

رسالة محمد



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان

مدل سازی دو بعدی داده های ژئوالکتریک با روش های مقاومت ویژه و قطبش القایی به منظور

اکتشاف مس در محدوده خرانق یزد

دانشجو : نادر مطاعی

اساتید راهنما :

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

مشاور:

مهندس حسن ریاحی

بهمن ۱۳۹۴

تقدیر به

بی شک شکوفایی هر عالم و دانشمندی بدون زحمات پدر و مادر به سرانجام نمی رسد. بر همین اساس پایان نامه را تقدیر به پدر و مادر دلسوز و دایم مهر بانمی کنم چرا که بدون ایشان تحقق رشد و غایب اینجانب انجام نمی - پذیرفت و اگر ایشان نبودند هستی در سکوت بود.

تشکر و قدردانی

یزدان پاك را سپاس گزارم كه بر من منت نهاد تا پایان دو سال دوره کارشناسی ارشد خویش را با این پایان نامه به سرانجام برسانم. در این راه پر پیچ و خم اگر دستان توانگر اساتید مجرب نبود، ثمره دو سال تلاش بنده حقیر به بار نمی نشست. بر همین اساس جا دارد كه از جناب آقای دکتر علیرضا عربامیری و جناب آقای دکتر ابوالقاسم كامكار روحانی به خاطر زحمتهای بی دریغ و راهنمایی های سودمندشان تشکر و سپاس گذاری به عمل آورم.

تعهد نامه

اینجانب **نادر مطاعی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف معدن از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **مدل سازی دو بعدی داده های ژئوالکتریک با روش های مقاومت ویژه و قطبش القایی به منظور اکتشاف مس در محدوده خرائق یزد** تحت راهنمایی آقای **علیرضا عرب امیری** و **ابولقاسم 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 تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

یکی از مراحل مهم در اکتشاف ذخایر معدنی، شناسایی مناطق هدف است. روش‌های قطبش-القایی^۱ (IP) و مقاومت‌ویژه، روش‌های مناسبی به‌منظور پی‌جویی و اکتشاف کانی‌سازی‌های سولفید فلزی می‌باشند. در این تحقیق یک محدوده اکتشافی در ۵ کیلومتری شمال‌شرق خرانق در نزدیکی روستای نفیس آباد از توابع شهرستان اردکان در استان یزد مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به شواهد کانی‌سازی سولفیدی مس در منطقه خرانق، عملیات ژئوفیزیکی با طراحی یک برداشت IP و مقاومت‌ویژه با استفاده از آرایش مستطیلی انجام شده که در نتیجه مناطق امیدبخش کانی‌سازی در منطقه مورد نظر تعیین شده است. به‌منظور بررسی مناطق امیدبخش در نقشه حاصل از برداشت سه پروفیل دوقطبی-دوقطبی با فواصل الکترودی ۱۰ و ۲۰ متری مستطیلی، طراحی و اجرا شده؛ تا روند آنومالی‌های احتمالی در عمق بررسی گردد. تفسیر داده‌های حاصل از پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV انجام شده است.

با مقایسه نتایج حاصل از تفسیر پروفیل‌های مستطیلی و پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی، مناطق کانی‌سازی سولفیدی و در نتیجه زون‌های احتمالی در منطقه شناسایی شده که شامل سه توده با بارپذیری بالا در مقطع DD100S و سه توده با بارپذیری بالا در مقطع DD200S است و بر اساس این نتایج، چهار محل مناسب برای حفاری معرفی شده است. دو نقطه حفاری روی پروفیل DD200S با عمق‌های ۲۰ و ۳۰ متر و دو نقطه حفاری روی پروفیل DD100S با عمق‌های ۳۰ و ۴۰ متر پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، پروفیل‌زنی، اکتشاف مس، مقاومت‌ویژه، قطبش‌القایی (IP)، آرایه دوقطبی-دوقطبی، خرانق، نفیس آباد، یزد.

^۱ Induced Polarization

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل اول	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- زمین‌شناسی مس	۲
۳-۱- پراکندگی ذخایر مس ایران	۴
۴-۱- معادن مس ایران	۴
۵-۱- کانه‌های مس	۴
۶-۱- کاربرد مس	۵
۷-۱- معیارها و راهنماهای اکتشافی ذخایر مس	۶
۱-۷-۱- معیارها و راهنماهای زمین‌شناسی	۶
۲-۷-۱- معیارها و راهنماهای دورسنجی	۶
۳-۷-۱- معیارها و راهنماهای ژئوشیمیایی	۷
۴-۷-۱- معیارها و راهنماهای ژئوفیزیکی	۷
۸-۱- تاریخچه مطالعات گذشته	۸
۹-۱- ضرورت و هدف انجام پایان‌نامه	۹
۱۰-۱- روش انجام تحقیق	۹
۱۱-۱- ساختار پایان‌نامه	۱۰
۲- فصل دوم	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- روش مقاومت‌ویژه	۱۲
۳-۲- مقاومت‌ویژه مواد سازنده زمین	۱۳
۴-۲- انواع آرایش‌های الکترودی	۱۷
۵-۲- انتخاب آرایش الکترودی مناسب	۱۷

۱۸	۲-۵-۱-آرایه مستطیلی
۲۰	۲-۵-۲-آرایش و نر
۲۰	۲-۵-۳-آرایش شلومبرژه
۲۰	۲-۵-۴-آرایش لی
۲۱	۲-۵-۵-آرایش دوقطبی-دوقطبی
۲۱	۲-۶-روش‌های برداشت مقاومت ویژه الکتریکی
۲۳	۲-۷-روش قطبش القایی (IP)
۲۳	۲-۷-۱-قطبش غشایی یا IP غیرفلزی
۲۴	۲-۷-۲-قطبش الکتروودی یا IP فلزی
۲۶	۲-۸-عوامل مؤثر بر IP
۲۷	۲-۹-روش‌های اندازه‌گیری IP
۲۷	۲-۱۰-برداشت‌های صحرایی IP
۲۹	۳- فصل سوم
۳۰	۳-۱- موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی منطقه مورد مطالعه
۳۱	۳-۲- شرایط اجتماعی و زیستی منطقه مورد مطالعه
۳۱	۳-۳- شرایط آب و هوایی محدوده مورد مطالعه
۳۲	۳-۴- مشخصات محدوده مورد مطالعه
۳۳	۳-۵- مورفولوژی و ریخت‌شناسی منطقه
۳۳	۳-۵-۱- بخش پست
۳۳	۳-۵-۲- بخش تپه‌ماهور
۳۳	۳-۵-۳- بخش کوهستانی
۳۴	۳-۶- زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه
۳۴	۳-۷- تکتونیک منطقه مورد مطالعه
۳۵	۳-۸- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه
۳۷	۴- فصل چهارم

۳۸	۱-۴ - مقدمه
۳۸	۲-۴ - روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی
۳۸	۱-۲-۴ - مدل‌سازی فیزیکی
۳۸	۲-۲-۴ - روش‌های مدل‌سازی عددی
۴۲	۳-۴ - روش‌های عددی برای حل مسائل وارون سازی
۴۳	۱-۳-۴ - روش کمترین مربعات گوس- نیوتن
۴۴	۲-۳-۴ - روش شبه نیوتن
۴۶	۴-۴ - وارون سازی هموار دوبعدی توسط نرم‌افزار RES2DINV
۴۸	۵-۴ - عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP
۵۲	۶-۴ - نقشه تغییرات بارپذیری و نقشه تغییرات مقاومت‌ویژه ظاهری آرایش مستطیلی
۵۵	۷-۴ - تفسیر کیفی داده‌های خام برداشت‌شده با آرایش دوقطبی- دوقطبی
۵۶	۱-۷-۴ - تفسیر کیفی شبه‌مقطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD10N
۵۸	۲-۷-۴ - تفسیر کیفی شبه‌مقطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD100S
۵۹	۳-۷-۴ - تفسیر کیفی شبه‌مقاطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD200S
۶۰	۸-۴ - مدل‌سازی وارون دوبعدی و تفسیر کمی مقاطع حاصل از مدل‌سازی
۶۱	۱-۸-۴ - مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD10N
۶۲	۲-۸-۴ - مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD100S
۶۴	۳-۸-۴ - مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD200S
۶۶	۴-۸-۴ - مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD10N با نرم‌افزار ZondRes2D
۶۷	۵-۸-۴ - مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD100S با نرم‌افزار ZondRes2D
۶۸	۶-۸-۴ - مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD200S با نرم‌افزار ZondRes2D
۷۱	۵ - فصل پنج
۷۲	۱-۵ - جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۷۲	۲-۵ - پیشنهادات
۷۷	۶- پیوست

پیوست الف: ۷۸

فهرست اشکال و جداول

عنوان

صفحه

شکل ۱-۲: نحوه انتشار جریان در برداشت‌های ژئوالکتریک	۱۳
شکل ۲-۲: فرم کلی آرایش الکترودی در روش مقاومت‌ویژه	۱۵
شکل ۳-۲: آرایش مستطیلی در برداشت‌های ژئوالکتریک	۱۹
شکل ۴-۲: نحوه چینش الکترودها در آرایش وئر	۲۰
شکل ۵-۲: آرایش الکترودی شلومبرژه	۲۰
شکل ۶-۲: نحوه چینش الکترودها در آرایش لی	۲۱
شکل ۷-۲: نحوه چینش الکترودها در آرایش دوقطبی-دوقطبی	۲۱
شکل ۸-۲: نمودار تغییرات اختلاف پتانسیل IP بر تغییرات اختلاف پتانسیل منبع	۲۶
شکل ۱-۳: نقشه راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه	۳۰
شکل ۲-۳: عکس ماهواره‌ای از محدوده مورد مطالعه	۳۲
شکل ۳-۳: نمایی از محدوده اکتشافی	۳۳
شکل ۴-۳: نمایی از بخش کوهستانی محدوده مورد مطالعه	۳۴
شکل ۱-۴: مدل اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار RES2DInv	۴۷
شکل ۲-۴: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده اکتشافی	۵۰
شکل ۳-۴: بخشی از نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و نقاط برداشت	۵۲
شکل ۴-۴: نقشه بارپذیری محدوده اکتشافی با آرایش مستطیلی	۵۴
شکل ۵-۴: نقشه تغییرات مقاومت‌ویژه محدوده اکتشافی با آرایش مستطیلی	۵۵
شکل ۶-۴: شبه‌مقطع مقاومت‌ویژه پروفیل DD10N	۵۷
شکل ۷-۴: شبه‌مقاطع IP پروفیل DD10N	۵۷

شکل ۴-۸: شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه پروفیل DD100S	۵۸
شکل ۴-۹: شبه‌مقاطع IP پروفیل DD100S	۵۹
شکل ۴-۱۰: شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه پروفیل DD200S	۶۰
شکل ۴-۱۱: شبه‌مقاطع IP پروفیل DD200S	۶۰
شکل ۴-۱۲: مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل DD10N	۶۲
شکل ۴-۱۳: مقاطع حاصل از وارون‌سازی پروفیل DD100S	۶۴
شکل ۴-۱۴: مقاطع حاصل از وارون‌سازی پروفیل DD200S	۶۵
شکل ۴-۱۵: مقاطع حاصل از وارون‌سازی پروفیل DD10N، توسط نرم‌افزار ZondRes2D	۶۶
شکل ۴-۱۶: مقاطع حاصل از وارون‌سازی پروفیل DD100S توسط نرم‌افزار ZondRes2D	۶۷
شکل ۴-۱۷: مقاطع حاصل از وارون‌سازی پروفیل DD200S توسط نرم‌افزار ZondRes2D	۶۹
شکل ۵-۱: نقاط حفاری پیشنهادی روی پروفیل DD100S	۷۴
شکل ۵-۲: نقاط حفاری پیشنهادی روی پروفیل DD200S	۷۵
جدول ۳-۱: مختصات جغرافیایی محدوده اکتشافی	۳۲

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

مواد معدنی، اقتصاد و صنعت بسیاری از جوامع را تشکیل می‌دهد. انسان از همان آغاز آفرینش خود در طول تاریخ برحسب نیازمندی‌ها و شناخت، از مواد معدنی مختلف استفاده کرده است. معدن و معدن کاری از جمله مشاغل و منابع درآمدزایی است، که این روزها با توجه به شناسایی اندیس‌های معدنی گسترش زیادی یافته است. گرچه پیشرفت صنعت و معدن در هر کشوری نشانگر رشد اقتصاد بالا در آن منطقه می‌باشد؛ اما در این زمینه باید دقت شود؛ که اولاً سرمایه‌ها از بین نرود و ثانیاً منابع به علت عدم کارشناسی لازم، صدمه و خسارت نبیند. از آنجا که پژوهش‌ها و کاوش‌های علمی در جهت شناسایی و بهره‌برداری از معادن را در زمره مهم‌ترین هدف‌ها شمرده‌اند؛ لذا باید با تهیه و اجرای برنامه‌های مناسب و تلاش‌های مداوم در آینده‌ای نزدیک نیازمندی‌های تمام صنایع را از منابع داخلی فراهم نمود [۱].

ایران در منطقه‌ای در حال توسعه واقع شده است. این موقعیت ژئوپولیتیک^۱ و استراتژیک و همچنین دسترسی به آب‌های آزاد، پتانسیل بالقوه‌ای برای کشور ایجاد می‌نماید تا با استفاده از امکانات موجود و مواد معدنی کشور بتوان در جهت توسعه آن گام برداشت. استان یزد از گذشته دور به‌عنوان یکی از مناطق غنی معدنی ایران به شمار می‌رود و بالطبع شهرستان اردکان نیز از این نعمت‌های عظیم خدادادی برخوردار است. که در این راستا طی سالیان گذشته معادن بسیاری شامل سنگ‌های ساختمانی، خاک‌های صنعتی و فلزات، چه از سوی بخش دولتی و چه از سوی بخش خصوصی در این مناطق به بهره‌برداری رسیده است و هم‌اینک نیز معادن بسیاری در مراحل مقدماتی اکتشاف قرار دارند.

۱-۲- زمین‌شناسی مس

کانسارهای مس را می‌توان برحسب خاستگاه آن‌ها به پنج گروه ژنتیکی تقسیم کرد [۱]:

- ۱- انباشته‌های پورفیری و اسکارن‌های همراه آن‌ها، رگه‌های گرمابی و ذخایر جانشینی در برش‌ها
- ۲- انباشته‌های همراه با سنگ‌های اولترامافیک، مافیک، اولترابازیک آلکالن و کربناتیت‌ها

^۱ GeoPolitic

۳- انباشته‌های ولکانوژنیک و متاولکانیک و انباشته‌های مس وابسته به مسیو سولفیدهای بخش ولکانیکی

۴- ذخایر رسوبی و متارسوبی

۵- رگه‌ها و توده‌های جانشینی

در مهر و موم‌های اخیر بنا بر نظریه تکتونیک صفحه‌ای و پیدایش ذخایر مس در ارتباط به صفحات لیتوسفری در زمین و به عبارتی وابستگی با لبه‌های آن‌ها، زون‌های فرورانش و محورهای گسترش آن‌ها در زمان و مکان تأکید شده است. نمونه وار انباشته‌های مس پورفیری را در چهارچوب الگوی تکتونیک ورقه-ای (صفحه‌ای) به نواحی قوس‌های آتش‌فشانی و قوس‌های پشته‌ای که در طرف قاره جای دارند، به فرورانش پوسته اقیانوسی نسبت می‌دهند. انباشته‌هایی از مس که در افیولیت‌ها جای دارند، با این نگرش از جمله کانسارهایی هستند که در مراکز گسترش پوسته اقیانوسی به وجود می‌آیند. انباشتگی‌های آتش‌فشان‌زاد و معادل‌های دگرگون‌شده آن‌ها نتیجه نهشته شدن فلزی هیدروترمال است. این پدیده در دو محیط زمین‌شناسی رخ می‌دهد کف اقیانوس‌ها و در فوران زیردریایی سولفوری همراه مجموعه‌های ولکانوکلستیک ریولیتی در کمان‌های ماگمایی نمونه‌هایی از مورد نخست، یعنی رسوب‌گذاری فلزی گرمایی را می‌توان در دریای سرخ، دریای سالتون و بسیاری مناطق در پشته میان‌اقیانوسی و مجاور آن یافت کرد. درباره گونه دوم یعنی فوران‌های زیردریایی سولفوری گمان می‌رود که در یک محیط قوس ماگمایی، هنگامی که چشمه‌های داغ زیردریایی همراه فوران‌های آتش‌فشانی عمل کرده‌اند، پدید آمده باشند. در مهر و موم‌های اخیر با افزایش پژوهش‌های اقیانوس‌شناسی معلوم شد که رسوب‌هایی که در نواحی ویژه از کف اقیانوسی پدید می‌آیند، در هنگام رسوب‌گذاری و انباشتگی در کف اقیانوس از برخی فلزات پرمایه می‌شوند. انباشته‌های مس رسوبی به‌طور عمده با سنگ‌های تبخیری محیط‌های حاشیه قاره‌ای پست و نواحی درونی آن‌ها و همچنین با سیستم‌های ریف درون قاره‌ای همراه‌اند. فزون بر آنچه گفته شد، این انباشته‌ها می‌توانند در اثر سیستم‌های دیاژنتیکی بعدی و گرمایی، دگرگونی، پراکندگی و انباشتگی دوباره یابند. انباشته‌های مس که به شکل مجموعه‌ای از رگه‌ها و رگچه‌ها هستند اساساً همراه کوارتز پدید می‌آیند و دارای مقادیر اندک کربنات و سولفورهای گوناگون می‌باشند. مهم‌ترین ذخیره این نوع انباشته‌ها در پیوند با نوارهای

شیست سبز قدیمی‌اند [۲].

۱-۳- پراکندگی ذخایر مس ایران

ذخایر مس ایران را می‌توان به شکل زیر زون بندی کرد [۱]:

- زون ارومیه- دختر که خود از نظر ذخایر مس به بخش جنوبی (ناحیه کرمان)، مرکزی (انارک-کاشان) و شمالی قابل تقسیم است.
- زون البرز باختری (محور طالقان- تارم- هشت جین).
- زون سبلان (باختر اردبیل- ناحیه اهر).
- زون کویر- سبزوار (بینالود).
- زون لوت.
- زون مکران.

۱-۴- معادن مس ایران

ایران روی کمر بند مس جهانی قرار دارد که از جنوب شرقی کشور آغاز شده تا شمال غربی و نواحی آذربایجان ادامه می‌یابد. بزرگ‌ترین کمر بند مس شناخته شده ایران همراه با زون ولکانیکی - پلوتونیک، کمر بند ارومیه- دختر است. کانسار مس پورفیری سرچشمه نیز بزرگ‌ترین معدن مس ایران و از جمله معادن مهم مس دنیا محسوب می‌شود. روی کمر بند ولکانیکی - پلوتونیک ارومیه- دختر؛ علاوه بر سرچشمه، چند منطقه دیگر با کانی‌سازی مس پورفیری شناسایی شده که در درست مطالعه هستند. چهار گنبد، تخت، بهر آلمان، سونگون، بالوچه، آستامال، بارملک و کیقال از جمله مهم‌ترین این مناطق هستند. کانی‌سازی نوع ماسیوسولفید نیز در منطقه سبزوار خراسان، چهل کوره سیستان و بلوچستان، پلنگی و چاه مسی کرمان یافت می‌شود [۱].

۱-۵- کانه‌های مس

مس در ساختمان بلورین ۲۵۰ کانی می‌نشیند ولی تنها شماری اندک از آن‌ها از نقطه نظر اقتصادی

اهمیت دارند. از این میان شماری از کانی‌ها از اهمیتی ویژه برخوردارند، همانند: کالکوپیریت، کالکوسیت، کولین، بورنیت، مس طبیعی، مالاکیت، آزرویت [۱].

برخی دیگر از کانی‌های مس گرچه فراوانند ولی به‌صورت کانه یا عنصر جنبی در فراوری و استخراج به‌دست می‌آیند. همانند تتراووریت، انارژیت، بورونیت، بورنویت. در فرایند پیدایش، اکسیداسیون و انباشتگی دوباره مس کانی‌های مس نظم خاصی می‌گیرند. به‌گونه‌ای که وجود یک کانی می‌تواند مبین وقوع یکی از پدیده‌ها در زون خاص باشد. کانی‌های زون هیپوژن شامل: کالکوپیریت، بورنیت، تتراووریت، بورتونیت، بوزونیت و انارژیت که عوامل درونی و فشار و دما سبب پیدایش آن‌ها می‌شوند. کانه‌های زون سوپرژن از محلول‌های حاصل از شستشوی کانه‌های هیپوژن به دست می‌آیند، این کانی‌ها عبارتند از کالکوسیت، کولیت، بورنیت. کانه‌های زون اکسیدی براثر اکسیداسیون کانی‌های زون هیپوژن و زون سوپرژن به‌وجود می‌آیند. این کانی‌ها عبارتند از مالاکیت، آزرویت کوپرلیت، تنوریت، مس طبیعی، کریزوکولا و برخی از کانی‌ها می‌توانند هم به زون هیپوژن و هم به سوپرژن متعلق باشند مثل کالکوسیت و بورنیت [۱].

۱-۶- کاربرد مس

مس به دلیل دارا بودن ویژگی‌های چون رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا، دوام و پایداری در برابر خوردگی، خستگی و خزش در صنایع گوناگون کاربرد دارد. بیشترین کاربرد آن در صنایع الکتریکی است که در ساخت خطوط انتقال نیروی برق ولتاژ بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صنایع مخابرات نیز کاربرد گسترده دارد ولی ارزان شدن فراوری آلومینیوم و به بازار آمدن فیبرهای نوری از نقش مس در صنایع مخابرات کاسته و این روند به‌طور صعودی ادامه دارد. در ساخت وسایل صنعتی که در برابر محلول‌های اسیدی نظیر استیک، سولفوریک، کلریدریک و فسفریک قرار می‌گیرند نیز کاربرد گسترده دارد. برخی از آلیاژهای آن برای کار با محلول‌های نمک خنثی مثل نیتрат‌ها، سولفات‌ها، کلرورهای سدیم و پتاسیم نیز مناسب است. با نگرش به پایداری مس و آلیاژهای آن در برابر خوردگی، این فلز در صنایع ساختمانی، راه‌آهن، هواپیماسازی و کشتی‌سازی، صنایع دریایی و شاخه‌های صنایع نظامی و مهمات‌سازی کاربردی

گسترده دارد. در صنایع دریایی هیچ آلیاژی دیگر نمی‌تواند همه ویژگی‌هایی را که مس و آلیاژهای آن از خود نشان می‌دهند داشته باشد که این ویژگی‌ها فزون بر پایداری در برابر خوردگی شامل پایداری در برابر خوردگی مواد آلی و زیستی ارزانی و عمر دراز مس است. در صنایع اتومبیل‌سازی نیز در ساخت وسایل برقی و غیر برقی اتومبیل‌ها مورد مصرف فراوان دارد. همچنین در ساخت ماشین‌آلات و قطعات غیر برقی و لوازم‌خانگی، تجهیزات تهویه هوا، ماشین‌آلات و وسایل کشاورزی، وسایل آشپزخانه، جواهرسازی، تزئینات، ساعت، میکروسکوپ و پروژکتورها کاربردی گسترده دارد. مس در تهیه آلیاژهای خاص همراه با عناصر نیکل، نقره، فسفر و بریلیم کاربردی گسترده دارد؛ که این امر ناشی از گسترش صنایع الکترونیک است. مواد شیمیایی مس در کشاورزی، پزشکی و داروسازی و صنایع چوب (به‌عنوان نگه‌دارنده چوب) کاربرد دارد [۲].

۱-۷- معیارها و راهنماهای اکتشافی ذخایر مس

۱-۷-۱- معیارها و راهنماهای زمین‌شناسی

اصلی‌ترین و بنیادی‌ترین داده‌های موردنیاز در اکتشاف مواد معدنی از جمله مس، داده‌های زمین‌شناسی است. داده‌های زمین‌شناسی به‌صورت نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس‌های مختلف تهیه می‌شود که در مراحل مختلف اکتشاف از شناسایی تا اکتشاف تفصیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این معیارها شامل ویژگی‌های سنگ چینه‌ای، تکتونیکی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، ماگماتیزم، دگرسانی و رابطه زمانی سنگ میزبان کانی‌سازی است که بر اساس آن نوع کانی‌سازی مس برای اکتشاف مشخص خواهد شد [۱].

۱-۷-۲- معیارها و راهنماهای دورسنجی

کاربرد روش‌های دورسنجی در اکتشاف ذخایر مس بر اساس تشخیص ردیاب‌های کانی‌سازی در سنگ میزبان انجام می‌گیرد که در مراحل شناسایی و پی‌جویی کاربرد دارد. مطالعات دورسنجی بر اساس

داده‌های ماهواره‌ای لندست MSS، لندست TM، اسپات^۱، آستر^۲، مادون‌قرمز و ابرطیفی^۳ کاربرد وسیعی در تشخیص زون‌های دگرسانی آرژیلیکی، سیلیسی، هماتیتی، ساختارهای خطی و حلقوی و تفکیک واحدهای سنگی دارد و برای شناسایی ذخایر مختلف مس به‌ویژه انواع پورفیری، اسکارنی، توده‌ای، ماگمایی و رگه‌ای و در تلفیق با سایر داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیک هوابرد بسیار کارساز است. از داده‌های MSS در تشخیص مناطق گسله و تفکیک لایه‌های سنگی، از داده‌های TM برای جدایش سنگ میزبان کربناتی و اکسید آهن از سایر سنگ‌های موجود در منطقه و از داده‌های مادون‌قرمز برای تشخیص وجود کلریت در سنگ‌های میزبان، از داده‌های استر برای تفکیک زون‌های دگرسانی آرژیلیکی، سیلیسی و هماتیتی و از داده‌های هایپراسپکترال برای تفکیک کانی‌های رسی در زون‌های دگرسانی آرژیلیکی استفاده می‌شود [۱].

۱-۷-۳- معیارها و راهنماهای ژئوشیمیایی

بررسی‌های ژئوشیمیایی و کانی سنگین از مهم‌ترین داده‌ها و راهنماها برای اکتشاف مس است که به‌صورت نقشه‌های آنومالی ژئوشیمیایی و کانی سنگین با مقیاس‌های مختلف از مراحل شناسایی تا عمومی کاربرد دارد. در اکتشاف ژئوشیمیایی مس، علاوه بر میزان غنی‌شدگی این عنصر، آنومالی عناصر پارائنز آن در انواع مختلف کانی‌سازی بسیار کارساز بوده و کمک شایانی به شناسایی انواع مختلف ذخایر مس و چگونگی گسترش سطحی و عمقی آن‌ها می‌کند [۱].

۱-۷-۴- معیارها و راهنماهای ژئوفیزیکی

مطالعات ژئوفیزیکی در اکتشاف مس بسیار متداول است. در مراحل شناسایی و پی‌جویی مطالعات ژئوفیزیک هوابرد و در مراحل اکتشاف عمومی و تفصیلی مطالعات ژئوفیزیک زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعات ژئوفیزیکی برای اکتشاف مس، مشکل اصلی چگونگی مدل‌سازی خواص ژئوفیزیکی

^۱ Spot

^۲ Aster

^۳ HyperSpectral

در یک چارچوب سازگار با مدل‌های ارائه‌شده برای تیپ‌های مختلف ذخایر مس است. علت آن است که حتی برای یک تیپ خاص از ذخایر مس نیز مشخصات سنگ‌های درون‌گیر ثابت نیست برای مثال در ذخایر رگه‌ای مس، نوع سنگ میزبان از سنگ‌های رسوبی تا آتشفشانی، نفوذی و حتی دگرگونی متغیر است و اغلب در زون‌های برشی تشکیل می‌شود که ترکیب کانسنگ آن‌ها بسیار متغیر است. ترکیب این متغیرها می‌تواند انواع گوناگونی از محیط درون‌گیر را تشکیل دهد که هر یک خواص ژئوفیزیکی خاص خود را دارند. مدل خواص ژئوفیزیکی ذخایر مس برای انتخاب مناسب‌ترین روش اکتشافی مؤثر است. مناسب‌ترین روش تابعی از تیپ کانی‌سازی مس است و برای بهینه‌سازی برداشت‌های ژئوفیزیکی قبل از انتخاب روش مطالعه باید، تیپ کانسار احتمالی را پیش‌بینی کرد [۳].

۸-۱- تاریخچه مطالعات گذشته

پدیده قطبش‌القایی (IP) برای اولین بار توسط کنراد شلومبرژه^۱ در سال ۱۹۱۲ شناسایی شد و تا اواخر دهه ۱۹۴۰ این پدیده به صورت یک روش عملاً مورد استفاده قرار نگرفت. تا این‌که این روش در طی جنگ جهانی دوم توسط ویلیام کک^۲ و دیوید بلیل^۳ که در یکی از پروژه‌های نیروی دریایی آمریکا جهت شناسایی مین‌های دریایی مشغول فعالیت بودند؛ توسعه یافت. در دهه ۱۹۸۰ پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در بخش دستگاهی و تکنیک‌های خاص این روش ایجاد شد؛ مثل ابداع روش قطبش‌القایی طیفی^۴ توسط پلتون و همکارانش در سال ۱۹۷۸ [۴].

اولین بار در اواخر دهه ۱۹۴۰ روش IP برای اکتشاف توده‌های کانسنگی بالاخص برای سولفیدهای پراکنده مورد استفاده قرار گرفت. در دهه ۱۹۶۰ از این روش به‌طور گسترده در اکتشافات ژئوفیزیک کانسارهای فلزات پایه استفاده شده است [۵].

در منطقه مورد مطالعه کارهای اکتشافی به‌منظور یافتن ماده معدنی صورت نگرفته است و تنها

^۱ Schlumberger

^۲ William Cook

^۳ David Blail

^۴ Spectral induced polarization

نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی در مقیاس‌های مختلف از منطقه تهیه شده است.

فهرست نقشه‌های موجود و تهیه شده از منطقه به شرح ذیل می‌باشد:

- نقشه توپوگرافی اردکان به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ [۶].

- نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ اردکان [۲].

- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرائق [۲].

۹-۱- ضرورت و هدف انجام پایان‌نامه

با توجه به اهمیت ذخایر مس و نیاز روزافزون به این ماده معدنی، مدل‌سازی پتانسیل معدنی می‌تواند یکی از راه‌های مناسب جهت اکتشاف این کانسار با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه باشد. با توجه به این که در مراحل اولیه اکتشاف کاهش هزینه بسیار حائز اهمیت می‌باشد، باید روشی انتخاب شود که هم از نظر هزینه هم زمان و همچنین میزان پاسخگویی در رسیدن به هدف مورد نظر بهینه باشد. در اکتشاف ذخایر مس نیز روش‌های ژئوفیزیکی نسبت به سایر روش‌های اکتشافی چه از نظر زمان و هزینه و چه از نظر پاسخگویی بهتر عمل می‌کنند. که این امر یافتن مناطق امیدبخش و معرفی مناطق با پتانسیل بالا را به عنوان هدف این تحقیق، توجیه می‌کند.

به طور خلاصه اهداف انجام مطالعات ژئوفیزیک در این محدوده به شرح ذیل می‌باشد:

- پوشش محدوده پیشنهادی با آرایش مستطیلی جهت تعیین و بررسی احتمال وجود بی‌هنجاری بارپذیری در محدوده و در صورت وجود بی‌هنجاری در این مرحله از مطالعات، بررسی گسترش این ناهنجاری‌ها در عمق با استفاده از آرایش مناسب نیز مورد نظر خواهد بود.

- مدل‌سازی داده‌های الکتریکی برداشت شده توسط نرم‌افزار RES2DINV.

- تعیین عوامل زمین‌شناسی و کنترل‌کننده باتوجه به اطلاعات به دست آمده از مرحله اول مطالعات ژئوفیزیکی (بررسی الکتریکی محدوده با آرایش مستطیلی).

- در صورت مثبت بودن نتایج بررسی‌های فوق با تلفیق نتایج مدل‌سازی با سایر اطلاعات زمین‌شناسی، چند محل برای حفر گمانه‌های اکتشافی پیشنهاد می‌شود.

۱۰-۱- روش انجام تحقیق

نخست جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی و برداشت داده‌های ژئوفیزیکی انجام می‌شود. در مرحله دوم داده‌ها توسط نرم‌افزار RES2DINV مدل‌سازی می‌شوند. در نهایت مدل‌های استخراجی از نرم‌افزار موردبررسی قرار می‌گیرند و مناطق احتمالی کانی‌سازی مس سولفیدی و محل‌های حفاری مشخص و پیشنهاد می‌شوند.

۱۱-۱- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر پنج فصل می‌باشد؛ که فصل جاری به بیان مقدمه، مروری بر کارهای انجام‌شده، ضرورت و روش تحقیق می‌پردازد. در فصل دوم مبانی تئوری و عملی روش‌های مقاومت‌ویژه و IP بیان می‌شود. در فصل سوم زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و شرایط جغرافیایی منطقه توضیح داده می‌شود. در فصل چهارم به مدل‌سازی دوبعدی و تفسیر مقاطع و داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پرداخته می‌شود و در نهایت در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای لازم ارائه می‌گردد.

فصل دوم

مبانی تئوری و عملی روش‌های مقاومت‌ویژه و قطبش -

القایی (IP)

۲-۱- مقدمه

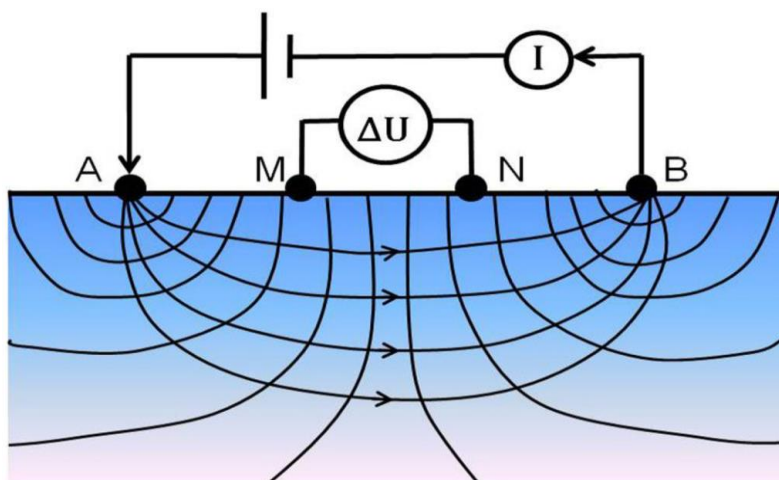
امروزه به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشافات مواد معدنی و انتخاب محل‌های مناسب برای اکتشاف امری متداول به شمار می‌رود [۷]. در کلیه مراحل اکتشاف مواد معدنی می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی استفاده کرد. اکتشافات الکتریکی بسیار متنوع‌تر از دیگر روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشند. بعضی از روش‌های الکتریکی مثل پتانسیل خودزا، جریان تلوریک و مگنتوتلوریک از منابع انرژی الکتریکی طبیعی بهره می‌گیرند؛ که از این نظر همانند اکتشافات گرانی و مغناطیسی می‌باشند. از طرف دیگر، روش‌های الکتریکی (مثل مقاومت‌ویژه و IP)، نیاز به جریان و یا میدان‌های الکتریکی به صورت مصنوعی داشته و از این نظر شباهت زیادی به روش‌های اکتشافات لرزه‌ای دارند. روش‌های الکتریکی اغلب برای پی‌جویی کانی‌های فلزی و هادی به کار می‌روند. این روش‌ها همچنین به طور وسیع در آبیاری، کارهای مهندسی عمران و زمین‌گرمایی کاربرد دارند. به طور کلی روش‌های الکتریکی سطحی کمتر در اکتشاف و مطالعه میدان‌های نفتی به خدمت گرفته می‌شوند؛ زیرا بیشتر این روش‌ها برای اکتشاف در اعماق کم مفید می‌باشند و معمولاً نمی‌توانند اطلاعات چندانی از اشکال زیرسطحی در اعماق بیشتر از ۵۰۰ متر فراهم نمایند. روش‌های ژئوالکتریکی بر مبنای میدان‌های الکتریکی زمین با ویژگی‌های الکتریکی ساختارهای زمین‌شناسی و معدنی استوارند [۷].

اکتشافات الکتریکی به طور کلی از سه خواص بنیادی و مهم سنگ‌ها بهره می‌گیرند؛ که عبارتند از : مقاومت‌ویژه، فعالیت الکتروشیمیایی (که در رابطه با کنترلیت‌های محلول در سفره‌های آبدار می‌باشند) و ثابت دی‌الکتریک (که اطلاعاتی درباره ظرفیت سنگ‌ها در ذخیره کردن الکتریسیته هنگام عبور جریان، فراهم می‌نماید) [۳].

۲-۲- روش مقاومت‌ویژه

در این روش از جریان ثابت یا مستقیم (DC) یا جریان متناوب (AC) با فرکانس بسیار کم (حدود Hz ۱-۲) استفاده می‌شود. این روش تغییرات مقاومت‌ویژه سنگ‌های اعماق زمین را در سطح زمین اندازه‌گیری

می‌کند. جریان الکتریکی توسط دو الکتروود جریان A و B که به فاصله AB (شکل ۱-۲) از یکدیگر قرار گرفته‌اند به داخل زمین تزریق شود. جهت جریان الکتریسیته مطابق شکل ۱-۲ از الکتروود مثبت A به سمت الکتروود منفی B می‌باشد [۸].



شکل ۱-۲: نحوه انتشار جریان در برداشت های ژئوالکتریک [۹]

۲-۳ - مقاومت ویژه مواد سازنده زمین

جریان الکتریکی به سه شیوه می‌تواند در یک سنگ جاری شود. هدایت الکترولیتی، الکترونیکی (اهمی) و دی‌الکتریکی. هدایت الکترولیتی با حرکت آرام یون‌ها در داخل الکترولیت صورت می‌پذیرد و به نوع یون‌ها، غلظت یونی و تحرک یونی و غیره بستگی دارد. هدایت الکترونیکی فرآیندی است که در آن برای مثال فلزات به الکترون‌ها اجازه می‌دهند تا با سرعت حرکت نموده، سپس شارش نمایند [۱۰].

هدایت دی‌الکتریکی در مواد با هدایت الکتریکی خیلی کم اتفاق می‌افتد؛ که در اثر میدان‌های متغیر خارجی، الکترون‌های اتم نسبت به هسته خود اندکی جابه‌جا می‌شوند. این جابه‌جایی نسبی اندک در بارهای مثبت و منفی، به قطبش دی‌الکتریکی ماده معروف است. ممکن است قطبش یونی و مولکولی در مواد با پیوندهای یونی و مولکولی رخ دهد. در همه این موارد هدایت الکتریکی، حاصل از قطبش الکترونی، یونی یا مولکولی است؛ که در اثر میدان‌های الکتریکی متفاوت به وجود می‌آید [۸].

در بسیاری از سنگ‌ها، هدایت الکتریکی از طریق عملکرد سیالات موجود در حفرات به‌عنوان الکترولیت و مشارکت بسیار اندک کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ (به‌جز در مواردی که کانی‌های تشکیل‌دهنده

سنگ خود رسانای خوب الکتریسیته باشند) صورت می‌پذیرد [۱۰].

مقاومت‌ویژه یک ماده به‌صورت مقاومت الکتریکی بین دو سطح مقابل از یک مکعب واحد از آن ماده برحسب واحد اهم تعریف می‌شود. برای یک استوانه رسانا با مقاومت R ، طول L و سطح A مقاومت‌ویژه از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (۱-۲)$$

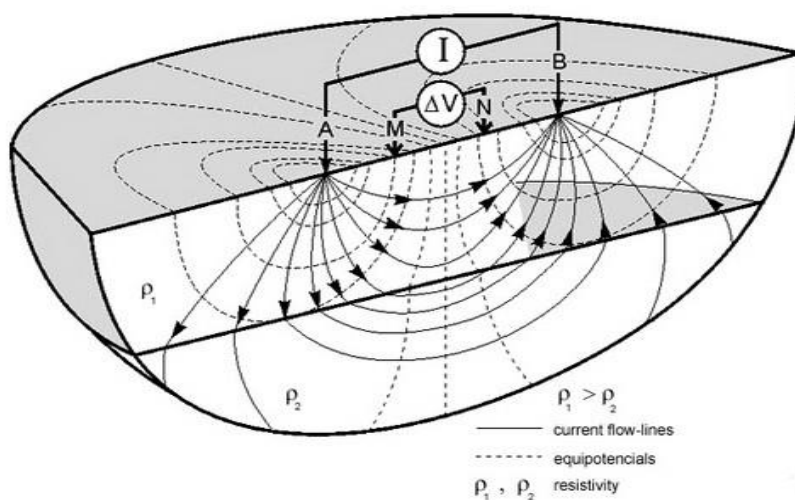
واحد مقاومت‌ویژه در سیستم استاندارد بین‌المللی اهم‌متر است و عکس مقاومت‌ویژه، رسانندگی خوانده می‌شود. برای خاک‌ها و سنگ‌های آبدار با افزایش عوامل کنترل‌کننده زیر مقاومت‌ویژه کاهش می‌یابد [۱۱]:

- ۱- بخشی از حجم سنگ که با آب اشغال شده است. ۲- میزان شوری یا محتوای یون‌های آزاد آب‌های فسیلی. ۳- ارتباط درونی فضاهای متخلخل (نفوذپذیری)، دما یا درجه حرارت. ۴- سن سنگ نیز اهمیت قابل‌توجهی در کنترل مقاومت‌ویژه الکتریکی دارد. در سنگ‌های آتشفشانی کواترنری ممکن است دامنه مقاومت‌ویژه از ۱۰ تا ۲۰۰ اهم‌متر متغیر باشد. درحالی‌که ممکن است معادل همان سنگ اما با سن پراکم‌ترین دامنه وسیع‌تری از مقاومت‌ویژه را در برگیرد. چون در سنگ‌های قدیمی‌تر خلل و فرج بیشتر به‌وسیله کانی‌سازی در معرض پرتشدگی ثانویه قرار می‌گیرد و در اثر تراکم سنگ‌ها، تخلخل و نفوذپذیری کاهش می‌یابد [۱۰].

همانند سایر خواص فیزیکی، هم‌پوشانی قابل‌توجهی در مقاومت‌ویژه مواد مختلف وجود دارد؛ که این ابهاماتی را در تفسیر مقاومت‌ویژه ایجاد می‌کند. آشنایی با وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه کمک شایانی در رفع این ابهامات می‌نماید [۱۲].

برای یک الکتروود جریان که در سطح یک محیط همگن با مقاومت‌ویژه ρ قرار داده شده است، خطوط جریان به‌صورت شعاعی حرکت می‌کنند و سطوح هم‌پتانسیل خطوط جریان را با زاویه قائم قطع می‌کنند [۱۳].

اگر فرم کلی آرایش الکتروودی در روش مقاومت‌ویژه را به‌صورت زیر در نظر بگیریم:



شکل ۲-۲: فرم کلی آرایش الکترودی در روش مقاومت ویژه [۹]

برای محاسبه اختلاف پتانسیل در هر نقطه به روش زیر عمل می‌شود [۳]:

پتانسیل در نقطه M به واسطه الکتروود مثبت A

$$V_M^A = \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{1}{AM} \quad (۲-۲)$$

پتانسیل در نقطه N به واسطه الکتروود مثبت A

$$V_N^A = \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{1}{AN} \quad (۳-۲)$$

پتانسیل در نقطه M به واسطه الکتروود منفی B

$$V_M^B = \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{1}{BM} \quad (۴-۲)$$

پتانسیل در نقطه N به واسطه الکتروود منفی B

$$V_N^B = \frac{\rho I}{2\pi} \times \frac{1}{BN} \quad (۵-۲)$$

کل پتانسیل در نقطه M به واسطه الکتروودهای جریان A و B

$$V_M^{A,B} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (۶-۲)$$

کل پتانسیل در نقطه N به واسطه الکترودهای جریان A و B

$$V_N^{A,B} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (۷-۲)$$

و در نهایت اختلاف پتانسیل کل، اندازه گیری شده توسط الکترودهای M و N به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta V_{MN}^{A,B} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (۸-۲)$$

رابطه بالا را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \times \frac{\Delta V}{I} \quad (۹-۲)$$

که در رابطه بالا عبارت $2\pi / [(1/AM) - (1/BM) - (1/AN) + (1/BN)]$ را فاکتور هندسی آرایش الکترودی می نامند و معمولاً آن را با حرف K نشان می دهند. بنابراین می توان رابطه را به صورت زیر نوشت:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (۱۰-۲)$$

اگر ρ در یک محیط همگن و ایزوتروپ اندازه گیری شود، آنگاه آن را مقاومت ویژه واقعی^۱ می نامند؛ اما

اگر اندازه گیری در یک محیط ناهمگن و غیر ایزوتروپ صورت گیرد، آنگاه آن را مقاومت ویژه ظاهری^۲

می گویند. مقدار مقاومت ویژه ظاهری تابعی از چند متغیر زیر می باشد [۳]:

۱- فواصل بین الکترودها^۳ یعنی AM, AN, BM و BN. ۲- وضعیت هندسی آرایش الکترودها. ۳- مقاومت-

ویژه واقعی و دیگر خصوصیات مواد زیرسطحی از قبیل ضخامت لایه ها، شیب لایه ها و خواص ناهمسانگردی

^۱ True Resistivity

^۲ Apparent Resistivity

^۳ Electrode Spacing

۲-۴- انواع آرایش‌های الکترودی

آرایه‌های الکترودی متنوعی برای برداشت‌های مقاومت‌ویژه وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. انتخاب آرایه مناسب به فضای موجود برای گسترش آرایه به کار گرفته شده و سختی و کارایی آن در کاربرد مورد نظر بستگی دارد. همچنین حساسیت آرایه‌ها به ناهمگنی‌های جانبی و فصل مشترک‌های شیب‌دار نیز از اهمیت به سزایی برخوردار است [۱۰]. در اصل، به کار گرفتن آرایه کاملاً خطی لزومی ندارد؛ اما در عمل الکترودها تقریباً همیشه در یک خط قرار می‌گیرند، زیرا در غیر این صورت تفسیر نتایج دشوار و کار صحرایی پیچیده می‌شود [۸].

چند نوع از آرایش‌های الکترودی مرسوم عبارتند از: آرایش ونر^۱، آرایش لی^۲، آرایش شلومبرژر^۳ و آرایش دوقطبی- دوقطبی^۴، دوقطبی- قطبی^۵، قطبی- قطبی^۶.

۲-۵- انتخاب آرایش الکترودی مناسب

هر آرایه دارای مزایا و معایبی در عمق کاوش، حساسیت به تغییرات جانبی یا قائم و قدرت سیگنال دارد. انتخاب آرایه الکترودی مناسب در برداشت مقاومت‌ویژه نیاز به داشتن دانش از هدف مورد مطالعه، حساسیت هر آرایه نسبت به ویژگی زمین‌شناسی خاص و میزان بودجه پروژه دارد [۱۴].

انتخاب آرایش الکترودی مناسب برای اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، به وضعیت ساختارهای زیر سطح زمین، حساسیت دستگاه اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه و به میزان نوفه‌ی زمینه بستگی دارد. چهار مؤلفه اصلی یک آرایش عبارتند از [۱۲]:

^۱Wenner Array

^۲Lee Array

^۳Schlumberger Array

^۴Dipole-Dipole Array

^۵Pole-Dipole Array

^۶Pole-pole Array

۱- عمق نفوذ، ۲- حساسیت آرایش به تغییرات عمقی و جانبی مقاومت ویژه الکتریکی در داخل زمین، ۳- پوشش افقی داده‌ها، ۴- نسبت سیگنال به نوفه

وارد^۱ (۱۹۹۰) عوامل متعدد زیر را برای مقایسه آرایه‌های الکترونی مختلف معرفی نموده است:

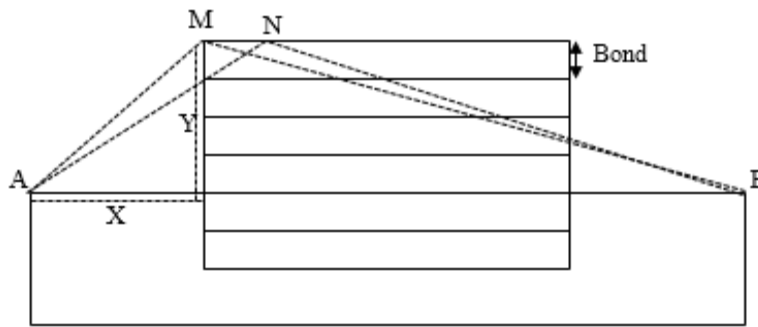
۱- نسبت سیگنال به نویز، ۲- جفت‌شدگی الکترومغناطیسی، ۳- حساسیت به موقعیت جانبی، ۴- قابلیت تفکیک ساختارهای شیب‌دار، ۵- قابلیت تفکیک ساختارهای افقی، ۶- عمق نفوذ، ۷- حساسیت به عمق آنومالی، ۸- حساسیت نسبت شیب، ۹- حساسیت نسبت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات سونداژزنی، ۱۰- حساسیت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات پروفیل زنی، ۱۱- حساسیت به توپوگرافی سنگ‌بستر، ۱۲- حساسیت به اثرات جانبی، ۱۳- حساسیت به روباره هادی، ۱۴- حساسیت به توپوگرافی [۳].

البته اطلاعات کافی در رابطه با این عوامل و شرایط بسیار متنوعی که ارزیابی هر کدام از آن‌ها را برای آرایه‌های مختلف میسر می‌سازد، در دسترس نیست. حتی برای بعضی از این عوامل، هیچ بررسی سیستماتیک و منظمی برای مجموعه گسترده از مدل‌های زیرزمینی انجام نشده است.

۲-۵-۱- آرایه مستطیلی

در آرایه مستطیلی، خط فرستنده AB بافاصله ثابت در روی زمین پیاده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها با جابه‌جایی الکترودهای M و N در روی پروفیل‌هایی به موازات AB انجام می‌شود. همان‌طوری که در شکل زیر دیده می‌شود؛ این برداشت‌ها در مستطیلی به پهنای $AB/3$ و به طول $AB/2$ صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های IP و مقاومت ویژه به مرکز MN نسبت داده می‌شود. عمق نفوذ جریان در این آرایه به فاصله AB بستگی داشته و به‌طور تجربی این عمق نفوذ را برابر $AB/4$ فرض می‌کنند [۱۵].

^۱Ward



شکل ۳-۲: آرایش مستطیلی در برداشت‌های ژئوالکتریک [۱۵].

در آرایه مستطیلی K (فاکتور هندسی) با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود. در این آرایه، نقاط اندازه‌گیری که در امتداد AB (در این برداشت‌ها محور x همان AB در نظر گرفته می‌شود) قرار دارند، دارای فاصله عمودی $Y = 0$ می‌باشند. مقادیر طول و عرض نقاط M و N همچنین طول نقطه B نسبت به نقطه A تعیین شده و سپس هر یک از فواصل ارائه شده در فرمول K محاسبه می‌شوند. البته برای راحتی کار می‌توان از جداولی که برحسب مقادیر AB و MN (فاصله پروفیل‌ها و Y و X نقاط برداشت است) استفاده نمود.

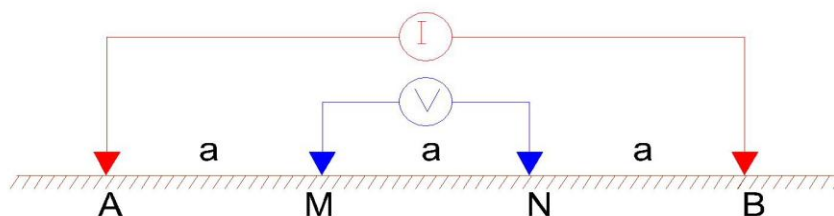
$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad (۱۱-۲)$$

از مزایای آرایه مستطیلی این است که فقط جفت الکترودهای MN جابه‌جا می‌شوند و این موضوع علاوه بر این که باعث افزایش سرعت عملیات می‌شود، نیازی به جابه‌جا کردن الکترودهای جریان، ژنراتور و سایر دستگاه‌های حجیم فرستنده جریان نیست و فقط الکترودهای پتانسیل و پتانسیومتر متصل را باید جابه‌جا کرد. همچنین شدت جریان به راحتی ثابت نگه‌داشته می‌شود. در این آرایه، از خط جریان (AB) نسبتاً بزرگ استفاده می‌شود تا زون مورد مطالعه دارای محدودیت نبوده و پروفیل‌ها کوتاه و ایستگاه‌های برداشت نزدیک به هم نباشند. خط فرستنده AB معمولاً عمود بر امتداد کانسار در نظر گرفته می‌شود و ذکر این نکته حائز اهمیت است که توسط این آرایه می‌توان کانی‌سازی‌های رگه‌ای تقریباً عمودی و لایه‌های هادی تقریباً افقی را شناسایی کرد. به عبارت دیگر این آرایه بیشتر برای تهیه نقشه هدایت الکتریکی کانسارهای فوق در عمق مشخص به کار می‌رود [۳].

۲-۵-۲- آرایش ونر

در این آرایش چهار الکترود A, M, N, B در روی زمین در طول یک خط با فواصل یکسان قرار می گیرند

[۳].

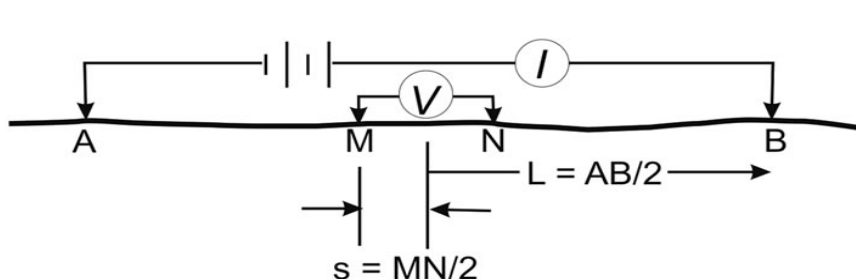


شکل ۲-۴: نحوه چینش الکترودها در آرایش ونر [۹]

۲-۵-۳- آرایش شلومبرژه

این آرایش به طور گسترده در اکتشافات الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد. چهار الکترود به شکل

زیر در یک خط قرار می گیرند؛ به طوری که AB حداقل باید ۵ برابر MN باشد [۳].

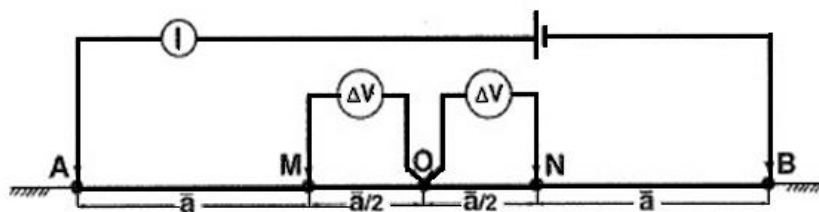


شکل ۲-۵: آرایش الکترودی شلومبرژه [۹]

۲-۵-۴- آرایش لی

این آرایش همانند ونر بوده، فقط یک الکترود پتانسیل اضافی O در وسط الکترودهای M و N دارد و

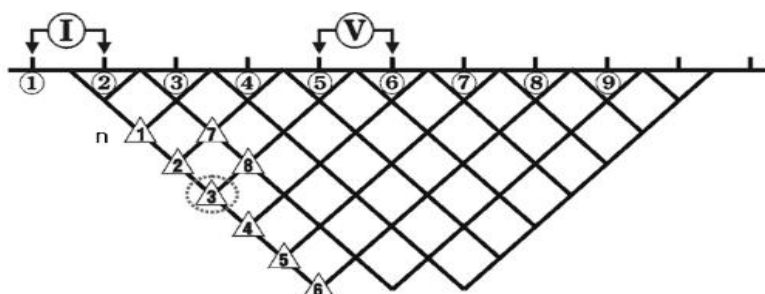
اندازه گیری اختلاف پتانسیل هر بار بین OM و ON صورت می گیرد [۳].



شکل ۲-۶: نحوه چینش الکترودها در آرایش لی [۹]

۲-۵-۵- آرایش دوقطبی-دوقطبی

آرایش‌های مختلف دوقطبی-دوقطبی در اکتشافات الکتریکی از سال ۱۹۵۰ به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، به‌ویژه موقعی که تئوری‌های لازم توسط آلپین^۱ توسعه یافتند. در آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی فاصله بین الکترودهای پتانسیل M و N و الکترودهای جریان A و B ثابت در نظر گرفته و به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فاصله بین مراکز دو قطب یعنی r می‌باشد [۳].



شکل ۲-۷: نحوه چینش الکترودها در آرایش دوقطبی-دوقطبی [۹]

۲-۶- روش‌های برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی

در روش‌های معمول برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، تعدادی الکترودها در زمین کوبیده می‌شود. از این تعداد، چهار الکترودها از طریق چهار رشته سیم به دستگاه سنجش مقاومت‌ویژه متصل می‌شوند. بسته به نوع آرایش، پس از اتمام یک قرائت و برای انجام قرائت بعدی، ممکن است سیم‌ها به یک، دو، سه و چهار الکترودها دیگر اتصال یابند. خارج کردن الکترودهای قبلی و وارد کردن الکترودهای جدید به مدار با استفاده از نیروی انسانی صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال اگر روش پروفیل زنی با آرایه ونر و فاصله الکترودها ۵۰ متر

^۱Alpin

مورد استفاده باشد؛ برای انجام هر قرائت لازم است تا هر چهار الکترو د ۵۰ متر جابه‌جا شوند. بدیهی است که این امر نیازمند متوقف کردن برداشت برای انتقال دادن سیم‌ها یا الکترودها به مدت زمان طولانی است و از آنجاکه جابه‌جایی‌ها توسط انسان صورت می‌گیرد، احتمال بروز خطا و وارد شدن الکترو دی دیگر به مدار و در نهایت برداشت داده غلط وجود دارد. دخالت نیروی انسانی در برداشتها باعث پایین بودن سرعت برداشت، بروز خطا، صرف زمان و هزینه اضافی و در مجموع پایین بودن کارایی شیوه‌های رایج برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی است. برای برداشتهای مقاومت‌ویژه الکتریکی دو روش سونداژزنی (VES) و پروفیل زنی معمول است.

در سونداژزنی مقاومت‌ویژه الکتریکی، با ثابت نگه‌داشتن مرکز آرایه الکترو دی، فاصله الکترو دی افزایش می‌یابد؛ که در نتیجه آن با افزایش فاصله الکترو دی عمق کاوش زیاد می‌شود [۱۱]. در تفسیر داده‌های سونداژزنی فرض بر این است که لایه‌های زیر سطحی افقی است و تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه در نظر گرفته نمی‌شود؛ که این باعث ایجاد خطا در تفسیر می‌گردد [۱۲].

در پروفیل زنی مقاومت‌ویژه، با ثابت نگه‌داشتن فاصله الکترو دی، کل آرایه روی یک مسیر مستقیم جابه‌جا می‌شود. با این شیوه، اطلاعاتی از تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه الکتریکی متناسب با عمق کاوش به دست می‌آید. روش‌های پروفیل زنی که حتی‌المقدور در راستای عمود بر امتداد ساختارهای زمین‌شناسی اجرا می‌شوند، تغییرات مقاومت‌ویژه را در دو بعد به تصویر می‌کشند. در این روش، مشکلات روش سونداژزنی تا حدود زیادی مرتفع می‌گردد. برای تفسیر و مدل‌سازی داده‌های این روش از روش‌های مدل‌سازی پیشرو و وارون استفاده می‌شود.

مدل‌سازی وارون و همچنین ابهامات زمین‌شناسی، عدم یکتایی تفسیرها را به دنبال دارد. لذا ممکن است برای افزایش سطح اطمینان نیاز به استفاده از چند روش ژئوفیزیکی باشد. در روش‌های مقاومت‌ویژه بهترین نتیجه از تفسیر داده‌ها، وقتی حاصل می‌شود که یافته‌های حاصل از سونداژزنی و پروفیل زنی باهم مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند [۳].

۷-۲- روش قطبش القایی (IP)

قطبش القایی (IP) روشی است ژئوفیزیکی که غالباً در اکتشاف فلزات پایه و تا حد کمتری در کاوش آب‌های زیرزمینی کاربرد دارد [۸].

این روش به‌طور گسترده برای اکتشاف توده‌های کانسنکی مخصوصاً برای سولفیدهای پراکنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمایشی از قطبش القایی را می‌توان با استفاده از یک آرایش استاندارد مقاومت‌ویژه چهار الکترودی جریان مستقیم به دست آورد؛ که در آن جریان دفعتاً قطع می‌شود. عموماً ولتاژ در دو سر الکترودهای پتانسیل یک‌باره صفر نمی‌شود؛ بلکه پس از یک کاهش بزرگ از حالت پایدار، به آهستگی واپاشی می‌یابد. زمان این واپاشی در حدود چند ثانیه یا چند دقیقه است. اگر جریان دوباره متصل شود، دامنه پتانسیل، پس از یک افزایش ناگهانی در ابتدای امر، در طول زمانی مشابه افزایش تدریجی یافته و به مقدار اولیه خود می‌رسد. روش‌هایی که برای اندازه‌گیری IP به کار گرفته می‌شود، شبیه به اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه می‌باشد. جریان الکتریکی توسط دو الکتروود به زمین تزریق می‌شود و اختلاف پتانسیل بعد از قطع شدن جریان توسط دو الکتروود پتانسیل M و N اندازه‌گیری می‌شود. تجارب آزمایشگاهی نشان داده که انرژی الکتریکی در داخل سنگ‌ها اساساً توسط فرآیندهای الکتروشیمیایی ذخیره می‌شود و این عمل معمولاً به دو طریق قطبش غشایی و قطبش الکتروودی صورت می‌گیرد [۳]:

۷-۲-۱- قطبش غشایی یا IP غیر فلزی

رسانش الکترولیتی عامل غالب در بیشتر سنگ‌ها می‌باشد و وقتی فلزی وجود نداشته و فرکانس پایین است، این تنها شکل رسانش است که وجود دارد. لذا ساختار سنگ‌ها باید تا حدودی متخلخل باشند؛ تا درجایی که کانی‌های فلزی وجود ندارند، شارش جریان را ممکن سازد. در اکثر کانی‌های سنگی مقداری بار منفی در سطح مشترک بین دو رویه سنگ و الکترولیت وجود دارد. در نتیجه یون‌های مثبت به این سطح مشترک جذب‌شده و یون‌های منفی از آن دور می‌شوند. این تراکم یون ممکن است تا عمق حدود 10^{-6} سانتیمتر در داخل الکترولیت گسترش یابد. اگر این رقم حدود پهنای خلل و فرج باشد، وقتی یک پتانسیل جریان مستقیم به دو سر آن وصل شود، یون‌های منفی در یک‌طرف آن انبارشده و از طرف دیگر دور

می‌شوند. در نتیجه چنین توزیع قطبیده‌ای، جریان قطع می‌شود. با برقراری مجدد، یون‌ها به وضعیت اولیه برمی‌گردند؛ در حالی که این عمل در زمانی معین صورت می‌گیرد [۸].

این نوع IP به بهترین وجه در حضور کانی‌های رسی صورت می‌گیرد و با افزایش شوری الکترولیت‌های موجود در حفرات، کاهش خواهد یافت.

۲-۷-۲- قطبش الکترودی یا IP فلزی

این نوع قطبش هنگامی رخ می‌دهد که در داخل سنگ مواد فلزی وجود داشته و قسمتی از جریان الکترونی و قسمتی دیگر الکترونیکی باشد؛ که سبب فعل و انفعال شیمیایی در سطح مشترک بین کانی و مایع گردد. وقتی جریان عبور کند، تبادل الکترون بین فلز و محلول یون‌ها در سطح مشترک صورت پذیرفته، عمل الکترولیز انجام می‌شود. در شیمی فیزیک این اثر به نام ولتاژ اضافی^۱ موسوم است. چون سرعت شارش جریان در الکترولیت خیلی کندتر از داخل فلز است، تجمع یون‌ها توسط ولتاژ خارجی صورت می‌گیرد. وقتی جریان قطع شود ولتاژ باقی‌مانده، با پخش یون‌ها به عقب و به طرف حالت تعادل اولیه آن‌ها، واپاشی می‌یابد [۸].

وقتی که کانی‌های فلزی در سنگ حضور داشته باشند، هدایت جریان الکتریکی به صورت الکترونیکی نیز صورت می‌گیرد. موقعی که جریان الکتریکی به داخل سنگ تزریق می‌شود، ذرات فلزی هادی قطبیده خواهند شد و در نتیجه سبب جلب یون‌های مثبت و منفی موجود در فلوئید در اطراف خود خواهند شد. معمولاً میزان سرعت هدایت الکترون‌ها از طریق ذره فلزی کمتر از سرعت تبادل الکترونی بین یون‌ها و ذره فلزی خواهد بود؛ در نتیجه در دو طرف ذره فلزی، یون‌های مثبت و منفی تجمع پیدا می‌کنند. هنگامی که جریان تزریقی قطع می‌شود، یون‌ها به آهستگی پراکنده شده و به محل اولیه خود مراجعت می‌کنند و سبب پیدایش ولتاژ ضعیف و رو به فانی IP می‌شوند. تمام کانی‌هایی که قابلیت هدایت خوبی دارند سهم به‌سزایی در این نوع IP دارند. طول مدت دوام ولتاژ روبه‌زوال IP در داخل زمین به عواملی مثل ساخت سنگ‌ها، تخلخل، تراوایی، قابلیت هدایت الکتریکی کانی‌های فلزی و قابلیت هدایت الکترولیت موجود در حفرات

^۱ Over Voltage

سنگ‌ها بستگی دارد. بزرگی و شدت IP فلزی به مقدار ولتاژ تزریقی، نوع ماده معدنی، درصد ماده معدنی، اندازه دانه‌ها، تخلخل، مقاومت و نوع الکترولیت و مقاومت ویژه سنگ‌های دربرگیرنده بستگی دارد. کانی‌هایی که رسانای الکترونی هستند، قطبش الکترونی از خود نشان می‌دهند. این گونه کانی‌ها شامل اکثر سولفیدها (به جز استیبنیت یا آنتیمونیت و اسفالریت خالص)، برخی اکسیدها مثل مگنتیت، ایلمنیت و البته گرافیت می‌باشند. البته بزرگی این قطبش الکترونی به چشمه جریان خارجی و همچنین مشخصات محیط بستگی دارد. این بزرگی با تراکم فلزی تغییر می‌کند، ولی چون پدیده سطحی است، اثر آن وقتی کانی پراکنده است، بیشتر از موقعی است که توده‌ای باشد. این امر را می‌توان برترین مزیت IP تلقی کرد. زیرا سایر روش‌های الکتریکی در این گونه حالت‌ها به خوبی جواب نمی‌دهند [۸].

هرچه ماده معدنی رساناتر و درصد آن بیشتر باشد، IP بزرگ‌تر و هر چه کانی‌ها پراکنده‌تر در متن سنگ میزبان باشند؛ IP برجسته‌تر خواهد بود. زیرا در این حالت سطح تماس برای تبادل الکترونی-یونی به حداکثر خواهد رسید. اگر به جای جریان تزریقی DC از جریان AC استفاده شود، مقدار IP فلزی با افزایش فرکانس جریان تزریقی، کاهش خواهد یافت. زیرا زمان لازم برای تشکیل ولتاژ IP، طولانی‌تر از زمان تناوب جریان AC تزریقی می‌باشد. به طور کلی اندازه‌گیری IP در صحرا به دو صورت انجام می‌شود [۳]:

۱- اندازه‌گیری IP در حوزه زمان، ۲- اندازه‌گیری IP در حوزه فرکانس

۱) اندازه‌گیری (IP) در حوزه زمان

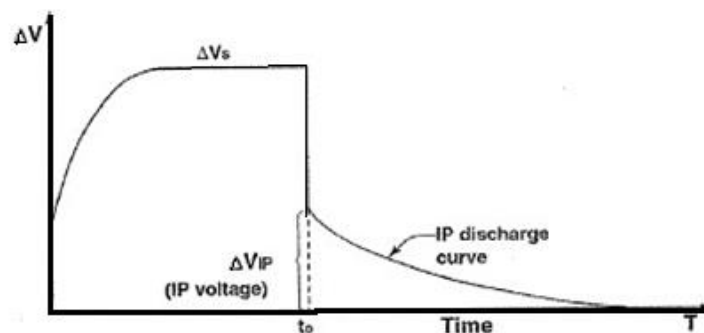
در این روش از جریان با فرکانس خیلی کم استفاده می‌شود. معمولاً جریان I را به مدت ۱ الی ۵ دقیقه وارد زمین می‌کنند تا اختلاف پتانسیل به یک حالت ثابت و پایدار برسد، سپس جریان را ناگهان قطع می‌کنند. در این حالت نحوه اندازه‌گیری معمولاً به ۳ طریق صورت می‌گیرد [۳]:

الف) اندازه‌گیری بارپذیری ظاهری بر اساس نسبت تغییرات اختلاف پتانسیل IP بر تغییرات اختلاف پتانسیل

منبع

ب) اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی ولتاژ IP

ج) اندازه‌گیری بارپذیری از طریق محاسبه تمامی مساحت زیر منحنی ولتاژ IP



شکل ۲-۸: نمودار تغییرات اختلاف پتانسیل IP بر تغییرات اختلاف پتانسیل منبع [۹]

$$A = \int_{t_1}^{t_2} \Delta v(t) dt \quad (۱۲-۲)$$

$$M = \frac{A}{\Delta V_s} = \frac{mV \times sec}{V} = msec \quad (۱۳-۲)$$

$$M = \frac{A}{\Delta V_s} = \frac{1}{\Delta V_s} \int_{t_0}^{t_{\infty}} \Delta v(t) dt \quad (۱۴-۲)$$

۲) اندازه‌گیری (IP) در حوزه فرکانس

در این روش تغییرات مقاومت ویژه ظاهری سنگ‌های زیرسطحی را هنگام تغییر فرکانس جریان AC اندازه‌گیری می‌نمایند. چون جریان حاصله از IP در سنگ‌های زیرسطحی با جهت جریان تزریقی مخالفت می‌کند؛ از این رو سبب ایجاد یک مقاومت مازاد بر مقاومت الکتریکی سنگ‌ها می‌شود. معمولاً در سنگ‌هایی که فاقد کانی‌های رسانا هستند IP خیلی کمی ایجاد می‌شود [۳].

۲-۸ - عوامل مؤثر بر IP

عوامل مختلفی که بر اندازه‌گیری IP اثر می‌گذارند، عبارتند از [۱۶]:

- قابلیت هدایت الکتریکی کانی‌ها: نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که کانی‌های دارای قابلیت هدایت الکتریکی الکترونی، IP قوی‌تری نسبت به کانی‌هایی که دارای هدایت الکترولیتی هستند (مالاکیت)، ایجاد می‌کنند. البته موارد استثنایی هم وجود دارد. اسفالریت درحالی‌که دارای هدایت الکتریکی فلزی

است، IP ضعیفی از خود نشان می‌دهد.

- عمق کانی‌سازی نیز در کاوش توده‌های معدنی به روش IP بسیار مؤثر است. اگر توده معدنی نسبتاً کوچک و عمیق باشد، ممکن است IP اندازه‌گیری شده آن قدر ضعیف باشد که نتوان کانسار را از سنگ دربرگیرنده تفکیک کرد.
- عیار ماده معدنی بر پاسخ IP اثر می‌گذارد. با افزایش عیار مواد معدنی، شدت IP افزایش می‌یابد.
- پدیده IP به سطح ایجادشده توسط دانه‌های ماده معدنی بستگی دارد. هرچقدر ماده معدنی دانه‌ریزتر باشد، IP حاصل بزرگ‌تر است. البته این نکته را باید مدنظر قرار داد که در صورتی که اندازه دانه‌بندی از یک حدی کوچک‌تر شود، شدت IP به‌جای افزایش، کاهش می‌یابد.
- مقاومت‌ویژه سنگ‌های دربرگیرنده کانسار نیز بر پاسخ IP اثر می‌گذارد. این تأثیر، به اختلاف مقاومت‌ویژه بین کانسار و سنگ میزبان بستگی دارد. با افزایش مقاومت‌ویژه سنگ‌های دربرگیرنده نسبت به مقاومت-ویژه کانسار، مقدار جریان اولیه‌ای که وارد کانسار می‌شود، افزایش می‌یابد.

۲-۹- روش‌های اندازه‌گیری IP

روش‌های سونداژزنی و پروفیل‌زنی در اندازه‌گیری‌های IP نیز به کار گرفته می‌شود؛ اما بیشتر از آرایش‌های دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی استفاده می‌شود، زیرا با استفاده از این دو آرایش می‌توان میزان جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بین الکترودهای جریان و پتانسیل را به حداقل کاهش داد [۳].

۲-۱۰- برداشت‌های صحرایی IP

تجهیزات و عملیات صحرایی برداشت‌های IP، مشابه با اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه است. بنابراین در اکثر مواقع، برداشت‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی به‌طور هم‌زمان انجام می‌شود. در بعضی موارد، پتانسیل خودزا (SP)^۱ نیز اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است که در مقایسه با اندازه‌گیری‌های SP و مقاومت‌ویژه، اندازه‌گیری‌های IP سرعت کم‌تری دارد. برای قرائت پارامترهای IP در صحرا، جریان از طریق دو الکتروده

^۱Self Potential

درون زمین ارسال می‌شود و اثر قطبش‌القایی توسط دو الکتروود پتانسیل غیر پلاریزه اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به شباهت سیستم الکتروودی اندازه‌گیری‌های IP با مقاومت‌ویژه، کلیه آرایه‌های الکتروودی را می‌توان از نظر تئوری مورد استفاده قرار داد [۱۷].

فصل سوم

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

۳-۱- موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه از لحاظ تقسیمات کشوری در استان یزد و شهرستان اردکان و در نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ کویر درانجیر قرار گرفته است. محدوده اکتشافی مورد مطالعه در فاصله تقریبی ۹۵ کیلومتری شمال شهرستان یزد و در فاصله ۱۳ کیلومتری شمال خرائق واقع شده است. دسترسی به محدوده از طریق راه ارتباطی یزد به خرائق به مسافت ۹۵ کیلومتر به شرح ذیل میسر می‌باشد [۲]:

یزد تا دوراهی طبس ۲۲ کیلومتر جاده آسفalte درجه یک، دوراهی طبس تا خرائق ۶۰ کیلومتر جاده آسفalte درجه یک، خرائق تا اول جاده خاکی نفیس آباد ۸ کیلومتر جاده آسفalte درجه یک، اول جاده خاکی نفیس آباد تا محدوده ۵ کیلومتر جاده خاکی، پس از خروج از آسفالت و ورود به جاده خاکی نفیس آباد، در امتداد این جاده خاکی مسافت ۲/۵ کیلومتر طی می‌شود و پس از رسیدن به دوراهی، جاده خاکی سمت چپ طی شده و در امتداد آن مسافت ۲/۲ کیلومتری پیموده می‌شود تا محدوده مورد مطالعه ظاهر شود.



شکل ۳-۱: نقشه راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه [۱۸]

۳-۲- شرایط اجتماعی و زیستی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در استان یزد، شهرستان اردکان و در قسمت شمال خرائق واقع گردیده است.

نزدیک‌ترین شهر به محدوده، شهر خرائق می‌باشد که در فاصله ۱۳ کیلومتری جنوب محدوده قرار دارد. این شهر دارای حدود ۱۰۰ خانوار جمعیت است و با امکاناتی چون مخابرات، پمپ‌بنزین، بانک، پست، نانوائی و غیره بهترین مکان جهت تأمین مایحتاج محدوده مذکور می‌باشد. همچنین با توجه به قرار گرفتن این شهر در مسیر ترانزیت یزد - طبس - مشهد و نزدیکی به ایستگاه راه‌آهن به‌عنوان انبار تخلیه و توزیع مواد معدنی می‌تواند استفاده شود [۲].

شغل اصلی ساکنین منطقه و آبادی‌های کوچک مجاور آن دامداری است و بر این اساس محصولات عمده این قسمت عمدتاً فراورده‌های لبنی می‌باشد. لازم به ذکر است که نزدیک‌ترین پاسگاه به محدوده، پاسگاه انتظامی خرائق می‌باشد.

۳-۳- شرایط آب و هوایی محدوده مورد مطالعه

به‌طور کلی منطقه مورد نظر به دلیل واقع شدن در بین ارتفاعات و به علت مجاورت در بخش خرائق به‌صورت نیمه کوهستانی است که دارای آب‌وهوای معتدل می‌باشد. هرچند به علت ریزش‌های بسیار کم و هم‌جواری با کویر، شرایط آب و هوایی مناطق کویری بر آن حاکم می‌باشد؛ یعنی دارای تابستان‌های گرم و سوزان و زمستان‌های سرد و خشک است. حداکثر دمای منطقه در تابستان گرم و سوزان حدود ۴۸ الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد و در زمستان حداقل ۱۰- الی ۱۲- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

ریزش‌های جوی در منطقه بسیار اندک و اغلب در زمستان و اوایل بهار صورت می‌گیرد. آب‌های ناشی از باران‌های موسمی پس از جاری شدن در ارتفاعات و عبور از دره‌ها و رودخانه‌ها به مناطق کویری و دشت‌های اطراف جاری می‌شود. وجود مسیل‌های زیاد و رودخانه‌های طبیعی عریض در این ناحیه نشان از بارندگی‌های فصلی در گذشته دارد. با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه امکان کار در کلیه فصول سال در این منطقه میسر خواهد بود.

۳-۴- مشخصات محدوده مورد مطالعه

محدوده اکتشافی عبارت است از چهارضلعی EFKL واقع در نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش

کویر درانجیر که مساحت آن حدود ۷/۴ کیلومتر مربع می باشد. مختصات رئوس محدوده موردنظر برحسب UTM و سیستم مختصاتی European1950 به صورت جدول ۱-۳ می باشد:

جدول ۱-۳: مختصات جغرافیایی محدوده اکتشافی

رئوس	E	F	K	L
طول جغرافیایی	۲۸۱۹۵۰	۲۸۴۳۰۰	۲۸۴۳۰۰	۲۸۲۰۰۰
عرض جغرافیایی	۳۵۸۸۹۵۰	۳۵۸۹۰۰۰	۳۵۸۵۷۰۰	۳۵۸۵۶۵۰

$$EF = KL = ۲/۳ \text{ km}$$

$$FK = LE = ۳/۳ \text{ km}$$



شکل ۲-۳: عکس ماهواره‌ای از محدوده مورد مطالعه [۱۹]

۳-۵- مورفولوژی و ریخت‌شناسی منطقه

به‌طور کلی از دیدگاه ریخت‌شناسی، محدوده اکتشافی مورد مطالعه از سه بخش تشکیل شده است که عبارتند از:



شکل ۳-۳: نمایی از محدوده اکتشافی

۳-۵-۱- بخش پست

بخش کوچکی از محدوده اکتشافی شامل پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های جوان و قدیمی به همراه رسوبات بستر رودخانه می‌باشد؛ که در نتیجه فرسایش ارتفاعات، این آبرفت‌ها به اشکال گوناگون پدید آمده‌اند؛ که در دامنه ارتفاعات انباشته شده‌اند و یا دشت‌ها و کویر را در بر گرفته‌اند.

۳-۵-۲- بخش تپه‌ماهور

این بخش شامل تپه‌ماهورهایی نسبتاً ناهموار با سطح هوازده می‌باشد. تشکیلات این بخش شامل شیل و ماسه‌سنگ می‌باشد. لازم به ذکر است ذخایر خاک صنعتی نیز در این بخش وجود دارد.

۳-۵-۳- بخش کوهستانی

این بخش دربرگیرنده تشکیلات ماسه‌سنگی و آهکی است؛ که در مراحل گوناگون کوهزایی چین‌خورده و گسلیده شده‌اند. این تشکیلات بلندی‌های منطقه را تشکیل داده‌اند؛ که بخش اعظمی از محدوده اکتشافی را شامل می‌شود.



شکل ۳-۴: نمایی از بخش کوهستانی محدوده مورد مطالعه

۳-۶- زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

ناحیه مورد مطالعه از نظر تقسیمات ساختاری زمین‌شناسی در زون ایران مرکزی قرار دارد. زون ایران مرکزی یکی از پیچیده‌ترین واحدهای زمین‌شناسی به شمار می‌رود. در این واحد از قدیمی‌ترین سنگ‌های پرکامبرین تا آتشفشان‌های نیمه فعال امروزی وجود دارد؛ که حوادث زمین‌شناسی فراوانی به خود دیده است. محدوده اکتشافی مذکور تقریباً در قسمت مرکزی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش اردکان و در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خرائق جای می‌گیرد. برای بررسی بهتر زمین‌شناسی منطقه ابتدا اطلاعات مختصری از سنگ‌های آذرین و تکتونیک ناحیه مورد اکتشاف و سپس به‌طور خلاصه زمین‌شناسی عمومی منطقه ارائه می‌گردد [۲].

۳-۷- تکتونیک منطقه مورد مطالعه

گسل‌ها و چین‌خوردگی‌هایی که با حرکات کوه‌زایی آلپین شروع و تا این زمان ادامه دارد، ساختمان تکتونیکی پیچیده‌ای را در منطقه ساخته است. به نظر می‌رسد که در طول پالئوزوئیک قسمت وسیعی از ناحیه اردکان از آب بالاآمده و قسمت‌هایی به زیرآب رفته و گودال‌هایی ایجاد شده است که متوالیاً توسط رسوبات ژوراسیک، کرتاسه و ترشیری پر شده است. چندین ساختار گسلی بزرگ با روند شمالی- جنوبی در منطقه به‌خصوص در قسمت شرقی آن توسعه پیدا کرده است. تعدادی از تاقدیس‌های خاص دوران سوم

(ترشیری) روی چین خوردگی‌های دوران مزوزوئیک و پالئوزوئیک قرار می‌گیرند. در کلوت اردکان تعدادی از گنبد‌های نمکی در راستای گسل‌ها و آنتی‌کلین‌های دیاپیریک، تشکیل گردیده‌اند. محدوده اکتشاف واقع در واحد تکتونیکی شرق خرائق می‌باشد که در این واحد گسل‌های بزرگ که از گسل اصلی منطقه ناشی شده است، باعث جابجایی عظیمی در رسوبات ژوراسیک گردیده است. به گونه‌ای که سنگ‌های اینفرا کامبرین و پالئوزوئیک را در کنار لایه‌ای از ژوراسیک قرار داده است [۲].

۳-۸- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

این محدوده به‌طور عمده از رسوبات سازندهای نایبند (تریاس بالایی) و شمشک (ژوراسیک زیرین) تشکیل شده است. این رسوبات که در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرائق تفکیک نشده‌اند؛ شامل ماسه‌سنگ درشت‌دانه، شیل، توف‌های سیاه تا خاکستری و سبز که در برخی نقاط کلریتی شده‌اند و کنگلومرا می‌باشد. میان لایه‌های آهکی نیز در بعضی نقاط منطقه وجود دارد. هوازگی توف، شیل و تبدیل آنها به کانی‌های رسی با شدت متفاوت در رسوبات نایبند - شمشک به چشم می‌خورد [۲].

تشکیلات شمشک دارای ویژگی‌های قاره‌ای است. که محیط رسوب‌گذاری آن رودخانه‌ای و بخش شیل آن مربوط به رسوبات دشت سیلابی و دلتایی می‌باشد. این رسوبات که دگرگونی ضعیف و آلتراسیون را تحمل کرده‌اند، عمده خاک‌های صنعتی در محدوده مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند.

کرتاسه منطقه اغلب شامل کنگلومرا، شیل، ماسه‌سنگ، مارن و آهک‌های لایه‌ای و توده‌ای می‌باشد؛ که به‌صورت دگر شیبی در اغلب قسمت‌ها بر روی رسوبات ژوراسیک و قدیمی‌تر قرار گرفته است. لازم به توضیح است که منطقه به‌شدت تحت تأثیر پدیده‌های تکتونیکی قرار گرفته و رسوبات توالی خود را از دست داده و به هم‌ریخته شده‌اند.

با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه درست در مجاورت گسل بزرگ خرائق قرار دارد، عملکرد گسل اصلی مذکور و سایر گسل‌های فرعی با امتداد شمال غرب - جنوب شرق سبب چین‌خوردگی، گسلش و خرد شدن شدید سنگ‌ها شده و نفوذ آب‌های جوی به داخل سنگ‌های خرد شده موجب هوازگی آنها گردیده است. بخش‌هایی از لایه‌های شیل که هوازگی آن شدیدتر بوده است، رنگ روشن داشته و به همین

دلیل مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور کلی ارتفاعات محدوده متشکل از قدیمی‌ترین رسوبات دوران اول زمین‌شناسی دارای رخساره‌ای قاره‌ای است؛ که همراه با سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا بازی حتی سنگ‌های اولترابازیک بوده و گرانیت نیمه عمیقی در آن‌ها نفوذ کرده است. در این محدوده نهشته‌های پرمین شامل دولومیت و سنگ‌آهک همراه با ماسه‌سنگ و شیل بر روی سنگ‌های دگرگونی قدیمی‌تر شامل کوارتزیت و دولومیت آلتزه شده دیده می‌شود. کانی‌سازی آهن در منطقه عمدتاً به شکل هماتیت و با توجه به آنالیزهای صورت گرفته بر روی ماده معدنی، با عیار متوسط ۴۶ درصد می‌باشد. بیشترین کانی‌سازی در کنتاکت سنگ‌های آهکی- دولومیتی و ماسه‌سنگی تشکیل شده است. ماده معدنی مالاکیت دارای رخنمون‌های متعددی در منطقه است؛ به‌طوری‌که به‌صورت لایه‌ها متعددی در سطح به نظر می‌رسد. با توجه به مشاهدات صحرایی پراکندگی رخنمون لایه‌های مالاکیت در دره‌ها، دامنه‌ها و حتی در رأس تپه‌ها قابل مشاهده است؛ که ارتباط آن‌ها چندان مشخص نیست. ولی می‌توان منشأ آن‌ها را فعالیت‌های تکتونیکی و گرمایی منطقه دانست [۲].

لازم به ذکر است بخش اعظمی از غرب و جنوب غرب محدوده به موازات امتداد باند خاک‌های صنعتی موجود، رشته تپه‌هایی با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی و از جنس شیل و ماسه‌سنگ موجود می‌باشد؛ که ذخایر مس به شکل رگچه‌هایی در آن تشکیل شده و کانی مس شامل آزوریت و مالاکیت می‌باشد. کانی‌سازی مس در امتداد یکی از گسل‌های اصلی موجود در منطقه با روند شمال غربی - جنوب شرقی و گسل‌های فرعی منشعب شده از آن و به طول مجموع ۲۰۰۰ متر صورت گرفته است. رسوبات آبرفتی انباشته شده در این محدوده در اثر فرسایش سازندهای زمین‌شناسی مجاور ایجاد شده است. این نهشته‌های کواترنر به‌صورت پادگانه‌های آبرفتی، مخروط‌افکنه‌ها و آبرفت‌های جوان در ناحیه مورد بررسی بین کوهپایه‌ها گسترده شده‌اند.

فصل چهارم

مدل سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و IP برداشت شده در

منطقه

۴-۱- مقدمه

همان‌گونه که می‌دانید، داده‌های برداشت‌شده یک سری داده خام می‌باشند؛ که دارای نوفه‌های مختلفی هستند و تفسیر مستقیم آن‌ها نتایج مطلوبی در پی نخواهد داشت. به عبارت دیگر داده‌های برداشت‌شده در عملیات صحرایی، در حقیقت یک سری داده خام می‌باشند؛ که توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی این داده‌ها (به‌طور مستقیم) غیرممکن است. بنابراین تعیین رابطه بین داده‌های صحرایی به دست‌آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به عبارت دیگر، مدل‌سازی داده‌های برداشت‌شده برای توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری است. در مدل‌سازی ریاضی، روابط فیزیکی توسط یک سری معادلات دیفرانسیلی و معادلات انتگرالی بیان می‌شوند؛ به گونه‌ای که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود [۳۰]. در این فصل مطالبی در رابطه با مدل‌سازی و روش‌های مدل‌سازی و لزوم انجام آن‌ها برای دستیابی به تفسیرهای ژئوفیزیکی ارائه خواهد شد.

۴-۲- روش‌های مدل‌سازی ژئوفیزیکی

مدل‌سازی ژئوفیزیکی به دودسته کلی مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی تقسیم‌بندی می‌شود [۳].

۴-۲-۱- مدل‌سازی فیزیکی

مدل‌سازی فیزیکی شبیه‌سازی ساختار زمین در مقیاس آزمایشگاهی است. این روش مدل‌سازی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. همچنین شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی به خوبی شرایط غیرقابل پیش‌بینی زمین را فراهم نمی‌کند. با پیشرفت علوم رایانه این روش عمده‌تاً جای خود را به مدل‌سازی عددی توسط برنامه‌های رایانه‌ای داده است [۳۰].

۴-۲-۲- روش‌های مدل‌سازی عددی

اولین وظیفه یک ژئوفیزیکست درک داده‌های جمع‌آوری‌شده در صحرا و تفسیر آن‌ها به صورت یک مدل زمین‌شناسی قابل قبول، در حد توان روش‌های مختلف ژئوفیزیکی برای انجام این وظیفه است. ژئوفیزیکست‌ها

برای درک این موضوع مسائل پیشرو را برای شاخه‌های مختلف ژئوفیزیک با استفاده از معادلات مربوطه حل می‌کنند. بنابراین تئوری روش‌های مختلف ژئوفیزیکی مجهز به ابزارهای مختلف ریاضی، مبنای حل مسائل پیشرو را تشکیل می‌دهد. تئوری این روش‌ها برای درک رفتار داده‌های ژئوفیزیکی از اهمیت شایانی برخوردار است [۲۰].

به دلیل پیشرفت‌های خیلی سریع علوم کامپیوتر، تکنولوژی نرم‌افزاری و روش‌های عددی در مدل‌سازی ریاضی، بهره‌گیری از تئوری وارون فراهم گردیده است. توسعه چشم‌گیر علوم و تکنولوژی در این زمینه در طی سه دهه گذشته، قدرت درک ژئوفیزیک‌ها را از داخل زمین بهبود بخشیده است [۲۰].

الف- مدل‌سازی پیشرو (مستقیم)

در مدل‌سازی پیشرو ورودی فرآیند مدل‌سازی یک مدل آزمون (فرضی) از زمین می‌باشد و در طی فرآیند با توجه به معادلات حاکم بر مسئله، داده‌های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به عنوان خروجی مدل ارائه می‌شوند. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترها) آن‌قدر ادامه می‌یابد تا پاسخ مدل برازش خوبی با داده‌های صحرائی پیدا کند؛ یعنی از مدل، داده‌ها بدست آید. مدل‌سازی پیشرو بر مبنای روش آزمون و خطا انجام می‌شود. در این روش یک توزیع خاص برای اجزا زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شود. سپس پاسخ این مدل تحت آرایش الکترونی موردنظر محاسبه می‌شود [۳۰].

ب- مدل‌سازی وارون (معکوس)

در مدل‌سازی وارون سعی می‌شود تا با توجه به داده‌های برداشت‌شده، مدل تخمین زده شود. بقیه مراحل مدل‌سازی وارون همانند مدل‌سازی پیشرو می‌باشد. در واقع تفاوت مدل‌سازی وارون با مدل‌سازی پیشرو در نحوه انتخاب مدل اولیه است. انتخاب مدل در روش وارون کمی سخت‌تر است؛ ولی پاسخ‌های حاصل به واقعیت نزدیک‌تر است. همچنین تعداد تکرار برای کاهش خطا کمتر می‌باشد. به دلیل پیچیده‌تر بودن مدل در روش وارون، زمان لازم برای محاسبه پاسخ‌های مدل و حجم اشغالی بیشتر است [۱۲].

در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی پارامترهای مدل، مقادیر مقاومت‌ویژه سلول‌های مدل و داده‌ها، مقادیر

مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده هستند. رابطه ریاضی بین پارامترهای مدل و پاسخ آن‌ها از روش‌های تفاضل محدود [۲۱] و یا اجزاء محدود [۲۲] فراهم می‌شوند. در تمامی روش‌های بهینه‌سازی، مدل اولیه در فرآیندی تکرارشونده طوری بهبود می‌یابد؛ تا اختلاف بین داده‌های برداشت شده و پاسخ‌های مدل کاسته شود. می‌توان داده‌های برداشت شده را به صورت بردار ستونی y نمایش داد:

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

m تعداد قرائت‌ها است. پاسخ‌های مدل (f) را نیز می‌توان به طریق مشابهی نشان داد

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

پارامترهای مدل به صورت بردار زیر ارائه می‌شوند

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (۳-۴)$$

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

$$g = y - f \quad (۴-۴)$$

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

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (۵-۴)$$

برای کاهش خطا از معادله گوس-نیوتن استفاده می‌شود، بدین وسیله پارامترهایی از مدل که باید تغییر کند تا مجموع مربعات خطا (E) کاهش پیدا کند؛ مشخص شوند [۲۳].

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (۶-۴)$$

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

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

به دلیل کاستی‌های معادله گوس-نیوتن، این روش کمتر مورد استفاده قرار گرفته و در عوض از بهبود یافته آن با عنوان مارکوارت-لونیگ^۱ استفاده می‌شود [۲۳].

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

در معادله فوق J ماتریس ژاکوبین^۲ و λ فاکتور تعدیل^۳ است. این روش با عنوان رگرسیون ریح نیز شناخته می‌شود. در وارون‌سازی داده‌های سونداژ که مدل از تعداد لایه‌های کمتری تشکیل شده است، این روش به‌خوبی پاسخ می‌دهد. ولی در مواردی که پارامترهای مدل زیاد باشند، نظیر مدل‌های دو و سه‌بعدی، مدل تولید شده با روش رگرسیون ریح، توزیع مقاومت‌ویژه نامنظم همراه با مناطقی با مقاومت‌ویژه بسیار بالا یا پایین خواهد داشت. برای رفع این مشکل معادله کمترین مربعات گوس-نیوتن بار دیگر به‌صورت معادله زیر بهینه شده، به طوری که تغییرات فضایی در پارامترهای مدل را کمینه می‌کند [۲۳].

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

$$F = \alpha_x c_x^T c_x + \alpha_y c_y^T c_y + \alpha_z c_z^T c_z \quad (10-4)$$

c_x, c_y و c_z ماتریس‌های هموارسازی در جهات x, y و z هستند. α_x, α_y و α_z وزن‌های نسبی داده‌شده به فیلترهای هموارسازی در جهات یاد شده است. معادله (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

^۱Marquardt-Levenberg

^۲Jacobwin

^۳Damping Factor

مدلی با تغییرات تدریجی مقاومت ویژه تولید می‌کند. استفاده از این روش وارون سازی برای مناطقی مناسب است که تغییرات زمین شناسی آن‌ها به صورت تدریجی بوده و ناگهانی نباشد. در شرایطی که مناطقی در زیر سطح به صورت درونی همگن هستند؛ ولی با محیط پیرامون خود متفاوت بوده و دارای مرزهای تند هستند، بهینه شده‌ی معادله فوق که به روش وارون سازی بلوکی معروف است جواب‌های به مراتب قابل قبول تری می‌دهد که به صورت زیر است [۲۳]:

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

$$F = \alpha_x c_x^T R_m c_x + \alpha_y c_y^T R_m c_y + \alpha_z c_z^T R_m c_z \quad (۱۲-۴)$$

R_m و R_d ماتریس‌های وزنی هستند. برای محاسبه مقاومت ویژه سه روش وجود دارد: (I) روش تحلیلی، (II) روش جزء مرزی^۱ (III) روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود. روش تحلیلی دقیق ترین روش است. ولی استفاده از این روش محدود به چند شکل هندسی ساده (کره و استوانه) است. روش جزء مرزی از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار است؛ اما در این روش نیز تعداد نواحی با مقدار مقاومت ویژه متفاوت محدود است (معمولاً کمتر از ۱۰ لایه). در بررسی‌های مهندسی و زیست محیطی 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 [۱۲].

۴-۳- روش‌های عددی برای حل مسائل وارون سازی

از میان روش‌های عددی حل مسائل وارون سازی، روش کمترین مربعات به دلیل سادگی ریاضی، از پرتعدادترین روش‌هاست. همچنین به دلیل اینکه در الگوریتم نرم افزار مورد استفاده در این پایان نامه این روش به کار برده شده است، به توضیح آن پرداخته می‌شود. در این مدل سازی، قبل از هر چیز به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل سازی نیاز می‌باشد [۲۴].

^۱Boundary element method

مدل اولیه در نرم افزار RES2DINV یک مدل اولیه همگن متناسب با داده های مشاهده ای است؛ به گونه ای که منجر به تغییرات شدید در مراحل تکرار نشود. پس از تخمین مدل اولیه نوبت به تصحیح این مدل با هدف رسیدن به تطابق قابل قبول با داده های صحرایی می رسد. برای این منظور دو روش مورد استفاده قرار می گیرد؛ که عبارتند از روش معمول کمترین مربعات گوس- نیوتن^۱ و روش شبه نیوتن^۲.

۴-۳-۱- روش کمترین مربعات گوس- نیوتن

یکی از روش های معمول برای حل مسائل غیرخطی، روش بهینه سازی گوس- نیوتن می باشد. این روش به طور گسترده ای در حل مسائل وارون سازی از جمله در نرم افزار RES2DINV به کار می رود [۲۵]. روش مدل سازی وارون کمترین مربعات گوس- نیوتن در سه مرحله انجام می شود. مرحله اول محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری برای مدل به کار گرفته شده می باشد. این مرحله با استفاده از روش تفاضل محدود^۳ یا روش اجزاء محدود^۴ انجام می شود. مرحله دوم محاسبه ماتریس ژاکوبین (محاسبه ماتریس مشتقات جزئی مرتبه اول) می باشد. مرحله سوم حل سیستم معادلات خطی می باشد. این مراحل به صورت تناوبی تکرار می شوند؛ تا هم خوانی مناسبی بین مدل فرض شده با مدل صحرایی ایجاد شود و یا برنامه به حداکثر تکرار تعریف شده خود برسد [۲۴].

از مزایای این روش مدل سازی، نزدیک بودن مدل ساخته شده به وسیله نرم افزار با مدل زمینی در همان تکرارهای اولیه می باشد. اما به دلیل محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، این روش زمان بر بوده و نیاز به حافظه زیادی برای مدل سازی دارد [۲۴].

۴-۳-۲- روش شبه نیوتن

در روش گوس- نیوتن، ماتریس ژاکوبین باید در هر تکرار محاسبه شود [۲۴]. روش شبه نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین به وسیله استفاده از یک روش به روز رسانی اجتناب می کند. این روش برای

^۱ Gauss-Newton

^۲ Quasi-Newton

^۳ Finite difference method

^۴ Finite element method

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

$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T \quad (۱۳-۴)$$

$$B_{i+1} u_i = \frac{(\Delta y_i - B_i P_i)}{P_i P_i^T} B_i + u_i P_i^T \quad (۱۴-۴)$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i \quad (۱۵-۴)$$

در روابط بالا y_i پاسخ مدل برای i امین تکرار، B_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای $(i+1)$ امین تکرار با استفاده از تقریب ماتریس ژاکوبین و B_i و بردار انحراف پارامتر می‌باشند. لازم به ذکر است که روش‌های دیگری نیز برای روش شبه نیوتن وجود دارد. مدل‌سازی وارون شبه نیوتن در چهار گام اصلی انجام می‌شود: در گام اول پارامترهایی که فرایند وارون سازی را کنترل می‌کنند؛ باید انتخاب شوند. میرایی اولیه، میرایی کمینه و همچنین ماکزیمم تعداد تکرارها برای این روش مدل‌سازی تعیین می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر $۰/۲$ و $۰/۰۴$ برای دو عامل میرایی اولیه و میرایی کمینه نتایج رضایت بخشی را برای اکثر داده‌های صحرایی ارائه می‌دهند [۲۴].

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

$$e_i = \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1})}{\varepsilon_i} \quad (۱۶-۴)$$

که ε_i و ε_{i+1} ، خطای RMS برای i امین و $(i+1)$ امین تکرار و e_i نیز میزان خطای RMS کمینه می‌باشند. به طور معمول فرایند مدل‌سازی وارون زمانی که e_i کمتر از $۰/۰۵$ است، متوقف می‌شود.

^۱Root- Mean- Squared

در گام دوم یک مدل زمین همگن به عنوان مدل اولیه برای اولین تکرار در نظر گرفته می شود. مقاومت-ویژه این مدل متناسب با داده های صحرایی برداشت شده می باشد. لگاریتم مقاومت ویژه این مدل به وسیله میانگین گرفتن از لگاریتم های مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده f_i به صورت زیر محاسبه می شود:

$$f(x) = r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (۱۷-۴)$$

حال مقاومت ویژه ظاهری برای مدل جدید با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه می شود.

در این رابطه n تعداد نقاط داده هاست. در این مرحله ماتریس ژاکوبین B_0 محاسبه شده و در حافظه کامپیوتر ذخیره می شود. معادله کمترین مربعات نیز برای تعیین بردار انحراف پارامتر P_0 حل می شود. ارزیابی مقاومت ویژه بلوک ها به وسیله رابطه (۱۸-۴) انجام می شود:

$$r_1 = r_0 + p_0 \quad (۱۸-۴)$$

در گام سوم روش به روزرسانی بیان شده در روش شبه نیوتن برای تقریب ماتریس ژاکوبین، B_{i+1} برای تکرار بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. به طور معمول اگر خطای RMS در تکرار قبلی کاهش پیدا کرده باشد، عامل میرایی نیز اگر هنوز بزرگتر از λ_m در گام اول باشد، کاهش پیدا می کند. اگر خطای RMS از تکرار قبلی بزرگتر باشد، جست و جوی خطی با استفاده از درونیابی درجه دوم برای پیدا کردن اندازه گام بهینه برای بردار انحراف پارامتر P مورد استفاده قرار می گیرد. این مورد معمولاً در یک مدل با یک خطای RMS کمتر رخ می دهد. اگر این روش باز هم موثر نباشد، عامل میرایی افزایش پیدا می کند و بردار P_i دوباره محاسبه می شود.

در گام چهارم، بعد از آن که یک مدل جدید به دست آمد، بردار انحراف پارامتر P_{i+1} با استفاده از ماتریس ژاکوبین ارزیابی شده و B_{i+1} محاسبه می شود. مراحل سوم و چهارم مرتباً تکرار می شوند؛ تا این که برنامه همگرا شود؛ یا اینکه برنامه همگرا شود؛ یا اینکه به ماکزیمم تعداد تکرارها برسد [۲۴].

روش شبه نیوتن در مقایسه با روش گوس نیوتن، روشی سریع تر است. زیرا ماتریس ژاکوبین در هر تکرار محاسبه نمی شود. همچنین حافظه کمتری از کامپیوتر نیز اشغال می کند. این مزایا باعث شده تا در

وارون سازی بیشتر روش شبه نیوتن استفاده شود [۲۴].

۴-۴- وارون سازی هموار دوبعدی توسط نرم افزار RES2DINV

در مدل سازی دوبعدی هموار، از روش بهینه یابی حداقل مربعات استفاده می شود و یک زمین تک

لایه ی همگن به عنوان مدل اولیه در نظر گرفته می شود [۲۶]. معادله این روش عبارت است از [۱۲]:

$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g \quad (۱۹-۴)$$

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

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (۲۰-۴)$$

در این رابطه، f_x فیلتر هموارساز افقی و f_z فیلتر هموارساز عمودی می باشد. می توان فاکتور تعدیل و فیلترهای هموارسازی را برای انواع مختلف داده ها تنظیم نمود. برای انجام محاسبات فوق از روش های تفاضل محدود و یا اجزاء محدود استفاده می شود. در مناطقی که تصحیح توپوگرافی نیاز است؛ نرم افزار به طور پیش فرض از روش اجزاء محدود استفاده می کند. ابتدا فاکتور تعدیل، یک مقدار بزرگ انتخاب می شود (λ_0) سپس بعد از هر تکرار این مقدار کاهش می یابد، تا به حد مینیمم برسد (λ_m) (که معمولاً یک دهم مقدار اولیه است).

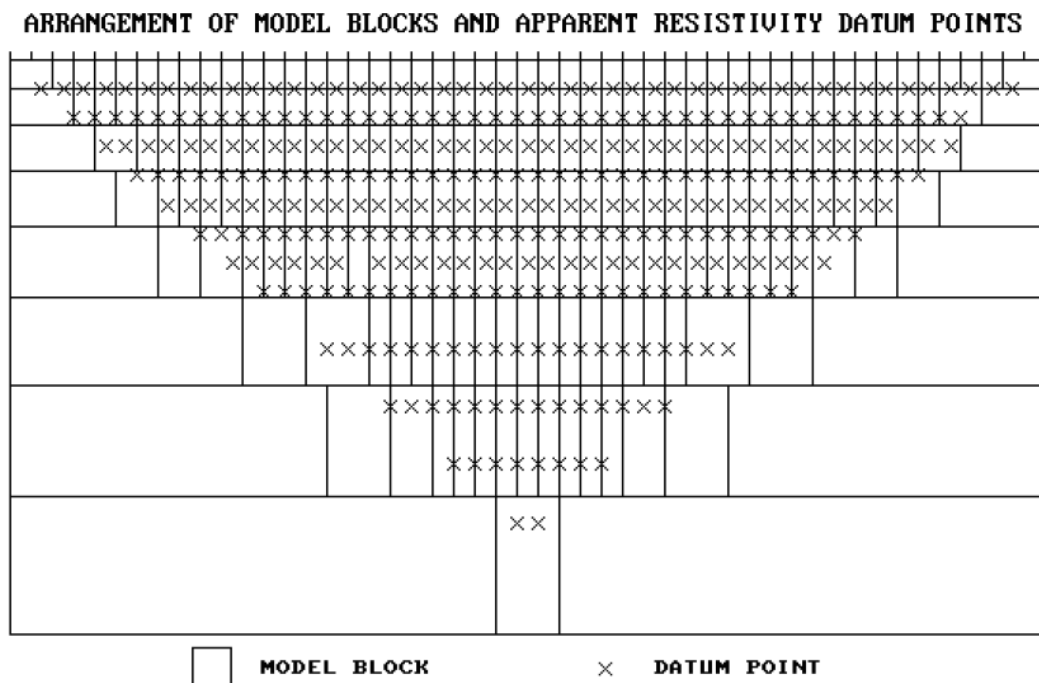
$$F = \lambda_m = 0.1 \lambda_0 \quad (۲۱-۴)$$

λ_0 به سطح نوفه منطقه بستگی دارد. هر چه سطح نوفه بیشتر باشد، مقدار اولیه فاکتور تعدیل هم بیشتر است. نرم افزار RES2DINV برای انجام مدل سازی، از روش کمترین مربعات به همراه روش عددی گوس-نیوتن یا شبه نیوتن استفاده می کند [۲۷]. برنامه در هر بار تکرار، خطای RMS را محاسبه می کند و سعی در کاهش آن دارد. مقدار خطای جذر میانگین مربعات توسط معادله زیر تعریف می شود [۲۸]:

$$RMS\% = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left(\frac{\rho_{oj} - \rho_{ej}}{\rho_{oj}} \right)^2}{N}} \times 100 \quad ۲۲-۴$$

که ρ_{oj} ز امین مقاومت ویژه مشاهده شده، ρ_{cj} نیز ز امین مقاومت ویژه محاسبه شده و N تعداد داده‌هاست. به‌طور عموم، روشی که برای وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه دوبعدی و سه‌بعدی به کار می‌رود، بر مبنای روش بهینه کمترین مربعات تعمیم داده شده می‌باشد [۲۹].

برای مدل‌سازی داده‌های IP و مقاومت ویژه از نرم‌افزار RES2DINV استفاده شده است. در این نرم‌افزار مدل مورد استفاده به‌عنوان مدل اولیه شامل یک سری بلوک‌های مستطیلی دوبعدی می‌باشد که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. در این مدل تعداد بلوک‌ها با تعداد نقاط داده‌ها در شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری برابر است و به یک شیوه مشابه منظم شده‌اند. همچنین عمق مراکز بلوک‌ها در محاسبه عمق میانگین تحت بررسی برای بازه‌های الکترونی مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۴].



شکل ۱-۴: مدل اولیه مورد استفاده در نرم‌افزار RES2DInv [۹]

این نرم‌افزار مدل‌سازی IP و مقاومت ویژه را به‌طور هم‌زمان انجام می‌دهد. داده‌های IP و مقاومت ویژه حاصل از به‌کارگیری آرایش‌های ونر، شلومبرژه، قطبی-قطبی، دو قطبی و دو قطبی-دو قطبی در

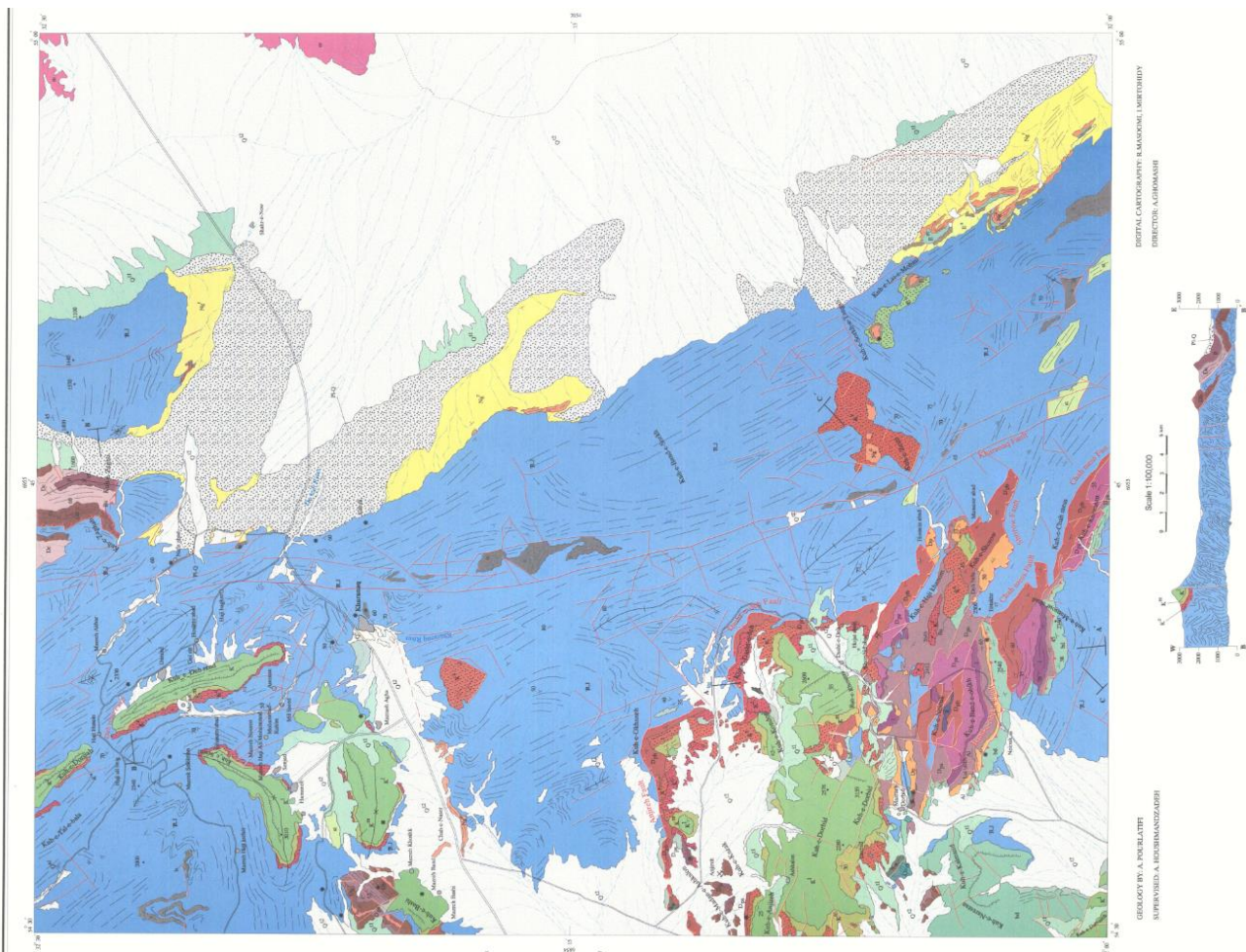
این نرم افزار قابل مدل سازی هستند (امکان تعریف آرایش های غیرمرسوم دیگری نیز وجود دارد).

در این نرم افزار مدل سازی وارون، با روش اجزاء محدود و تفاضل محدود برای تعداد زیاد داده های صحرایی قابل انجام است. امکان تصحیح توپوگرافی روی شبکه نیز مقدور می باشد. هدف از وارون سازی داده های ژئوفیزیکی، ارائه مدلی است که بیشترین تطابق را با داده های صحرایی داشته باشد. در حقیقت مدل به دست آمده بیانگر یک پاسخ ریاضی مطابق با ساختار زمین شناسی می باشد.

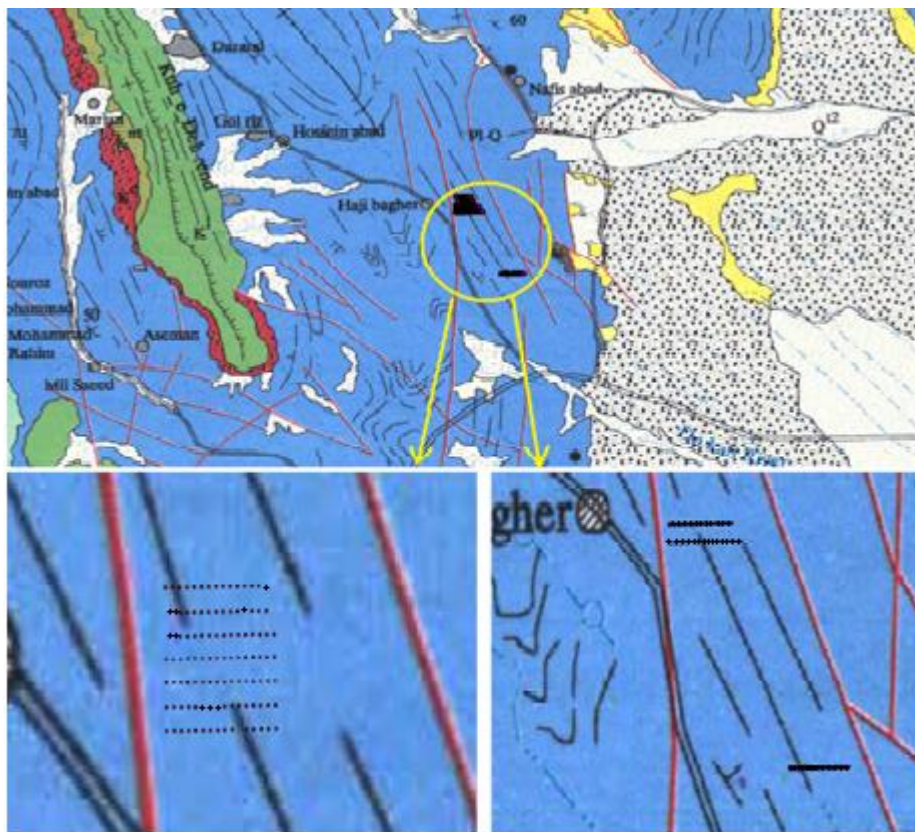
پارامترهای مدل در مراحل تکرار در فرآیند وارون سازی، آن قدر تغییر می کنند تا بیشترین تطابق بین پاسخ مدل ارائه شده و داده های صحرایی حاصل گردد. همچنین مدل به دست آمده باید با داده های زمین شناسی تطبیق داده شوند؛ تا صحت آن نیز از نظر زمین شناسی مورد تایید قرار گیرد [۱۲].

۴-۵- عملیات صحرایی برداشت داده های مقاومت ویژه و IP

با توجه به رخنمون کانی سازی مس در محدوده اکتشافی، مطالعات پی جویی به منظور یافتن منابع اقتصادی کانی سازی مس در محدوده را شروع نموده و پس از بررسی های پی جویی و اکتشاف مقدماتی و به منظور ادامه مطالعات اکتشافی، اجرای مطالعات ژئوفیزیک در دستور کار شرکت مهندسی امید قرار داده شد. به منظور کنترل هزینه ها مقرر شد، تا ابتدا بر روی رخنمون های ماده معدنی برداشت های ژئوفیزیک انجام شود و در صورت مثبت بودن نتایج، نقاطی برای حفاری مشخص گردد. در قسمت شمالی و جنوبی منطقه رخنمون های ماده معدنی مشاهده شده برای برداشت های ژئوفیزیکی انتخاب شدند. در فاز اول بر روی رخنمون جنوبی یک پروفیل، برداشت به نام DD10 و بر روی رخنمون شمالی یک مستطیل (برای برداشت با آرایش مستطیلی) و دو پروفیل برداشت به نام های DD100 و DD200 طراحی و برداشت شده است. در این مطالعات آرایش مستطیلی با طول خط جریان ۸۰۰ متر و برداشت پروفیل ها با آرایش دوقطبی - دوقطبی و فواصل الکترودی ۲۰ متر صورت گرفته، که در ادامه به تفسیر آنها پرداخته می شود. با توجه به امتداد تقریبی شمال غرب - جنوب شرق رخنمون ماده معدنی، خطوط برداشت در جهت شرقی - غربی انتخاب شده است. در شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ به ترتیب نقشه زمین شناسی منطقه و محل قرار گرفتن شبکه مستطیلی طراحی شده و پروفیل های دوقطبی - دوقطبی بر روی نقشه زمین شناسی مشخص شده است.



شکل ۴-۲: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده اکتشافی [۲]



شکل ۴-۳: بخشی از نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و نقاط برداشت

۴-۶- نقشه تغییرات بارپذیری و نقشه تغییرات مقاومت‌ویژه ظاهری آرایش

مستطیلی

با توجه به رخنمون ماده معدنی در شمال محدوده یک مستطیل برای برداشت مقاومت‌ویژه و IP با آرایش مستطیلی طراحی شد؛ که رخنمون ماده معدنی بین ایستگاه‌های ۶۰ و ۴۰ غربی پروفیل ۵۰ شمالی و ایستگاه ۰ و ۲۰ غربی پروفایل صفر قرار گرفته است. شماره ایستگاه‌ها بر روی نقشه مستطیلی مشخص شده‌اند. نقشه‌های IP و مقاومت‌ویژه داده‌های صحرایی حاصل از به‌کارگیری آرایش مستطیلی که توسط نرم‌افزار Surfer مدل شده‌اند، به ترتیب در شکل ۴-۴ و شکل ۵-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۴ ملاحظه می‌شود، مقاومت‌ویژه در محدوده مورد مطالعه به‌طور تقریبی بین ۲۰ اهم‌متر تا ۹۰ اهم‌متر متغیر است؛ که نشان‌دهنده پایین بودن مقادیر مقاومت‌ویژه در محدوده مطالعاتی می‌باشد. همچنین، مقادیر مقاومت‌ویژه در این نقشه به جز در چند محدوده کوچک که مقاومت‌ویژه از حد زمینه بالاتر بوده که

احتمالاً مربوط به ماسه‌سنگ، رسوبات آهکی و سنگ‌های آذرین موجود در منطقه می‌باشد، مقدار پایینی بین ۲۰ اهم‌متر تا ۵۵ اهم‌متر را نشان می‌دهند؛ که می‌تواند به دلیل وجود رسوبات بادی ماسه‌ای و رس باشد. مقادیر بارپذیری در نقشه IP به دست آمده از داده‌های برداشت شده با آرایش مستطیلی در محدوده مطالعاتی بین ۱ میلی‌ثانیه تا ۱۴ میلی‌ثانیه متغیر است. در این محدوده مقادیر بالاتر از ۱۰ میلی‌ثانیه به دلیل نشان دادن بی‌هنجاری نسبت به زمینه، به عنوان زون بارپذیری در نظر گرفته شده است. به جز چند محدوده کوچک در شمال شرق، جنوب شرق و غرب شبه‌مقطع، مقادیر بارپذیری در کل نقشه کمتر از ۶ میلی‌ثانیه می‌باشد؛ که اغلب با نواحی با مقاومت ویژه پایین در نقشه مقاومت ویژه منطبق می‌باشد. با توجه به نقشه‌های IP و مقاومت ویژه، در سه زون احتمال وجود کانی‌سازی مس از نوع رگچه‌ای و افشان وجود دارد.

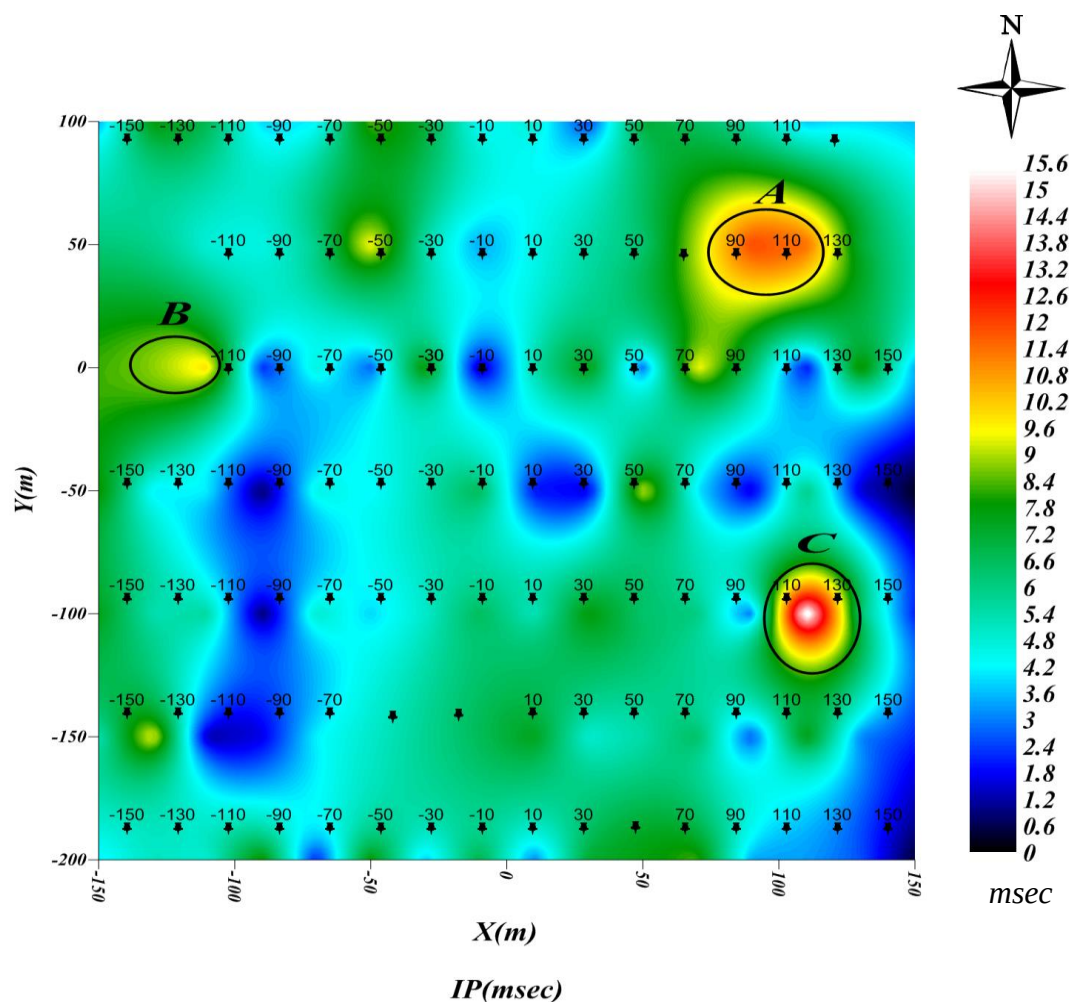
زون A: این زون که در قسمت شمال شرقی محدوده مطالعاتی قرار دارد، نسبت به دو زون دیگر گستردگی بیشتری دارد و دارای بارپذیری بالاتر از حد زمینه و در حدود ۱۰ تا ۱۲ میلی‌ثانیه می‌باشد؛ که بر نواحی با مقاومت ویژه ۵۰ اهم‌متر منطبق می‌باشد. با توجه به قرار گیری یکی از رخنمون‌های کانی‌سازی در این زون، احتمال وجود کانی‌سازی در این زون بالاست.

زون B: این زون تقریباً در غرب نقشه بارپذیری محدوده قرار دارد و بارپذیری بالایی نسبت به زمینه نشان می‌دهد؛ که با توجه به مقاومت ویژه بسیار پایین در این محدوده، احتمال وجود کانی‌سازی در این منطقه بسیار زیاد است.

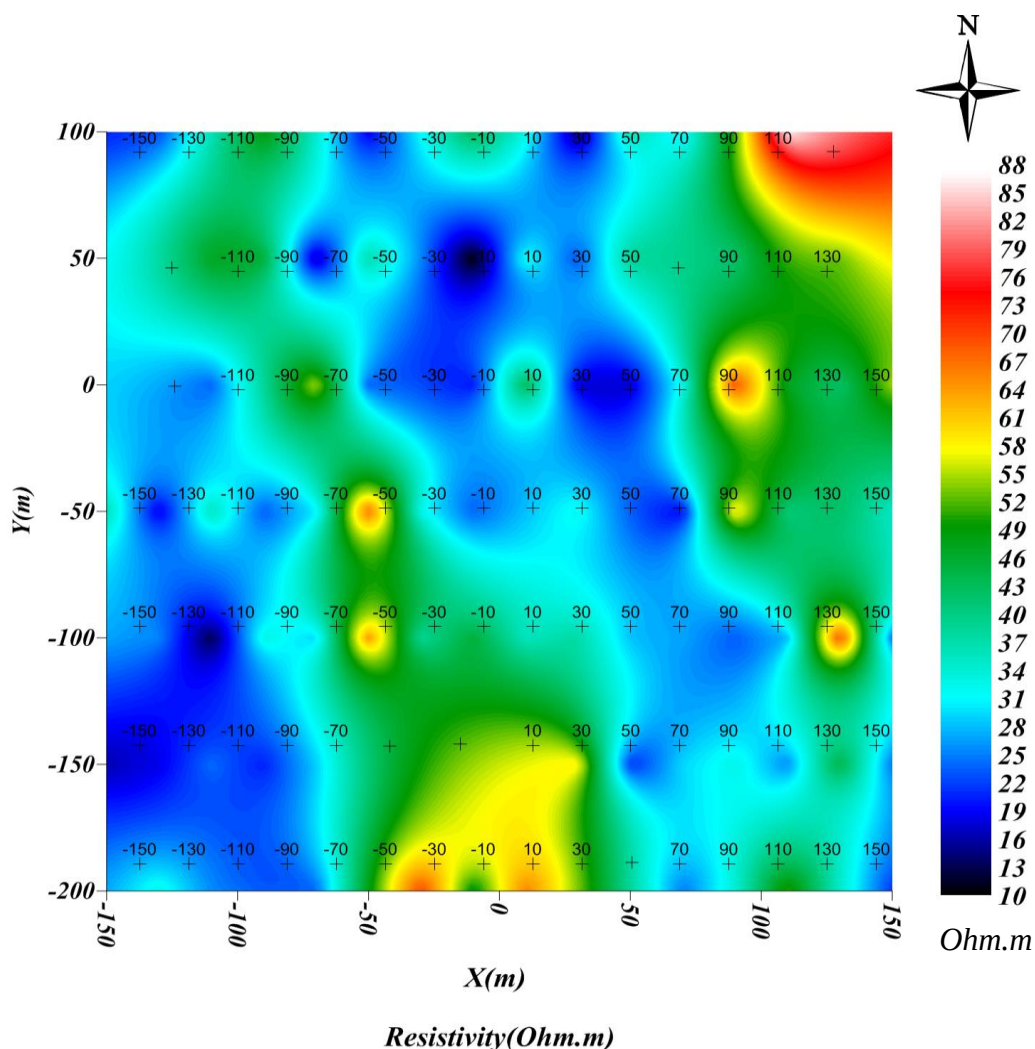
زون C: این زون که در جنوب شرق نقشه بارپذیری قرار دارد، بارپذیری قابل توجهی نسبت به زمینه نشان می‌دهد؛ که با توجه به مقاومت ویژه بالا در نقشه مقاومت ویژه در این ناحیه، در صورت وجود کانی‌سازی احتمال کانی‌سازی از نوع افشان یا پراکنده خواهد بود.

در نقشه مقاومت ویژه ظاهری مقادیر کمتر از ۲۶ اهم‌متر به عنوان زون‌های رسانا در نظر گرفته شده و زون بندی نقشه بر اساس این فرض انجام شده است. در نقشه تهیه شده یک زون رسانا از جنوب تا شمال محدوده برداشت امتداد دارد که شمال محدوده بیشتر منطبق بر رخنمون ماده معدنی می‌باشد. همان گونه

که مشاهده می‌شود، مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده در محدوده نسبتاً پایین بوده و این نشان‌دهنده گسترش زیاد واحد شیلی و رسی در محدوده برداشت می‌باشد. با توجه به شواهد صحرایی و زمین‌شناسی واحد کم مقاومت مرکز محدوده برداشت که در بعضی از نقاط منطبق بر واحد دارای بارپذیری بالاتر از ۱۰ میلی‌ثانیه بر ثانیه است؛ دارای اهمیت بیشتری از لحاظ اکتشافی است و با توجه به شواهد صحرایی تصمیم گرفته شد که عملیات اکتشافی بر روی این زون ادامه پیدا کند. با توجه به رخنمون ماده معدنی، زون‌های بی‌هنجار در سمت شمال شرق و جنوب شرق محدوده برداشت بیشتر منطبق بر رخنمون ماده معدنی می‌باشند.



شکل ۴-۴: نقشه بارپذیری محدوده اکتشافی با آرایش مستطیلی



شکل ۴-۵: نقشه تغییرات مقاومت ویژه محدوده اکتشافی با آرایش مستطیلی

در ادامه با توجه به اطلاعات به دست آمده از تفسیر کیفی شبه مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری داده‌های صحرایی برداشت شده با آرایش مستطیلی، اطلاعات زمین‌شناسی و محل رخنمون‌ها و به منظور بررسی دقیق از زون‌های کانی‌سازی و تعیین محل بی‌هنجاری‌ها، سه پروفیل با آرایش دوقطبی-دوقطبی برداشت شده است.

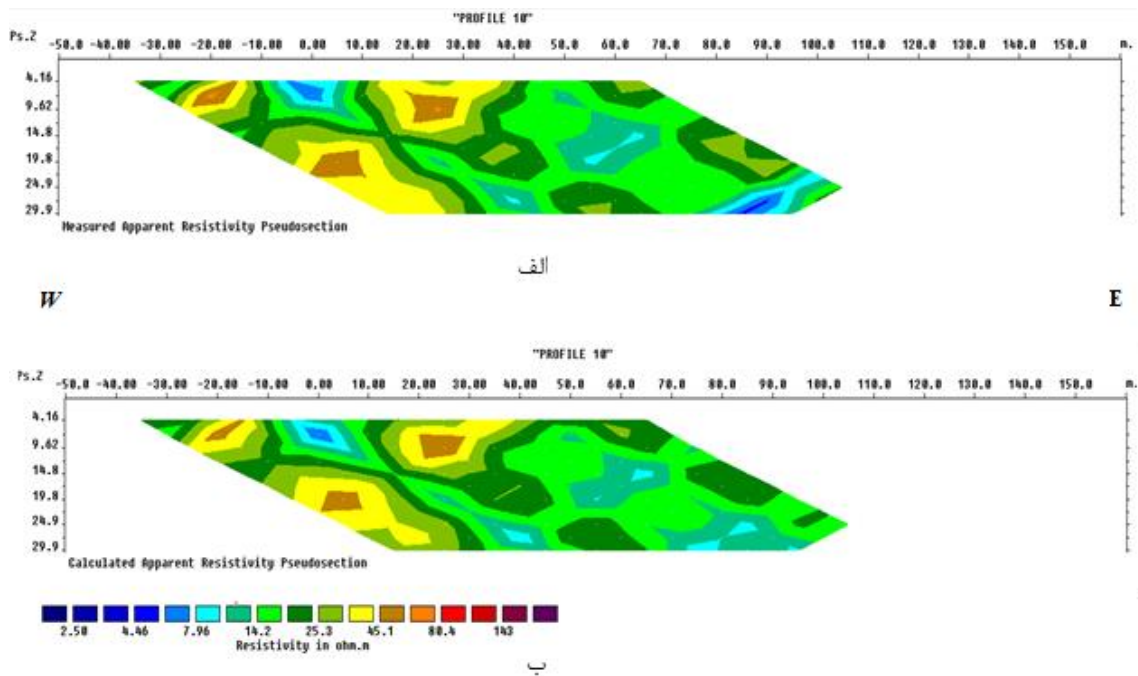
۴-۷- تفسیر کیفی داده‌های خام برداشت شده با آرایش دوقطبی-دوقطبی

به منظور تعیین موقعیت تقریبی قرارگیری زون‌های بی‌هنجاری، شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه و IP برای هر یک از پروفیل‌ها توسط نرم‌افزار RES2DINV تهیه شده و تفسیر کیفی این شبه مقاطع در ادامه ارائه خواهند شد.

در پایان، مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و IP، برای هر پروفیل به‌صورت جداگانه ارائه می‌شود و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی تفسیرهای لازم ارائه خواهند شد. ذکر این نکته ضروری است که به‌صورت قراردادی جهت برداشت به سمت غرب با علامت منفی نشان داده‌شده و اعداد منفی که در محور افقی مقاطع و شبه‌مقاطع دیده می‌شوند نشان‌دهنده جهت برداشت است.

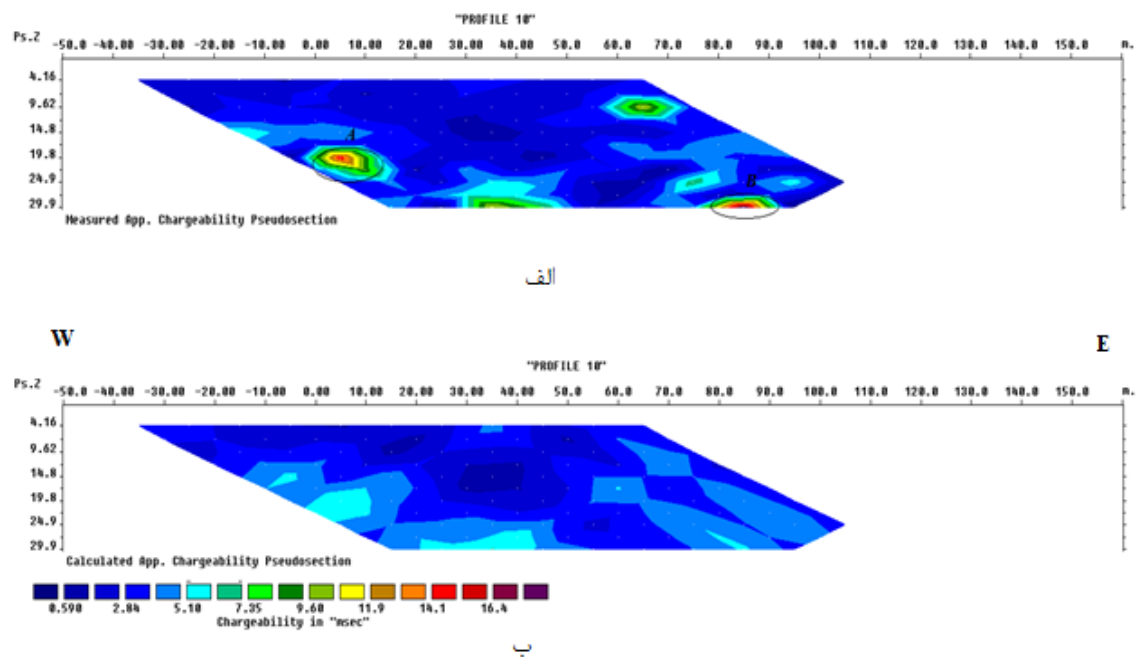
۴-۷-۱- تفسیر کیفی شبه‌مقاطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD10N

شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷، به ترتیب شبه‌مقاطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP برای پروفیل DD10N را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۴-۶ مشاهده می‌شود، یک زون با مقاومت‌ویژه بالا (نسبت به مقدار زمینه) نزدیک به سطح زمین در مرکز شبه‌مقطع دیده می‌شود. همچنین یک زون با مقاومت‌ویژه بالا با راستای شمال غرب- جنوب شرق در سمت چپ شبه‌مقطع دیده می‌شود؛ که تا عمق ۳۰ متری ادامه دارد. شکل ۴-۷ شبه‌مقاطع داده‌های خام IP را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات شارژپذیری در سطح دیده نمی‌شود و با افزایش عمق چند محدوده شارژپذیری بالایی از خود نشان می‌دهند؛ که این نشان‌دهنده این است که در سطح احتمال کانی‌سازی وجود ندارد. اما با توجه به بالا بودن بارپذیری در اعماق، احتمال کانی‌سازی در اعماق بیشتر است. لازم به ذکر است که منظور از بالا بودن بارپذیری در اعماق، بالاتر بودن بارپذیری نسبت به زمینه است. دو بی‌هنجاری A و B در شکل ۴-۷ با IP بالا در فواصل ۱۰ متری و ۸۰ متری از مرکز پروفیل و در عمق‌های حدودی ۲۵ متری و ۳۰ متری مشاهده می‌شود؛ که بر مقادیر با مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین از شبه‌مقطع مقاومت‌ویژه منطبق هستند. این زون‌ها محتمل‌ترین زون‌های کانی‌سازی بر اساس شبه‌مقطع بدست آمده از پروفیل DD10N می‌باشند. امتداد بی‌هنجاری B احتمالاً در اعماق بیشتر قابل مشاهده است. با مقایسه شبه‌مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و شبه‌مقاطع داده‌های محاسبه‌شده (پاسخ مدل) در شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ می‌توان گفت که مدل‌سازی برای مقاطع مقاومت‌ویژه و IP تقریباً قابل قبول است. البته این نتیجه‌گیری، نتیجه‌گیری نهایی نیست؛ زیرا با توجه به شبه‌مقاطع داده‌های خام به‌دست آمده است. نتیجه‌گیری نهایی با توجه به تفسیر مقاطع حاصل از مدل‌سازی وارون به دست می‌آید.



شکل ۴-۶: شبه‌مقطع مقاومت ویژه: الف) داده‌های مشاهده‌ای، ب) داده‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار

RES2DINV، پروفیل DD10N

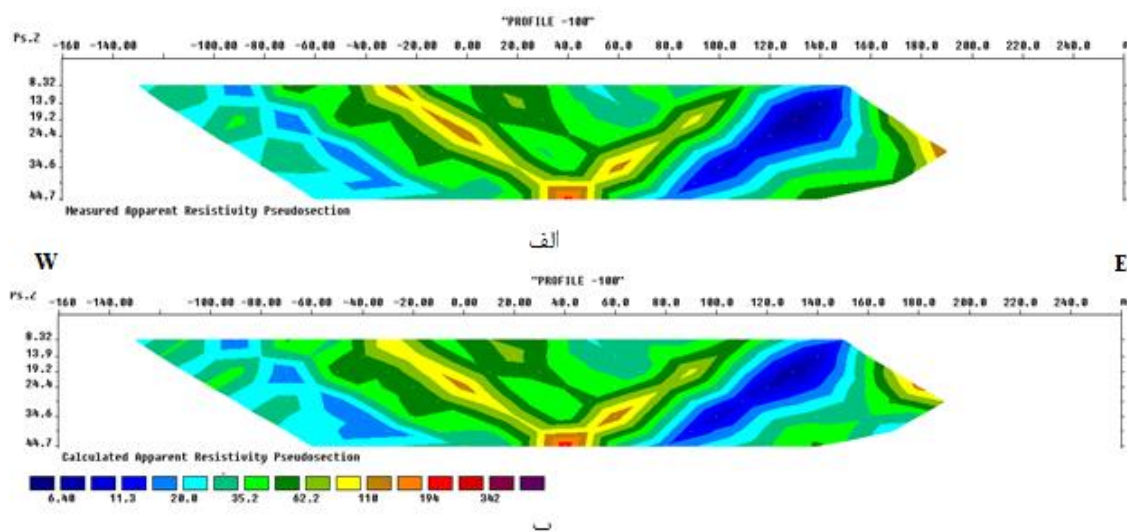


شکل ۴-۷: شبه‌مقاطع IP: الف) داده‌های مشاهده‌ای، ب) داده‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار Res2DINV، پروفیل

DD10N

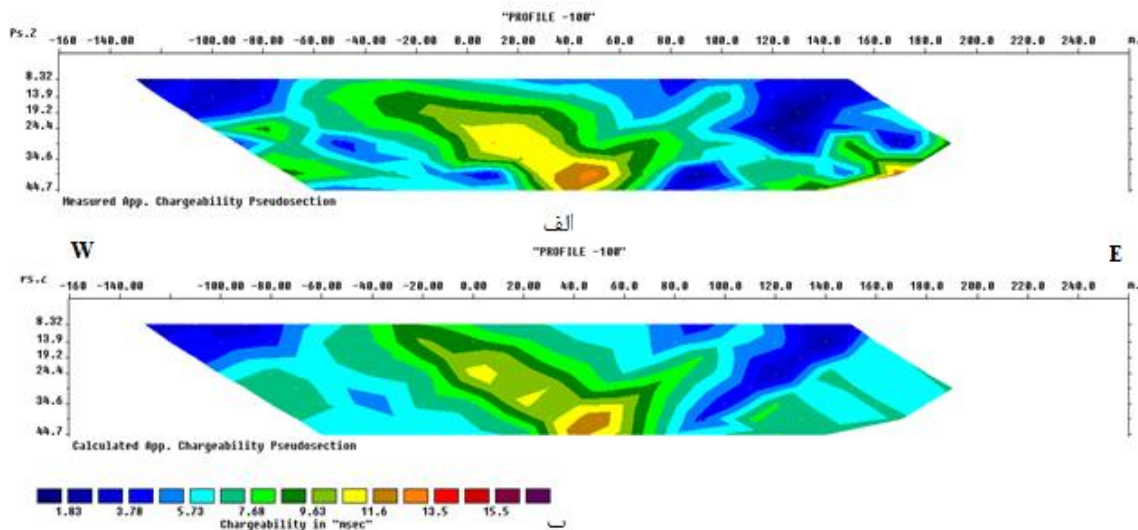
۴-۷-۲- تفسیر کیفی شبه‌مقطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD100S

شبه‌مقطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD100S به ترتیب در شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود، یک زون با مقاومت‌ویژه بالا با فاصله ۲۰ متری از مرکز پروفیل به سمت غرب، با امتداد شمال غرب- جنوب شرق تا عمق ۴۵ متری دیده می‌شود. همچنین یک زون دیگر با امتداد شمال شرق- جنوب غرب در فاصله ۱۰۰ متری از مرکز پروفیل وجود دارد که در عمق ۴۵ متری این دو زون یکدیگر را قطع می‌کنند. در شبه‌مقطع بارپذیری همان‌طور که مشاهده می‌شود یک زون با بارپذیری بالا در مرکز پروفیل با عمق ۱۹ تا ۳۵ متری دیده می‌شود که بر ناحیه با مقاومت‌ویژه بالا در شبه‌مقطع مقاومت‌ویژه منطبق است و می‌تواند نشان‌دهنده کانی‌سازی در این منطقه باشد. همچنین در فاصله ۸۰ متری از مرکز به سمت غرب نیز یک زون با بارپذیری نسبتاً بالا در عمق ۲۴ تا ۳۷ متری دیده می‌شود که آن‌هم بر ناحیه با مقاومت‌ویژه پایین در شبه‌مقطع مقاومت‌ویژه منطبق است. در زون اول به دلیل بالا بودن مقادیر مقاومت‌ویژه احتمال کانی‌سازی از نوع پراکنده بیشتر است. به‌طور کلی در این دو زون احتمال کانی‌سازی مس وجود دارد.



شکل ۴-۸: شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه: الف) داده‌های مشاهده ای، ب) داده‌های محاسبه شده توسط نرم افزار

DD100S، پروفیل، Res2DINV

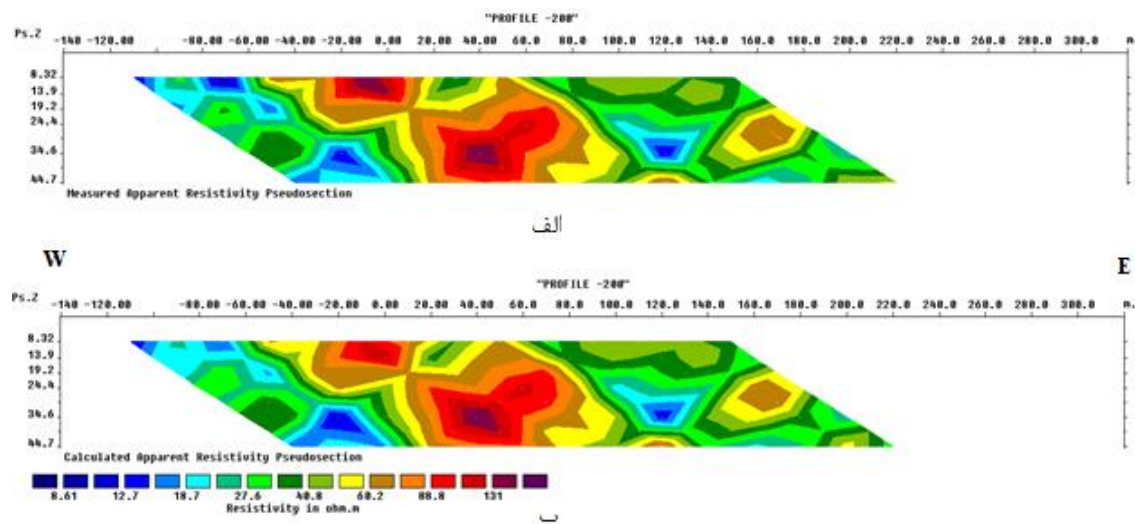


شکل ۴-۹: شبه‌مقاطع IP (الف) داده‌های مشاهده‌ای، (ب) داده‌های محاسبه شده توسط نرم افزار Res2DINV، پروفیل

DD100S

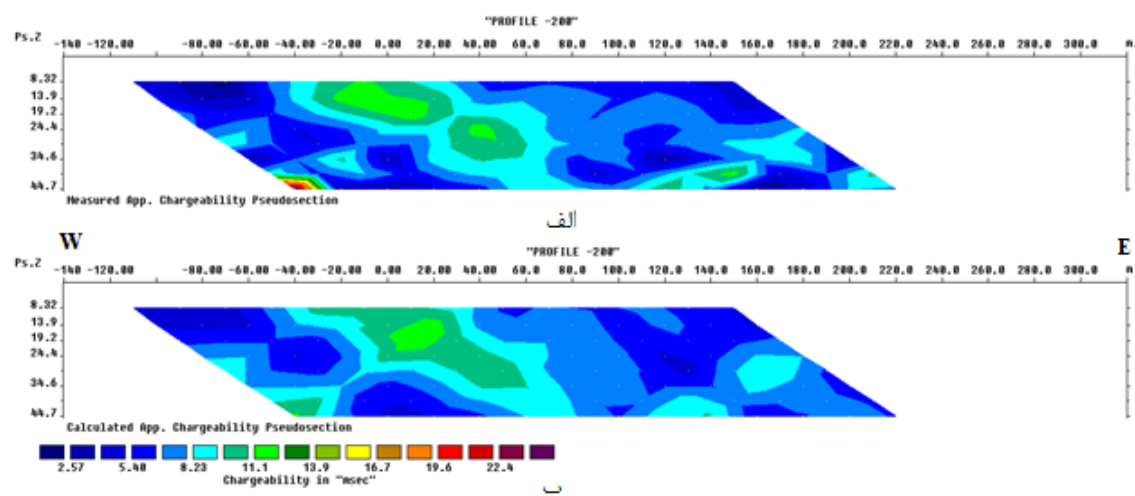
۴-۷-۳- تفسیر کیفی شبه‌مقاطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD200S

شکل ۴-۱۰ و شکل ۴-۱۱، به ترتیب شبه‌مقطع داده‌های خام مقاومت‌ویژه و IP برای پروفیل DD200S را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، یک زون با مقاومت‌ویژه بالا با گسترش ۳۰ متری تا مرکز پروفیل از سمت غرب دیده می‌شود که دارای امتداد شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد و تا عمق ۴۵ متری ادامه دارد؛ که با افزایش عمق گسترش این زون افزایش می‌یابد. با نگاهی به شبه‌مقطع بارپذیری، یک زون با بارپذیری بالا در فاصله ۲۰ متری از مرکز پروفیل در سمت غرب با امتداد شمال غرب- جنوب شرق دیده می‌شود که تا عمق ۴۰ متری ادامه پیدا کرده است. با انطباق شبه‌مقطع بارپذیری و شبه‌مقطع مقاومت‌ویژه دیده می‌شود که زون بارپذیر منطبق بر زون با مقاومت‌ویژه بالا است که می‌تواند نشان‌دهنده کانی‌سازی پراکنده در این زون باشد.



شکل ۴-۱۰: شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه: الف) داده‌های مشاهده‌ای، ب) داده‌های محاسبه شده توسط نرم افزار

Res2DINV، پروفیل DD200S



شکل ۴-۱۱: شبه‌مقاطع IP: الف) داده‌های مشاهده‌ای، ب) داده‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار Res2DINV.

پروفیل DD200S

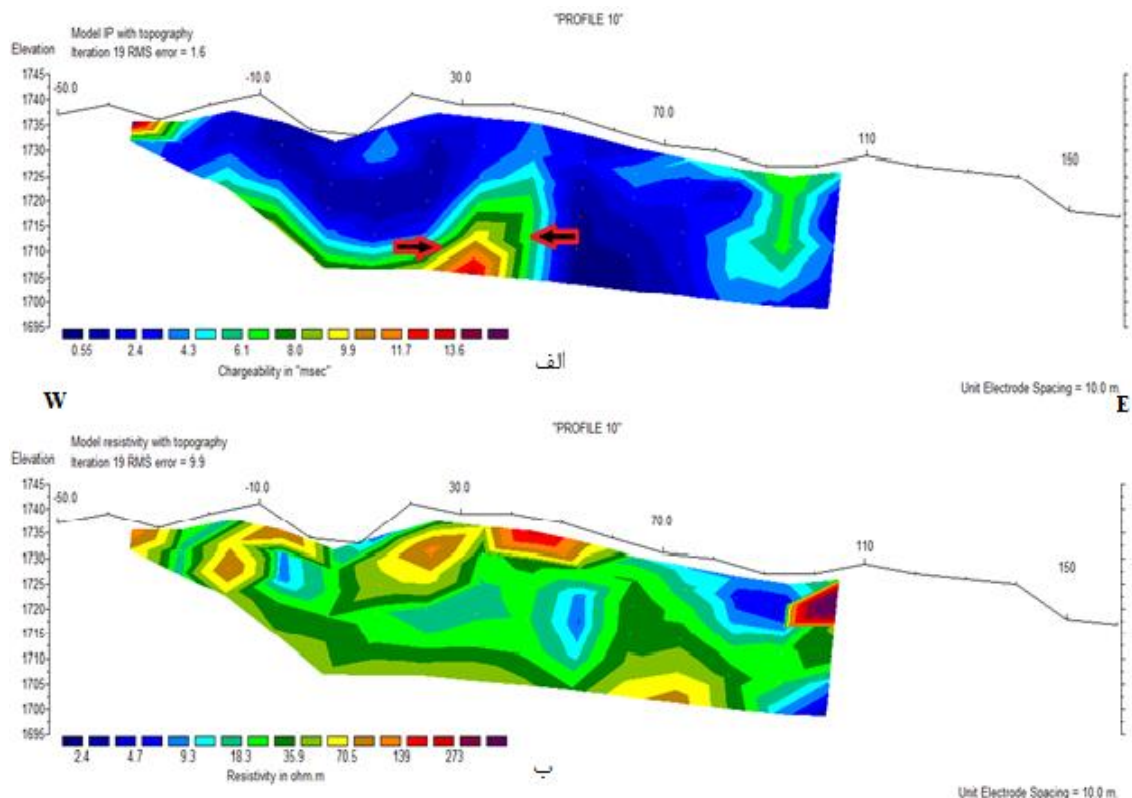
۴-۸- مدل سازی وارون دوبعدی و تفسیر کمی مقاطع حاصل از مدل سازی

در این تحقیق، برای تعیین دقیق‌تر محل زون‌های کان‌سازی شده احتمالی و تعیین هندسه و ابعاد آن‌ها در هریک از پروفیل‌ها، مدل‌سازی وارون هموار با استفاده از نرم‌افزارهای RES2DINV و ZondRes2D صورت گرفته است. در نرم‌افزار RES2DINV، مدل‌سازی وارون با روش اجزاء محدود و تفاضل محدود برای تعداد بسیاری از داده‌های صحرایی قابل انجام است. امکان تصحیح توپوگرافی بر روی

شبکه نیز مقدور می‌باشد. مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به‌طور هم‌زمان با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV انجام شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی برای هریک از سری داده‌های مقاومت‌ویژه و IP برای هر پروفیل به‌صورت جداگانه ارائه شده و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و معدنی، تفسیرهای لازم ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که در همه مقاطع، محورهای افقی و قائم برحسب متر می‌باشند. در پایان با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از مدل‌ها، به ارزیابی نتایج مدل‌سازی پرداخته می‌شود.

۴-۸-۱- مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD10N

نتایج مدل‌سازی هموار صورت گرفته توسط نرم‌افزار RES2DINV برای داده‌های مقاومت‌ویژه و IP در شکل ۴-۱۲ (الف و ب) آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای RMS ناشی از مدل‌سازی وارون هموار برای داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD10N به ترتیب ۹/۹ درصد و ۱/۶ درصد در تکرار نوزدهم است. در مقطع IP مشابه شبه‌مقطع IP، بارپذیری در سطح مقادیر پایینی از خود نشان می‌دهد؛ که با توجه به بالا بودن تقریبی مقادیر مقاومت‌ویژه می‌تواند در ارتباط با رسوبات آهکی موجود در منطقه باشد. نتایج مدل‌سازی مقطع بارپذیری یک بی‌هنجاری با بارپذیری بالا (در حدود ۱۳ میلی‌ثانیه) نشان می‌دهد؛ که در شکل ۴-۱۲ (الف) مشخص شده است. این بی‌هنجاری گسترده‌گی افقی قابل‌توجهی دارد؛ که در فاصله ۴۰ متری از مرکز و عمق ۳۰ متری قرار دارد و با مقادیر مقاومت‌ویژه پایین (در حدود ۴۰ اهم‌متر) در مقطع مقاومت‌ویژه منطبق می‌باشد. این بی‌هنجاری از نظر شکل و ابعاد توسط نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه مورد تأیید قرار می‌گیرد و می‌تواند مربوط به کانی‌سازی مس در منطقه می‌باشد.

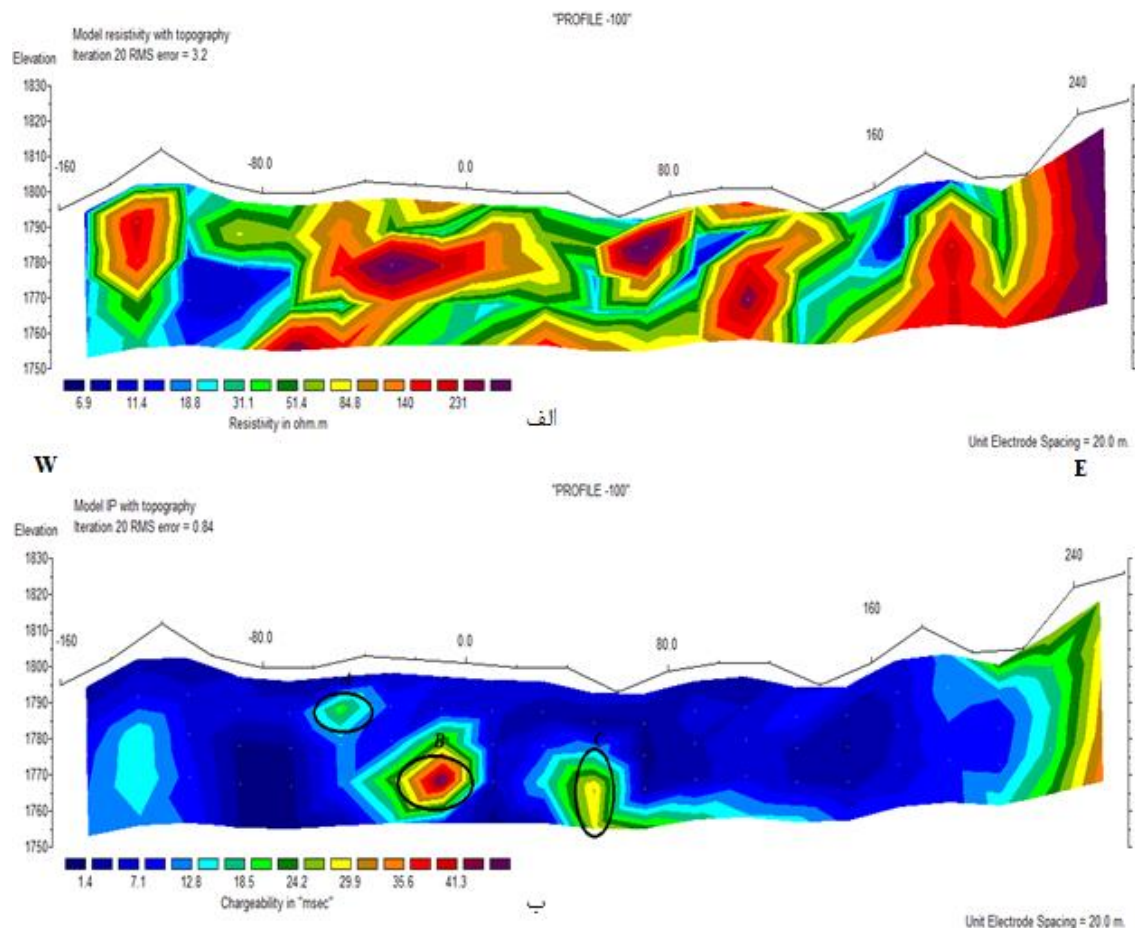


شکل ۴-۱۲: مقاطع حاصل از مدل سازی وارون: مدل بارپذیری، ب) مدل مقاومت ویژه، برای پروفیل DD10N

۴-۸-۲- مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل DD100S

شکل ۴-۱۳، مقاطع حاصل از مدل سازی وارون هموار توسط نرم افزار RES2DINV، به ترتیب برای داده های مقاومت ویژه و IP را نشان می دهد. خطای RMS ناشی از مدل سازی وارون برای داده های مقاومت ویژه و IP به ترتیب ۳/۲ درصد و ۰/۸۴ درصد است؛ که این مقدار خطا پایین و در نتیجه قابل قبول تلقی می شود. ذکر این نکته ضروری است که یکی از دلایل پایین بودن تقریبی مقادیر RMS می تواند نزدیک بودن مقادیر بارپذیری و همچنین مقادیر مقاومت ویژه اندازه گیری شده در طول پروفیل موردنظر باشد؛ که در سه پروفیل این احتمال وجود دارد. نتایج مدل سازی داده های مقاومت ویژه نشان دهنده ۳ توده با مقاومت ویژه بالا در مرکز و فواصل ۸۰ و ۱۰۰ متری از مرکز پروفیل می باشد. به طور کلی مقاومت ویژه در این پروفیل نسبت به پروفیل DD10N بیشتر می باشد؛ که می تواند به دلیل وجود سنگ ها و رسوبات آهکی در محل این پروفیل باشد. نتایج مدل سازی داده های IP مقادیر بارپذیری پایینی را در سطح نشان می دهد؛ که تأییدی بر وجود سنگ های آهکی در بخش های سطحی می باشد. در مقطع حاصل از مدل سازی وارون

داده‌های IP سه بی‌هنجاری با IP بالا مشاهده می‌شود. مقدار بارپذیری در بی‌هنجاری اول (A) که در شکل ۱۳-۴(ب) مشخص شده است در حدود ۲۰ میلی‌ثانیه می‌باشد؛ که در عمق تقریبی ۳۰ متر قرار دارد و در فاصله ۴۰ تا ۶۰ متری از مرکز پروفیل به سمت غرب قرار گرفته است. از آنجایی که این زون با مقادیر مقاومت‌ویژه متوسط (۱۰۰ تا ۱۴۰ اهم‌متر) در مقطع مقاومت‌ویژه انطباق دارد، احتمال کانی‌سازی مس در آن کم بوده و در صورت وجود از نوع پراکنده می‌باشد. بی‌هنجاری دوم در فاصله کمی از بی‌هنجاری اول (از مرکز تا ۴۰ متری ابتدای پروفیل به سمت غرب) در عمق ۴۰ متری قرار دارد. این بی‌هنجاری (B) که در مقطع بارپذیری مشخص شده است، به طور متوسط بارپذیری در حدود ۳۵ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد که بر نواحی با مقاومت‌ویژه پایین تا متوسط از مقطع مقاومت‌ویژه انطباق دارد؛ که احتمال کانی‌سازی در این زون را بالاتر از زون قبل می‌برد. همچنین یک بی‌هنجاری در فاصله ۴۰ تا ۶۰ متری از مرکز پروفیل به سمت شرق در عمق ۴۰ متری نیز دیده می‌شود؛ که بر نواحی با مقاومت‌ویژه پایین در مقطع مقاومت‌ویژه انطباق دارد و می‌تواند نشان‌دهنده کانی‌سازی مس در آن زون باشد.

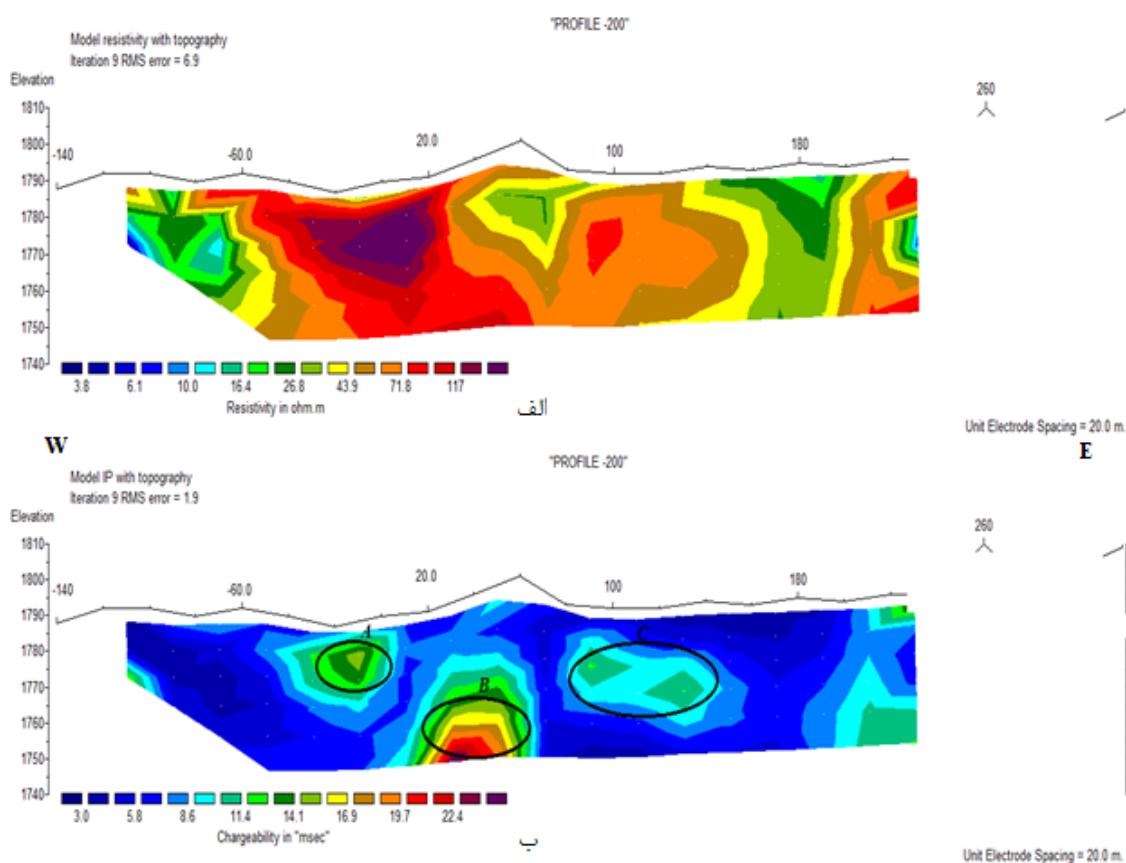


شکل ۴-۱۳: مقاطع حاصل از وارون سازی: الف) مدل مقاومت‌ویژه، ب) مدل بارپذیری، پروفیل DD100S

۴-۸-۳- مدل سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP پروفیل DD200S

شکل ۴-۱۴، مقاطع حاصل از مدل‌سازی هموار با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV به ترتیب برای داده‌های مقاومت‌ویژه و IP را نشان می‌دهد. همان‌طور که از مقاطع به‌دست‌آمده برای داده‌های مقاومت‌ویژه و IP قابل‌مشاهده است خطای RMS ناشی از مدل‌سازی وارون برای داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به ترتیب ۶/۹ درصد و ۱/۹ درصد می‌باشد که این مقدار خطا پایین و در نتیجه قابل قبول تلقی می‌شود. نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه دو زون با مقاومت‌ویژه بالا و متوسط را نشان می‌دهد؛ که یکی در فاصله ۶۰- (منفی نشان‌دهنده جهت است) تا ۲۰ متری از مرکز پروفیل و گسترشی در امتداد شمال غرب- جنوب شرق تا عمق ۵۰ متری می‌باشد و دیگری در فاصله ۹۰ تا ۱۱۰ متری از مرکز پروفیل و عمق ۲۰ متری قرار دارد. مدل‌سازی داده‌های IP سه بی‌هنجاری را نشان می‌دهند؛ که در مقطع IP مشخص‌شده‌اند.

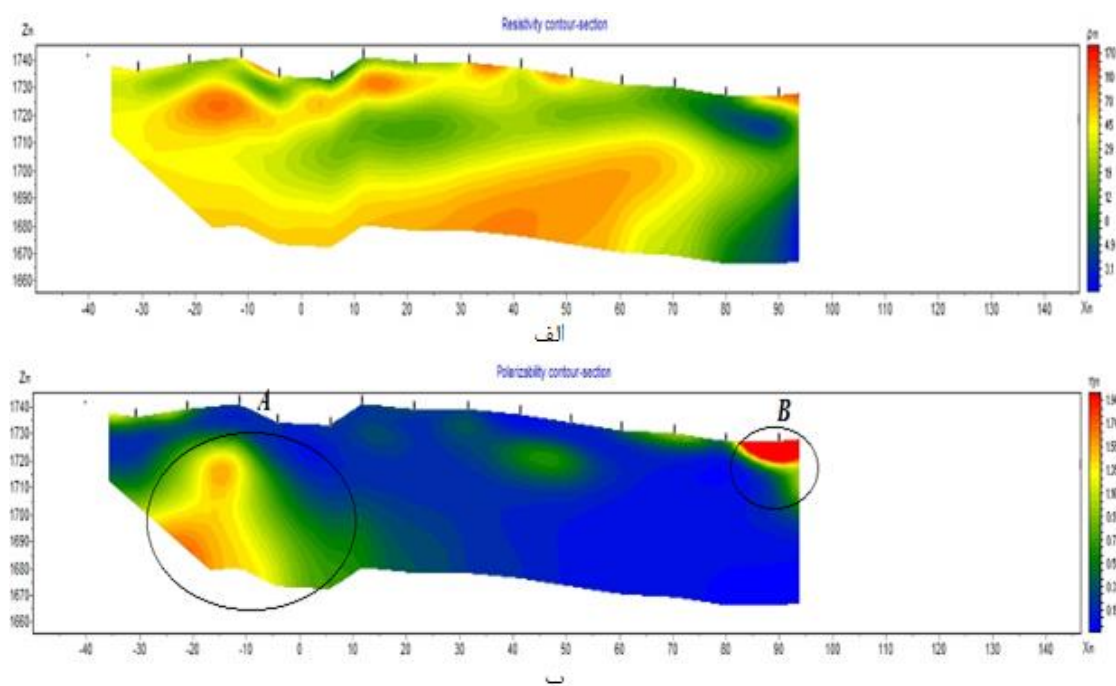
بی‌هنجاری اول در مرکز پروفیل و عمق ۱۵ متری قرار دارد که بارپذیری در حدود ۱۴ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد که بر مقادیر بالای مقاومت‌ویژه منطبق است و می‌تواند نشان‌دهنده کانی‌سازی پراکنده یا افشان در این زون باشد. بی‌هنجاری دوم که در فاصله ۲۰ تا ۴۰ متری از مرکز پروفیل و در عمق ۴۰ متری واقع شده است دارای بارپذیری در حدود ۲۰ میلی‌ثانیه بوده و بر مقادیر متوسط مقاومت‌ویژه (۷۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر) منطبق می‌باشد که احتمال وجود کانی‌سازی در این زون بیشتر از زون قبل می‌باشد. بی‌هنجاری سوم نیز مانند بی‌هنجاری دوم همین شرایط را داراست. با این تفاوت که گسترش افقی آن از دو بی‌هنجاری قبل بیشتر است (حدود ۶۰ متر). این زون منطبق بر یک زون شکستگی می‌باشد و می‌تواند دارای گسترش عمقی تا ۵۰ متر نیز باشد. با مقایسه مقطع بارپذیری DD100S با مقطع بارپذیری DD200S می‌توان روند منظمی در بی‌هنجاری‌ها دید، همان‌طور که مشاهده می‌شود بی‌هنجاری (A) در مقطع بارپذیری DD200S با بی‌هنجاری (B) در مقطع بارپذیری DD100S تقریباً در فاصله افقی و قائم یکسانی قرار دارند و شکل مشابهی از خود نشان می‌دهند؛ که می‌تواند نشان‌دهنده یک‌روند کانی‌سازی در محدوده اکتشافی باشد.



شکل ۴-۱۴: مقاطع حاصل از وارون سازی: الف) مدل مقاومت‌ویژه، ب) مدل بارپذیری، پروفیل DD200S

۴-۸-۴- مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل DD10N با نرم افزار ZondRes2D

شکل ۴-۱۵، مقاطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP توسط نرم افزار ZondRes2D را نشان می دهد. مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه به طور کلی مقادیر متوسط رو به بالای مقاومت ویژه را همانند مدل به دست آمده از نرم افزار RES2DINV نشان می دهد. مقطع حاصل از مدل سازی داده های IP دو زون بی هنجاری را نشان می دهد که روی مقطع مشخص شده اند. زون (A) که در سمت چپ مقطع مشخص شده است مقادیر بارپذیری بالایی را در عمق نشان می دهد؛ که بر مقادیر مقاومت ویژه متوسط تا بالا منطبق است و می تواند نشان دهنده کانی سازی افشان یا پراکنده باشد. زون (A) در مقطع به دست آمده توسط نرم افزار ZondRes2D تقریباً با زون به دست آمده توسط نرم افزار RES2DINV منطبق است؛ که باعث افزایش احتمال وجود کانی سازی در این زون می شود. همچنین بی هنجاری دیگر با IP بالا که در گوشه بالا منتهی الیه سمت راست مشاهده می شود که مربوط به رخنمون مس می باشد.



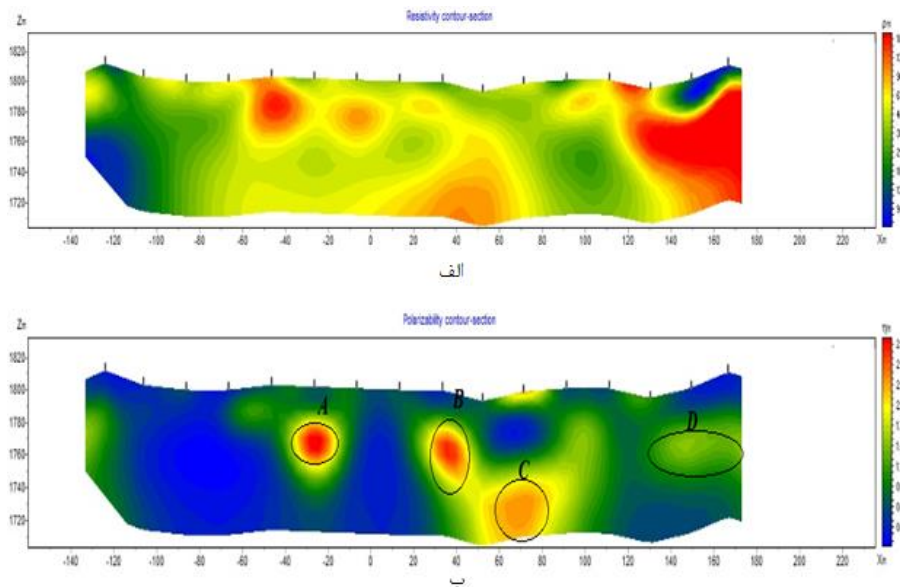
شکل ۴-۱۵: مقاطع حاصل از وارون سازی: الف: مدل مقاومت ویژه، ب: مدل بارپذیری، پروفیل DD10N، توسط نرم-

افزار ZondRes2D

۴-۸-۵- مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل DD100S با نرم افزار

ZondRes2D

شکل ۴-۱۶، مقاطع حاصل از مدل سازی وارون با استفاده از نرم افزار ZondRes2D برای داده های مقاومت ویژه و IP را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود مقادیر مقاومت ویژه در طول مقطع به دست آمده به طور کلی مقادیر متوسط می باشند و در چند زون مقادیر بالایی را نمایش می دهند؛ که با مقطع به دست آمده از نرم افزار RES2DINV منطبق است. مقطع حاصل از مدل سازی داده های IP چهار زون بی هنجار را نشان می دهند؛ که در مقطع بارپذیری مشخص شده اند. بی هنجاری های A، B و C در مقطع مدل سازی شده توسط نرم افزار RES2DINV نیز مشاهده شدند که بر مقادیر کم تا متوسط مقاومت ویژه در مقطع مقاومت ویژه منطبق هستند و احتمال وجود کانی سازی در زون A و B زیاد است. همچنین در مقطع به دست آمده توسط نرم افزار ZondRes2D، یک زون بی هنجار دیگر (D) در انتهای مقطع (سمت راست) مشاهده می شود؛ که در مقطع به دست آمده از نرم افزار RES2DINV مشخص نشده بود. این زون در مقطع حاصل از مدل سازی توسط نرم افزار ZondRes2D دارای بارپذیری در حدود ۱۵ میلی ثانیه است؛ که با مقادیر بالای مقاومت ویژه در مقطع مقاومت ویژه انطباق دارد و می تواند نشان دهنده ی احتمالی کانی سازی افشان یا پراکنده در این زون باشد.



شکل ۴-۱۶: مقاطع حاصل از وارون سازی: الف: مدل مقاومت ویژه، ب) مدل بارپذیری، پروفیل DD100S توسط نرم-

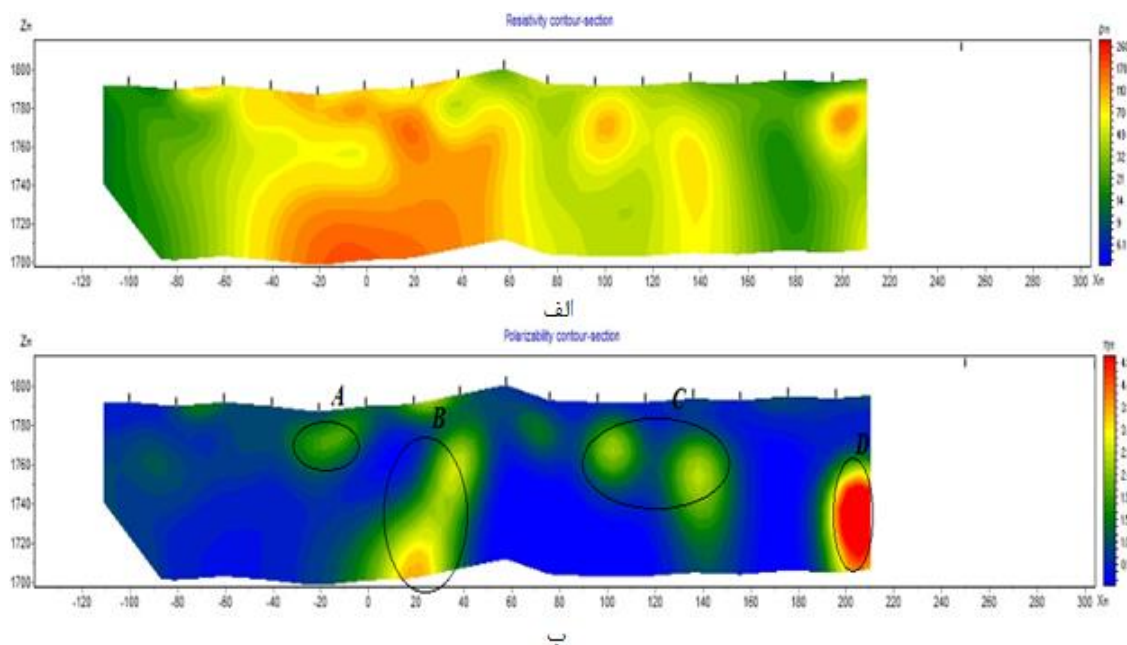
افزار ZondRes2D

۴-۸-۶- مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP پروفیل DD200S با نرم افزار

ZondRes2D

شکل ۴-۱۷، مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه و IP را توسط نرم افزار ZondRes2D نشان می دهد. در مقطع مقاومت ویژه به طور کلی مقادیر متوسط تا کم مقاومت ویژه را در سرتاسر مقطع نشان می دهد و یک زون با مقاومت ویژه بالا با امتداد شمال غرب- جنوب شرق که در مقطع حاصل از مدل سازی توسط نرم افزار RES2DINV نیز مشاهده شد. مقطع حاصل از داده های IP چهار زون بی هنجاری را نشان می دهند؛ که در مقطع مشخص شده اند. زون های A و B که در مقطع مدل سازی شده داده های IP توسط نرم افزار RES2DINV نیز مشاهده شدند. زون C نیز همان طور که در تفسیر مقطع حاصل از نرم افزار RES2DINV گفته شد، دارای بارپذیری بالا و منطبق بر مقادیر متوسط مقاومت ویژه در مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه می باشد و در مدل به دست آمده توسط نرم افزار ZondRes2D شکستگی ذکر شده، بهتر نمایان شده است. بی هنجاری چهارم (D) که در مدل به دست آمده از نرم افزار ZondRes2D نشان داده شده است؛ در مقطع حاصل از مدل سازی توسط نرم افزار RES2DINV به خوبی نشان داده نشده بود، در مقطع به دست آمده این زون دارای بارپذیری در حدود ۴۰ میلی ثانیه

می‌باشد؛ که در عمق ۶۰ متری واقع شده است. این زون بر مقادیر متوسط مقاومت‌ویژه در مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه منطبق است که می‌تواند نشان‌دهنده وجود کانی‌سازی مس در سنگ‌های آندزیتی باشد. به‌طور کلی احتمال کانی‌سازی در زون C از زون‌های دیگر این مقطع بیشتر بوده و اهمیت بیشتری دارد.



شکل ۴-۱۷: مقاطع حاصل از وارون‌سازی: الف: مدل مقاومت‌ویژه، ب: مدل بارپذیری، پروفیل DD200S توسط نرم

افزار ZondRes2D

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت‌ویژه و IP به‌منظور پتانسیل‌یابی کانسارهای مس در منطقه خرانق یزد توسط شرکت مهندسی امید انجام گرفته است. مدل‌سازی وارون داده‌های صحرایی برداشت‌شده با آرایش دوقطبی-دوقطبی توسط نرم‌افزار RES2DINV انجام شد و مقاطع حاصل به‌منظور تخمین گسترش کانی‌سازی فلزی تفسیر شدند. به‌منظور تجزیه و تحلیل مقاطع حاصل از مدل‌سازی تا حد امکان از اطلاعات زمین‌شناسی که در دیگر مراحل اکتشاف انجام‌شده و نتایج آن که تا حدودی موجود است، استفاده شده است. در ادامه به‌منظور پی‌بردن و اطمینان از دقت مدل‌های به‌دست آمده توسط نرم‌افزار RES2DINV، داده‌های مقاومت‌ویژه و IP توسط نرم‌افزار ZondRes2D نیز مدل‌سازی شد و نتایج به‌دست آمده با نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار RES2DINV مقایسه شد؛ که تا حد مطلوبی مدل‌ها یکدیگر را تایید می‌کردند. نتایج حاصل به‌منظور انجام مناسب‌تر و دقیق‌تر مراحل بعدی اکتشاف، در ادامه ارائه می‌گردند.

شبه‌مقطع حاصل از داده‌های مشاهده‌ای تحت تأثیر عواملی مانند وجود نوفه، بی‌هنجاری‌های کاذب، آرایش‌های الکتروودی مختلف، خطای اپراتور و خطای ناشی از دستگاه قرار دارند؛ که به‌هیچ‌وجه نمی‌توانند تصویر دقیقی از زیر سطح زمین ارائه دهند. این عوامل تأثیری بر روی شبه‌مقطع می‌گذارند که تفسیر مستقیم و بدون محاسبات پیچیده ریاضی (روش‌های وارون‌سازی) را غیرممکن می‌سازند. بنابراین راهی جز اعمال الگوریتم‌های مختلف برای حذف بخشی یا تمامی این اثرات ناخواسته بر روی داده‌ها نیست؛ که این امر لزوم مدل‌سازی وارون داده‌های صحرایی را نشان می‌دهد.

با توجه به شواهد زمین‌شناسی، بررسی‌های صحرایی مانند محل رخنمون کانی‌سازی و نتایج به‌دست آمده از مقاطع حاصل از مدل‌سازی، منطقه مورد مطالعه از نظر کانی‌سازی فعال بوده و در این منطقه بی‌هنجاری‌هایی مشاهده می‌شوند؛ که نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشند.

در مقاطع IP، مانند مقاطع به‌دست آمده برای پروفیل‌های DD200S و DD100S، احتمالاً بارپذیری بالا با کانی‌سازی مس همراه است. در مناطق با بارپذیری نه‌چندان بالا، بازهم می‌توان انتظار کانی‌سازی

مس را داشت؛ که با تطابق و ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی می‌توان به وجود کانی‌سازی مس در منطقه مورد مطالعه پی برد.

با توجه به اینکه بعضی از بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در مقاطع مدل‌سازی، روند منظمی در بعضی مقاطع دارند؛ مانند بی‌هنجاری مشاهده شده در ابتدای پروفیل‌های DD100S و DD200S که تقریباً در فاصله افقی و قائم یکسانی قرار دارند و شکل مشابهی از خود نشان می‌دهند؛ بنابراین به نظر می‌رسد از نوع واقعی باشند، نه نوع کاذب یا حاصل از نوفه. ضمن این‌که بعضی نوفه‌های ساخته دست بشر، مانند کابل‌های فشارقوی در منطقه حضور ندارند.

۵-۲- پیشنهادات

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

۱- پیشنهاد می‌گردد برای دستیابی به اطلاعات کامل‌تر و دقیق‌تر از منطقه مورد مطالعه، از روش‌های تکمیلی دیگر مانند روش SIP در کارهای آتی استفاده شود. این روش قابلیت تفکیک کانی‌های رسی و پیریت از سایر کانی‌های سولفیدی را دارد. بنابراین با استفاده از روش SIP می‌توان کانی‌های رسی و پیریت را از کانی‌های هدف در این تحقیق مانند مالاکیت، آزوریت و ... تمیز داد. از آنجایی که این تمایز با استفاده از روش‌های به کار رفته در این تحقیق امکان‌پذیر نیست و نیز احتمال وجود و همراهی پیریت با کانی‌های هدف وجود دارد و حتی حضور پیریت به تنهایی باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های کاذب می‌شود، بنابراین استفاده از روش SIP می‌تواند بسیار مفید واقع شود. نتایج تفسیر داده‌های SIP و مقاومت‌ویژه تخمین قابل قبولی از گسترش عمقی بی‌هنجاری‌ها به دست می‌دهد؛ که پارامتر بسیار مهمی در انتخاب نقاط حفاری است.

۲- برای تعیین گسترش زون کانی‌سازی مس در حد فاصل پروفیل‌های DD10N و DD200S لازم است برداشت داده‌ها در امتداد این پروفیل‌ها آن‌قدر ادامه یابد تا میزان گسترش جانبی بی‌هنجاری‌ها واقع در انتهای آن‌ها کاملاً مشخص گردد.

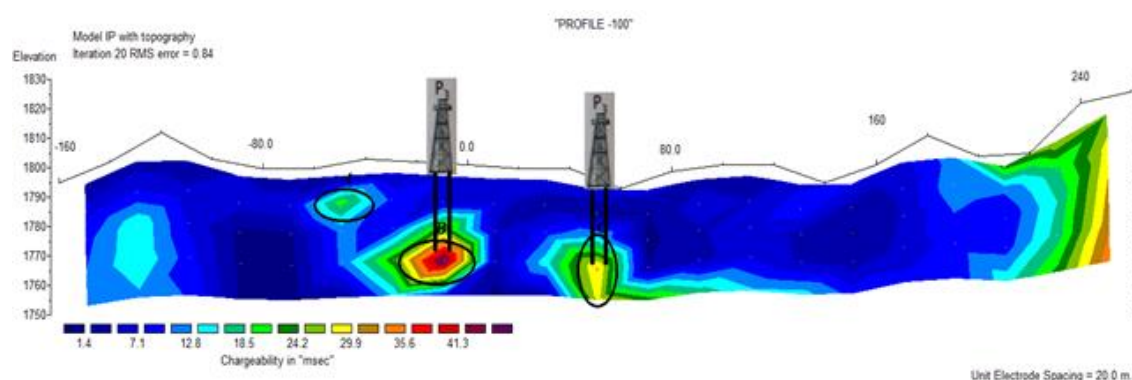
۳- برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و IP بر روی پروفیل‌های دیگری عمود بر پروفیل‌های برداشت شده

ادامه یابد. به گونه ای که محل تقاطع آن ها مکان بی هنجاری های به دست آمده در برداشت اولیه باشد. این کار به تعیین شکل بی هنجاری ها، بالاتر بردن دقت تفسیر و همچنین تخمین میزان و عیار تقریبی ذخیره معدنی کمک می کند. به عنوان مثال پیشنهاد می شود که در حد فاصل دو پروفیل DD100S و DD200S، پروفیلی عمود بر جهت گسترش این دو پروفیل در فاصله ۱۰۰ متری از ابتدای پروفیل، برداشت شود.

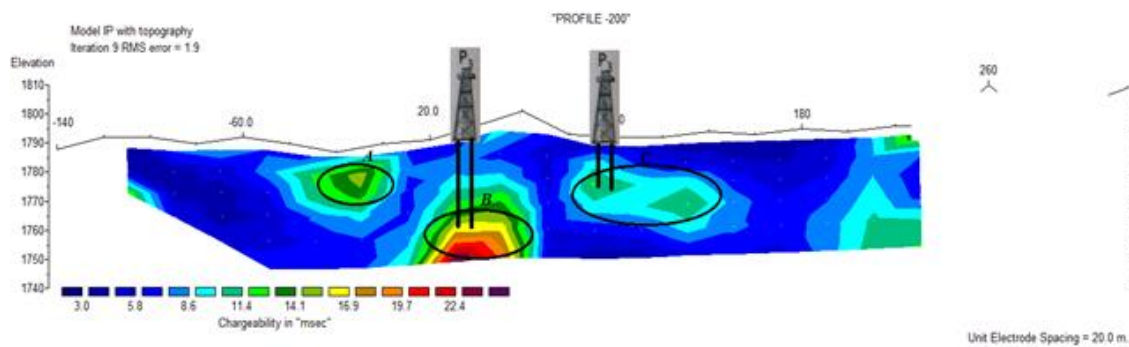
۴- پیشنهاد می شود از تلفیق داده های ژئوفیزیک و ژئوشیمی در محیط GIS در مقیاس ناحیه ای و محلی استفاده شود. تلفیق نتایج مدل ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی به همراه دگرسانی ها می تواند مختصات بهینه را برای اجرای عملیات حفاری مشخص نماید.

۵- با توجه به نتایج به دست آمده از تفسیر مقاطع ژئوفیزیکی، اطلاعات زمین شناسی و بررسی های صحرایی، چند محل برای حفاری اکتشافی پیشنهاد شد که دارای مشخصاتی به شرح زیر می باشند:

بر روی پروفیل DD100S دو نقطه در فواصل ۱۰- و ۶۰ متری از مرکز پروفیل با عمق های ۳۰ و ۳۵ متر و در پروفیل DD200S دو نقطه در فواصل ۸۰ و ۱۰۰ متری از مرکز پروفیل با عمق های ۳۰ و ۲۰ متر انتخاب شدند که در شکل ۵-۱ و شکل ۵-۲ مشخص شده اند.



شکل ۵-۱: نقاط حفاری پیشنهادی روی پروفیل DD100S



شکل ۵-۲: نقاط حفاری پیشنهادی روی پروفیل DD200S

پیوست

پیوست الف: نرم افزار RES2DINV (Ver3.52)

RES2DINV یک برنامه کامپیوتری است که به صورت خودکار برای زیر سطح زمین از داده های به دست آمده از برداشت های الکتریکی، مدل مقاوم ویژه دوبعدی تولید می کند. از آنجاکه این برنامه تحت ویندوز است، کارت های گرافیکی سازگار با تمام ویندوزها و چاپگرها به صورت خودکار از این برنامه حمایت می کنند. این برنامه آرایش های ونر، شلومبرژه، قطبی-قطبی، دوقطبی، دوقطبی-دوقطبی خطی و استوایی را می شناسد (امکان تعریف آرایش های غیرمرسوم نیز وجود دارد). مدل دوبعدی استفاده شده توسط این برنامه، زیر سطح زمین را به تعدادی بلوک مستطیلی شکل تقسیم می کند. هدف این برنامه تعیین مقاومت ویژه بلوک های مستطیلی شکل است که در نهایت مقاومت ویژه ظاهری ایجاد می کند که موافق با اندازه گیری واقعی است. برای آرایش های ونر و شلومبرژه، ضخامت لایه اول بلوک ها ۰.۵ برابر فاصله الکترودی است. برای آرایش های قطبی-قطبی، دوقطبی و دوقطبی این ضخامت به ترتیب ۰.۳، ۰.۶ و ۰.۹ فواصل الکترودی است. ضخامت لایه های عمیق تر عموماً ۱۰٪ افزایش می یابد. کاربر همچنین می تواند عمق لایه ها را به صورت دستی تغییر دهد. تعداد و چینش واحدهای مستطیلی مطابق توزیع داده های صحرائی است. این برنامه با تنظیم و تغییر مقاومت ویژه بلوک های مدل، اساساً سعی می کند اختلاف بین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده و اندازه گیری شده را کاهش دهد. اندازه گیری این اختلاف به وسیله خطای جذر متوسط مربعات (RMS) ارائه می شود. با وجود این، مدلی با کمترین خطای RMS که گاه تغییرات غیرواقعی و بزرگتری را در مقادیر مقاومت ویژه مدل نشان دهد، همیشه الزاماً بهترین مدل از منظر زمین شناسی نیست. در حلت کلی بهترین روش انتخاب مدل، انتخاب در تکرارهایی است که خطای RMS به طور قابل توجهی تغییر نمی کند. این حالت معمولاً بین تکرارهای ۳ تا ۵ اتفاق می افتد.

مدل سازی پیشرو با روش اجزاء محدود یا تفاضل محدود برای تعداد بسیار بالای الکترودها (۱۶۰۰۰) و داده های صحرائی (۲۱۰۰۰) قابل انجام است. برداشت های چاه پیمایی و دریایی نیز قابل تفسیر می باشند. روش های تسریع محاسبات نظیر محاسبه تقریبی ژاکوبین مرحله اول و شبه نیوتن در مراحل

بعدی قابل انتخاب است. انتخاب عامل میرایی و بعضی راهکارهای جانبی دیگر که به سرعت بیشتر می انجامد نیز پیش بینی شده است. نرم افزار مقاطع گوناگونی را تهیه و نمایش می دهد. علاوه بر مدل نهایی مقاطع حساسیت و عدم قطعیت واحدها قابل محاسبه هستند. امکان انتخاب معیار کمترین انحراف مطلق به جای معیار مرسوم کمترین مربعات وجود دارد.

همان طور که اشاره شد این معیار، مدل بسیار بهتری برای زمین هایی که با مرزهای تیز و تغییرات ناگهانی مقاومت ویژه سروکار داریم ارائه می نماید. از دیگر ویژگی های این نرم افزار امکان تغییر عرض واحدها به نصف فاصله الکترودی است؛ که بنا بر تجربیات، نتایج بهتری با نوسانات جعلی کمتر، مدل به دست می دهد. امکان استفاده از تمامی روش های تصحیحات توپوگرافی روی شبکه وجود دارد. همچنین با افزایش عامل میرایی برای نواحی خاص در مدل، می توان میزان تغییرات مقاومت ویژه را با توجه به اطلاعات دقیق قبلی از آن نقاط، تقریباً ثابت نگاه داشت. در مجموع، تکیه بیش از حد بر قید همواری در الگوریتم پیشنهادی و همچنین استفاده از شبکه مستطیلی، باعث شده تا مدل های نهایی در این نرم افزار اغلب بسیار کلی بوده و قادر به تفکیک بی هنجاری های نزدیک به هم و ارائه مرزهای آشکار آنها حتی با معیار کمترین انحراف مطلق نباشند.

منابع

- [۱] قربانی، منصور (۱۳۸۷)، "زمین شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه‌های معدنی ایران"، انتشارات آرین‌زمین.
- [۲] سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور (www.GSI.ir)
- [۳] کلاگری ع.ا. (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز.
- [۴] Keary, P., Brooks, M., and Hill, I. (2002). "An Introduction to Geophysical Exploration", 3rd edn, Blackwell.
- [۵] Mikhail, Z. S., (1994), "The geoelectrical methods in geophysical exploration", Elsevier, 9, pp 873.
- [۶] سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (www.mod.gov.ir)
- [۷] کریم پور، م، ملک زاده، آ.حیدریان، م. (۱۳۸۷)، "اکتشاف ذخایر معدنی"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۸] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., (1990). "Applied Geophysics". Cambridge University Press, pp 522-539.
- [۹] www.geomoto.com
- [۱۰] Reynolds, J. M., (1997), "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics", pp 418-459.
- [۱۱] Seigel, H. O., (1959), "Mathematical formulation and type curves for induced polarization", 24, 3, pp 543-565.
- [۱۲] Loke, M.H., (2004), "2-D and 3-D electrical imaging surveys".
- [۱۳] Dahlin, T., and Loke, M.H. (1998). Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. Journal of Applied Geophysics 38, 7-249.
- [۱۴] Sumner, J.S., (1976), "Principles of induced polarization for geophysical exploration", Elsevier, pp 277-303.
- [۱۵] یانگل، اس.اچ، ۱۹۹۶، "روش‌های الکتریکی در اکتشافات ژئوفیزیکی حوضه‌های رسوبی عمیق"، ترجمه مهدوی، ف، (۱۳۸۳)، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۱۶] حسن زاده، ح، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "مدل سازی توام داده های قطبش القایی و مقاومت ویژه"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود.
- [۱۷] میلسوم، ج. (۱۳۹۰)، "مبانی برداشت‌های ژئوفیزیک صحرایی"، ترجمه رمضی، ح، عزیززاده، ع، انتشارات دانشگاه تهران.

[۱۸] www.Yjc.ir

[۱۹] www.Google Earth.com

[۲۰] Ward, S. H., (1990), "Resistivity and Induced Polarization Method in Geotechnical and Environmental Geophysics", SEG, vol.1, pp. 147-189.

[۲۱] Hedlin, C. and Constable, S., (1990), "Occam's inversion to generate smooth: two dimensional models from magnetotelluric data", Geophysics, 55, 1613-1624.

[۲۲] Okan, T., (2002), "Interpretation of field observations in induced polarization", International Conference on earth Science and Electronic.

[۲۳] Loke, M.H. and Barker, R.D., (1995), "Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections" J. of Geophysics, 60, pp 1682-1690.

[۲۴] Loke, M. H., and John W. Lane Jr. "Inversion of data from electrical resistivity imaging surveys in water-covered areas", Exploration Geophysics 35. 266-271. 2004.

[۲۵] Sasaki, Y., (1992), "Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation", Geophysical Prospecting, 40, 453-464.

[۲۶] Loke, M.H. and Barker, R.D., (1996), "Practical techniques for 2d resistivity surveys and data inversion", Geophysical Prospecting, 44, 131-152.

[۲۷] Loke, M.H., and Dahlin, T., (2002), "A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton method in resistivity imaging inversion" J. of Applied Geophysics, 4, pp 149-162.

[۲۸] Zohdy, A.A.R., (1989). "A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves". Geophysics, 54, 245-253.

[۲۹] Smith, N. and Vozoff, K., (1984), "Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data", IEEE Trans. Geosc, 22, 21-28.

[۳۰] Dey, A., and Morrison, H.F. (1979). "Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures". Geophysical Prospecting 27, 106-136.

Abstract:

One of the most important steps in the exploration of mineral resources is the identification of target areas. induced polarization (IP) and resistivity methods are suitable for metal sulfide mineralization exploration. In this study, an exploration area has been used in 5 km north of East Kharanq near the village of Nafis Abad in Ardakan city province of Yazd. According to the evidence for copper sulfide mineralization in the area Kharanq, geophysical operations have done with IP and resistivity survey design with a rectangular arrangement that as a result, the potential areas of mineralization in the area is determined. In order to investigate potential areas in the map of three dipole-dipole profiles survey 10 and 20 meters electrode spacing, designed and implemented, so that the possible anomalies will check in depth. The data from the Dipole – Dipole profiles were interpreted in RES2DINV.

By comparing the results of the interpretation of the rectangular and Dipole - Dipole profiles, areas of sulphide minerals, and potential zones were identified in the area that include three masses with high chargeability DD100S and DD200S section and based on the results, four perfect place to drilling were introduced. two Drilling points on DD200S profiles with depths of 20 and 30 meters Depths and two drilling points on DD100S profile with depths of 30 and 40 meters is proposed.

Keywords: Modeling, profile grinding, copper exploration, resistivity, induced polarization, dipole-dipole array, kharanq, nafisabad, Yazd.



Shahrood University of Technology

Faculty of mining, Petroleum and Geophysics

**Two-dimensional modeling geoelectric data by resistivity and induced
polarization methods for detection copper range from Khranq Yazd**

Nader Motaei

Supervisor:

Dr. Alireza Arab Amiri & Dr. Abolghasem Kamkar Rohani

Advisor:

Hasan Riahi

Winter 1394