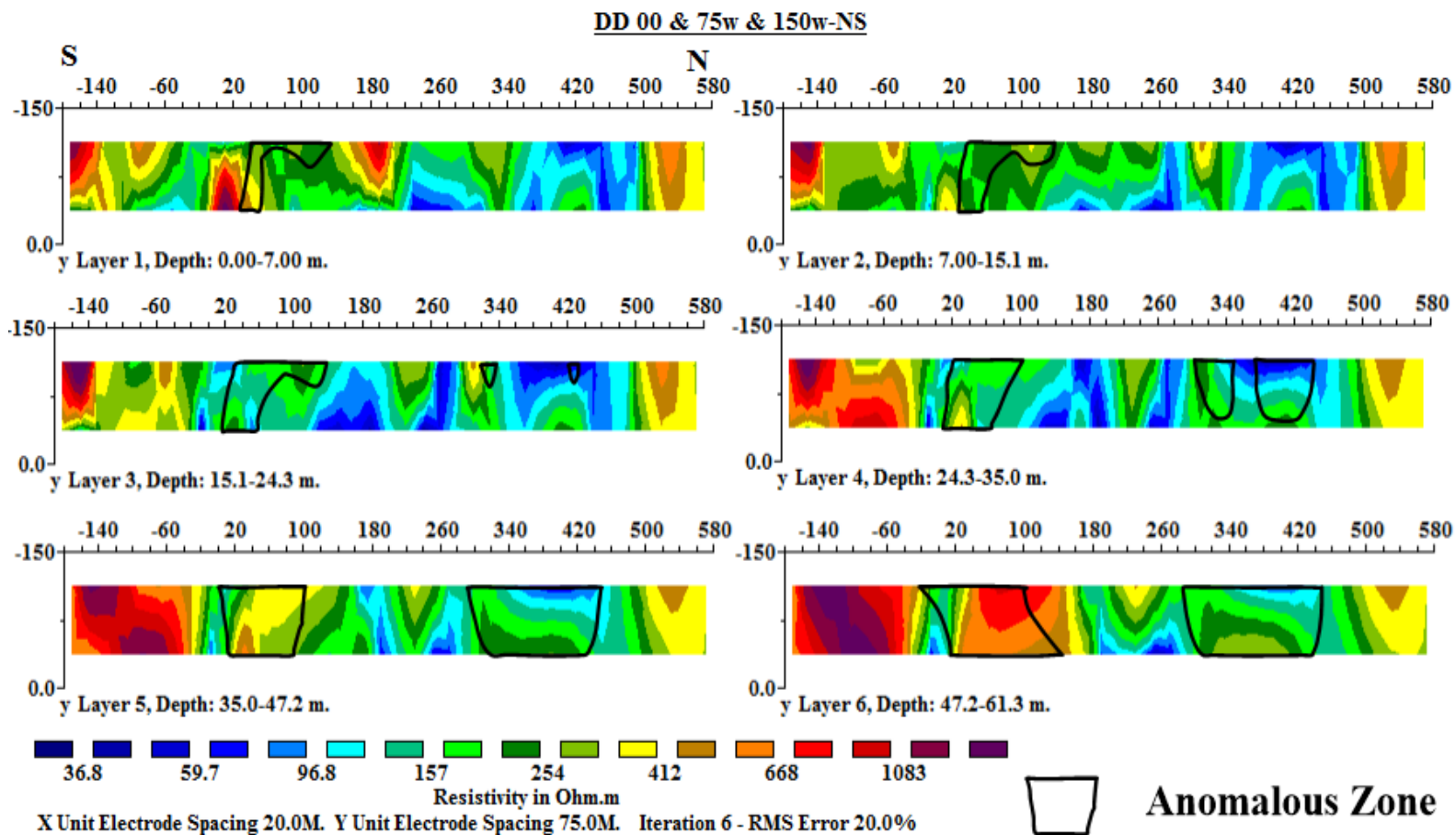
با توجه به تفسیرهای فوق و نتایج حاصل از مدل سازی داده‌ها با نرم افزارهای مذکور، و همچنین ترکیب اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی و مطالعات زمین شناسی، دو نقطه حفاری به منظور بررسی دقیق تر بی‌هنجاری‌های احتمالی B1-a و B1-b پیشنهاد می‌گردد (شکل ۴-۲۷-ب).

۳-۴-۴ بررسی نتایج حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP

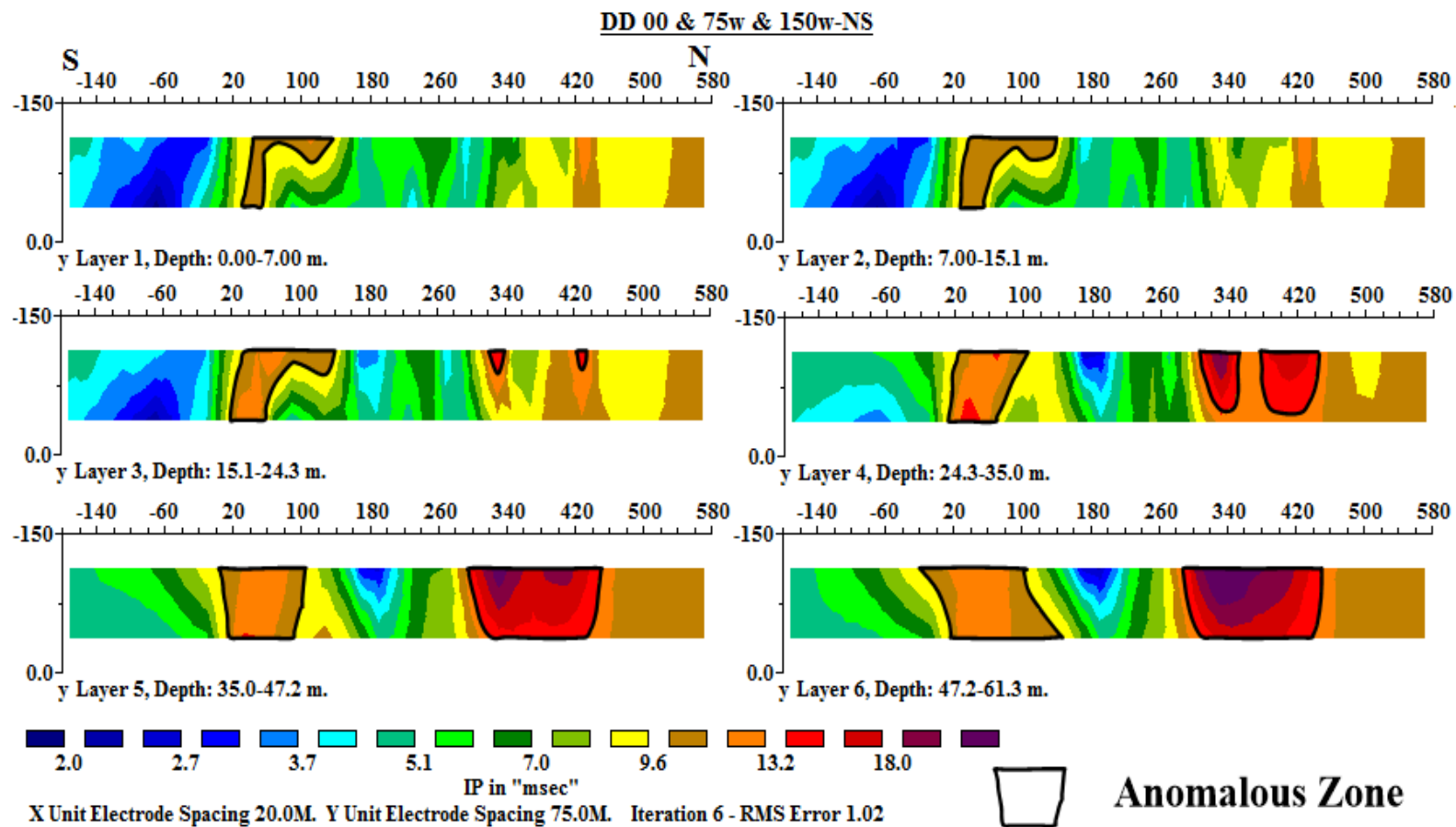
مدل سازی سه بعدی داده ها به منظور دستیابی به یک دید کلی از نواحی بی هنجار زیر سطحی بسیار مفید است؛ و یک تصویر کامل تر از زیر سطح را ارائه می دهد [Sultan and Monteiro Santos, 2008]. برداشت داده های مقاومت ویژه و IP با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی در امتداد ۶ پروفیل (۳ پروفیل شمالی- جنوبی و ۳ پروفیل شرقی- غربی) به صورت موازی، با فاصله الکترودی ۲۰ متر و فاصله پروفیلی ۷۵ متر و ۱۰۰ متر به ترتیب برای پروفیل های شمالی- جنوبی و شرقی- غربی انجام شد؛ و مدل سازی وارون دوبعدی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و IP با استفاده از نرم افزارهای RES2DINV و ZondRes2D برای شش پروفیل مذکور صورت گرفت. سپس هر دسته از پروفیل های موازی به وسیله نرم افزار RES2DINV با یکدیگر ترکیب شدند و دو مجموعه تصاویر مقاومت ویژه و IP سه بعدی ایجاد شدند. در نهایت به منظور مدل سازی وارون سه بعدی، هر کدام از مجموعه داده ها به نرم افزار RES3DINV فراخوانی شده و مدل سازی سه بعدی داده ها انجام شد؛ که نتایج این مدل سازی برای هر دسته از پروفیل ها ارائه می شود. همچنین برای نمایش بهتر نتایج مدل سازی های سه بعدی، از نرم افزار Voxler و RockWorks استفاده شده است.

الف) پروفیل های شمالی- جنوبی

شکل های (۴-۲۹) و (۴-۳۰)، به ترتیب مقاطع حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP برای سه پروفیل DD 00-NS، DD 75w-NS و DD 150w-NS را نمایش می دهند.

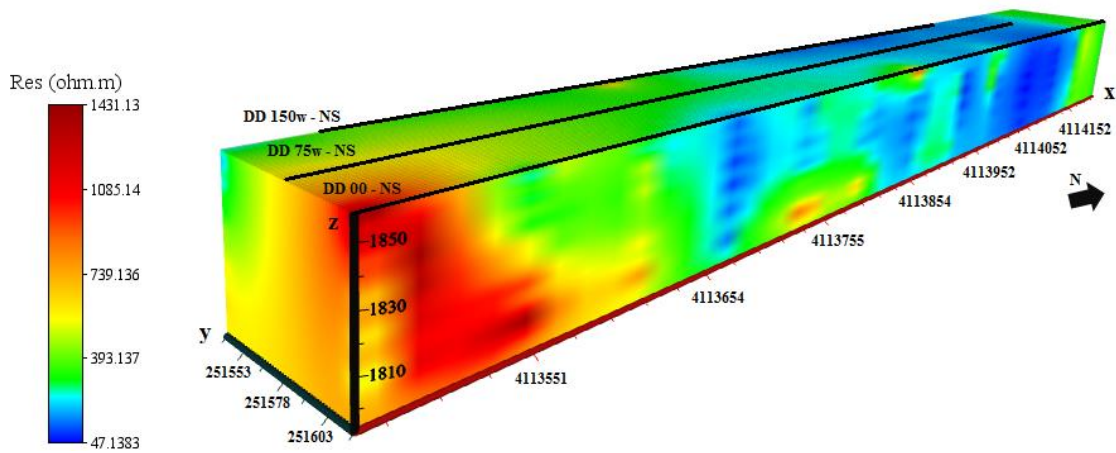


شکل ۴-۲۹: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی وارون سببعدی داده های مقاومت ویژه برای پروفیل های شمالی- جنوبی.

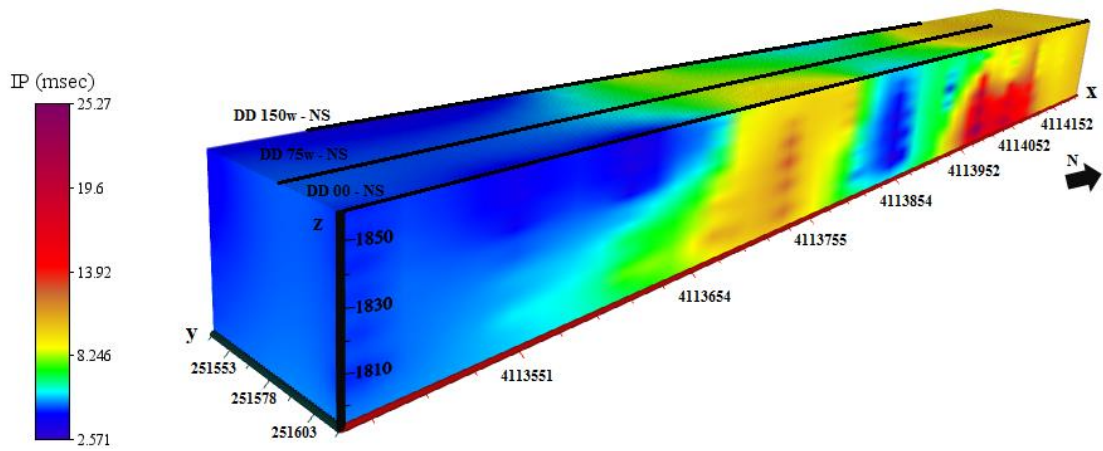


شکل ۳۰-۴: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده های IP برای پروفیل های شمالی- جنوبی.

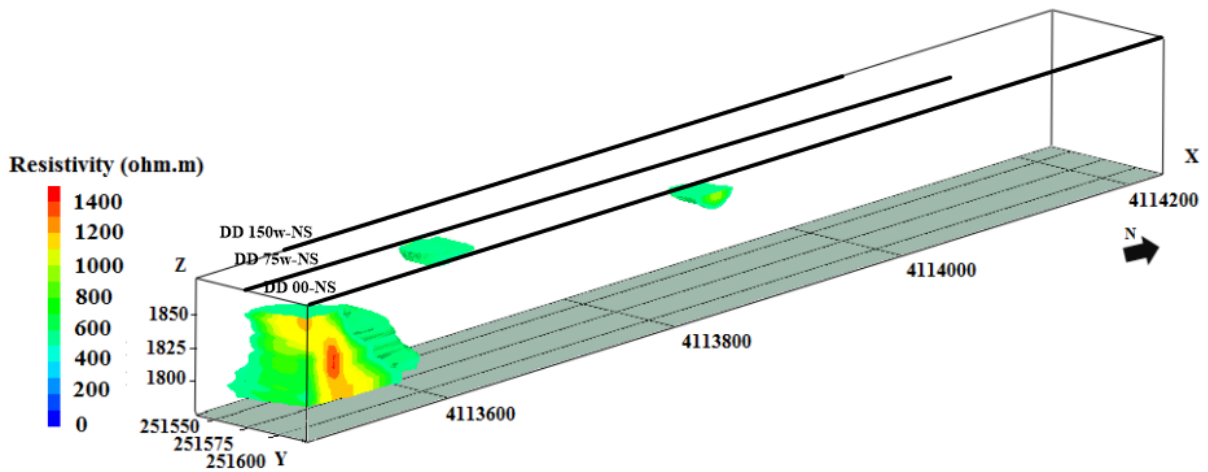
با توجه به شکل (۴-۳۰)، بی‌هنجاری‌های احتمالی را می‌توان به دو بخش شمالی و جنوبی تفکیک کرد. بر این اساس، بی‌هنجاری احتمالی جنوبی که از سطح تا عمق ۷ متری به صورت یک بی‌هنجاری نسبتاً کوچک دیده می‌شود؛ دارای گسترش شرقی-غربی است. این بی‌هنجاری با افزایش عمق، وسعت بیشتری می‌یابد؛ به طوری که در عمق ۴۷ تا ۶۱ متری به بیشترین وسعت خود می‌رسد. در شکل (۴-۲۹)، بی‌هنجاری جنوبی منطبق بر مناطق با مقاومت ویژه متوسط می‌باشد. با توجه به شکل (۴-۳۰)، در عمق ۱۵ تا ۲۳ متری از سطح زمین، دو بی‌هنجاری احتمالی کوچک دیگر در شمال مقطع مدل IP نمایان می‌شوند؛ که در عمق ۲۴ تا ۳۵ متری، گسترش شرقی-غربی پیدا می‌کنند. این دو بی‌هنجاری در عمق ۳۵ تا ۴۷ متری به یکدیگر متصل می‌شوند و با افزایش عمق وسعت بیشتری می‌یابند؛ به طوری که در عمق ۴۷ تا ۶۱ متری محدوده وسیعی از مقطع را در برمی‌گیرند. بیشترین مقدار بارپذیری برای این بی‌هنجاری‌ها نیز مربوط به همین عمق می‌باشد. در شکل (۴-۲۹)، بی‌هنجاری‌های شمالی منطبق بر مناطق با مقاومت ویژه متوسط تا پایین می‌باشند. همچنین به نظر می‌رسد که یک توده با مقاومت ویژه بالا (بیش از ۷۰۰ اهم‌متر) در سمت جنوب پروفیل‌ها، از عمق‌های بالا به سمت سطح کشیده شده و در نزدیکی سطح، از حجم آن کاسته شده است؛ که این توده به احتمال قوی منطبق بر توده‌ی نفوذی کوارتز مونزونیتی در جنوب منطقه اکتشافی چومالو می‌باشد. شکل‌های (۴-۳۱) تا (۴-۳۴) نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه و IP برای پروفیل‌های شمالی-جنوبی را در محیط نرم‌افزار Voxler و RockWorks نمایش می‌دهند.



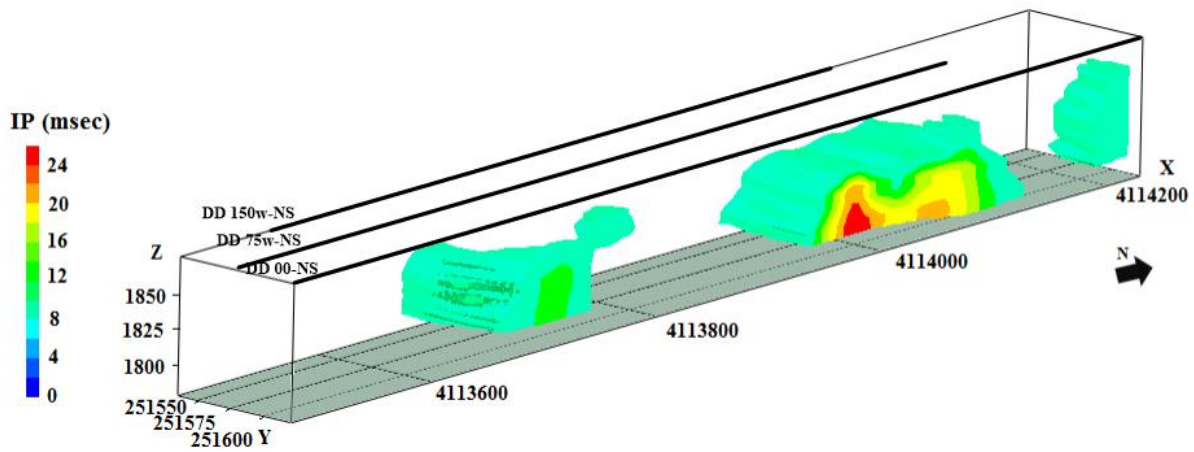
شکل ۴-۳۱: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل‌های شمالی- جنوبی با نرم‌افزار Voxler.



شکل ۴-۳۲: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شمالی- جنوبی با نرم‌افزار Voxler.



شکل ۴-۳۳: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل‌های شمالی - جنوبی با نرم‌افزار RockWorks برای مقادیر مقاومت‌ویژه بیش از ۶۰۰ اهم‌متر.

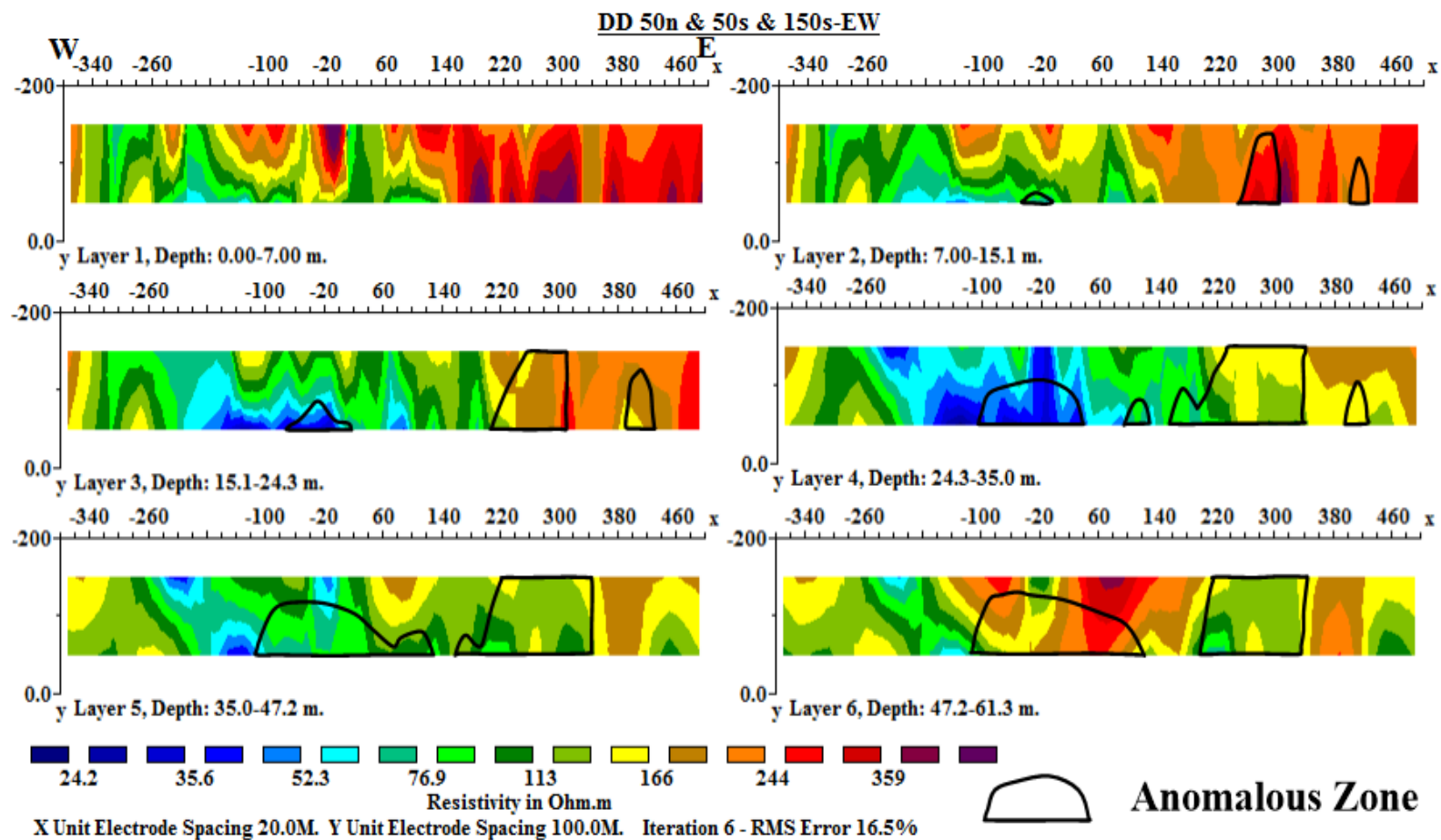


شکل ۴-۳۴: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شمالی - جنوبی با نرم‌افزار RockWorks برای مقادیر بارپذیری بیش از ۱۰ میلی‌ثانیه.

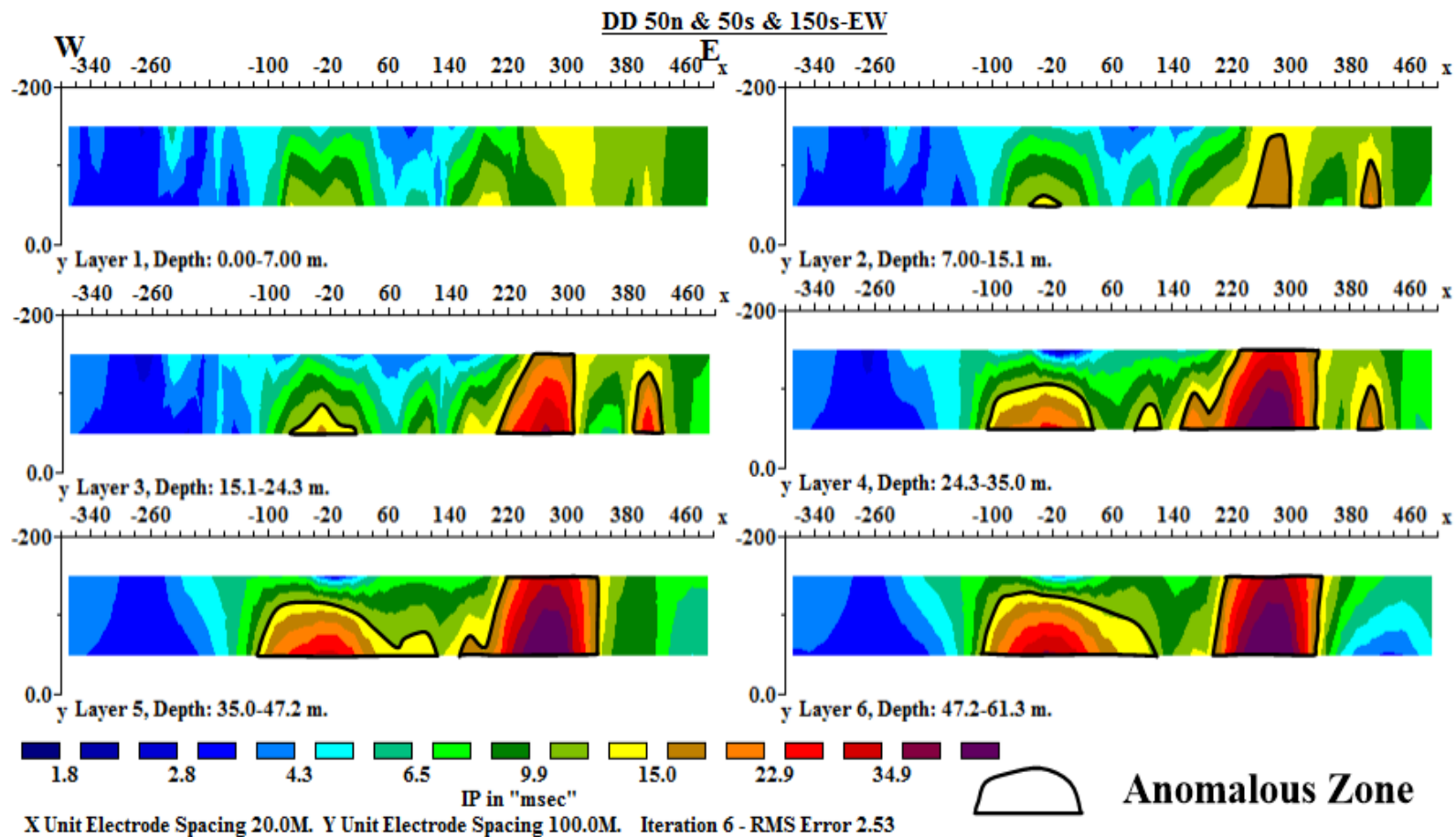
با توجه به نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌ها (شکل‌های (۴-۳۱) تا (۴-۳۴))، مناطقی با بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین به‌عنوان نواحی بی‌هنجار احتمالی در نظر گرفته شده‌اند؛ که می‌توانند جزء مناطق محتمل کانی‌سازی فلزی سولفیدی در منطقه باشند و از اهداف اکتشافی به‌شمار آیند.

ب) پروفیل‌های شرقی - غربی

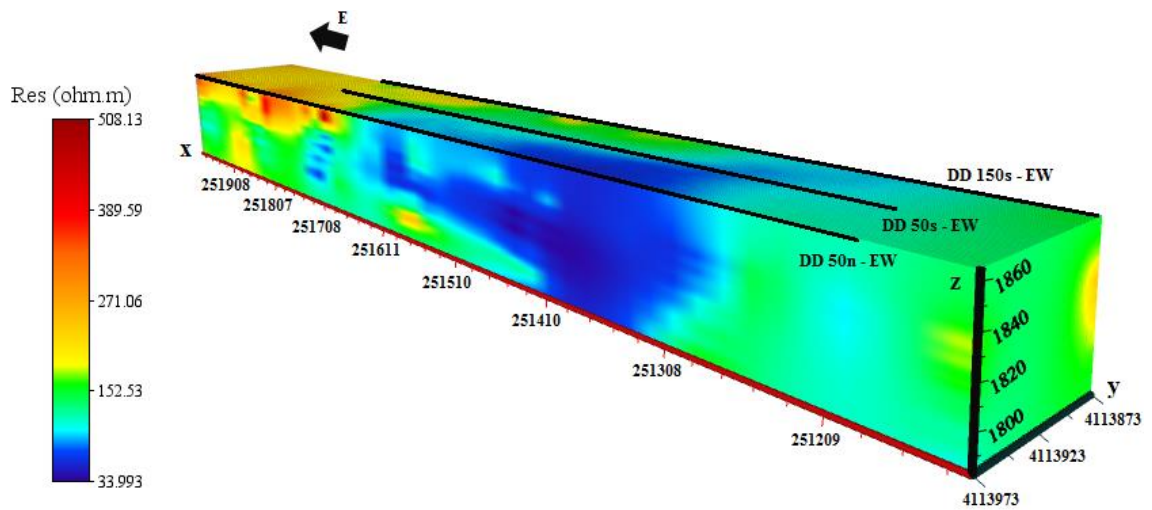
شکل‌های (۳۵-۴) و (۳۶-۴)، به ترتیب مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP برای سه پروفیل DD 50n-EW، DD 50s-EW و DD 150s-EW را نمایش می‌دهند. با توجه به شکل (۳۶-۴)، سه بی‌هنجاری احتمالی کوچک در عمق ۷ تا ۱۵ متری دیده می‌شود؛ که با افزایش عمق به ۱۵ تا ۲۴ متر، شدت و وسعت هر سه بی‌هنجاری افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار بارپذیری برای بی‌هنجاری شرقی مربوط به همین عمق است. شدت و وسعت این بی‌هنجاری با افزایش عمق به ۲۴ تا ۳۵ متر، کاهش می‌یابد و در اعماق بیش از ۳۵ متر هیچ اثری از آن دیده نمی‌شود؛ اما شدت و وسعت دو بی‌هنجاری دیگر با افزایش عمق همچنان افزایش می‌یابد. به‌علاوه در عمق ۲۴ تا ۳۵ متری یک بی‌هنجاری احتمالی کوچک دیگر در نواحی میانی تصویر نمایان می‌شود؛ که با افزایش عمق به ۳۵ تا ۴۷ متر، به بی‌هنجاری مرکزی متصل می‌شود. بیشترین مقدار بارپذیری برای بی‌هنجاری‌ها مربوط به عمق ۴۷ تا ۶۱ متری می‌باشد. در شکل (۳۵-۴)، بی‌هنجاری‌های مشاهده‌شده در مقاطع IP منطبق بر مناطق با مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین می‌باشند. شکل‌های (۳۷-۴) تا (۴۰-۴) نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP برای پروفیل‌های شرقی - غربی را در محیط نرم‌افزار Voxler و RockWorks نمایش می‌دهند.



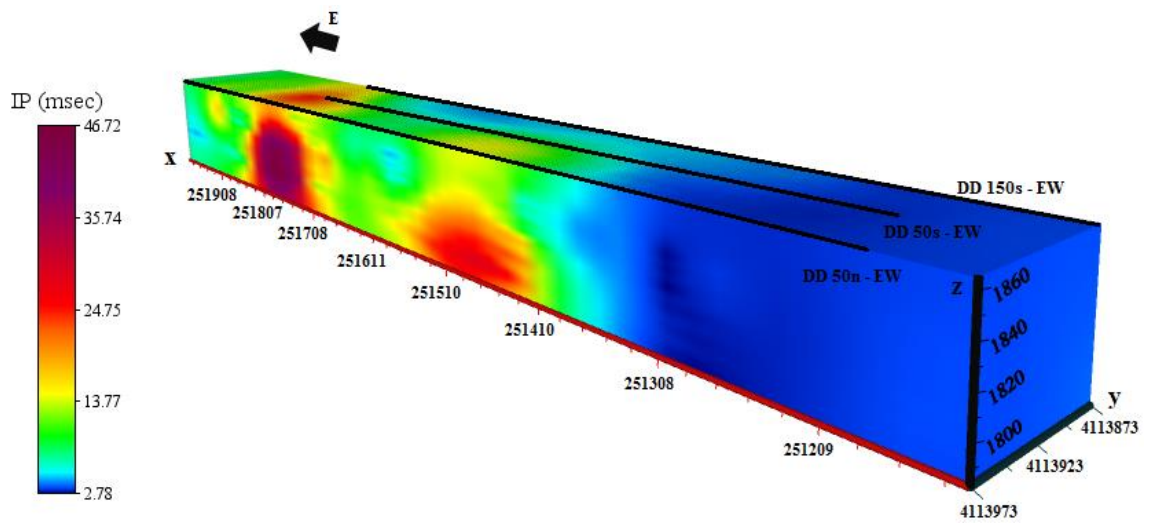
شکل ۴-۳۵: مقاطع افقی حاصل از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل‌های شرقی- غربی.



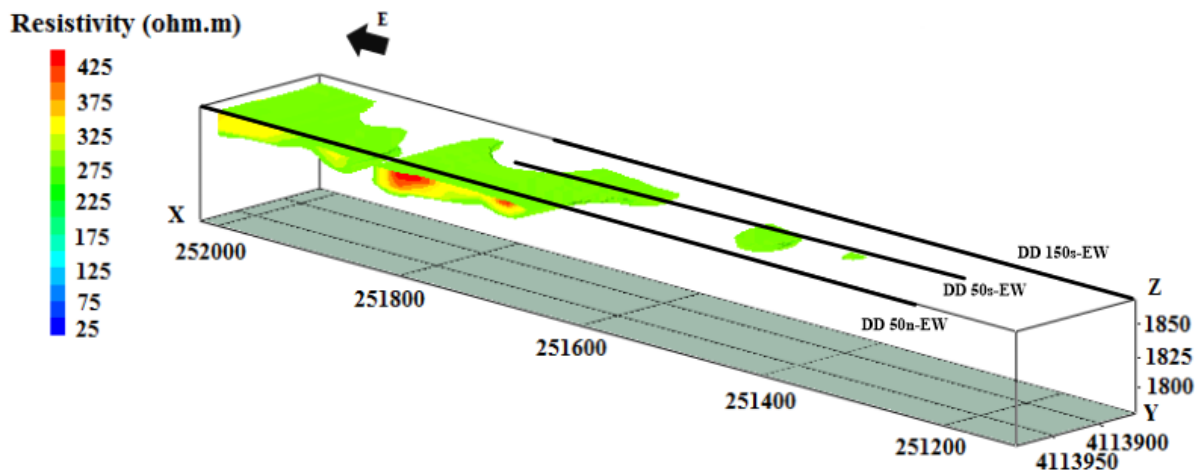
شکل ۴-۳۶: مقاطع افقی حاصل از مدل سازی وارون سه بعدی داده های IP برای پروفیل های شرقی - غربی.



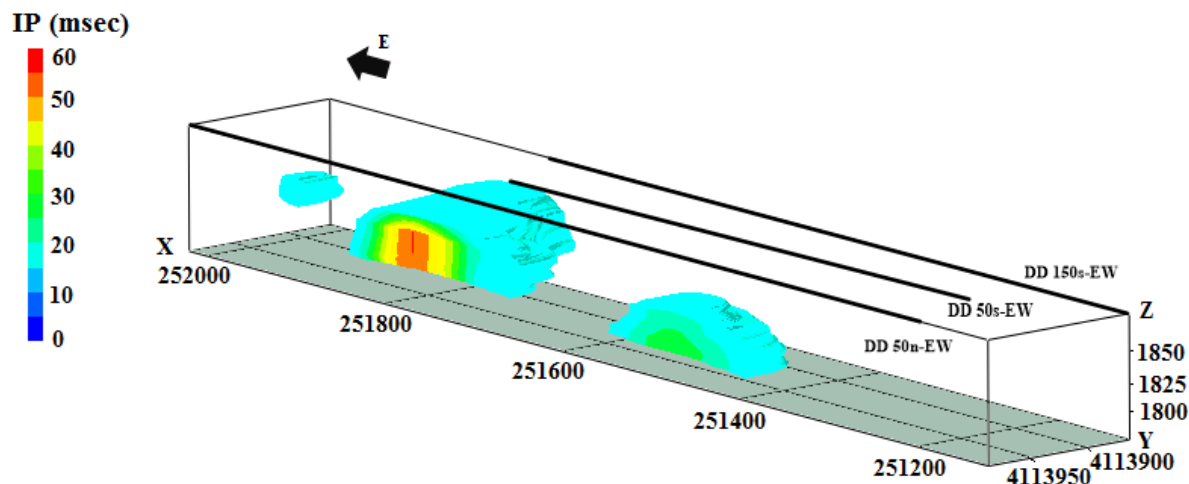
شکل ۴-۳۷: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه برای پروفیل‌های شرقی - غربی با نرم‌افزار Voxler.



شکل ۴-۳۸: نمایش نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های IP برای پروفیل‌های شرقی - غربی با نرم‌افزار Voxler.



شکل ۴-۳۹: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه برای پروفیل های شرقی - غربی با نرم افزار RockWorks برای مقادیر مقاومت ویژه بیش از ۲۵۰ اهم متر.



شکل ۴-۴۰: نمایش نتایج وارون سازی سه بعدی داده های IP برای پروفیل های شرقی - غربی با نرم افزار RockWorks برای مقادیر بارپذیری بیش از ۱۵ میلی ثانیه.

بر اساس نتایج مدل سازی سه بعدی داده ها (شکل های (۴-۳۷) تا (۴-۴۰))، مناطقی با بارپذیری بالا و مقاومت ویژه متوسط تا پایین به عنوان نواحی بی هنجار احتمالی در نظر گرفته شده اند؛ که این بی هنجاری ها را می توان جزء مناطق محتمل کانی سازی فلزی سولفیدی در منطقه چومالو دانست. در پایان شایان ذکر است؛ هرچند فاصله ۷۵ و ۱۰۰ متری به ترتیب بین پروفیل های شمالی - جنوبی و شرقی - غربی برای

مدل‌سازی و تفسیر سه‌بعدی داده‌ها نسبتاً زیاد می‌باشد و گاهی به دلیل هم‌اندازه نبودن طول انتهای پروفیل‌ها، بی‌هنجاری‌هایی در این فاصله ایجاد می‌شود که نمی‌توان آن‌ها را با درصد بالایی از احتمال به کانی‌سازی در منطقه نسبت داد؛ ولی در مجموع با خطایی بیشتر از حالت معمول می‌توان نتایج بررسی‌های سه‌بعدی و دوبعدی را با یکدیگر مرتبط دانست. از این رو، نتایج مدل‌سازی‌های سه‌بعدی برای پروفیل‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP برداشت‌شده در منطقه، از جمله احتمال پیوستگی بی‌هنجاری‌ها در فواصل بین پروفیل‌های برداشت و همچنین احتمال گسترش زون‌های بی‌هنجار در اعماق پایین‌تر (بیش از ۴۶ متر) را تأیید می‌کنند.

۴-۴-۴ نمایش سه‌بعدی تمامی داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و IP

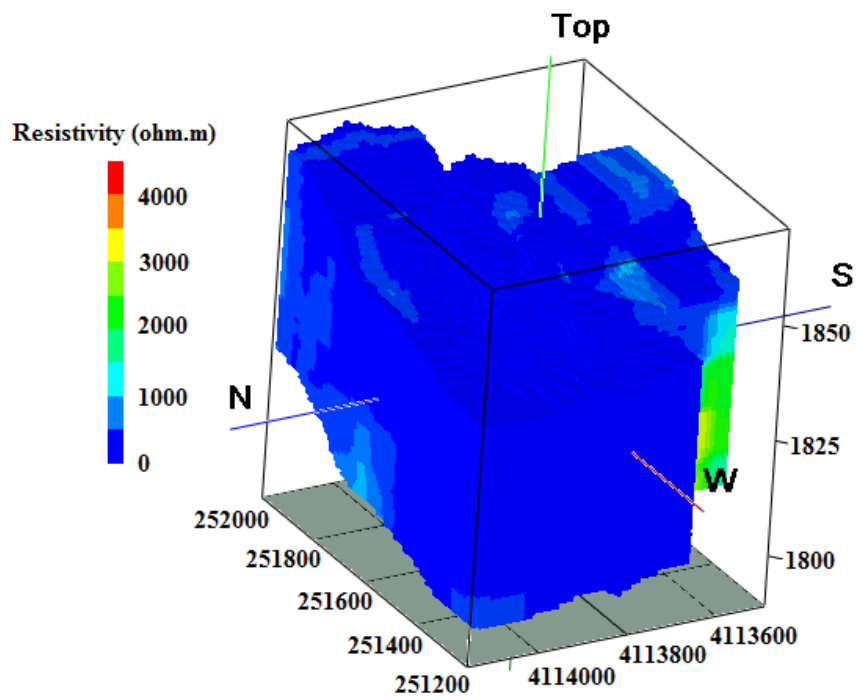
از آنجا که توزیع مقاومت‌ویژه در زمین معمولاً به صورت سه‌بعدی می‌باشد، لذا دستیابی به یک دید کلی از نواحی بی‌هنجار زیرسطحی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ که این مهم با مدل‌سازی و نمایش سه‌بعدی داده‌ها میسر می‌شود. مدل‌های سه‌بعدی قادرند اطلاعات جزئی‌تری از هندسه، مکان، شکل و جهت ساختارهای زمین‌شناسی در عمق و ارتباط این ساختارها ارائه دهند. همچنین به منظور افزایش صحت و دقت عملیات اکتشاف، دسترسی به اطلاعات کلیدی از قبیل موقعیت سه‌بعدی کانسار و حجم پتانسیل معدنی اهمیت زیادی دارد؛ که مدل‌های سه‌بعدی این‌گونه اطلاعات را نیز در اختیار قرار می‌دهند.

تهیه مدل‌های سه‌بعدی از داده‌های برداشت‌شده در منطقه اکتشافی چومالو به دو طریق و با استفاده از نرم‌افزار RockWorks انجام شد؛ که به دلیل رعایت اختصار به توضیح مختصری از دو روش و ارائه مدل‌هایی که تطابق بهتری با دیگر نتایج دارند، بسنده می‌کنیم. در یک مرحله نتایج مدل‌سازی‌های سه‌بعدی برای هر دسته از پروفیل‌های موازی با نرم‌افزار RES3DINV، در فضای سه‌بعدی با یکدیگر تلفیق شدند و دو مدل سه‌بعدی از داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به دست آمد. در مرحله دیگر نتایج

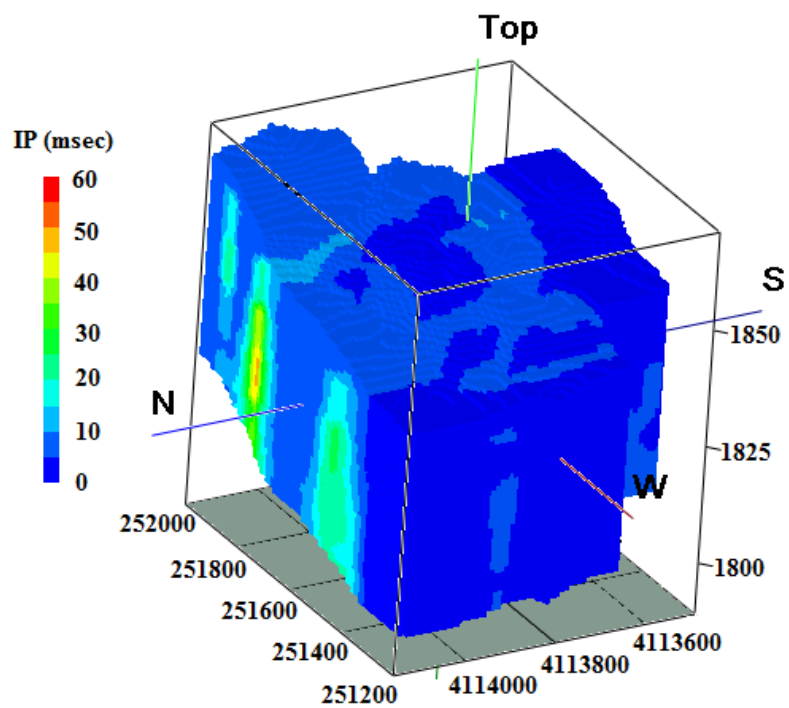
مدل‌سازی‌های دوبعدی برای هر شش پروفیل با نرم‌افزار RES2DINV، در فضای سه‌بعدی با یکدیگر تلفیق شدند و دو مدل سه‌بعدی دیگر نیز به‌دست آمد. مقایسه نتایج مدل‌های سه‌بعدی تهیه‌شده، با دیگر نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی در منطقه بیان‌گر آن است؛ که تهیه مدل‌های سه‌بعدی از نتایج مدل‌سازی‌های دوبعدی در این پژوهش، نتایج دقیق‌تر و اطلاعات قابل‌اعتمادتری از بی‌هنجاری‌های احتمالی زیرسطحی ارائه می‌دهند. شایان ذکر است؛ که در مدل‌های تهیه‌شده از نتایج مدل‌سازی‌های سه‌بعدی، چندین بی‌هنجاری در مناطق انتهایی پروفیل‌ها ایجاد شده است؛ که خیلی قابل‌اعتماد نمی‌باشند. این اتفاق احتمالاً ناشی از تعداد داده‌های کم و برون‌یابی نرم‌افزار RES3DINV در انتهای پروفیل‌هایی با طول‌های متفاوت می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری است؛ که نتایج هر دو روش در قسمت‌هایی به‌جز انتهای پروفیل‌ها، از انطباق بسیار خوبی برخوردار است.

به‌منظور تلفیق نتایج مدل‌سازی‌های دوبعدی در سه بعد، نمایش کانی‌سازی‌های احتمالی و همچنین تجسم بهتر توزیع فضایی مقادیر مقاومت‌ویژه و بارپذیری از نرم‌افزار RockWorks استفاده شده است. در نمایش‌های سه‌بعدی، نتایج وارون‌سازی‌های دوبعدی در فضای سه‌بعدی درون‌یابی می‌شوند؛ و سپس با تعیین یک حد آستانه مناسب، بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی در این فضا نمایش داده می‌شوند. در این نمایش‌ها، مقادیر مجهول در فواصل بین پروفیل‌ها با روش ریاضی عکس فاصله وزنی ناهمسانگرد^۱ درون‌یابی شده‌اند. در شکل‌های (۴-۴۱) تا (۴-۴۴) نمایش سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP آورده شده است. شکل‌های (۴-۴۳) و (۴-۴۴) به‌ترتیب مقادیر مقاومت‌ویژه بیش از ۵۰۰ اهم‌متر و بارپذیری بیش از ۱۰ میلی‌ثانیه را به‌صورت سه‌بعدی نمایش می‌دهند. بر این اساس، نواحی بی‌هنجار با بارپذیری بالا منطبق بر مناطقی با مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین هستند.

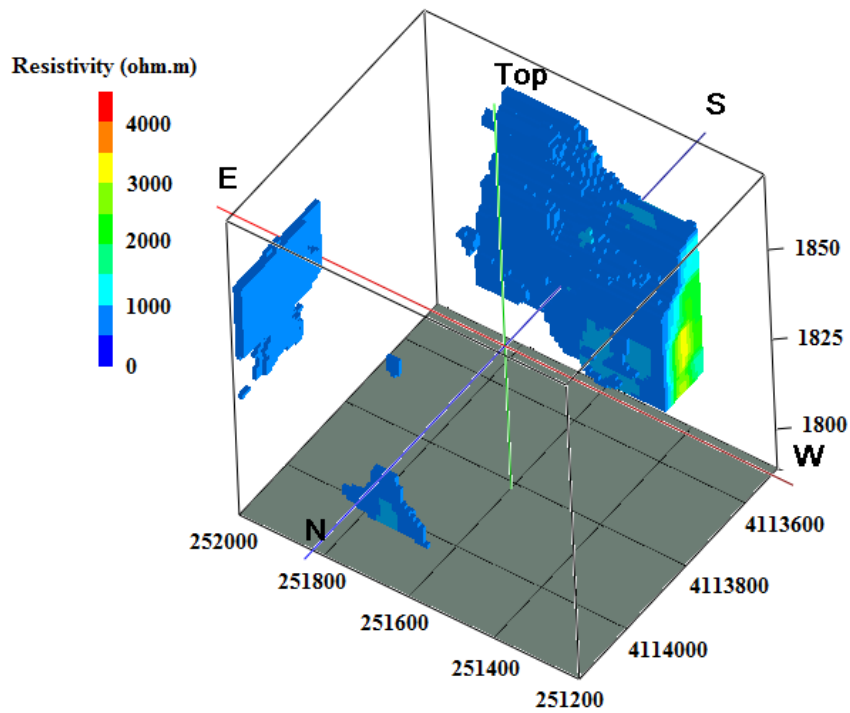
^۱ Inverse Distance Weighted Anisotropic Method



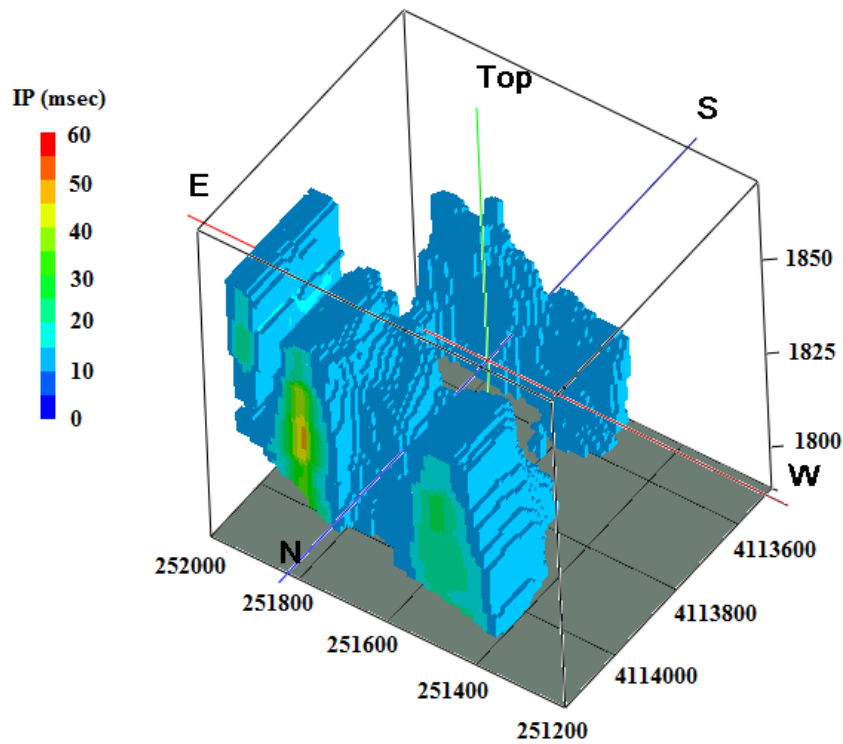
شکل ۴-۴۱: نمایش سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه همراه با توپوگرافی.



شکل ۴-۴۲: نمایش سه بعدی داده‌های بارپذیری همراه با توپوگرافی.



شکل ۴-۴۳: نمایش سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه برای مقادیر بیش از ۵۰۰ اهم‌متر.



شکل ۴-۴۴: نمایش سه بعدی داده‌های بارپذیری برای مقادیر بیش از ۱۰ میلی ثانیه.

با توجه به شکل (۴-۴۴)، بی‌هنجارهای احتمالی بر روی پروفیل DD 00-NS (شکل ۴-۱۷-ب) و همچنین بی‌هنجارهای احتمالی بر روی پروفیل DD 50n-EW (شکل ۴-۲۳-ب)، به ترتیب در جهت غرب و جنوب منطقه ادامه پیدا کرده‌اند. بر این اساس یک بی‌هنجاری با راستای تقریبی شرقی-غربی در جنوب محدوده منطبق بر زون سیلیسی-برشی، و چند بی‌هنجاری با راستای تقریبی شمالی-جنوبی در شمال محدوده و در ارتباط با شکستگی‌های نهشته‌های اولیوین بازالتی گسترش یافته‌اند؛ که می‌توان آن‌ها را مرتبط با کانی‌سازی فلزی سرب و روی در منطقه چومالو دانست.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

مطالعات انجام شده در محدوده اکتشافی چومالو، شامل مطالعات زمین شناسی و ژئوفیزیکی می باشند. بر پایه مشاهدات صحرائی، شواهد زمین شناسی و ساختاری و مطالعات میکروسکوپی، کانه زایی سرب و روی در محدوده چومالو در سنگ میزبان آتشفشانی اولیوین بازالت و بخشی از توده نفوذی مونزونیتی، در ارتباط با نفوذ توده مونزونیتی و طی فرآیندهای هیدروترمال رخ داده است. حضور بافت های شانه ای در کوارتز، پرکننده فضای خالی در کلسیت و فلوریت، و برش های سیلیسی نشان دهنده حضور محلول های هیدروترمال است؛ که ضمن چرخش در زون های گسلی و شکستگی ها، باعث ایجاد دو سیستم کانی سازی در منطقه و تشکیل دگرسانی های هیدروترمال از جمله پروپیلیتیک، پروپیلیتیک- کربناته، سیلیسی و سیلیسی- آرژلیک شده اند. گسل ها کنترل کننده ی این کانی سازی ها هستند، کانی سازی های مذکور به صورت رگه و رگچه های کوارتز و کوارتز- کلسیت، توده ای و برش هیدروترمال با سیمان کوارتز تشکیل شده اند. این نوع برش، حاصل چیرگی فشار بخار سیال هیدروترمال (فشار هیدروستاتیک) بر فشار لیتوستاتیک است؛ که با شکستن و خرد شدن سنگ های مسیر مهاجرت سیال های هیدروترمال در ژرفای کم رخ می دهد [Browne, 1978]. کانی سازی با کوارتز و پیریت آغاز شده است؛ که با مقادیر متفاوتی از گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و فلوریت همراهی می شوند. خصوصیات کانی سازی چومالو با توجه به ساختار رگه ای آن، بافت های تشکیل دهنده کانی سازی، دگرسانی های موجود و نوع ماده معدنی، از نوع کانسارهای سرب و روی هیدروترمال می باشد.

در این پژوهش، برداشت های ژئوفیزیکی به دو روش مقاومت ویژه و IP به منظور اکتشاف کانسار سرب و روی چومالو در شمال غرب زنجان انجام شد. برداشت داده ها در این منطقه، ابتدا با آرایه الکترودی مستطیلی به منظور پی جویی مناطق امیدبخش و سپس با آرایه الکترودی دوقطبی- دوقطبی به منظور اکتشاف این مناطق صورت گرفت. نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. به کارگیری روش‌های مقاومت‌ویژه و IP با استفاده از آرایه الکترودی مستطیلی برای پی‌جویی مناطق امیدبخش، موفق بوده است؛ در این بررسی‌ها مناطق امیدبخش با مقادیر مقاومت‌ویژه پایین تا متوسط و بارپذیری بالا نمایان شدند. پس از بررسی‌های عمقی بر روی این مناطق، صحت نتایج حاصل از به کارگیری آرایه مستطیلی تأیید شد.

۲. استفاده هم‌زمان از دو روش مقاومت‌ویژه و IP با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی به منظور بررسی عمقی مناطق امیدبخش، سودمند بوده و در تشخیص بی‌هنجاری‌های احتمالی مرتبط با کانی‌سازی موفق عمل کرده است؛ با مقایسه نتایج به دست آمده از این دو روش برای نواحی بی‌هنجار، می‌توان در مورد عیار و نوع کانی‌سازی‌ها (پراکنده یا توده‌ای) اظهار نظر نمود. به علاوه استفاده از این روش‌ها باعث کاهش هزینه‌های اکتشافی، مدیریت زمان و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی (در مقایسه با حفاری) می‌شود.

۳. مدل‌های وارون مقاومت‌ویژه و IP به دست آمده از نرم‌افزارهای RES2DINV و ZondRes2D انطباق نسبتاً خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند. همچنین خطای RMS برای هر دو نرم‌افزار، با تعداد مراحل تکرار کم (۴ یا ۵ مرحله تکرار)، مقادیر پایینی دارد.

۴. بررسی مدل‌های وارون سه‌بعدی مقاومت‌ویژه و IP به دست آمده از نرم‌افزار RES3DINV برای هر دسته از پروفیل‌های موازی نشان می‌دهد؛ که نتایج مدل‌سازی‌های مذکور با نتایج مدل‌سازی‌های وارون دوبعدی مقاومت‌ویژه و IP هم‌خوانی بالایی دارند و وجود نواحی بی‌هنجار عمقی در نتایج هر دو مدل‌سازی تأیید می‌شود. البته قابل ذکر است؛ که در مدل‌های به دست آمده از نرم‌افزار RES3DINV گاهی به علت هم‌اندازه نبودن طول پروفیل‌ها، بی‌هنجاری‌هایی در گوشه‌ها و فواصل انتهایی پروفیل‌ها به دلیل داده‌های کم و برون‌یابی نرم‌افزار در این قسمت‌ها ایجاد می‌شود؛ که این بی‌هنجاری‌ها خیلی قابل اعتماد نمی‌باشند.

۵. نتایج حاصل از مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه، در برخی موارد گسل‌های موجود در نقشه زمین‌شناسی منطقه و چند گسل احتمالی پنهان و مرتبط با بی‌هنجاری‌ها را نمایان کرده است؛ هرچند که در تعیین محل دقیق این ساختارها و شناسایی تمامی آن‌ها موفق نبوده است. با توجه به ارتباط نزدیک کانی‌سازی با ساختارهای گسلی و شکستگی‌ها، تشخیص دقیق این ساختارها از اهمیت بالایی برخوردار است.

۶. نتایج مطالعات ژئوفیزیکی در منطقه چومالو، نشان از ادامه روند سیستم کانی‌سازی دوم (دسته رگه‌های شمالی) به سمت شرق و شمال‌شرق محدوده دارد.

۷. بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی و تفسیر نتایج به‌کمک اطلاعات زمین‌شناسی، بی‌هنجاری‌هایی منطبق بر مناطق با مقادیر بارپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین، و عمدتاً مرتبط با ساختارهای گسلی و شکستگی‌ها، به‌عنوان کانی‌سازی‌های احتمالی سرب و روی معرفی گردیدند. بر این اساس، یک بی‌هنجاری در جنوب محدوده با راستای تقریبی شرقی-غربی و منطبق بر زون سیلیسی-برشی، و چند بی‌هنجاری در شمال محدوده با راستای تقریبی شمالی-جنوبی و در ارتباط با شکستگی‌های نهشته‌های اولیوین بازالتی شناسایی شدند. در مقام مقایسه برای بی‌هنجاری‌های شمالی نسبت به بی‌هنجاری جنوبی، احتمالاً کانی‌سازی فلزی با عیار و گستردگی بیشتر، به‌صورت رگه‌ای و حضور سولفیدهای توده‌ای در نهشته‌های بازالتی تشکیل شده است؛ و برای زون سیلیسی-برشی، احتمالاً کانی‌سازی با عیار و گستردگی کمتر، و عمدتاً با حضور سولفیدهای پراکنده صورت گرفته است؛ که شواهد زمین‌شناسی تا حدودی این نتیجه را تأیید می‌کند. البته احتمال می‌رود مقادیر بالای بارپذیری برای برخی از بی‌هنجاری‌های شمالی به علت حضور پیریت پراکنده در عمق باشد؛ که برای اطمینان از این موضوع نیاز به اطلاعات تکمیلی از جمله داده‌های حفاری می‌باشد.

۸. بی‌هنجاری جنوبی عمدتاً از عمق نزدیک به سطح زمین تا عمق حدود ۴۶ متر گسترش دارد؛ که ترانشه‌های حفرشده در ارتباط با زون سیلیسی-برشی و همچنین رخنمون سطحی این زون، حضور کانی‌سازی در این قسمت را تأیید می‌کند. بی‌هنجاری‌های شمالی نیز از عمق حدود ۱۰ متر تا حدود ۴۶ متر بر روی پروفیل DD 50n-EW گسترش دارند؛ که با حرکت به سمت جنوب، عمق قرارگیری بی‌هنجاری‌ها بر روی دو پروفیل DD 50s-EW و DD 150s-EW افزایش و از شدت آن‌ها کاسته می‌شود. وجود آثار معدنکاری قدیمی و رخنمون‌های کانی‌سازی در ارتباط با این بی‌هنجاری‌ها نیز، تأییدی بر وجود کانی‌سازی‌های عمقی در این قسمت است.

۲-۵ پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در محدوده مورد مطالعه و بررسی نتایج سایر مطالعات، موارد زیر جهت مطالعات بیشتر در رابطه با این پژوهش پیشنهاد می‌شوند:

۱. با توجه به این‌که بی‌هنجاری‌ها بر روی تمامی پروفیل‌ها در جهت افزایش عمق (بیش از ۴۶ متر) همچنان ادامه دارند؛ پیشنهاد می‌شود عملیات ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه و IP بر روی پروفیل‌ها، با فواصل الکترودی بزرگ‌تر نیز صورت گیرد؛ تا گسترش عمقی بی‌هنجاری‌ها بهتر مشخص شود.
۲. به منظور تعیین شکل دقیق بی‌هنجاری‌ها و افزایش دقت تفسیرها، پیشنهاد می‌شود برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP بر روی پروفیل‌هایی بین پروفیل‌های قبلی و با فاصله حداکثر ۵۰ متر از دیگر پروفیل‌ها صورت گیرد و سپس مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی داده‌ها انجام شود. همچنین به منظور دقت بیشتر برای مدل‌سازی سه‌بعدی، پیشنهاد می‌شود طول پروفیل‌های برداشت تا حد امکان هم‌اندازه طراحی و برداشت شود. این برداشت‌ها به‌خصوص در شمال منطقه به منظور بررسی عمقی بیشتر برای بی‌هنجاری B2 شناسایی شده در برداشت آرایه مستطیلی

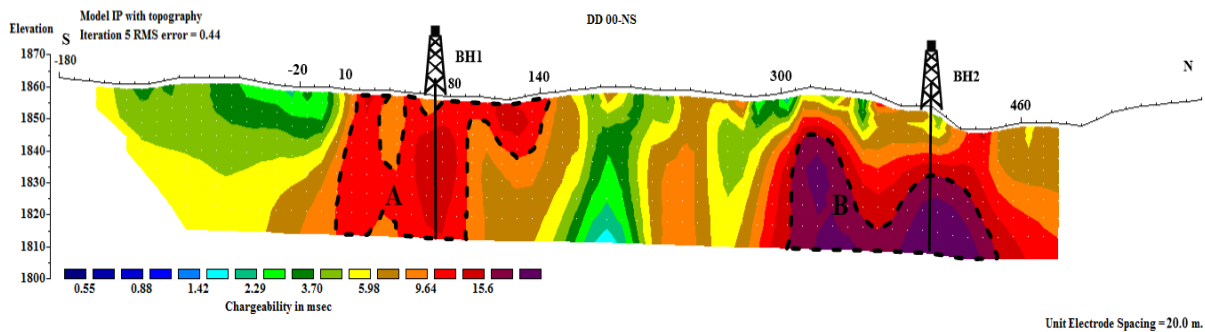
(شکل ۴-۱۴) حائز اهمیت می‌باشند.

۳. با توجه به این که مقادیر IP در پروفیل‌های برداشت‌شده می‌تواند ناشی از حضور کانی‌های فلزی از جمله پیریت و یا کانی‌های رسی باشد؛ و از آنجا که وجود پیریت در نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه نیز تأیید شده است، لذا پیشنهاد می‌شود در صورت امکان برداشت‌های SIP قبل از انجام حفاری و به‌منظور شناسایی و تفکیک کانی‌های فلزی و رسی، و بررسی دقیق‌تر بافت و ابعاد کانی‌سازی در منطقه به‌خصوص برای بی‌هنجاری‌های شمالی (به‌دلیل مقادیر بالاتر بارپذیری نسبت به بی‌هنجاری جنوبی) صورت گیرد.

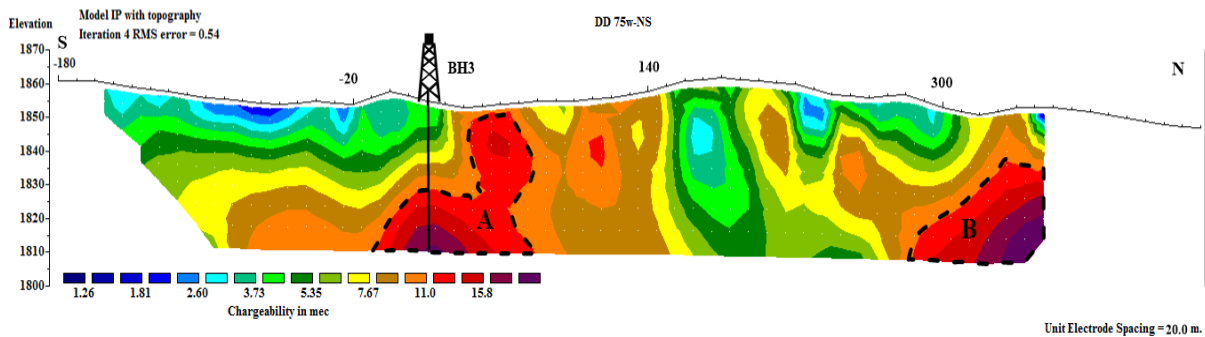
۴. با توجه به نوع کانی‌سازی در منطقه و ارتباط آن با ساختارهای گسلی و شکستگی‌ها، تهیه نقشه تکتونیکی منطقه به‌منظور شناسایی دقیق این ساختارها پیشنهاد می‌گردد.

۵. همچنین با توجه به فعال بودن منطقه از نظر تکتونیکی و اهمیت شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها، به‌منظور تعیین موقعیت این ساختارها در منطقه، استفاده از روش مقاومت‌ویژه با به‌کارگیری آرایه الکترودی قطبی- دوقطبی متقارن با توجه به قابلیت شناسایی بهتر گسل و شکستگی با این آرایه نسبت به سایر آرایه‌های الکترودی [پیروز و همکاران، ۱۳۹۲]، پیشنهاد می‌شود. به‌علاوه استفاده از روش مغناطیس‌سنجی زمینی نیز احتمالاً می‌تواند در شناسایی این ساختارها کمک شایانی نماید.

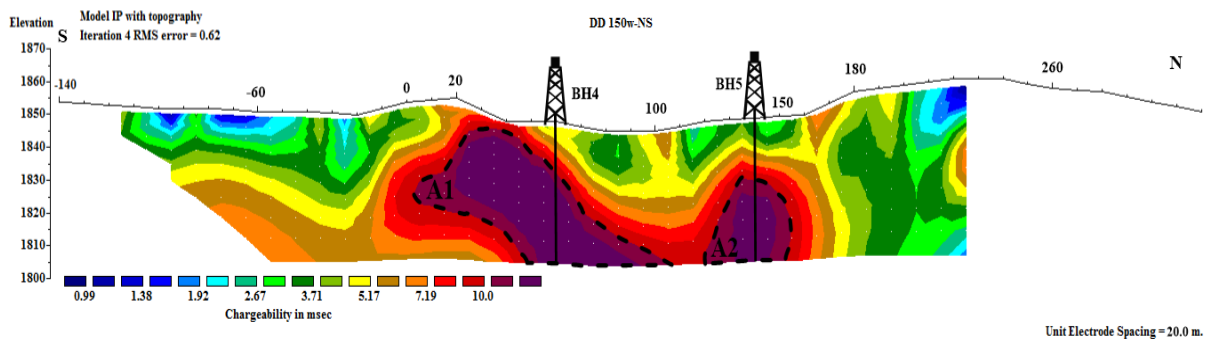
۶. در نهایت با توجه به محل بی‌هنجاری‌های زیرسطحی به‌دست آمده در نتیجه‌ی مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل‌های DD 00-NS، DD 75w-NS، DD 150w-NS، DD 50n-EW، DD 50s-EW و DD 150s-EW، نقاط مختلف حفاری بر روی پروفیل‌های مذکور با مختصات و مشخصات ارائه شده در جدول (۵-۱) پیشنهاد می‌شود (شکل‌های (۵-۱) تا (۵-۶)). شایان ذکر است؛ که تمامی گمانه‌های حفاری از نوع قائم پیشنهاد می‌شوند.



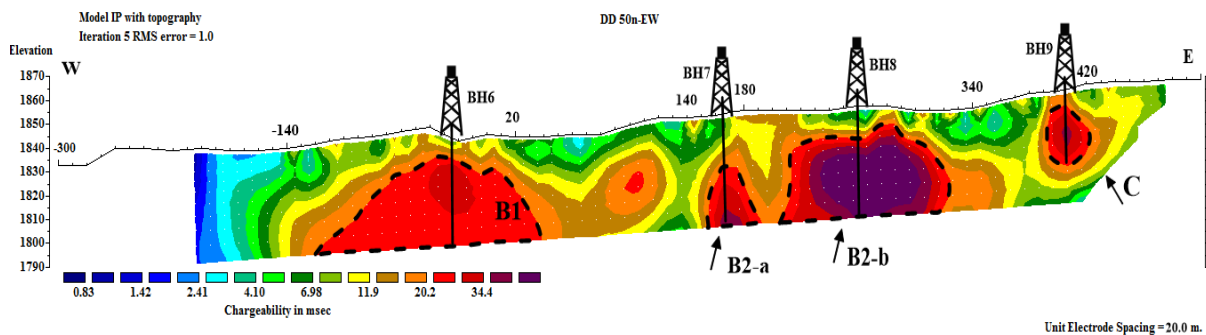
شکل ۵-۱: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD 00-NS همراه با موقعیت گمانه های پیشنهادی.



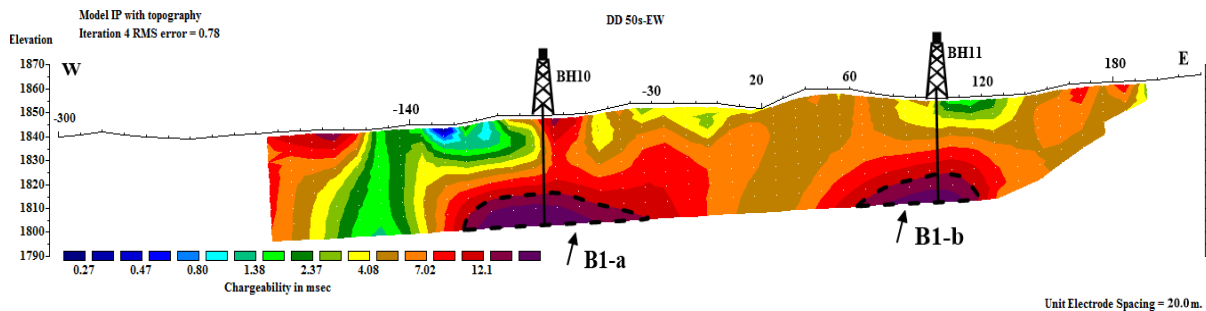
شکل ۵-۲: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD 75w-NS همراه با موقعیت گمانه پیشنهادی.



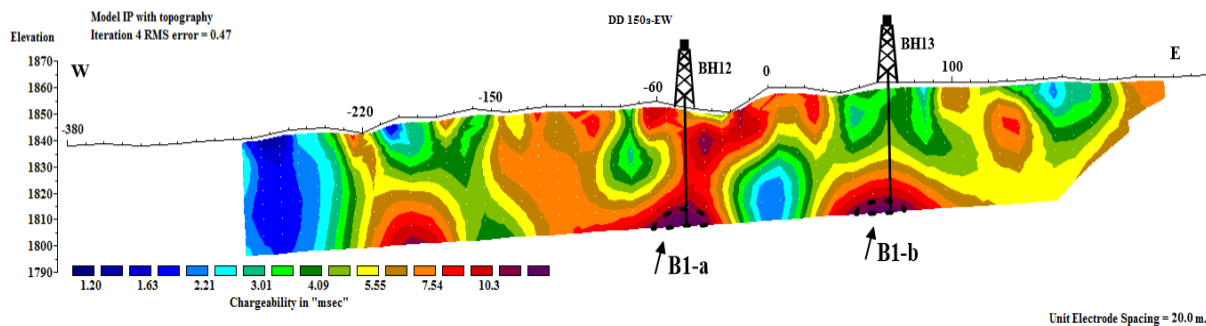
شکل ۵-۳: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD 150w-NS همراه با موقعیت گمانه های پیشنهادی.



شکل ۴-۵: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD 50n-EW همراه با موقعیت گمانه های پیشنهادی.



شکل ۵-۵: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD 50s-EW همراه با موقعیت گمانه های پیشنهادی.



شکل ۶-۵: مدل IP حاصل از مدل سازی وارون توسط نرم افزار RES2DINV برای پروفیل DD 150s-EW همراه با موقعیت گمانه های پیشنهادی.

جدول ۵-۱: مشخصات نقاط پیشنهادی برای حفاری‌های اکتشافی

فاصله تقریبی محل حفاری از مبدأ پروفیل	طول و عرض جغرافیایی (UTM)	عمق حفاری (m)	گمانه پیشنهادی	نام پروفیل برداشت
+۷۰	X= 251654 Y= 4113723	۴۶	BH1	DD 00-NS
+۴۰۰	X= 251651 Y= 4114052	۴۶	BH2	DD 00-NS
+۲۰	X= 251579 Y= 4113673	۴۶	BH3	DD 75w-NS
+۶۰	X= 251504 Y= 4113712	۴۶	BH4	DD 150w-NS
+۱۴۰	X= 251505 Y= 4113792	۴۶	BH5	DD 150w-NS
-۲۵	X= 251485 Y= 4114022	۴۶	BH6	DD 50n-EW
+۱۶۵	X= 251675 Y= 4114022	۴۶	BH7	DD 50n-EW
+۲۶۰	X= 251768 Y= 4114024	۴۶	BH8	DD 50n-EW
+۴۰۵	X= 251916 Y= 4114026	۳۰	BH9	DD 50n-EW
-۸۰	X= 251429 Y= 4113923	۴۶	BH10	DD 50s-EW
+۱۰۰	X= 251611 Y= 4113923	۴۶	BH11	DD 50s-EW
-۴۵	X= 251464 Y= 4113823	۴۶	BH12	DD 150s-EW
+۶۵	X= 251576 Y= 4113822	۴۶	BH13	DD 150s-EW

منابع و مأخذ

آریامنش م. و احمدی س.، (۱۳۹۱)، "ژئوالکتریک"، انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران، ص ۵۱۰.

آقازاده م. و براتی ب.، (۱۳۹۵)، "گزارش نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی ۱:۵۰۰۰ محدوده معدنی چومالو".

بازرگانی گیلانی ک. و پرچکانی م.، (۱۳۸۹)، "ویژگی‌های فلززایی (متالوژنیکی) کانسار سرب و روی (مس) باریک آب با سنگ میزبان توف اسیدی، رشته‌کوه‌های طارم، جنوب خاور زنجان، شمال باختر ایران"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۸، دوره ۲۰، ص ۹۷.

پیروز ا.، جهان‌بین م.، رفعت‌هراب ع.، احمدزاده غ. و فردوسی ح.، (۱۳۹۲)، "به تصویر کشیدن ناهمگنی‌های 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، دانشگاه صنعتی شاهرود.

حاجی‌میرزاجان ح.، کریم‌پور م. ح.، ملک‌زاده شفارودی آ.، حیدریان شهری م. ر. و هامونی س. ج.، (۱۳۹۲)، "تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی، ژئوشیمی و مطالعات ژئوفیزیکی IP/RS و مغناطیس‌سنجی زمینی منطقه رودگز، جنوب شرق گناباد، استان خراسان رضوی"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، دوره ۵، ص ۱۱۷.

خاکزاد ا. و حاج‌علیلو ب.، (۱۳۷۸)، "بررسی کانی‌سازی‌های سرب، روی و مس مناطق شمال غرب زنجان و شرق میانه در ارتباط با دگرسانی‌های گسترده گرمابی"، سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ص ۲۱۲، دانشگاه شیراز.

رجائی ا. و داودی‌راد م.، (۱۳۸۹)، "مدل‌سازی دوبعدی داده‌های گمانه‌زنی قائم‌الکتریکی به‌همراه مطالعه موردی"، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.

شرکت توسعه علوم زمین، (۱۳۸۲)، "گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در محدوده ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین"، ارائه شده به سازمان صنایع و معادن استان اردبیل.

فیضی م.، ابراهیمی م.، کوهستانی ح. و مختاری م. ع. ا.، (۱۳۹۵)، "زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی رخ‌داد معدنی مس آق‌کند (شمال زنجان، پهنه طارم- هشتجین)"، **مجله زمین‌شناسی اقتصادی**، شماره ۲، دوره ۸، ص ۵۰۷.

قربانی م.، (۱۳۸۶)، "زمین‌شناسی اقتصادی ذخایر معدنی و طبیعی ایران"، انتشارات آراین زمین، تهران، ص ۵۱۵.

قربانی م.، (۱۳۸۷)، "زمین‌شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه‌های معدنی ایران"، انتشارات آراین زمین، تهران، ص ۶۰۷.

کلاگری ع.، (۱۳۸۹)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز، ص ۱۸۶-۱۱۷.

مرادزاده ع.، دولتی ارده‌جانی ف.، کثیری ا. و عرب‌امیری ع.، (۱۳۸۶)، "مدل‌سازی وارون و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی کانسار سرب و روی تاش"، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، تهران.

موسوی س ح.، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "مدل‌سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون‌القایی

و مقاومت‌ویژه به‌منظور اکتشاف ذخایر مس در منطقه هفت‌کوه کرمان"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مهدوی ف.، (۱۳۸۳)، "روش‌های الکتریکی در اکتشافات ژئوفیزیکی حوضه‌های رسوبی عمیق"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

مهرابی ب.، چقانه ن. و طالع فاضل ا.، (۱۳۹۳)، "بررسی کانی‌سازی اپی‌ترمال سولفیداسیون متوسط آنومالی ۴ کانسار گلوچه (شمال زنجان)، بر اساس خصوصیات کانه‌نگاری، دگرسانی و ژئوشیمی سیال کانه‌ساز"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱، دوره ۶، ص ۱.

مهرابی ب.، طالع فاضل ا.، قاسمی سیانی م. و اقبالی م. ع.، (۱۳۸۹)، "بررسی نحوه کانی‌سازی و تشکیل کانسار رگه ای مس- طلا گلوچه (شمال زنجان) بر اساس شواهد کانی‌شناسی، ژئوشیمی و سیالات درگیر"، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۴، دوره ۳۵، ص ۱۸۵.

نبوی م. ح.، (۱۳۵۵)، "دیباجه‌ای بر زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی کشور.

نوروزی غ. و غلامی س.، (۱۳۸۴)، "تحلیل و مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP, Rs, M) در محل اندیس معدنی مس سوناجیل"، نشریه دانشکده فنی، شماره ۲، دوره ۳۹، ص ۲۵۳.

نوروزی غ.، (۱۳۹۲)، "روش‌های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۱۸۸.

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

هادی‌زاده ح.، (۱۳۸۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "اکتشافات ژئوشیمیایی از دیدگاه زمین‌شناسی

اقتصادی در محدوده برگه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰۰ برندق (از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ ماسوله)"، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

Alavi. M., (1991), "**Tectonic map of the Middle East**", Geological Survey of Iran, Tehran.

Best M., Fage I. and Daigle R., (2015), "Integrating high resolution resistivity/IP surveying and core measurements over nine known mineral deposits: Yukon, Canada", Near Surface Asia Pacific Conference, P48, Waikoloa, Hawaii.

Browne P. R. L. (1978) "Hydrothermal alteration in active geothermal fields" **Ann. Rev. Earth planet. Sci.**, **6**, pp. **229- 250**.

Dentith M. and Mudge S. T., (2014), "**Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**", Vol. 1, First Edition, Cambridge university press, UK, pp. **236**.

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

Evrard M., Pirard E. and Nguyen F., (2016), "Geophysical investigation of the Pb-Zn deposit of Lontzen, Belgium", Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, P378, Denver, Colorado.

Goldie M. (2007) "A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada" **The Leading Edge**, **2**, **26**, pp. **180-183**.

Hinze W. J. (1990). The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies, pp 75-126, In: "**Geotechnical and Environmental Geophysics**", Ward S. H. Society of Exploration Geophysicists, US.

Kaminsky, A., (2012), "Tutorial: program for two-dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods", Saint-Petersburg.

Kearey P., Brooks M. and Hill I., (2002), “**An Introduction to Geophysical Exploration**”, Vol. 1, Third Edition, Blackwell Science Ltd, Oxford, pp. **184**.

Kirsch R., (2009), “**Groundwater Geophysics**”, Vol. 1, Second Edition, Springer, Heidelberg, pp. **85**.

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. **205**.

Loke M. H. and Barker R. D. (1995) “Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections” **Geophysics**, **6**, **60**, pp. **1682-1690**.

Loke M. H. and Barker R. D. (1996) “Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method” **Geophysical Prospecting**, **1**, **44**, pp. **131-152**.

Loke, M. H., (2004), “Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys”, Geotomo Software.

Loke, M. H., (2005), “RES3DINV ver. 2.15 for Windows 95/98 & NT-Rapid 3D Resistivity & IP inversion using the least squares method”.

Loke, M. H., (2013), “Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least squares method”, Geotomo Software.

Meju M. A., (1994), “**Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice**”, Society of Exploration Geophysicists, United State of America, pp. **305**.

Milsom J. and Eriksen A., (2011), “**Field Geophysics**”, Vol. 1, Fourth Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. **109-133**.

Mooney H. M., (1980), “**Handbook of Engineering Geophysics: Electrical Resistivity**”, Vol. 2, Bison Instruments, Minneapolis, USA, pp. **3-28**.

Reynolds J. M., (2011), “**An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**”, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. **289-402**.

Roy K. K., (2008), “**Potential Theory in Applied Geophysics**”, Springer, Heidelberg, pp. **651**.

Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A. and Richard G. (2005) “Electrical resistivity survey in soil science: a review” **Soil and Tillage research**, **2**, **83**, pp. **173-193**.

Sasaki Y. (1992) “Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation” **Geophysical Prospecting**, **4**, **40**, pp. **453-463**.

Scales J. A., Smith M. L. and Treitel S., (2001), “**Introductory Geophysical Inverse Theory**”, Samizdat press, pp. **193**.

Seigel H., Nabighian M., Parasnis D. S. and Vozoff k. (2007) “The early history of the induced polarization method” **The Leading Edge**, **3**, **26**, pp. **312-321**.

Selley R. C., Cocks L. R. M. and Plimer I. R., (2005), “**Encyclopedia of geology**”, Vol. 1, First Edition, Elsevier Ltd, Oxford, pp. **482**.

Stocco S., Godio A. and Sambuelli L. (2009) “Modelling and compact inversion of magnetic data: A Matlab code” **Computers and Geosciences**, **10**, **35**, pp. **2111-2118**.

Stöcklin J. (1968) “Structural history and tectonics of Iran; a review” **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, **7**, **52**, pp. **1229-1258**.

Sultan S. A. and Monteiro Santos F. A. (2008) “1D and 3D resistivity inversions for geotechnical investigation” **Journal of Geophysics and Engineering**, **1**, **5**, pp. **1-11**.

Sumner J. S., (1972), “A Comparison of Electrode Arrays in IP Surveying”, AIME, San Francisco, California.

Telford W. M., Geldart L. P. and Sheriff R. E., (1990), “**Applied Geophysics**”, Vol. 1, Second Edition, Cambridge university press, UK, pp. **578-596**.

Thomas G., Stolz E. M. and Mutton A. J. (1992) “Geophysics of the Century zinc-lead-silver deposit, northwest Queensland” **Exploration Geophysics**, 1/2, 23, pp. 361-366.

Ward, S. H., (1990), “**Geotechnical and Environmental Geophysics: Resistivity and Induced Polarization Methods**”, Vol. 1, Society of Exploration Geophysicists, US, pp. 147-189.

White R. M. S., Collins S. and Loke M. H. (2003) “Resistivity and IP arrays, optimized for data collection and inversion” **Exploration Geophysics**, 4, 34, pp. 229-232.

Whitney D. L. and Evans B. W. (2010) “Abbreviations for names of rock-forming minerals” **American Mineralogist**, 1, 95, pp. 185–187.

Zhou Q. Y., Shimada J. and Sato A. (2001) “Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography” **Water Resources Research**, 2, 37, pp. 273-285.

Zohdy A. A. R., (1989), “A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves” **Geophysics**, 2, 54, pp. 245-253.

Website:

[Http://www.google.com/earth/](http://www.google.com/earth/)

Abstract

Geophysical methods are one of the most suitable methods that they have a wide application in prospecting and exploration of mineral deposits. Using two or more exploratory methods together and combining them with other information such as geological studies can increase the possibility of exploring and reaching promising areas. According to the evidence of metallic and sulfide mineralization in the study area (Chumalu exploratory area), the use of induced polarization (IP) and electrical resistivity geophysical methods for prospecting and exploration of probable mineralization and doing geological studies is of great importance.

The Chumalu exploratory area is located at 70 km northwest of Zanjan, which is geologically located in the Alborz-Azarbaijan magmatic arc and in the Taron-Hashtjin metallogenic zone. The host rock is the Eocene volcanic rocks and the Oligocene monzonite intrusive mass that have undergone propylitic-carbonate, silica, and silica-argillic hydrothermal alterations due to the injection of intrusive mass. The mineralization in the area is of the form of vein, veinlet, massive, scattered and replaced, and follows the trend of the faults and fractures that includes galena, sphalerite, cerussite, chalcopyrite and pyrite. Based on the results of the geological studies conducted in this research, the mineralization characteristics of Chumalu area are of the type of lead and zinc hydrothermal deposits.

According to initial geological studies and the mineral evidence in the area, IP and resistivity data acquisition were first designed and carried out in the form of 4 networks using gradient array in order to determine the anomalous limits, and then, in the form of 6 lines using dipole-dipole array in order to explore the lateral and depth limits of these anomalies. The prospecting that have been done in the area revealed some places that were apt for mineralization. Then, IP and resistivity acquisition data was processed and modeled using two-dimensional (2D) smooth inversion method using RES2DINV and ZondRes2D software packages, and the results were interpreted and validated based on the results of geological studies and information obtained from trenches, mining evidence and surface outcrops. Furthermore in order to obtain a better view of subsurface anomalous areas, three-dimensional (3D) smooth inversion modeling was carried out using RES3DINV software.

Also for better representation of 2D and 3D modeling results, Voxler and RockWorks software have been used. Consequently, an anomaly with an approximate east-west orientation in the south of the area has been extended on the silica-shear zone, and some anomalies with an approximate north-south orientation in the north of the area, in relation to the fractures of the basaltic deposits, which can be linked with lead and zinc metallic mineralization in the area. Anomalous areas with high chargeability and medium to low resistivity values have been determined. It is worth noting, high chargeability values for some anomalies in the north of the area are probably due to the presence of scattered pyrites in depth. Finally, 13 points were proposed for drilling.

Keywords: Hydrothermal alteration, Vein mineralization, Induced polarization (IP), Electrical resistivity, Dipole- dipole array, Chumalu, Zanjan.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Exploration

**Exploratory modeling and interpretation of
geophysical and geological data in lead and zinc deposit of
Chumalu mine, northwest of Zanjan**

By: Arash Rabiei Sadeghabadi

Supervisor:

Dr. Alireza Arab-Amiri

Dr. Abolghasem Kamkar-Rouhani

Advisor:

Dr. Susan Ebrahimi

January 2018