





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی سه بعدی معکوس داده های مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی،

مطالعه موردی ذخیره پلی متال در محدوده عشوند همدان، ایران

متین طبیب زاده گناوه

استاد راهنما:

دکتر علی نجاتی کلاته

دکتر علیرضا عربامیری

استاد مشاور:

علیرضا عامری

شهریور ۱۳۹۵

تقدیم بہ:

روح پاک پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونہ در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم

و بہ مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر

و بہ : ہمسرم، اسطورہ زندگیم، پناہ خستگیم و امید بودنم ...

تقدیر و شکر

سپاس خدای عزوجل را که همواره بندگان را مورد لطف و عنایتش قرار داده است، خدایی که بار دیگر مرا تحت الطاف بیکرانیش قرار داد تا بتوانم قدمی دیگر در مسیر اعتلا و پیشرفت تحصیل پیش بردارم. بی شک در ابتدا باید قدردان پدر و مادر مهربانم باشم که یک بار دیگر با فراهم نمودن اسباب رفاه آسایش، در گذر از این مرحله زندگانی نیز یاریم نمودند و البته امیدوار به روزی که تنها بتوانم گوشه‌ای بسیار کوچک از زحماتشان را جبران نمایم. در ادامه مراتب سپاس و قدردانی خویش را نشانر اساتید راهنمای ارجمندم، آقایان دکتر علی نجاتی کلاته و دکتر علیرضا عرب امیری نموده و از خداوند متعال سلامتی، موفقیت و بهروزی را برای ایشان خواستارم.

از جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و سرکار خانم دکتر سوسن ابراهیمی که زحمت داورسی این پایان نامه با ایشان بود، کمال قدردانی را دارم.

در خاتمه سپاس گزار کلیه دوستان و عزیزانی، هستم که مراد پایان رسانیدن این پایان نامه یاری نمودند، مطمئناً موفقیت و سلامتی ایشان آرزوی قلبی این حقیر خواهد بود.

چکیده:

روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های مناسبی می‌باشند که در پی‌جویی و اکتشاف ذخایر معدنی کارایی بالایی دارند. این روش‌ها اگر به درستی انتخاب شوند، اطلاعات ارزشمندی از کانی‌سازی در سطح و در عمق ارائه می‌دهند. در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی دقیق‌تر کانسار اسکارن پلی‌متال مس، طلا، روی و آهن در شمال‌شرق شهر نهاوند و در نزدیکی روستای عشوند در محدوده‌ای به مساحت 350×400 مترمربع، ابتدا برداشت‌های مغناطیس‌سنجی با فاصله نقاط ۱۰ متر در ۱۰۶۰ ایستگاه برداشت شد. بعد از مشخص شدن گسترش بی‌هنجاری‌ها، روند و امتداد کانی‌سازی، محل مناسب جهت برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی تعیین شد و تعداد هفت پروفیل موازی با فاصله ۵۰ متر از یکدیگر، با آرایش دوقطبی-دوقطبی و عمود بر امتداد توده در جهت شمالی-جنوبی جهت بررسی شیب و امتداد بیشتر توده‌ها در عمق و تعیین نقاط بهینه حفاری طراحی و برداشت شد. به‌منظور تعیین هندسه منبع و تباین مغناطیدگی توده‌های مورد نظر با محیط اطراف، وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبگ (نرم‌افزار UBC MAG3D) صورت گرفت. به‌منظور استفاده بهینه الگوریتم مذکور، ابتدا کاربرد آن بر روی داده‌های مصنوعی به‌همراه نوفه بررسی و بر اساس میزان تطابق نتایج با جواب اصلی، از این روش جهت مدل‌سازی داده‌های واقعی استفاده شد؛ که جهت درک کامل‌تر نتایج نهایی، نماهای مختلفی از آن‌ها آورده شده است. همچنین، داده‌های مقاومت‌ویژه و IP برداشت‌شده، پس از ورود به نرم‌افزار RES2DINV و انجام تصحیحات اولیه به روش وارون‌سازی کمترین مربعات، وارون‌سازی شده و نتایج حاصله به صورت مقاطع دوبعدی ارائه شدند. نهایتاً به‌منظور کاهش ریسک مطالعات آتی و همچنین هزینه‌های حفاری تا میزان قابل‌توجهی، از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار RES3DINV استفاده گردید. با توجه به نقشه برگردان به قطب با ادامه فراسو تا ۵ متر که در محدوده مورد مطالعه برای تفسیر مناسب‌تر به نظر می‌رسد می‌توان دید

که توده‌های معدنی در جهت شرق به غرب کشیده شده‌اند. همچنین بیشتر توده‌ها تا عمق بیش از ۲۰ متر نیز ادامه داشته‌اند.

تقریباً در تمام بخش‌هایی که تغییرات بی‌هنجاری مغناطیس دیده می‌شود بی‌هنجاری قطبش‌القایی هم وجود داشته و شکل توده به مقدار بسیار زیادی مشخص شده است. تنها می‌توان گفت در بخش‌هایی که بی‌هنجاری مغناطیس ضعیف‌تر بوده به احتمال زیاد مقدار آهن توده کمتر و یا در عمق بیشتری بوده است. همچنین مشخص گردید تقریباً بیشتر توده‌ها شیبی به سمت جنوب داشته است. توده مورد مطالعه از سطح زمین شروع شده و در بعضی موارد تا عمق‌های بیش از ۴۰ متر نیز ادامه داشته است. همچنین توده‌هایی مجزا از هم با شیب و عمق متفاوت که ممکن است در اثر گسل از هم جدا شده باشد به خوبی تفکیک شده است. بر اساس مدل‌های به‌دست آمده از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی منطقه مورد مطالعه، چنین به نظر می‌رسد که از سه بی‌هنجاری موجود، بی‌هنجاری A هم از نظر اندازه و هم از نظر شدت مغناطیدگی نسبت به دو آنومالی B و C بزرگ‌تر بوده و از اهمیت بیشتری برخوردار است.

بر اساس اطلاعات موجود و نتایج مدل‌سازی‌های سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی، مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی محدوده مورد مطالعه، مناطق امیدبخش جهت حفر گمانه‌های اکتشافی شناسایی و معرفی گردید.

کلیدواژه: مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، مقاومت‌ویژه الکتریکی، قطبش‌القایی، مغناطیس‌سنجی،

پلی‌متال، عشوند، همدان.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

طیب زاده گناوه، م.، عرب امیری، ع.، نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۹۵، "مدل سازی وارون دوبعدی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی، مطالعه موردی: کانسار اسکارن پلی متال عشوند نهاوند"، دومین همایش ملی زمین شناسی و اکتشافات معدنی، کرمان.

طیب زاده گناوه، م.، نجاتی کلاته، ع.، عرب امیری، ع.، ۱۳۹۵، "اکتشاف کانسار پلی متال در منطقه عشوند نهاوند با استفاده از مدل سازی وارون داده های مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی"، دومین همایش ملی زمین شناسی و اکتشافات معدنی، کرمان.

مقالات ISI در دست ارائه

مقاله ای با عنوان :

3D inversion of magnetic, electrical resistivity and induced polarization data for a Poly-metal skarn deposit: A case study from Nahavand Of Hamedan Province, Iran.

فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ مروری بر سوابق به کارگیری روش های ژئوفیزیک اکتشافی.....	۳
۳-۱ ضرورت مطالعه.....	۶
۴-۱ اهداف و روش انجام تحقیق.....	۷
۵-۱ ساختار پایان نامه.....	۸
فصل دوم.....	۹
موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.....	۹
۱-۲ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.....	۱۰
۲-۲ توپوگرافی محدوده مورد مطالعه.....	۱۱
۳-۲ زمین شناسی محدوده اسکارن پلی متال عشوند.....	۱۲
۴-۲ واحدهای زمین شناسی موجود در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مورد مطالعه.....	۱۷
۱-۴-۲ کربونیفر - پرمین.....	۱۷
الف- واحد CP ¹	۱۷
۲-۴-۲ پرموتریاس.....	۱۸
الف- واحد PTR.....	۱۸

- ب- واحد TRJm ۱۸
- ج- واحد TRJm ۱۸
- ۲-۴-۳ کرتاسه ۱۹
- الف- واحد gr ۱۹
- ب- واحد K1v1 ۱۹
- ج- واحد K1tb ۲۰
- ۲-۴-۴ کواترنری ۲۰
- الف- واحد Q1 ۲۰
- ب- واحد Q2 ۲۰
- ج- واحد Qc ۲۰
- ۲-۴-۵ سنگ‌های دگرگون شده ۲۱
- ۲-۵-۵ مشخصات ترانسه‌های حفر شده بر روی اسکارن عشوند ۲۴
- ۲-۵-۱ ترانسه شماره یک ۲۴
- ۲-۵-۲ ترانسه شماره دو ۲۴
- ۲-۵-۳ ترانسه شماره سه ۲۵
- ۲-۵-۴ ترانسه شماره چهار ۲۶
- ۲-۵-۵ ترانسه شماره پنج ۲۶
- ۲-۵-۶ ترانسه شماره شش ۲۷

۲۸	..... ترانسه شماره هفت ۷-۵-۲
۲۹	..... ترانسه شماره هشت ۸-۵-۲
۳۱	..... فصل سوم
۳۱	..... مطالعات مغناطیس‌سنجی در منطقه مورد مطالعه
۳۲	..... ۱-۳ مقدمه
۳۵	..... ۲-۳ نقشه‌های حاصل از اعمال فیلترها و تفسیر داده‌های مغناطیس
۳۶	..... ۱-۲-۳ تصحیح IGRF (میدان مرجع ژئومغناطیس جهانی)
۳۸	..... ۲-۲-۳ برگردان به قطب
۴۰	..... ۳-۲-۳ نقشه‌های باقیمانده
۴۱	..... ۴-۲-۳ فیلتر ادامه به سمت بالا
۴۷	..... ۵-۲-۳ نقشه مشتق قائم مرتبه اول
۴۸	..... ۶-۲-۳ سیگنال تحلیلی
۴۹	..... ۳-۳ مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی
۵۴	..... ۴-۳ مدل مصنوعی
۵۷	..... ۵-۳ مدل‌سازی وارون داده‌های واقعی (صحرائی)
۶۲	..... ۶-۳ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۶۳	..... فصل چهارم
۶۴	..... ۱-۴ مقدمه

- ۶۴ ۲-۴ روش مقاومت ویژه الکتریکی
- ۶۸ ۱-۲-۴ تقسیم بندی مواد مختلف از لحاظ مقاومت ویژه
- ۶۹ ۲-۲-۴ انتخاب آرایش الکترونی مناسب
- ۷۱ ۳-۲-۴ آرایش دو قطبی - دو قطبی
- ۷۴ ۳-۴ روش قطبش القایی (IP)
- ۷۴ ۱-۳-۴ روش های اندازه گیری IP
- ۷۶ ۲-۳-۴ منشأ پدیده قطبش القایی
- ۸۰ ۴-۴ مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و IP برداشت شده در منطقه مورد مطالعه
- ۸۰ ۱-۴-۴ روش های مدل سازی ژئوفیزیکی
- ۸۰ الف- مدل سازی فیزیکی
- ۸۱ ب- روش های مدل سازی عددی
- ۸۵ ۵-۴ روش های عددی برای حل مسائل وارون سازی
- ۸۶ ۱-۵-۴ روش کمترین مربعات گوس - نیوتن
- ۸۶ ۲-۵-۴ روش شبه نیوتن
- ۸۹ ۶-۴ وارون سازی هموار دو بعدی توسط نرم افزار RES2DINV
- ۹۲ ۷-۴ عملیات صحرایی برداشت داده های مقاومت ویژه و IP
- ۹۳ ۸-۴ مدل سازی وارون دوبعدی و تفسیر مقاطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه و IP
- ۹۴ ۱-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P1

۹۷	۲-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P2
۱۰۰	۳-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P3
۱۰۳	۴-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P4
۱۰۶	۵-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P5
۱۰۹	۶-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P6
۱۱۲	۷-۸-۴ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P7
۱۱۵	۹-۴ نمایش سه بعدی نتایج حاصل از مدل سازی دوبعدی
۱۱۶	۱۰-۴ مدل سازی وارون سه بعدی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی
۱۲۰	۱۱-۴ وارون سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی منطقه مورد مطالعه
۱۲۷	۱۲-۴ جمع بندی و نتیجه گیری
۱۲۹	فصل پنجم
۱۲۹	نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۳۰	۱-۵ نتیجه گیری
۱۳۲	۲-۵ پیشنهادات
۱۳۷	منابع و مآخذ

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): نقشه راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه..... ۱۰
- شکل (۲-۲): تصویر ماهواره‌ای محدوده مورد نظر..... ۱۱
- شکل (۳-۲): تصویر توپوگرافی محدوده بر روی نقشه گوگل..... ۱۲
- شکل (۴-۲): موقعیت زون سنندج - سیرجان و محدوده مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰..... ۱۳
- ۱۴
- شکل (۵-۲): نمایی از اسکارن عشوند، در قسمت بالایی مرمریت به‌عنوان سنگ میزبان و در قسمت مرکزی، اسکارن و در قسمت پایین، توده گرانیتی قابل مشاهده است (دید به سمت شمال)..... ۱۵
- شکل (۶-۲): نمایی دیگر از اسکارن عشوند نهاوند (دید به سمت غرب)..... ۱۵
- شکل (۷-۲): نمای شرقی اسکارن عشوند که توسط یک گسل وارون در معرض دید قرار گرفته است (دید به سمت غرب)..... ۱۶
- شکل (۸-۲): نمایی از آگرواسکارن کانسار عشوند (دید به سمت شمال)..... ۱۶
- شکل (۹-۲): نمایی از کانه‌زایی مس به صورت مالاکیت در زون اکسیدی کانسار عشوند..... ۱۷
- شکل (۱۰-۲): مقطع عرضی زمین‌شناسی محدوده اسکارن عشوند و موقعیت سنگ همبر مرمریتی، آگرواسکارن، آندواسکارن و توده گرانیتی و همچنین موقعیت ترانشه‌های حفر شده در آن..... ۲۲
- شکل (۱۱-۲): دورنمایی از محدوده مورد مطالعه و موقعیت ترانشه‌های حفر شده در آن (دید به سمت شرق)..... ۲۳
- شکل (۱۲-۲): نمایی از موقعیت ترانشه‌های حفر شده در محدوده مورد مطالعه (دید به سمت غرب)..... ۲۳
- ۲۳
- شکل (۱۳-۲): موقعیت قرارگیری ترانشه‌های حفر شده در نقشه ۱:۱۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه..... ۲۳
- شکل (۱-۳): مختصات برداشت‌های مغناطیس و موقعیت پروفیل‌های دوقطبی - دوقطبی بر روی آن

- ۳۲.....
- شکل (۲-۳): نمایی از موقعیت قرارگیری ترانشه‌ها نسبت به نقاط برداشت مقاومت ویژه و IP، مغناطیس، واحدهای زمین‌شناسی و ساختارهای گسله بر روی بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰ منطقه مورد مطالعه..... ۳۳
- شکل (۳-۳): نقاط برداشت مغناطیس و پروفیل‌های دوقطبی- دوقطبی بر روی نقشه ۱:۱۰۰۰ منطقه مورد مطالعه به همراه توپوگرافی..... ۳۴
- شکل (۴-۳): نقشه میدان مغناطیسی کل منطقه مورد مطالعه..... ۳۶
- شکل (۵-۳): نقشه تصحیح میدان کل ناحیه از مغناطیس زمین (IGRF)..... ۳۷
- شکل (۶-۳): نقشه برگردان به قطب محدوده مورد مطالعه..... ۳۹
- شکل (۷-۳): نقشه برگردان به قطب بر روی تصویر google به همراه توپوگرافی..... ۳۹
- شکل (۸-۳): نقشه باقیمانده حاصل از اعمال فیلتر حذف روند سطحی درجه یک..... ۴۰
- شکل (۹-۳): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع ۵ و ۱۰ متری..... ۴۱
- شکل (۱۰-۳): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع ۱۵ و ۲۰ متری..... ۴۲
- شکل (۱۱-۳): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع ۲۵ و ۳۰ متری..... ۴۳
- شکل (۱۲-۳): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع ۳۵ و ۴۰ متری..... ۴۴
- شکل (۱۳-۳): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع ۴۵ و ۵۰ متری..... ۴۵
- شکل (۱۴-۳): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع ۵۵ و ۶۰ متری..... ۴۶
- شکل (۱۵-۳): نقشه مشتق قائم مرتبه اول..... ۴۷
- شکل (۱۶-۳): نقشه سیگنال تحلیلی منطقه مورد مطالعه..... ۴۹
- شکل (۱۷-۳): ساختار سه‌بعدی مدل شده به وسیله مجموعه‌ای از مکعب مستطیل‌ها با تباین مغناطیسی ثابت..... ۵۰
- شکل (۱۸-۳): شمای سه‌بعدی از هندسه مدل‌های مصنوعی..... ۵۴

- شکل (۳-۱۹): الف) بی‌هنجاری مغناطیسی مصنوعی بدون نویز ب) آنومالی مغناطیسی مصنوعی حاوی
 ۵٪ نویز..... ۵۵
- شکل (۳-۲۰): همپوشانی مدل وارون یافته با مدل مصنوعی (الف) برای داده‌های بدون نویز (ب) حاوی
 ۵ درصد نویز..... ۵۶
- شکل (۳-۲۱): مدل‌سازی سه‌بعدی وارون داده‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه الف) دید از بالا ب)
 دید از پهلو..... ۵۸
- شکل (۳-۲۲): نمای سه‌بعدی از بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه مورد مطالعه به وسیله نرم‌افزار Mag3D
 ۵۹
- شکل (۳-۲۳): نمای سه‌بعدی بی‌هنجاری مغناطیسی ذخیره عشوند نهاوند در نرم‌افزار Voxler (دید از
 شمال)..... ۶۰
- شکل (۳-۲۴): نمایی از تغییرات توزیع شدت مغناطیدگی در آنومالی A (دید از شمال)..... ۶۰
- شکل (۳-۲۵): نمایی از برش قائم آنومالی A و تغییرات شدت مغناطیدگی در آن (دید از شمال شرق)
 ۶۱
- شکل (۳-۲۶): نمایی از برش قائم آنومالی‌های A، B و C و تغییرات شدت مغناطیدگی در آن‌ها (دید از
 شمال)..... ۶۱
- شکل (۴-۱): توده استوانه در زیر سطح زمین..... ۶۵
- شکل (۴-۲): نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی به صورت سه‌بعدی
 ۶۶
- شکل (۴-۳): محدوده مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها، خاک‌ها و کانی‌ها..... ۶۹
- شکل (۴-۴): آرایش دوقطبی - دوقطبی..... ۷۱
- شکل (۴-۵): مقطع دوبعدی آرایش دوقطبی - دوقطبی..... ۷۲

- شکل (۴-۶): مقطع حساسیت آرایش دوقطبی - دوقطبی ۷۳
- شکل (۴-۷): اندازه‌گیری IP در روش حوزه زمان ۷۵
- شکل (۴-۸): چگونگی گسترش قطبش‌القایی غشایی، الف) تنگ شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی،
ب) بار منفی ذرات رسی و المان رشته‌ای موجود در دیواره کانال ارتباطی ۷۸
- شکل (۴-۹): قطبش الکترودی الف) شارش جریان در یک کانال باز ب) قطبش دانه رس‌نا که در کانال
ارتباطی سنگ قرار گرفته است ۷۹
- شکل (۴-۱۰): مدل اولیه مورد استفاده در نرم افزار RES2DINV ۹۱
- شکل (۴-۱۱): دید محدوده (غرب به شرق) به همراه امتداد تقریبی پروفیل‌های برداشت مقاومت ویژه و
IP ۹۲
- شکل (۴-۱۲): موقعیت ایستگاه‌های برداشتی بر روی هر یک از پروفیل‌ها (دید از شرق) ۹۳
- شکل (۴-۱۳): مقطع مقاومت ویژه به همراه مدل بر روی پروفیل شماره یک ۹۵
- شکل (۴-۱۴): مقطع قطبش‌القایی به همراه مدل بر روی پروفیل شماره یک ۹۶
- شکل (۴-۱۵): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره یک ۹۶
- شکل (۴-۱۶): پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره یک ۹۷
- شکل (۴-۱۷): مقطع مقاومت ویژه به همراه مدل بر روی پروفیل شماره دو ۹۸
- شکل (۴-۱۸): مقطع قطبش‌القایی به همراه مدل بر روی پروفیل شماره دو ۹۹
- شکل (۴-۱۹): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره دو ۹۹
- شکل (۴-۲۰): پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره دو ۱۰۰
- شکل (۴-۲۱): مقطع مقاومت ویژه به همراه مدل بر روی پروفیل شماره سه ۱۰۱
- شکل (۴-۲۲): مقطع قطبش‌القایی به همراه مدل بر روی پروفیل شماره سه ۱۰۲
- شکل (۴-۲۳): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره سه ۱۰۲

- شکل (۴-۲۴): پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش القایی بر روی پروفیل شماره سه..... ۱۰۳
- شکل (۴-۲۵): مقطع مقاومت ویژه به همراه مدل بر روی پروفیل شماره چهار..... ۱۰۴
- شکل (۴-۲۶): مقطع قطبش القایی به همراه مدل بر روی پروفیل شماره چهار..... ۱۰۵
- شکل (۴-۲۷): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره چهار..... ۱۰۵
- شکل (۴-۲۸): پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش القایی بر روی پروفیل شماره چهار..... ۱۰۶
- شکل (۴-۲۹): مقطع مقاومت ویژه به همراه مدل بر روی پروفیل شماره پنج..... ۱۰۷
- شکل (۴-۳۰): مقطع قطبش القایی به همراه مدل بر روی پروفیل شماره پنج..... ۱۰۸
- شکل (۴-۳۱): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره پنج..... ۱۰۸
- شکل (۴-۳۲): پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش القایی بر روی پروفیل شماره پنج..... ۱۰۹
- شکل (۴-۳۳): مقطع مقاومت ویژه به همراه مدل بر روی پروفیل شماره شش..... ۱۱۰
- شکل (۴-۳۴): مقطع قطبش القایی به همراه مدل بر روی پروفیل شماره شش..... ۱۱۱
- شکل (۴-۳۵): مقطع مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره شش..... ۱۱۱
- شکل (۴-۳۶): پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش القایی بر روی پروفیل شماره شش..... ۱۱۲
- شکل (۴-۳۷): مقطع مقاومت ویژه به همراه مدل بر روی پروفیل شماره هفت..... ۱۱۳
- شکل (۴-۳۸): مقطع قطبش القایی به همراه مدل بر روی پروفیل شماره هفت..... ۱۱۴
- شکل (۴-۳۹): مقطع مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره هفت..... ۱۱۴
- شکل (۴-۴۰): پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش القایی بر روی پروفیل شماره هفت..... ۱۱۵
- شکل (۴-۴۱): نمایش سه بعدی نتایج وارون سازی دوبعدی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی..... ۱۱۶
- شکل (۴-۴۲): پارامتری کردن مدل سه بعدی زمین مورد بررسی در نرم افزار RES3DINV..... ۱۱۹
- شکل (۴-۴۳): مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی در بازه های متفاوت عمقی..... ۱۲۱

- شکل (۴-۴۴): مقاطع قائم الف) مقاومت ویژه ب) قطبش القایی (در امتداد محور y) حاصل از مدل سازی با نرم افزار RES3DINV ۱۲۲
- شکل (۴-۴۵): نمایش سه بعدی داده های مقاومت ویژه در منطقه مورد مطالعه الف) دید از پهلو ب) دید از بالا ۱۲۴
- شکل (۴-۴۶): نمایش سه بعدی داده های قطبش القایی در منطقه مورد مطالعه الف) دید از پهلو چپ ب) دید از پهلو راست ۱۲۵
- شکل (۴-۴۷): نمایش سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP منطقه مورد مطالعه با توپوگرافی به وسیله نرم افزار Rockworks ۱۲۶
- شکل (۵-۱): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره یک ۱۳۲
- شکل (۵-۲): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره دو ۱۳۳
- شکل (۵-۳): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره سه ۱۳۳
- شکل (۵-۴): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره چهار ۱۳۴
- شکل (۵-۵): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره پنج ۱۳۴
- شکل (۵-۶): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره شش ۱۳۵
- شکل (۵-۷): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره ۱۳۵.۷ ۱۳۵

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): مختصات جغرافیایی گوشه‌های محدوده مورد مطالعه (زون 39N)..... ۱۰
- جدول (۲-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره یک حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۴
- جدول (۳-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره دو حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۵
- جدول (۴-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره سه حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۵
- جدول (۵-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره چهار حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۶
- جدول (۶-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره پنج حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۷
- جدول (۷-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره شش حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۷
- جدول (۸-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره هفت حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۸
- جدول (۹-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره هشت حفر شده در محدوده اسکارن عشوند..... ۲۹
- جدول (۱-۳): عمق و موقعیت جانبی بلوک‌های سه‌بعدی..... ۵۴
- جدول (۱-۴): میانگین مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها..... ۶۸
- جدول (۲-۴): خصوصیات مختلف چند آرایش الکترودی..... ۷۰

جدول (۳-۴): بارپذیری در انواع کانی‌ها..... ۷۹

جدول (۱-۵): نقاط پیشنهادی برای حفاری..... ۱۳۶

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

پیشرفت روز افزون در زمینه‌های صنعتی، نیاز دائمی و رو به افزایش صنایع را به مواد اولیه مورد نیاز برای تولیدات به‌همراه دارد. در این راستا، اکتشاف منابع فلزی برای تداوم صنعت و بسیاری دیگر از جنبه‌های زندگی بشر، بیش از پیش حائز اهمیت است. به دلیل تقاضای بالای مواد معدنی، استخراج منابع سطحی روبه افول نهاده‌اند؛ بنابراین بسیار ضروری است که منابع عمیق‌تر مورد اکتشاف و بهره‌برداری قرار گیرند.

باتوجه به نقش مواد معدنی در تامین نیازهای اولیه‌ی صنایع مختلف، جستجوی آن‌ها با روش‌های کارآمد ضروری به‌نظر می‌رسد. امروزه صرفاً با به‌کارگیری اطلاعات زمین‌شناسی سطحی نمی‌توان منابع معدنی را شناسایی نمود. روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های ارزان و نسبتاً قابل‌اعتمادی می‌باشند که برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی و دستیابی به منابع مدفون استفاده می‌شوند. این روش‌ها اگر به‌درستی انتخاب شوند، می‌توانند اطلاعات مناسبی از کانی‌سازی در سطح و عمق بدهند [Alilou et al. 2014].

[al. 2014] نهشته‌های هدف ژئوفیزیکی، اغلب در ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی مدفون شده و توسط این ساختارها پنهان گردیده‌اند. بنابراین اکتشاف دقیق این نهشته‌ها مشکل بوده و نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی می‌باشد [Oldenburg and Pratt, 2007].

یکی از روش‌های مهم ژئوفیزیک که به‌منظور کاهش ریسک عملیات اکتشافی و هزینه‌های حفاری به‌کار می‌رود، مدل‌سازی‌های پر قدرت و پرسرعت وارون‌سازی می‌باشد. وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی، یک روش مدل‌سازی است و از مهم‌ترین مراحل در تفسیر کمی داده‌های حاصل از این روش می‌باشد. مشکل اصلی این روش، عدم یکتایی پاسخ‌های آن است [Fedi and Rapolla, 1999].

اطلاعات ارزشمندی از وارون‌سازی و تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی می‌تواند حاصل شود. به‌عنوان مثال، یکی از روش‌های مرسوم در اکتشاف کانسارهای فلزی به‌خصوص اسکارن‌های آهن و مس، به‌کارگیری

هم‌زمان روش‌های تلفیقی مغناطیس‌سنجی، قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌باشد [Alilou et al. 2014].

با توسعه و پیشرفت محاسبات عددی، وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی از دوبعد تا سه و چهاربعد (بعد چهارم، بعد زمان است) می‌تواند انجام شود [Zhen Cheng et al, 2015].

اغلب ساختارهای زمین‌شناسی در طبیعت سه‌بعدی می‌باشند، از طرفی، بیشتر ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده تنها می‌توانند به‌وسیله مدل‌های زیرسطحی سه‌بعدی ژئوفیزیکی یا زمین‌شناسی نشان داده شوند [Loke and Barker, 1996]؛ بنابراین، به روش‌های تفسیر سه‌بعدی به‌طور واضح نیاز پیدا می‌شود و نهایتاً نتایج با دقت دقیق‌تری ارائه می‌گردند [Sasaki, 1994].

فرایند مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، علاوه بر اینکه تفسیری جزئی‌تر از هندسه ساختارهای زمین‌شناسی در عمق و ارتباط آن‌ها ارائه می‌دهد؛ اطلاعات اساسی درباره مکان و جهت این ساختارها نیز نمایان می‌کند. همچنین این مدل‌ها می‌توانند برای پیش‌بینی پتانسیل معدنی و ارزیابی منابع معدنی مفید واقع شوند.

۱-۲ مروری بر سوابق به‌کارگیری مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیس-

سنجی، مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در اکتشاف کانسارهای معدنی

وایت^۱ و همکاران (۲۰۰۱) به منظور مشخص نمودن و ترسیم زون سولفیدی مس معدن کوپر هیل^۲، از روش وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های قطبش‌القایی استفاده نمودند. همچنین با استفاده از این روش توانستند، عدم قطعیت در مورد روند ساختاری در معدن نام‌برده را حل و فصل کرده و درک بهتری از زمین‌شناسی زیرسطحی منطقه ارائه دهند.

^۱ White

^۲ Copper Hill

وانگ^۱ و همکاران (۲۰۱۲) در ایالت هنان^۲ چین از روش مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی به‌عنوان ابزاری برای ترکیب‌کردن آن با داده‌های زمین‌شناسی استفاده نموده و توانستند به زمان تشکیل و موقعیت کانسار در اهداف معدنی دست یابند.

همچنین لورو و مانتووانی^۳ (۲۰۱۲) در ایالت پارتینها^۴ (جنوب شرق برزیل) نیز توانستند از بین چندین روش موجود، به‌وسیله مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی، شکل هندسی کانسار، بارپذیری مغناطیسی آن، مرز آنومالی‌ها و عمق آن‌ها را به‌دست آورند.

به‌دلیل نزدیک بودن آنومالی‌ها به‌یکدیگر و جهت‌یافتگی مغناطیسی متفاوت آن‌ها، مجزا کردن مؤلفه‌های مغناطیسی همراه با منشأ آن مشکل است. برای رفع این مشکل و توضیح رفتار مغناطیسی منطقه، قبل از به‌دست آمدن و تفسیر نتایج آنالیز گمانه‌ها، ریبرو^۵ و همکاران (۲۰۱۳) در ایالت ماتوگروسو^۶ برزیل، از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی در کنار روش مشتق مراتب بالاتر، استفاده نمودند.

یوچیدا^۷ و همکاران (۲۰۱۵) در ایالت نیشی‌یاما^۸ ژاپن، به‌منظور دستیابی به اطلاعاتی جزئی‌تر از ساختارهای مقاومت‌ویژه الکتریکی مخازن زمین‌گرمایی در سه‌بعد و انتخاب نقطه بهینه جهت حفاری و ایجاد چاه‌های تولید، برای اولین بار در منطقه مذکور توانستند با استفاده از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، به تصاویر واضحی از کلاهدک‌های رسی با مقاومت‌ویژه پایین و مخازن هیدروترمال

^۱ Wang

^۲ Henan

^۳ Louro and Mantovani

^۴ Pratinha

^۵ Ribeiro

^۶ Mato Grosso

^۷ Uchida

^۸ Nishayama

با مقاومت ویژه بالادست یافته و مرزهای با تباین مقاومت ویژه الکتریکی را از یکدیگر تفکیک نمایند. همچنین، این تفاسیر با نتایج داده‌های گمانه‌ها سازگاری بالایی نشان داد.

زارعان و همکاران (۱۳۸۹) به منظور اکتشاف طلا و عناصر همراه در منطقه گلوجه زنجان و دنبال کردن ناهنجاری‌های مقاومت ویژه و قطبش‌القایی در کانی‌های سولفور، با استفاده از آرایش دوقطبی - دوقطبی، داده‌های ژئوفیزیکی مذکور را در مجموع ۱۴ پروفیل برداشت کرده و پس از انجام مدل‌سازی - های وارون دو و سه بعدی با استفاده از نرم افزارهای RES2DINV و RES3DINV، نه تنها به اهداف فوق دست یافتند؛ بلکه طی این مدل‌سازی‌ها، روند و شیب رگه‌هایی که امکان وجود کانی‌زایی در آن‌ها بالا است؛ را مشخص نمودند.

جمالی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش‌های قطبش‌القایی (IP) و مقاومت ویژه الکتریکی به پی‌جویی و اکتشاف ژئوفیزیکی ذخایر پلی‌متال در منطقه کبودان - بردسکن پرداختند. در این پژوهش محدوده‌های امیدبخش فلزی در منطقه‌ی مورد مطالعه توسط نتایج برداشت مشخص شدند.

علیلو و همکاران (۲۰۱۴)، نهشته پلی‌متال حلب واقع در استان زنجان را با ترکیب سه روش ژئوفیزیکی، شامل مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش‌القایی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، علاوه بر شناسایی انواع مختلف کانی‌سازی در سطوح مختلف، شیب، عمق، ضخامت، مکان و روند کانی‌سازی مشخص گردید. همچنین در سال ۱۳۹۲، با به‌کارگیری روش‌های تلفیقی فوق‌الذکر در کانسار اسکارن آهن و مس قلندر واقع در اهر، نه تنها به اهداف ذکر شده دست یافتند، بلکه توانستند افق‌های کانی‌سازی کم‌عیار و پرعیار (به صورت رگه‌ای و توده‌ای) را شناسایی کرده و نقاط بهینه برای حفاری اکتشافی را پیشنهاد دهند.

خزایی‌فر و همکاران (۱۳۹۴)، در محدوده کانسار پلی‌متال عشوند همدان، به تخمین عمق منشأهای مختلف آنومالی با روش آنالیز طیف‌توان تعمیم‌یافته با استفاده از داده‌های مغناطیس پرداختند و نتایج آن را با نتایج روش‌های مقاومت ویژه و قطبش‌القایی مقایسه کردند و مشخص گردید که روش پیشنهادی

در این تحقیق، نتایجی بسیار نزدیک به یکدیگر دارند. بدین ترتیب روش آنالیز طیف‌توان تعمیم‌یافته به عنوان روشی کاربردی در تخمین عمق داده‌های مغناطیسی معرفی شد.

۳-۱ ضرورت مطالعه

از آنجا که در اکثر موارد، زمین واقعی تحت مطالعه دارای پیچیدگی‌های ذاتی است؛ لذا انجام مدل‌سازی‌های یک‌بعدی و یا حتی دوبعدی برای نیل به مقاصد اکتشافی کافی نبوده و نیاز به انجام مدل‌سازی سه‌بعدی به‌خوبی احساس می‌شود. از سوی دیگر تفسیر داده‌های خام ژئوفیزیکی به‌علت متأثر بودن شکل و عمق آنومالی‌ها از آرایه‌های الکترودی به‌کار گرفته‌شده، اغلب گمراه‌کننده می‌باشند. لذا به منظور تعیین ویژگی‌های ساختاری کانسار، مدل‌سازی وارون بر روی داده‌های صحرایی انجام می‌پذیرد. وجود مسئله وارون سه‌بعدی، معلول وجود مسئله پیشروی سه‌بعدی است. مدل‌سازی پیشروی، حل یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی و شرایط مرزی خاص توسط روش‌های محاسباتی است [قاری، ۱۳۹۱].

مدل‌سازی وارون سه‌بعدی به‌علت کاهش ریسک در عملیات اکتشافی و همچنین کاهش قابل‌توجه هزینه‌های حفاری، در سال‌های اخیر اهمیت روزافزونی در امر پی‌جویی و اکتشاف منابع زیرزمینی یافته است.

به منظور اکتشاف دقیق‌تر مواد رسانا در کانسار اسکارن پلی‌متال ناحیه مذکور از قبیل طلا، روی، مس و آهن، روش‌های قطبش‌القایی، مقاومت‌ویژه الکتریکی و مغناطیس‌سنجی مفید می‌باشند و با استفاده از آن‌ها نواحی بی‌هنجار را می‌توان به‌خوبی تشخیص داد [جعفری، ۱۳۹۰، نوروزی و غلامی، ۱۳۸۴، ژولیده و همکاران، ۱۳۹۰].

به‌همین منظور در این پژوهش سعی بر آن است تا با کمترین هزینه بتوان بهترین نقاط حفاری که منجر به اکتشاف نهایی ماده معدنی می‌گردد، معرفی شوند.

۴-۱ اهداف و روش انجام تحقیق

به منظور اکتشاف کانسار پلی‌متال در ۱۵ کیلومتری شمال شرقی نهاوند در استان همدان و در ۲ کیلومتری شمال شرق روستای عشوند، ابتدا داده‌های مغناطیس‌سنجی با فاصله نقاط ۱۰ متر (شبکه برداشت ۱۰ در ۱۰) در ۱۰۶۰ ایستگاه، تحت پوشش برداشت‌های مغناطیس‌سنجی قرار گرفت. بعد از مشخص شدن گسترش بی‌هنجاری‌ها، روند و امتداد کانی‌سازی، محل مناسب جهت برداشت شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی تعیین شد تا با استفاده از تمامی داده‌ها، وضعیت قرارگیری توده‌ها در عمق بررسی شود. برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در شبکه مستطیلی شکل با ابعاد ۳۵۰ در ۴۰۰ متر و با آرایش دوقطبی-دوقطبی در ۱۲۹ ایستگاه برداشت و در قالب ۷ پروفیل موازی با یکدیگر عمود بر امتداد کانی‌سازی احتمالی و در جهت شمالی-جنوبی به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر (مجموعاً ۵۵۳ نقطه) توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور اندازه‌گیری شده است. هر یک از این پروفیل‌ها دارای فاصله الکترودی ۲۰ متر و حداکثر تا ۸ گام می‌باشند.

در این پژوهش داده‌های ۷ پروفیل برداشت‌شده به منظور مدل‌سازی و تفسیر مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های این پروفیل‌ها پس از ورود به نرم‌افزار RES2DINV و انجام تصحیحات اولیه به روش وارون‌سازی کمترین مربعات، مدل‌سازی شده و نتایج حاصله به صورت مقاطع دوبعدی ارائه شد. همچنین به منظور کاهش ریسک مطالعات آتی و تعیین دقیق‌تر نقاط حفاری احتمالی از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار RES3DINV استفاده شد. همچنین به منظور بررسی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی موجود در منطقه نیز، از برگردان سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی به کمک نرم‌افزار Mag3D استفاده گردید. در گام بعدی نتایج حاصل از پردازش و تفسیر مقاطع ژئوفیزیکی با اطلاعات به‌دست آمده از ترانسه‌های حفرشده مقایسه و اعتبارسنجی شد. در انتها آنچه مدنظر است پیشنهاد نقاط مناسب برای انجام حفاری و شناسایی مناطق امیدبخش می‌باشد.

۵-۱ ساختار پایان نامه

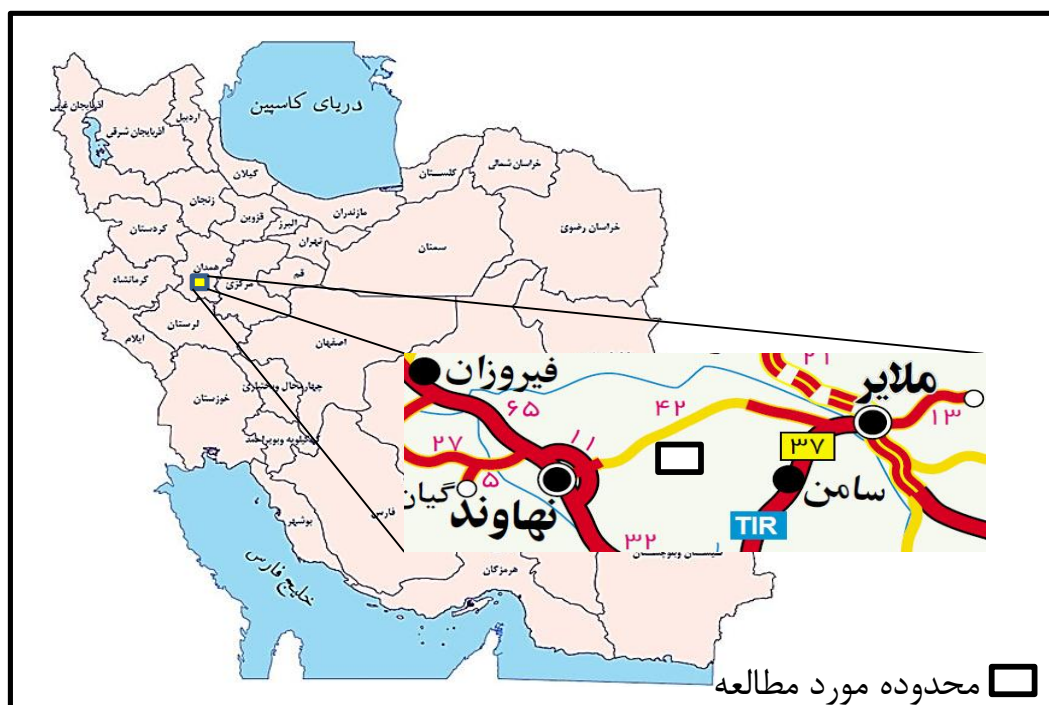
پژوهش حاضر مشتمل بر پنج فصل می باشد؛ که فصل جاری به بیان مقدمه، مروری بر مطالعات صورت گرفته، ضرورت، اهداف پژوهش و روش انجام کار می پردازد. در فصل دوم به زمین شناسی منطقه مورد مطالعه اشاره شده است. در فصل سوم پس از بیان تئوری مقاومت ویژه و قطبش القایی، به تفسیر مدل سازی دوبعدی و سه بعدی داده های مذکور پرداخته شده است. در فصل چهارم پس از بیان تئوری مغناطیس، شرح تصحیحات لازم و انواع فیلترهای مورد نیاز به تفسیر مدل سازی سه بعدی داده های مغناطیس پرداخته شد و در نهایت در فصل آخر نتیجه گیری و پیشنهادات لازم ارائه گردید.

فصل دوم

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

۱-۲ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در فاصله تقریبی ۱۵ کیلومتری (فاصله هوایی) شمال شرقی شهر نهاوند و در استان همدان واقع شده است. مطابق شکل (۱-۲)، برای رسیدن به منطقه پس از طی ۱۵ کیلومتر از نهاوند به سمت ملایر در سمت راست با عبور از جاده آسفالت به طول تقریبی ۳ کیلومتر ابتدا به محدوده و سپس به روستای عشوند می‌رسیم. محدوده مورد نظر در ارتفاع ۱۵۰ متری از زمین‌های پست منطقه واقع گردیده و مختصات جغرافیایی چهارگوش آن در جدول (۱-۲) آمده است [جعفری، ۱۳۹۰].



شکل (۱-۲): نقشه راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه

جدول (۱-۲): مختصات جغرافیایی گوشه‌های محدوده مورد مطالعه (زون 39N)

گوشه‌های چهار گوش	سیستم تصویر UTM	
	X	Y
A	۲۶۷۹۳۵	۳۷۸۹۱۱۰
B	۲۶۸۳۱۰	۳۷۸۹۱۱۰
C	۲۶۸۳۱۰	۳۷۸۸۶۷۷
D	۲۶۷۹۳۵	۳۷۸۸۶۷۷

۲-۲ توپوگرافی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه کوهستانی بوده و دارای توپوگرافی نسبتاً شدیدی است؛ به طوری که کمترین ارتفاع در نقاط برداشتی ۲۱۴۰ و بیشترین ارتفاع ۲۲۵۰ متر ثبت شده است (شکل‌های ۲-۲ و ۳-۲) [جعفری، ۱۳۹۰].



شکل (۲-۲): تصویر ماهواره‌ای چهار گوشه محدوده مورد نظر [برگرفته شده از Google earth].



شکل (۲-۳): تصویر توپوگرافی محدوده بر روی نقشه گوگل [برگرفته شده از Google earth].

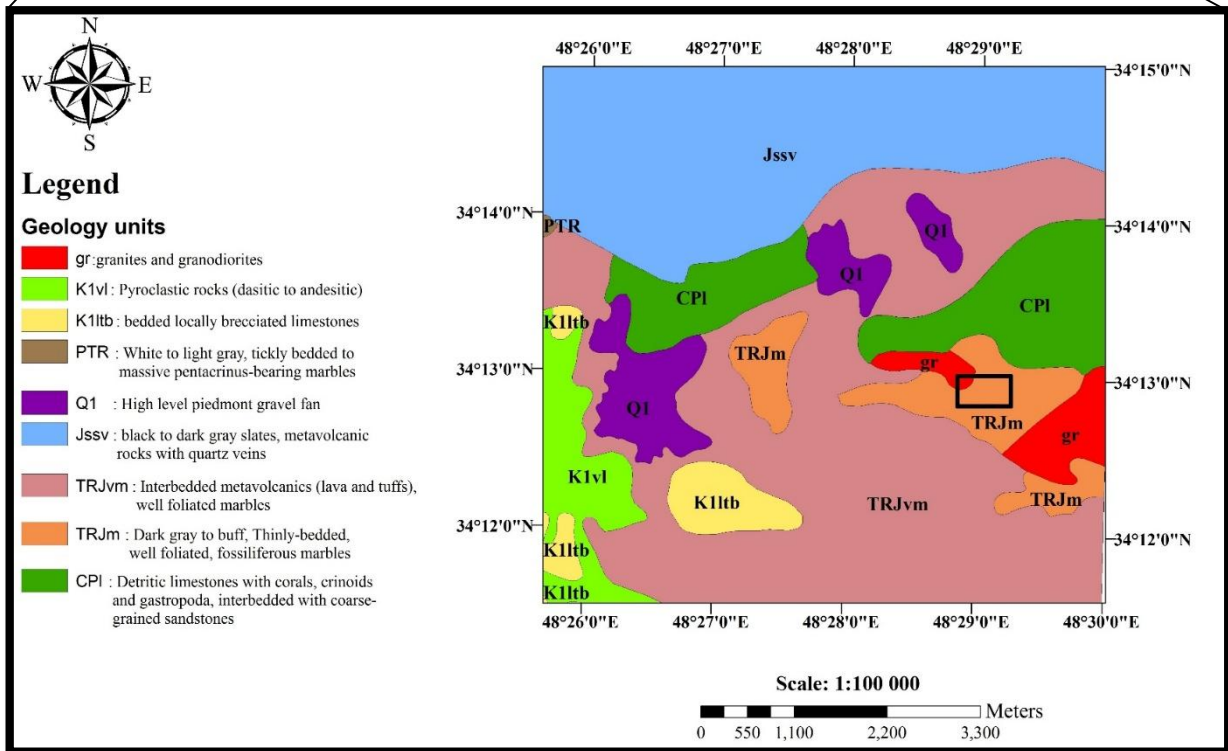
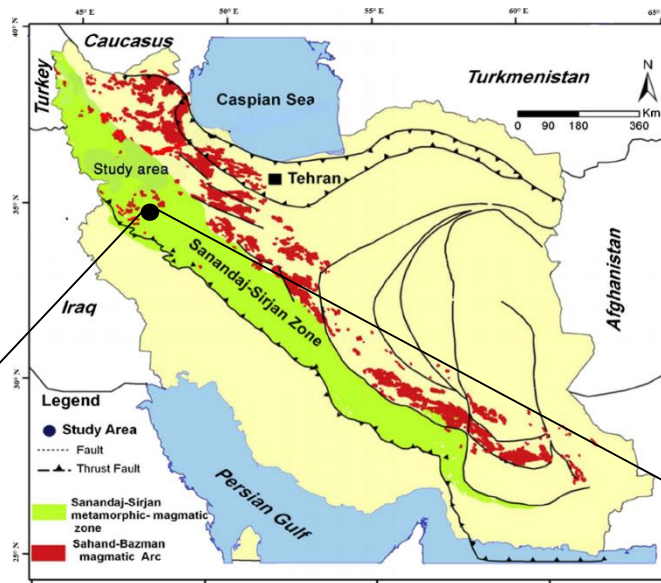
۲-۳ زمین‌شناسی محدوده اسکارن پلی‌متال عشوند

محدوده مورد مطالعه در زون سنندج - سیرجان قرار گرفته است (شکل ۲-۴)؛ به طوری که هم حضور دگرگونی‌های ناحیه‌ای موجود در زون سنندج - سیرجان در آن قابل ملاحظه بوه و هم وجود توده نفوذی کرتاسه و دگرگونی همبری حاصل از نفوذ این توده در سنگ‌های آهنی قدیمی‌تر در آن مشهود می‌باشد. حاصل این دگرگونی همبری در منطقه مورد مطالعه، تشکیل اسکارن پلی‌متال آهن، مس، روی و طلا، همراه با آندواسکارن و اگزواسکارن کاملاً مشخص و تیپیک است. عمده واحدهای سنگی موجود در محدوده مورد مطالعه و سن آن‌ها به شرح زیر می‌باشد.

۱- مرمیت به سن تریاس که به دلیل گسل خوردگی و خردشدگی شدید، از نوع مرمیت درجه سه محسوب گردیده و فاقد قابلیت کوپ‌دهی و قواره‌دهی مناسب می‌باشد. مرمیت مذکور در کنتاکت با توده نفوذی تشکیل اگزواسکارن از نوع کربناتیته داده و همچنین بخشی از ماده معدنی را در خود جای

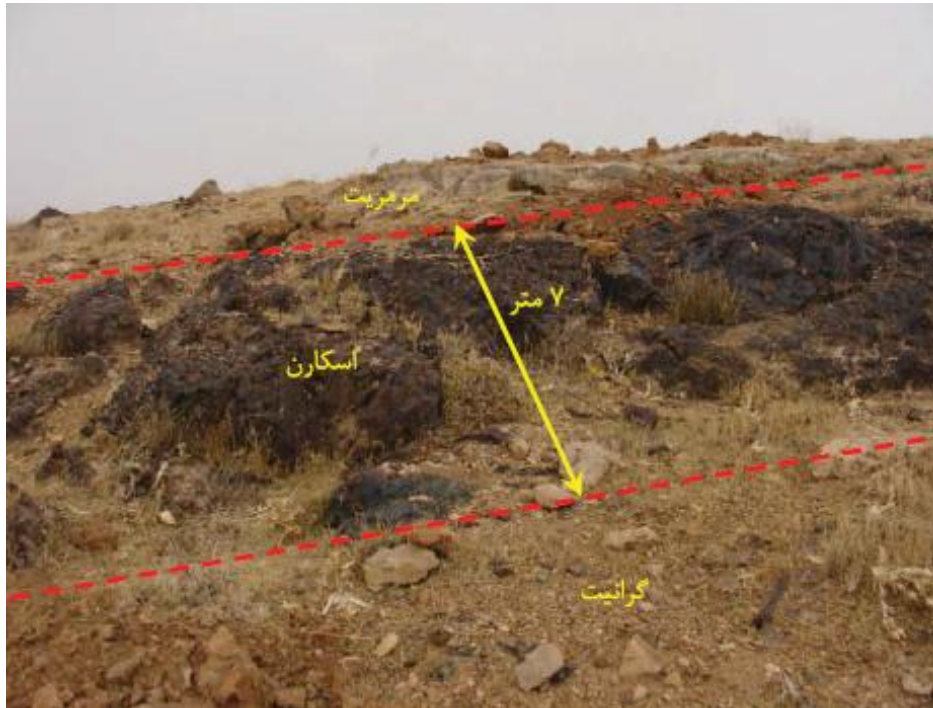
داده است. تشکیل آهک به مرمریت در این محدوده به دلیل عملکرد زون سنندج - سیرجان بوده که در طی آن، در طی یک دگرگونی ایزومتامورفیسم آهک تبدیل به مرمریت شده است. این دگرگونی با کمترین تغییر ترکیب در سنگ صورت گرفته است. در مرحله بعدی دگرگونی و در کرتاسه پایانی، همراه به نفوذ توده گرانودیوریتی به داخل این مرمریت و در کنتاکت بلافصل با توده نفوذی، به دلیل آلوکمیک و باز بودن سیستم و جریان آزاد یونی، دگرگونی از نوع مجاورتی با تشکیل اسکارن صورت گرفته است که با فاصله از توده از میزان این دگرگونی و کانه‌زایی به نحو محسوسی کاسته می‌گردد و در نهایت به مرمریت ختم می‌شود.

۲- توده نفوذی گرانودیوریتی به سن ۷۰ تا ۸۰ میلیون سال قبل (بر اساس سن‌سنجی صورت گرفته توسط تهیه‌کننده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نهاوند، [مهدوی، ۱۹۹۲]) به سن کرتاسه فوقانی که در محل کنتاکت به سنگ میزبان (مرمریت) تشکیل آندواسکارن را داده است؛ جز مناطق تیپیک اسکارنی به‌شمار می‌رود. این توده بارور بوده و منشأ اصلی تشکیل کانسار به‌شمار می‌رود.



شکل (۲-۴): موقعیت زون سنندج - سیرجان و محدوده مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۱]

شکل‌های (۲-۵)، (۲-۶)، (۲-۷)، (۲-۸) و (۲-۹) نمایی از اسکارن عشوند همراه با سنگ میزبان (مرمریت)، توده گرانیتی و بخشی از ماده معدنی (مس) را نشان می‌دهند.



شکل (۲-۵): نمایی از اسکارن عشوند، در قسمت بالایی مرمریت به‌عنوان سنگ میزبان و در قسمت مرکزی، اسکارن و در قسمت پایین، توده گرانیتی قابل مشاهده است (دید به سمت شمال) [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]



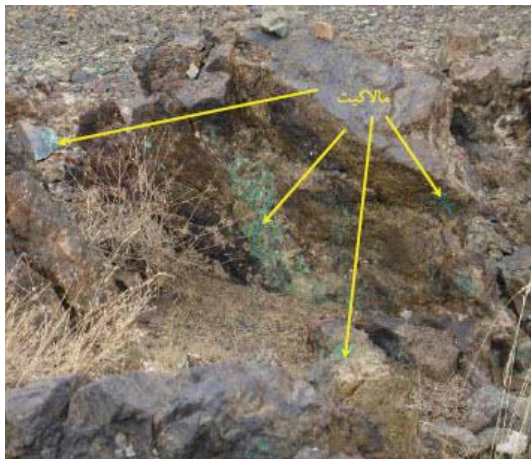
شکل (۲-۶): نمایی دیگر از اسکارن عشوند نهاوند (دید به سمت غرب) [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]



شکل (۲-۷): نمای شرقی اسکارن عشوند که توسط یک گسل وارون در معرض دید قرار گرفته است (دید به سمت غرب) [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]



شکل (۲-۸): نمایی از آگرواسکارن کانسار عشوند (دید به سمت شمال) [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]



شکل (۲-۹): نمایی از کانه‌زایی مس به صورت مالاکیت در زون اکسیدی کانسار عشوند [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]

۴-۲ واحدهای زمین‌شناسی موجود در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مورد مطالعه

واحدهای زمین‌شناسی منطقه از قدیم به جدید از واحدهای زیر تشکیل شده و کلیه مطالب این بخش از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ [موحدی، ۱۳۸۹] برگرفته شده است.

۱-۴-۲ کربونیفر- پرمین

الف- واحد CP^1

CP^1 قدیمی‌ترین واحد سنگ چینه‌ای این ناحیه است و شامل ردیف‌هایی از سنگ‌آهک نازک لایه همراه درون‌لایه‌های ماسه‌سنگی به رنگ قهوه‌ای می‌باشد. همچنین بخش دیگری از این واحد، به صورت سنگ ماسه درشت دانه و سنگ آهک آواری همراه با مرجان، کرینوئید و خرده‌هایی از صدف گاستروپود دیده می‌شود. در ناحیه‌ای نزدیک روستای عشوند، این واحد به وسیله یک زون گسله در مقابل اسلیت‌های سیاه و توده‌های ولکانیکی تریاس- ژوراسیک و آهک‌های ضخیم لایه کرتاسه پیشین قرار گرفته است. واحد CP^1 به عنوان یک واحد تفکیک ناپذیر کربونیفر- پرمین شناخته می‌شود.

الف - واحد PTR

واحد PTR در شمال و شمال شرقی روستای برجک واقع شده و شامل رخنمون‌های کوچک و پراکنده‌ای از سنگ‌های آهکی مرمری شده به‌رنگ خاکستری روشن تا سفید توده‌ای و بسیار ستبر لایه، سنگ آهک ضخیم و آهک‌های مرمری شده به‌رنگ خاکستری روشن و تیره با لایه‌بندی قابل تورق دیده می‌شود. این واحد مرمری شده به‌صورت پنجره‌های تکتونیکی بر روی سری سنگ‌های آذرآواری و سنگ‌های آذرین دگرگون شده با سن کرتاسه قرار گرفته است. در اطراف روستای کاله خان، قشلاق ده پول، برونزدی از این ردیف (PTR) دیده می‌شود که همگی دارای همبری تکتونیکی با واحدهای مجاور خود می‌باشند. سن واحد PTR به دوره پرمین تا تریاس بر می‌گردد.

ب - واحد TRJVm

در محدوده مورد مطالعه، واحد TRJVm قسمت زیادی از سطح زمین را پوشانده و برونزد گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین به‌صورت گدازه (که به‌طور ضعیف دگرگون شده)، توف و همراه با میان‌لایه‌هایی از مرمرهای نازک لایه بسیار مشخص است. بخش بالایی این واحد از اسلیت به‌رنگ خاکستری تیره تا سیاه رنگ تشکیل شده است. این واحد سنی معادل تریاس- ژوراسیک دارد [عمیدی و مجیدی، ۱۹۷۷]. در بخش جنوب شرقی و شمال نهاوند این مجموعه (TRJVm) به‌نام مجموعه نهاوند^۱ معرفی گردیده است.

ج - واحد TRJm

این واحد شامل سنگ‌های مرمریتی نازک لایه خاکستری تیره رنگ می‌باشند که در ناحیه شمال و شمال شرق روستای عشوند در سطحی وسیع گسترش دارد.

^۱ Nahavand complex

الف- واحد gr

سنگ‌های آذرین نفوذی در منطقه مورد نظر، با ترکیب بیشتر گرانیت و گرانودیوریت می‌باشند. ویژگی‌های میکروسکوپی آن داشتن بافت دانه‌ای (گرانولر) است و کانی‌های فلدسپات آن به‌طور گسترده‌ای جای خود را به کانی‌های میکائی (سریسیت-مسکویت)، کانی‌های رسی و همچنین اپیدوت داده‌اند. فلدسپات‌های آلکالن آن دارای بافت پرتیت است که تجزیه شده و به کانی‌های رسی تبدیل گردیده‌اند. کوارتز و آمفیبول گاهی به‌قطر چند میلی‌متر در آن دیده می‌شود. کانی‌های فرعی بیشتر اسفن و آپاتیت هستند. این واحد که به‌روش پرتوسنجی (پتاسیم - آرگون) اندازه‌گیری شده، در شرح نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ نه‌اوند، حدود ۸۰-۷۰ میلیون سال برآورد شده است [ولی‌زاده، ۱۹۷۵، حسینی‌دوست و همکاران، ۱۹۹۲] که مشخص‌کننده کرتاسه بالا^۱ است. واحد مذکور، در شمال‌شرق روستای عشوند و در سطح وسیعی گسترش دارد و عامل اساسی کانه‌سازی در این محدوده محسوب می‌شود.

ب- واحد Klv1

این واحد آمیزه‌ای آذرآواری^۲ است که در آن سنگ‌های آهکی بلورین شده کرتاسه پائین^۳ و قطعات سنگ‌های آتشفشانی به‌صورت مخلوطی دیده می‌شوند. این آمیزه بیشتر از قطعات سنگ‌هایی که بیشتر پورفیری و دارای ترکیب داسیتی و آندزیتی هستند، تشکیل شده است.

^۱ Upper Cretaceous

^۲ Pyroclastic

^۳ Early Cretaceous

ج- واحد Klitb

این واحد شامل ورقه‌های سنگ آهکی وابسته به کرتاسه پایین بوده که به صورت قطعه‌های رورانده^۱ روی واحدهای مجاور (که عمدتاً سنگ‌های آهکی به صورت توده‌ای تا ستبر لایه اند و بخشی از آن به صورت اوولیتی و دارای خرده صدف های فسیلی است) قرار گرفته‌اند.

۲-۴-۴ کواترنری

رسوبات کواترنری قسمت زیادی از ورقه نه‌آوند را پوشانده است که در بیشتر اوقات به صورت مخروط-افکنه‌های آبرفتی و رسوبات رودخانه‌ای آبرفتی جوان و قدیمی موجود هستند. رسوبات کواترنری بیشتر از سیلت، ماسه و گراول تشکیل شده‌اند.

الف- واحد Q1

این واحد، مخروط‌افکنه‌های درشت‌دانه مرتفعی هستند که به صورت دشت‌هایی مسطح در بخش‌هایی از شمال منطقه رخنمون دارند و دارای توپوگرافی آرام و ملایمی هستند. قطعات سنگی بیشتر در ابعاد گراول و ماسه تشکیل شده‌اند؛ که از رخنمون‌های مجاور منشأ گرفته‌اند و دارای شیب ملایمی هستند.

ب- واحد Q2

نهشته‌های رسوبی جوانی هستند که شامل ماسه و گراول می‌باشند و در بخش‌هایی از شمال منطقه رخنمون دارند.

ج- واحد Qc

این واحد شامل رسوبات دهانه رودخانه بوده و جوان‌ترین فرم رسوبات دوران کواترنری محسوب می‌شوند.

^۱ Klippe

۲-۴-۵ سنگ‌های دگرگون شده^۱

بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی به نظر می‌رسد که آخرین مرحله دگرگونی ناشی از تبلور کامل گرانیات باتولیت الوند می‌باشد. مطالعات زمین‌شناسی نیز آشکار می‌سازد که قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگونی ورقه‌نهاد متعلق به دوره تریاس پیشین می‌باشد که در آن‌ها سنگ‌های کربناتی به صورت مرم‌ظاهر شده‌اند. از سویی دیگر، جوان‌ترین سنگ‌های دگرگونی منطقه نیز سنگ‌های کرتاسه پائین است که بخش گسترده‌ای از سنگ‌های دگرگونی این ناحیه را تشکیل داده‌اند و به صورت اسلیت، فیلیت و شیست همراه با سنگ‌های آذرین دگرگون شده در منطقه برونزد دارند. با توجه به موارد یاد شده می‌توان گفت که تقریباً تمامی سنگ‌های دگرگونی این منطقه، خاستگاه رسوبی داشته و دامنه سنی آن‌ها همانطور که ذکر گردید از زمان پرمین- تریاس تا کرتاسه پائین می‌باشد.

در طی مطالعات اکتشافی صورت گرفته در این محدوده دو زون کانه‌سازی اصلی شناسایی شد که در زیر شرح هر کدام آمده است [موحدی، ۱۳۸۹]:

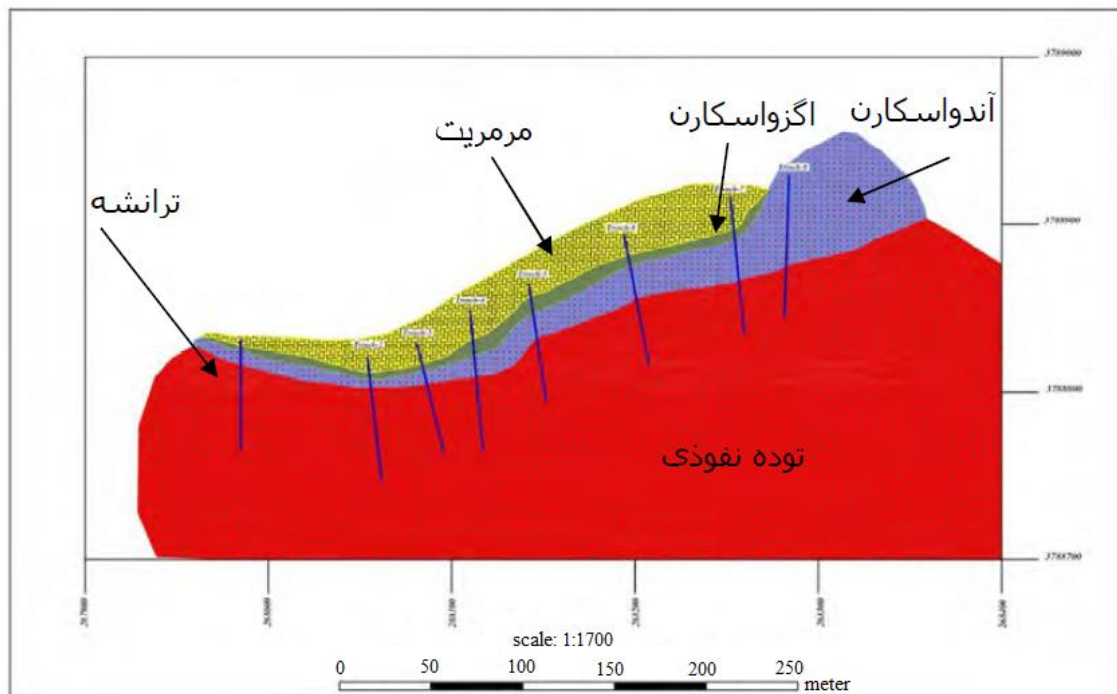
۱- کانه‌سازی در مرز توده نفوذی و سنگ همبر و داخل توده نفوذی که تشکیل آندواسکارن را داده است. میزان کانه‌سازی به طرف داخل توده، کاهش می‌یابد و در نهایت به توده نفوذی می‌رسد.

۲- کانه‌سازی در مرز توده نفوذی و سنگ همبر و داخل سنگ همبر که تشکیل اگزواسکارن را داده است. میزان کانه‌سازی به طرف داخل سنگ همبر، کاهش می‌یابد و در نهایت به سنگ مرم‌ریتی فاقد کانه‌زائی ختم می‌گردد.

در محدوده اسکارن عشوند تعداد ۸ ترانسه اکتشافی (شکل‌های ۲-۱۰، ۲-۱۱ و ۲-۱۲) با حجم تقریبی ۶۰۰ متر مکعب حفر گردید. کلیه ترانسه‌های حفر شده در این محدوده به قسمی طراحی گردیدند که هر چهار بخش سنگ همبر مرم‌ریتی، اگزواسکارن، آندواسکارن و توده گرانیتی را قطع کنند

^۱ Metamorphic Rocks

تا بتوان دید مناسبی نسبت به تغییر عناصر در این چهار بخش به دست آورد. از مطالعه نمودارهای مربوط به این ترانسه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که تغییرات عناصر از توده گرانیتی به طرف آندواسکارن و آگزواسکارن و در نهایت سنگ همبر مرمریتی به صورت تدریجی می‌باشد به طوری که به طرف آندواسکارن و آگزواسکارن به صورت افزایشی است و در نهایت به داخل سنگ همبر به صورت کاهشی است تا در نهایت به ترکیب کلارک زمینه مرمریت نزدیک می‌شود. نکته جالبی که از مطالعه این روند افزایش و کاهشی عناصر در قسمت‌های مختلف اسکارن به دست می‌آید، تغلیظ عناصری خاص در یکی از واحدهای آندواسکارن یا آگزواسکارن می‌باشد. به طوری که عناصری مانند روی، طلا و مس در آگزواسکارن ماده معدنی تغلیظ می‌گردد و عنصری مانند آهن در آندواسکارن ماده معدنی تجمع می‌کند. در شکل شماره (۲-۱۰) کروکی زمین‌شناسی محدوده اسکارن عشوند و موقعیت سنگ همبر مرمریتی، آگزواسکارن، آندواسکارن و توده گرانیتی و همچنین موقعیت ترانسه‌های حفر شده در آن آورده شده است.



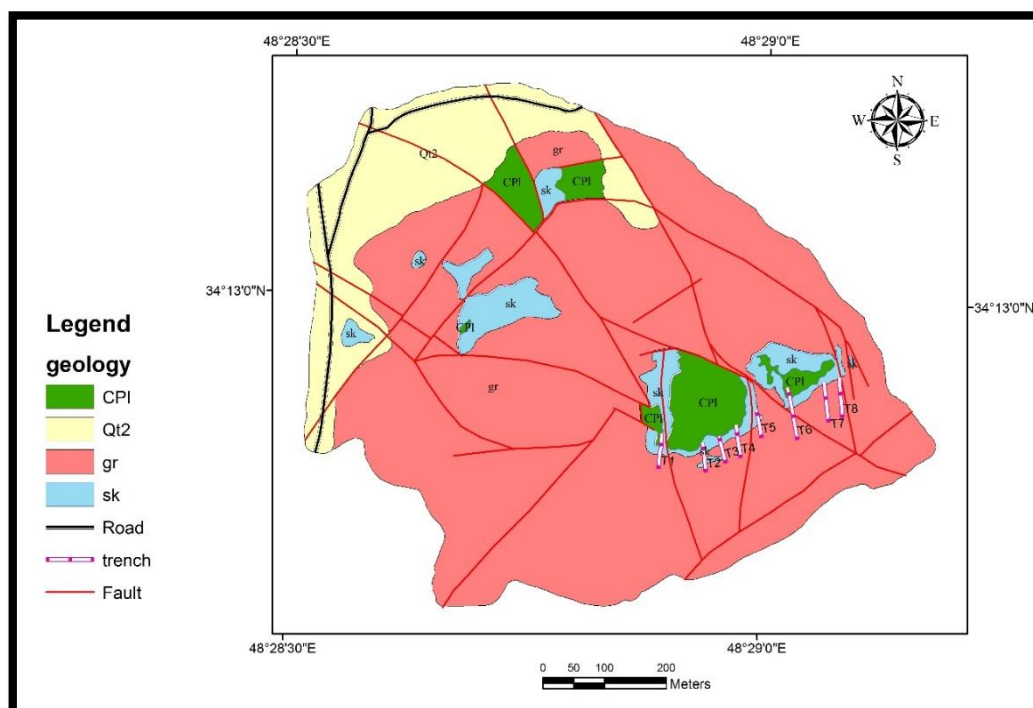
شکل (۲-۱۰): مقطع عرضی زمین‌شناسی محدوده اسکارن عشوند و موقعیت سنگ همبر مرمریتی، آگزواسکارن، آندواسکارن و توده گرانیتی و همچنین موقعیت ترانسه‌های حفر شده در آن [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]



شکل (۲-۱۱): دورنمایی از محدوده مورد مطالعه و موقعیت ترانشه‌های حفر شده در آن (دید به سمت شرق)
[سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]



شکل (۲-۱۲): نمایی از موقعیت ترانشه‌های حفر شده در محدوده مورد مطالعه (دید به سمت غرب) [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]



شکل (۲-۱۳): موقعیت قرارگیری ترانشه‌های حفر شده در نقشه ۱:۱۰۰۰ منطقه مورد مطالعه [سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۹۰]

۲-۵-۱ مشخصات ترانشه‌های حفر شده بر روی اسکارن عشوند

۲-۵-۱-۱ ترانشه شماره یک

در محل مختصات $X=267991$, $Y=3788832$ ترانشه‌ای به طول ۵۷ متر، عرضی یک متر و عمق یک متر حفر شد که هر چهار واحد آهکی، اگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه برداری کاملی از این ترانشه به عمل آمد. در ۲۲ متر اول، ترانشه دارای امتداد NS بوده و در ۸ متر بعدی، امتداد ترانشه S18W و در ۲۷ متر بعدی امتداد ترانشه S5W می باشد.

جدول (۲-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانشه شماره یک حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-1	Exo Skarn	Au (PPb)	3.1	2.58
		Cu (PPm)	26	10.16
		Fe (PPm)	15810	8837.79
		Zn (PPm)	307.7	86.15
	Endo Skarn	Au (PPb)	8.9	2.89
		Cu (PPm)	1588	201.77
		Fe (PPm)	149700	25418.56
		Zn (PPm)	1560	248.6

۲-۵-۲ ترانشه شماره دو

در محل مختصات $X=268057$, $Y=3788816$ ترانشه‌ای به طول ۴۹ متر، عرضی یک متر و عمق یک و نیم متر، با امتداد S6E بر روی توده گرانیتی و همچنین سنگ میزبان آهکی حفر شده که هر چهار واحد آهکی، اگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه برداری کاملی از این ترانشه به عمل آمد.

جدول (۳-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره دو حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-2	Exo Skarn	Au (PPb)	2.8	2.17
		Cu (PPm)	89	36.14
		Fe (PPm)	139400	76867.44
		Zn (PPm)	132.8	72.75
	Endo Skarn	Au (PPb)	3.1	2.23
		Cu (PPm)	21	16.4
		Fe (PPm)	189000	142548.33
		Zn (PPm)	97.77	63.07

۲-۵-۳ ترانسه شماره سه

در محل مختصات $X=268083$ ، $Y=3788827$ ترانسه‌ای به طول ۴۵ متر، عرض یک متر و عمق یک متر، با امتداد S14E بر روی توده گرانیتی و همچنین سنگ میزبان آهکی حفر شد که هر چهار واحد آهکی، اگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه‌برداری کاملی از این ترانسه به عمل آمد.

جدول (۴-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانسه شماره سه حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-3	Exo Skarn	Au (PPb)	8.3	5.14
		Cu (PPm)	562	170.64
		Fe (PPm)	150600	11484.81
		Zn (PPm)	2019	895.18
	Endo Skarn	Au (PPb)	3.8	2.78
		Cu (PPm)	1104	229.54
		Fe (PPm)	163700	86679.52
		Zn (PPm)	775.5	217.92

۴-۵-۲ ترانشه شماره چهار

در محل مختصات $X=268111$, $Y=3788846$ ترانشه‌ای به طول ۵۵ متر، عرض یک متر و عمق یک متر، با امتداد S7E بر روی توده گرانیتی و همچنین سنگ میزبان آهکی حفر شد که هر چهار واحد آهکی، اگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه‌برداری کاملی از این ترانشه به عمل آمد.

جدول (۴-۵): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانشه شماره چهار حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-4	Exo Skarn	Au (PPb)	3770	363.45
		Cu (PPm)	18404	2271.6
		Fe (PPm)	133700	24645.44
		Zn (PPm)	7707	1104.17
	Endo Skarn	Au (PPb)	60	16.53
		Cu (PPm)	51500	3970.07
		Fe (PPm)	513900	196573.55
		Zn (PPm)	5555	466.95

۵-۵-۲ ترانشه شماره پنج

در محل مختصات $X=268144$, $Y=3788869$ ترانشه‌ای به طول ۴۵ متر، عرض یک متر و عمق یک متر، با امتداد S10E بر روی توده گرانیتی و همچنین سنگ میزبان آهکی حفر شد که هر چهار واحد آهکی، اگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه‌برداری کاملی از این ترانشه به عمل آمد.

جدول (۲-۶): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانشه شماره پنج حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-5	Exo Skarn	Au (PPb)	8.9	4.81
		Cu (PPm)	4188	1365.17
		Fe (PPm)	244300	180192.56
		Zn (PPm)	106.4	63.3
	Endo Skarn	Au (PPb)	6.5	3.09
		Cu (PPm)	261	46.91
		Fe (PPm)	190300	44833.62
		Zn (PPm)	370.6	52.76

۲-۵-۶ ترانشه شماره شش

در محل مختصات $X=268194$, $Y=3788906$ ترانشه‌ای به طول ۸۷,۵ متر، عرض یک متر و عمق یک متر، با امتداد S11E بر روی توده گرانیتی و همچنین سنگ میزبان آهنی حفر شد که هر چهار واحد آهنی، اگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه‌برداری کاملی از این ترانشه به عمل آمد.

جدول (۲-۷): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانشه شماره شش حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-6	Exo Skarn	Au (PPb)	61	20.71
		Cu (PPm)	46060	8237.23
		Fe (PPm)	270100	115198.8
		Zn (PPm)	16615	4820.12
	Endo Skarn	Au (PPb)	6.9	2.78
		Cu (PPm)	3301	574.44
		Fe (PPm)	201900	120930.48
		Zn (PPm)	5118	536.65

۷-۵-۲ ترانشه شماره هفت

در محل مختصات $X=268253$ ، $Y=3788915$ ترانشه‌ای به طول ۶۶ متر، عرض یک متر و عمق یک متر، با امتداد S6E بر روی توده گرانیتی و همچنین سنگ میزبان آهکی حفر شد که هر چهار واحد آهکی، اگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه‌برداری کاملی از این ترانشه به عمل آمد.

جدول (۸-۲): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانشه شماره هفت حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-7	Exo Skarn	Au (PPb)	1288	220.86
		Cu (PPm)	33650	19297.68
		Fe (PPm)	632900	556517.93
		Zn (PPm)	15670	5729.88
	Endo Skarn	Au (PPb)	51.5	10.09
		Cu (PPm)	26150	2402.33
		Fe (PPm)	283600	73262.92
		Zn (PPm)	6367.5	614.05

۲-۵-۸ ترانشه شماره هشت

در محل مختصات $X=268279$ ، $Y=3788922$ ترانشه‌ای به طول ۶۵ متر، عرض یک متر و عمق یک متر، با امتداد S4E بر روی توده گرانیتی و همچنین سنگ میزبان آهکی حفر شد که هر چهار واحد آهکی، آگزواسکارن، آندواسکارن و همچنین توده گرانیتی را قطع نمود و نمونه‌برداری کاملی از این ترانشه به عمل آمد.

جدول (۲-۹): مقادیر حداکثر و میانگین عناصر طلا، مس، آهن و روی در ترانشه شماره هشت حفر شده در محدوده اسکارن عشوند

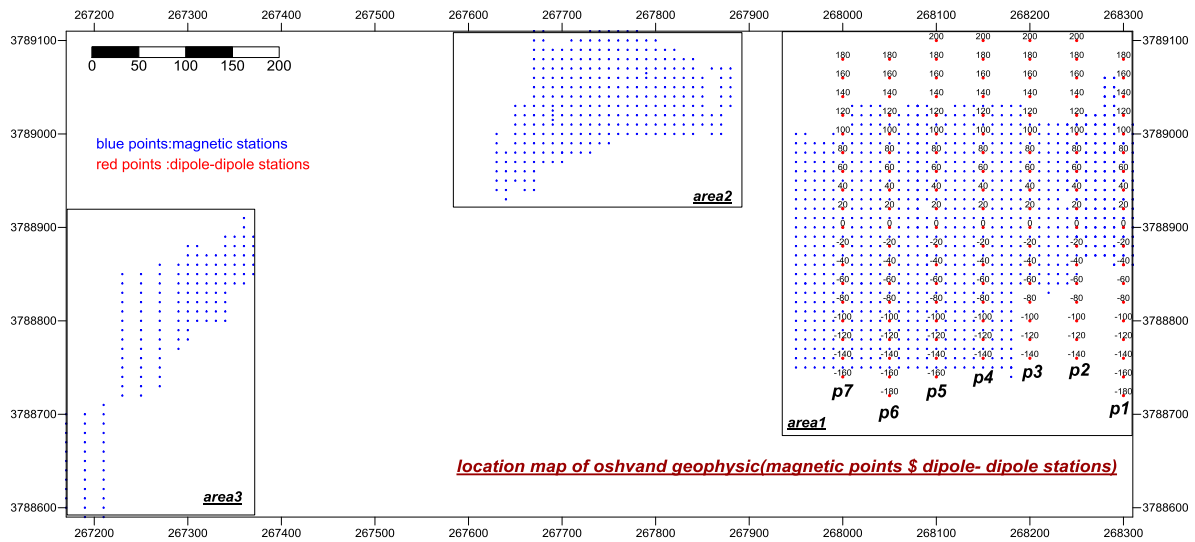
Trenchs Name	Lithology	Element	Maximum	Average
Trench-8	Endo Skarn	Au (PPb)	1194	200.25
		Cu (PPm)	209400	18732.04
		Fe (PPm)	704300	318747.86
		Zn (PPm)	6235	827.11

فصل سوم

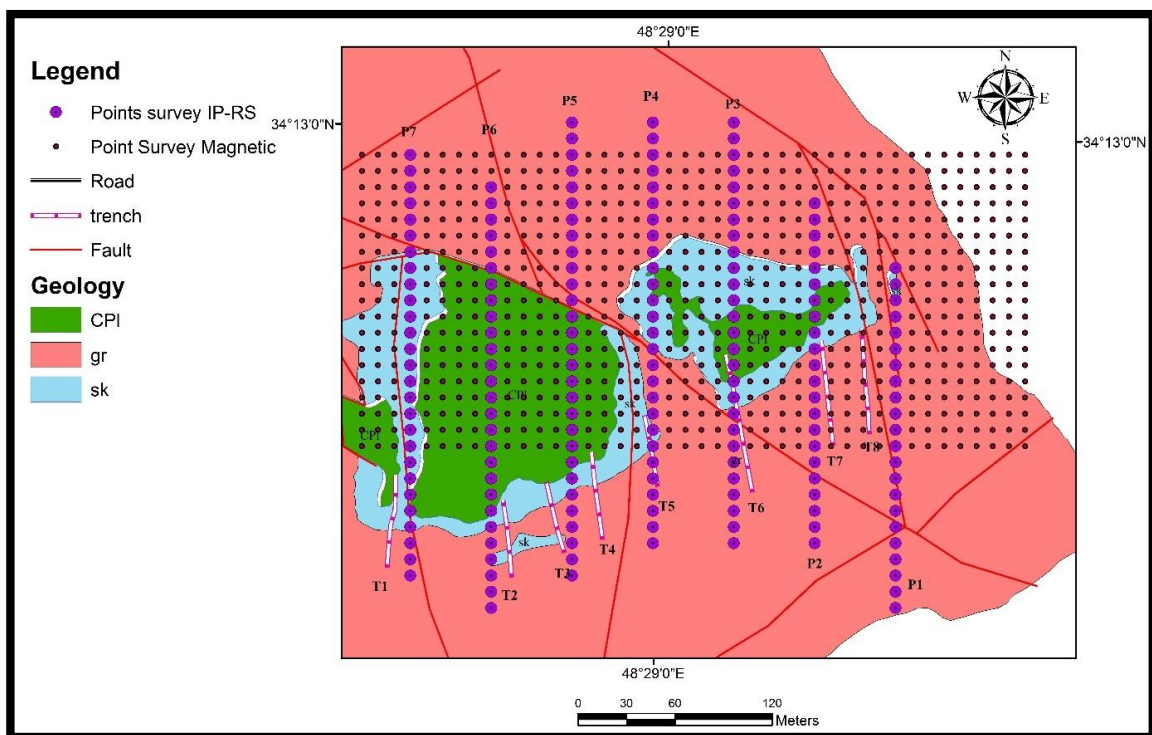
مطالعات معناطیس نحی در منطقه مورد مطالعه

هدف از برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی، جست‌وجوی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در زیر سطح زمین است. اگرچه اکثر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها به‌صورت مشخص غیرمغناطیس هستند؛ ولی انواع خاصی از سنگ‌ها دارای مقدار کافی از کانی‌های مغناطیسی‌اند؛ که می‌توانند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی قابل‌توجهی تولید کنند. روش مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی است که به‌طور وسیع برای اکتشاف هیدروکربن‌ها و ذخایر معدنی (Thoman et al, 1997- Oldenburg et al, 2000- Ferneyhough, 2000) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اکتشاف ذخایر معدنی، اغلب اندازه‌گیری مغناطیسی به‌صورت مستقیم برای پی‌جویی کانی‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما این روش برای اکتشاف کانی‌هایی که خود غیرمغناطیسی هستند، اما با کانی‌های مغناطیسی همراه هستند؛ نیز به‌کار می‌رود. با ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری که امروزه به‌کار گرفته می‌شود، حتی می‌توان تغییرات بسیار جزئی شدت میدان مغناطیسی که در رابطه با سنگ‌های رسوبی نزدیک سطح زمین باشند؛ را نیز اندازه‌گیری کرد [کامکار روحانی و بیکی، ۱۳۸۸].

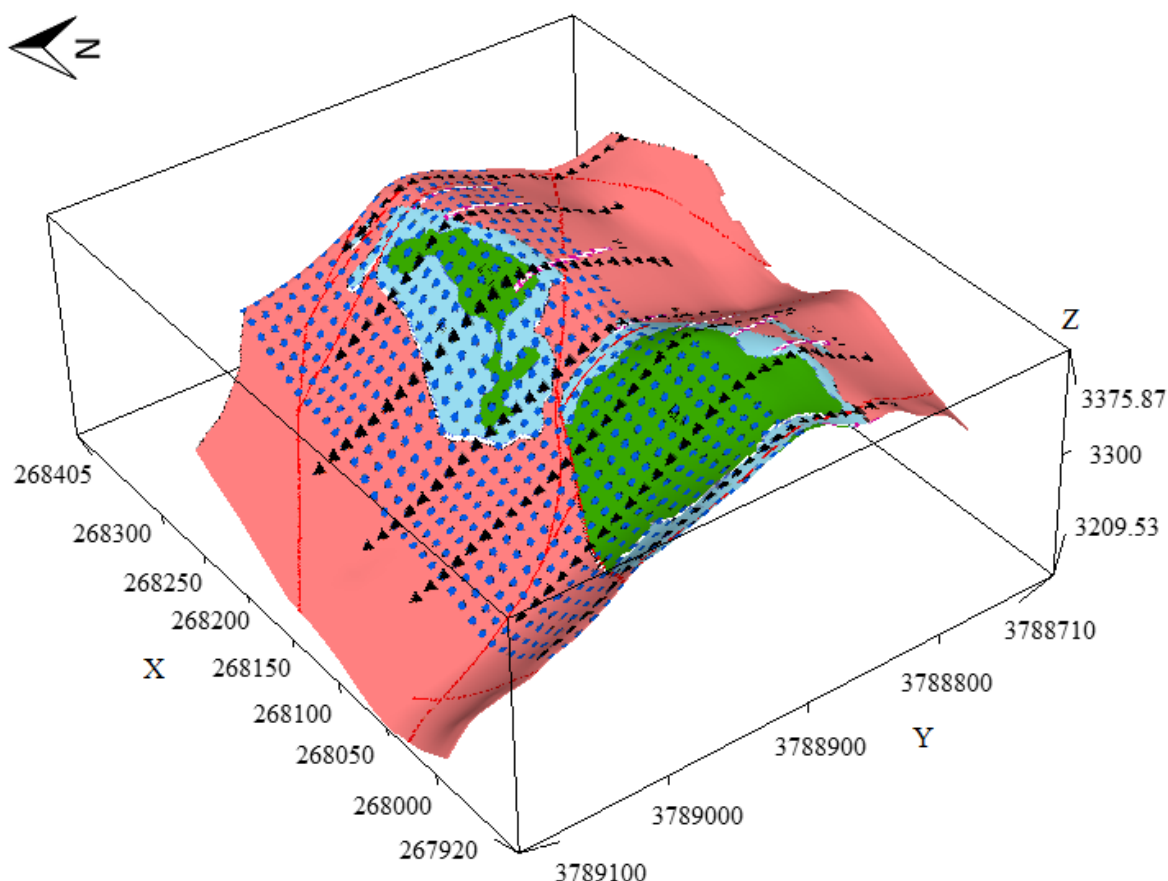
یکی از اهداف تفسیر داده‌های میدان مغناطیسی، تعیین محل و عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌باشد. داده‌های مغناطیسی زمینی مورد استفاده در این پژوهش را سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، با دستگاه مغناطیس‌سنج پروتون در سال ۱۳۹۰ برداشت کرده است. در منطقه مورد مطالعه مجموعاً ۱۰۶۰ ایستگاه برداشت شد تا با استفاده از تمامی داده‌ها، وضعیت قرارگیری توده‌ها در عمق بررسی شود [جعفری، ۱۳۹۰]. (شکل (۳-۱) مختصات برداشت‌های مغناطیس‌سنجی و موقعیت پروفیل‌های دوقطبی- دوقطبی بر روی آن را نشان می‌دهد، شکل (۳-۲) و (۳-۳) نقاط برداشت مغناطیس و پروفیل‌های دوقطبی- دوقطبی را بر روی نقشه ۱:۱۰۰۰ منطقه مورد مطالعه به‌همراه توپوگرافی را نشان می‌دهد)



شکل (۳-۱): مختصات برداشت‌های مغناطیس و موقعیت پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی بر روی آن



شکل (۳-۲): نمایی از موقعیت قرارگیری ترانسه‌ها نسبت به نقاط برداشت مقاومت‌ویژه و IP، مغناطیس، واحدهای زمین‌شناسی و ساختارهای گسله بر روی بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰ منطقه مورد مطالعه



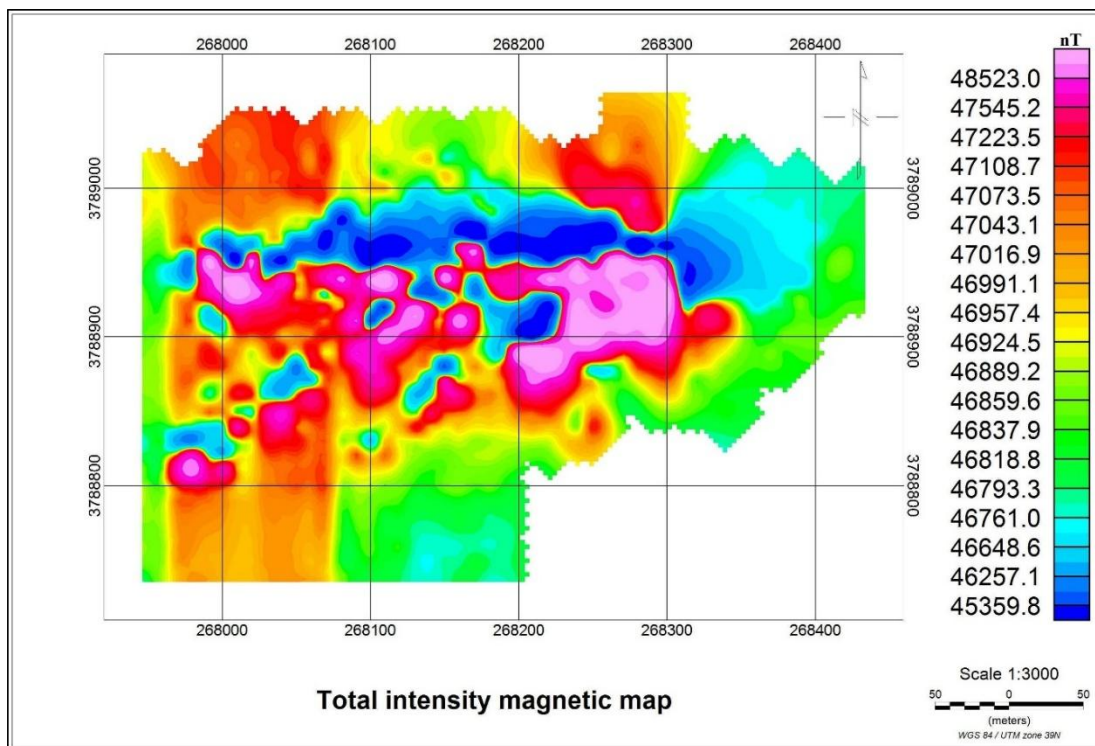
شکل (۳-۳): نقاط برداشت مغناطیس و پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی بر روی نقشه ۱:۱۰۰۰ منطقه مورد مطالعه به-همراه توپوگرافی (دید از شمال غرب)

فیلترهای متعددی برای تعیین مرزها و عمق آنومالی‌های مغناطیسی وجود دارند؛ که از جمله آن‌ها می‌توان روش فیلترهای ادامه فروسو و فراسو، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، برگردان به قطب و مشتقات افقی و قائم را نیز نام برد. این فیلترها روش‌های ریاضی شناخته‌شده‌ای هستند؛ که بر پایه مشتقات میدان پتانسیل استوار می‌باشند. در این پژوهش، از روش‌های برگردان به قطب، حذف روند، فیلتر ادامه فراسو (گسترش رو به بالا)، فیلتر ادامه فروسو (گسترش رو به پایین) و سیگنال تحلیلی و مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی به‌منظور بررسی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

۲-۳ نقشه‌های حاصل از اعمال فیلترها و تفسیر داده‌های مغناطیسی

شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه به میدان مغناطیسی و پدیده مغناطیسی باقیمانده در سنگ‌ها بستگی دارد که در ارتباط با میزان کانی‌های آهن‌دار در سنگ‌ها بوده و در سنگ‌های مختلف تفاوت دارد. بنابراین سنگ‌هایی که دارای این کانی‌ها باشند شدت میدان بیشتری را نشان داده و به صورت بی‌هنجاری مغناطیسی نمایان می‌گردند. بدیهی است که در سنگ‌های نفوذی، کانی‌های آهن‌دار نسبت به سنگ‌های رسوبی بیشتر می‌باشند؛ لذا با اندازه‌گیری تغییرات کل میدان مغناطیسی علاوه بر مشخص نمودن بی‌هنجاری‌های مغناطیسی حاصل از تجمع کانی‌های آهن‌دار می‌توان کنتاکت و گسل‌های احتمالی را ردیابی کرد. مقادیر زاویه میل و زاویه انحراف برای منطقه مورد مطالعه بر اساس موقعیت جغرافیایی به ترتیب ۵۲/۱ و ۴/۱ است. کمترین مقدار ۴۱۸۹۸ نانوتسلا و بیش‌ترین مقدار ۵۲۱۸۵ نانوتسلا اندازه‌گیری شده است. متوسط شدت میدان مغناطیسی در محدوده ۴۶۹۰۰ نانوتسلا به دست آمده است. اختلاف شدت میدان در این محدوده حدود ۱۱۰۰۰ نانوتسلا است که نشان‌دهنده نفوذپذیری مغناطیسی بالا و نزدیک بودن توده به سطح زمین می‌باشد [جعفری، ۱۳۹۰].

پس از برداشت داده‌ها و اعمال تصحیحات اولیه و چشمی روی داده‌ها؛ از جمله حذف تغییرات روزانه میدان مغناطیسی که با برداشت میدان در یک ایستگاه پایه نزدیک به منطقه مورد بررسی صورت گرفته، با استفاده از نرم‌افزار Oasis Montaj نقشه میدان مغناطیسی کل منطقه تهیه شده است (شکل ۳-۴). برای آماده کردن داده‌ها به منظور اجرای برگردان، لازم است که ابتدا ناهنجاری باقی‌مانده به دست آید و سپس این داده‌ها به اندازه لازم هموار شوند. در ادامه، به تفکیک این دو مرحله توضیح داده می‌شوند. میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در هر نقطه، مجموع میدان مغناطیسی کره زمین، میدان منطقه‌ای ناشی از ناهنجاری‌های بزرگ مقیاس پوسته (میدان منطقه‌ای) و ناهنجاری‌های محدود محلی است. از آنجا که در این تحقیق، هدف مدل‌سازی توده‌های محلی است، باید میدان‌های ذکر شده را به طریقی حذف کرد.



شکل (۳-۴): نقشه میدان مغناطیسی کل منطقه مورد مطالعه

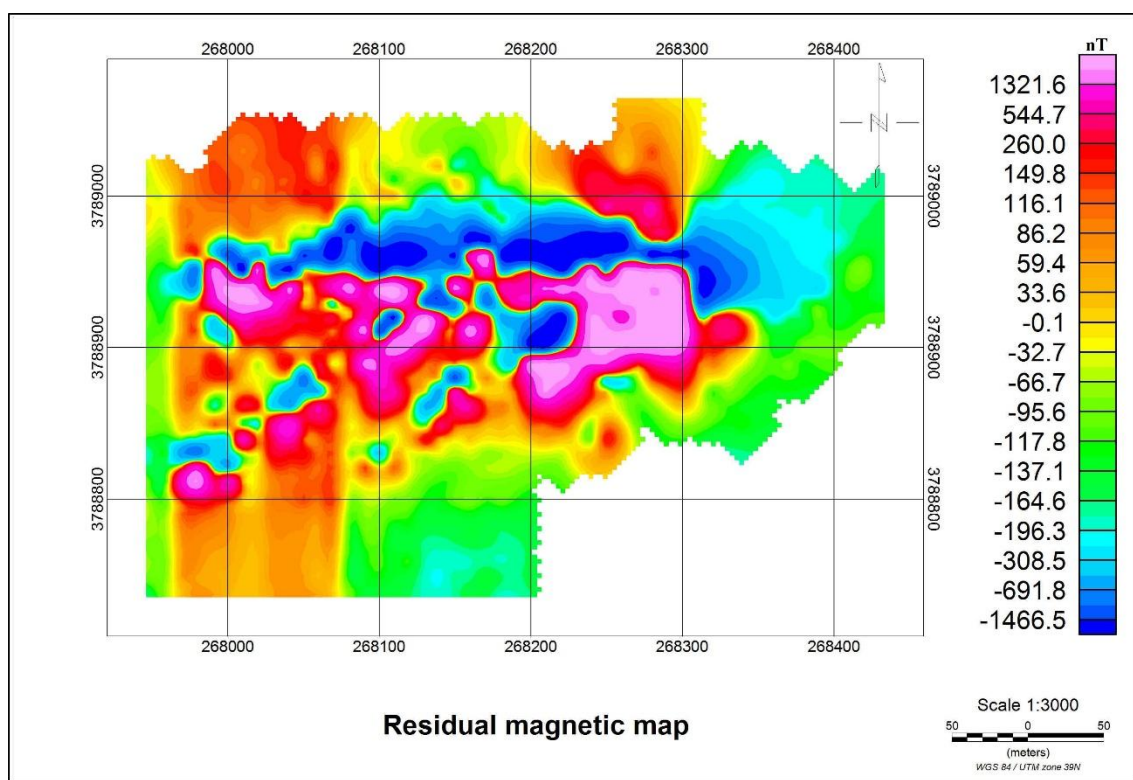
۳-۲-۱ تصحیح IGRF^۱ (میدان مرجع ژئومغناطیس جهانی)

برای حذف میدان مغناطیسی ناحیه‌ای زمین، به صورت انحصاری یک مدل از میدان ناحیه‌ای زمین معروف به IGRF از داده‌ها عرضه می‌شود. اولین قدم در آماده‌سازی داده‌های مشاهده‌ای برای اجرای مدل‌سازی، حذف میدان IGRF و میدان منطقه‌ای و به دست آوردن ناهنجاری باقی‌مانده است. با کم کردن شدت میدان IGRF از همه داده‌های اندازه‌گیری شده، ناهنجاری باقی‌مانده مورد نیاز که در حکم ورودی به برنامه برگردان داده می‌شود، حاصل می‌گردد. در این پژوهش فرض این است که مغناطیس بازمند حضور ندارد و همه مغناطیدگی ناشی از القا و در تمام توده منشأ یکنواخت است. زوایای میل و انحراف مغناطیدگی منشأ نیز برابر با مقادیر به دست آمده فوق در نظر گرفته می‌شود.

^۱ International Geomagnetic Reference Field

همان طور که بیان شد، میدان منطقه‌ای میدان مغناطیسی ناشی از توده‌های بزرگ و عمیق ناحیه‌ای است. بنابراین در نقطه‌ای از شبکه داده‌های برداشت‌شده که ناهنجاری‌های محلی وجود نداشته باشد (که اصطلاحاً به آن زمینه هم گفته می‌شود)؛ میدان مشاهده‌شده مجموع میدان‌های IGRF و منطقه‌ای خواهد بود. به این ترتیب با کم کردن میدان IGRF (۴۶۹۵۶ نانو تسلا) از مقدار میدان اندازه‌گیری شده در یک نقطه از زمینه، می‌توان میدان منطقه‌ای را به دست آورد [یوسفی و اسکویی، ۱۳۹۲].

تصحیح مغناطیسی باقیمانده اولین و مهم‌ترین تصحیح در پردازش داده‌ها است؛ که اثر میدان مغناطیسی منطقه‌ای زمین را حذف می‌کند و میدان به‌جامانده، فقط میدان ناشی از بی‌هنجاری‌های موجود خواهد بود. در شکل (۵-۳) نقشه پتانسیل مغناطیسی پس از اعمال تصحیح IGRF آورده شده است.

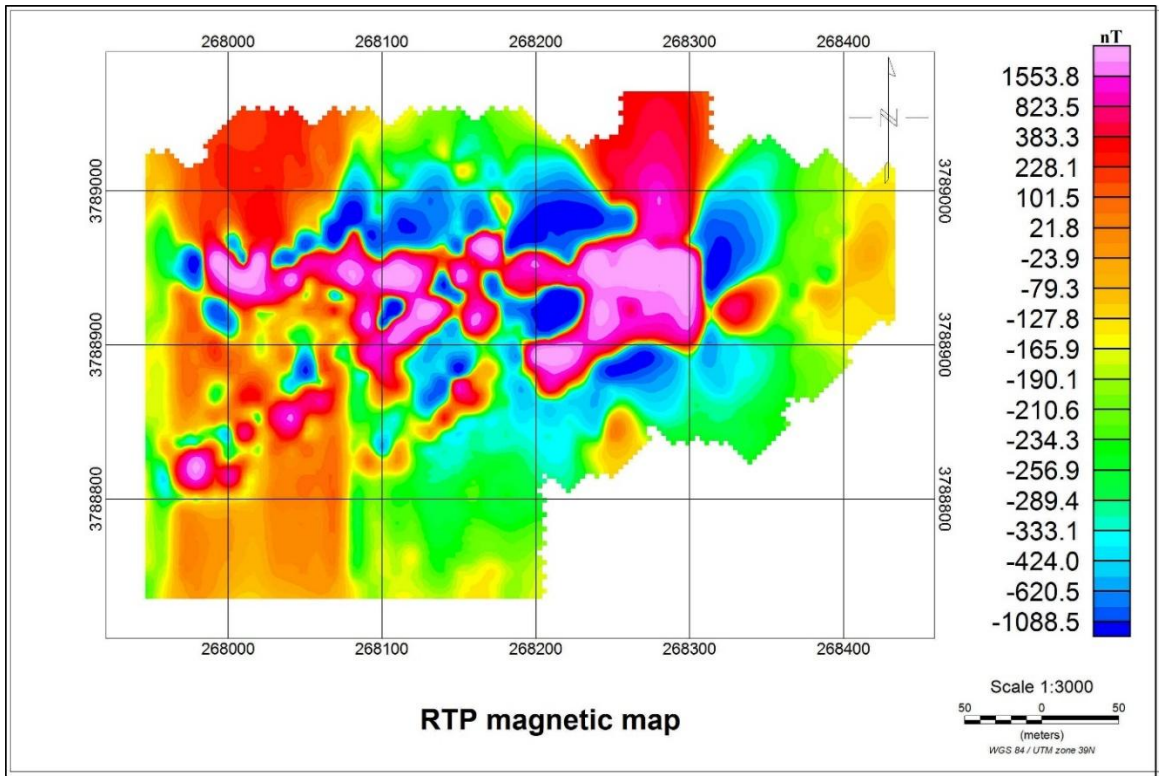


شکل (۵-۳): نقشه تصحیح میدان کل ناحیه از مغناطیس زمین، (IGRF)

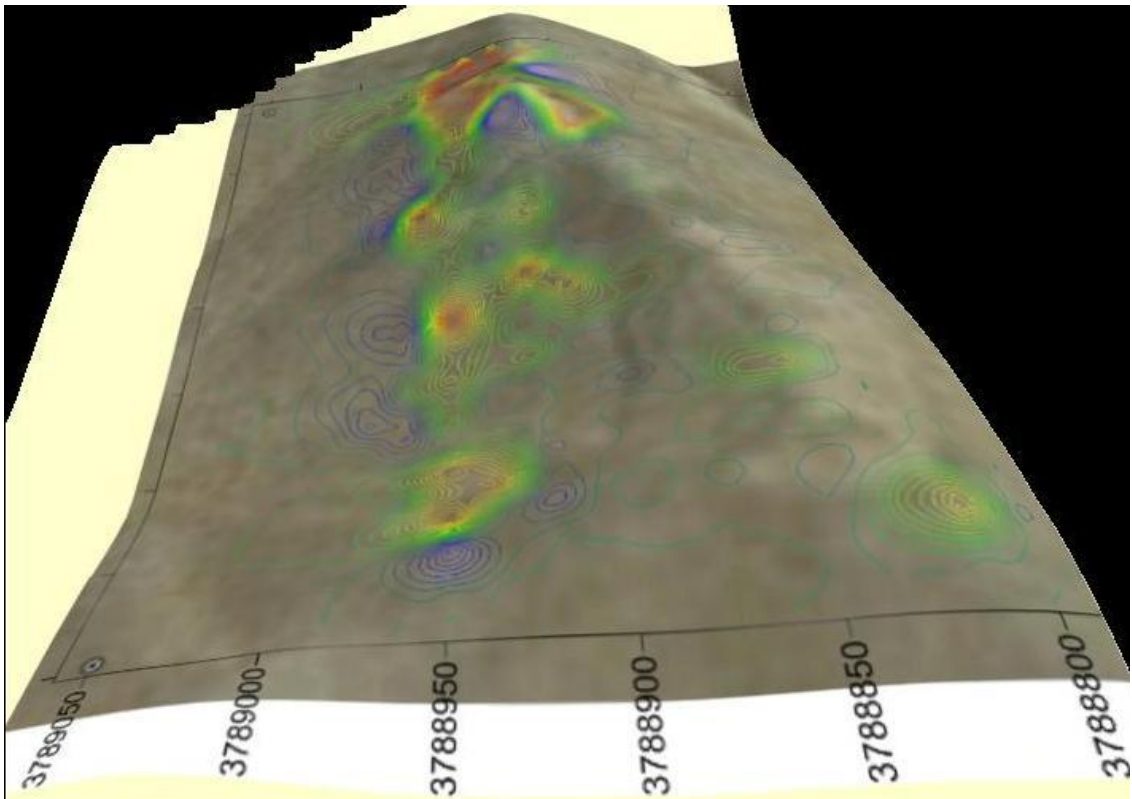
۳-۲-۲ برگردان به قطب^۱

وقتی که میدان زمین متمایل باشد، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در جهت القا دارای شکل نامتقارن متناسب با منبع آن‌ها هستند، اما وقتی که میدان القایی قائم باشد، بی‌هنجاری‌های القایی مستقیماً در بالای منبع آن قرار می‌گیرند. به‌غیر از مواردی که توده در قطبین مغناطیسی واقع است، سایر بی‌هنجاری‌ها مغناطیسی شکلی نامتقارن دارند. با استفاده از روش برگردان به قطب، داده‌های مغناطیسی منطقه به یکی از دو محل قطب مغناطیسی (خطوط نیروی مغناطیسی به‌صورت قائم) یا استوای مغناطیسی (خطوط نیروی مغناطیسی به‌صورت افقی) منتقل می‌شوند. لذا برای دستیابی به موقعیت دقیق بی‌هنجاری‌ها، نیاز به نقشه‌های برگردان به قطب است. این کار با اعمال زاویه میل و انحراف منطقه بر داده‌های شدت میدان امکان‌پذیر است. در این حالت بی‌هنجاری‌های به‌وجود آمده در اثر القاء مغناطیسی به‌طور عمودی در بالای منبع ایجادکننده خود قرار می‌گیرند [Clark, 1999]. در شکل (۳-۶) و (۷-۳) نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی زمینی منطقه عشوند نشان داده‌شده است.

^۱ Reduction to the pole



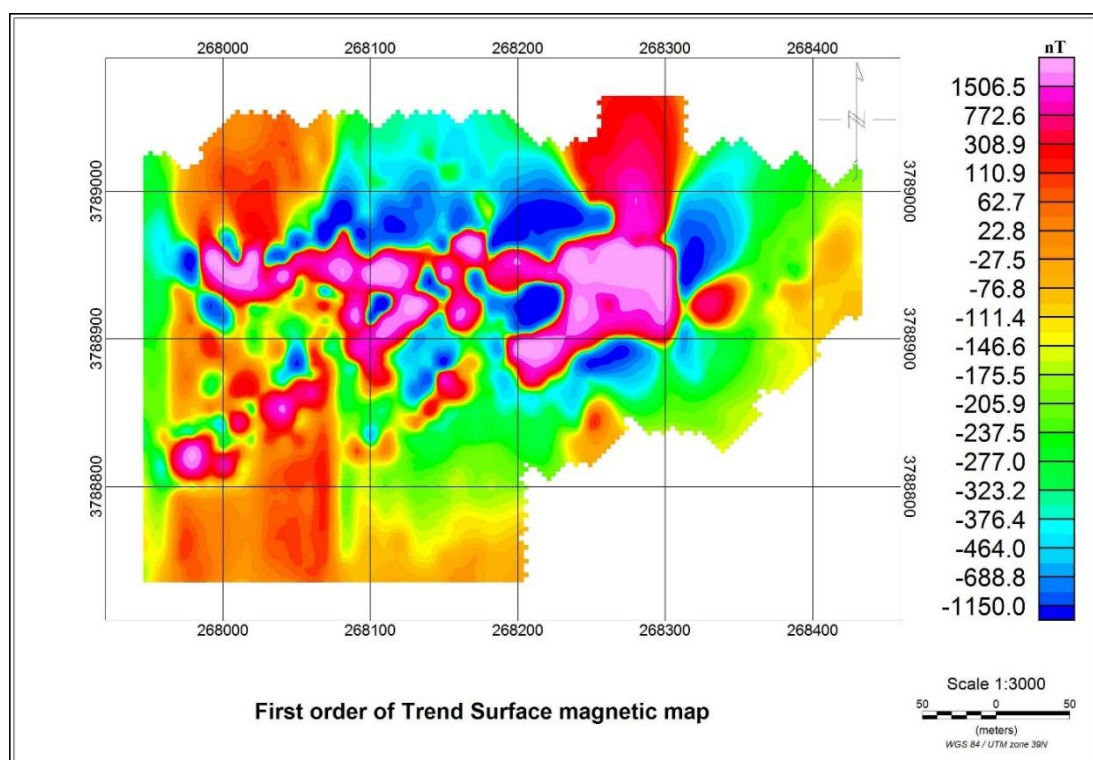
شکل (۳-۶): نقشه برگردان به قطب محدوده مورد مطالعه



شکل (۳-۷): نقشه برگردان به قطب بر روی تصویر Google به همراه توپوگرافی

۳-۲-۳ نقشه‌های باقیمانده (Residual map)

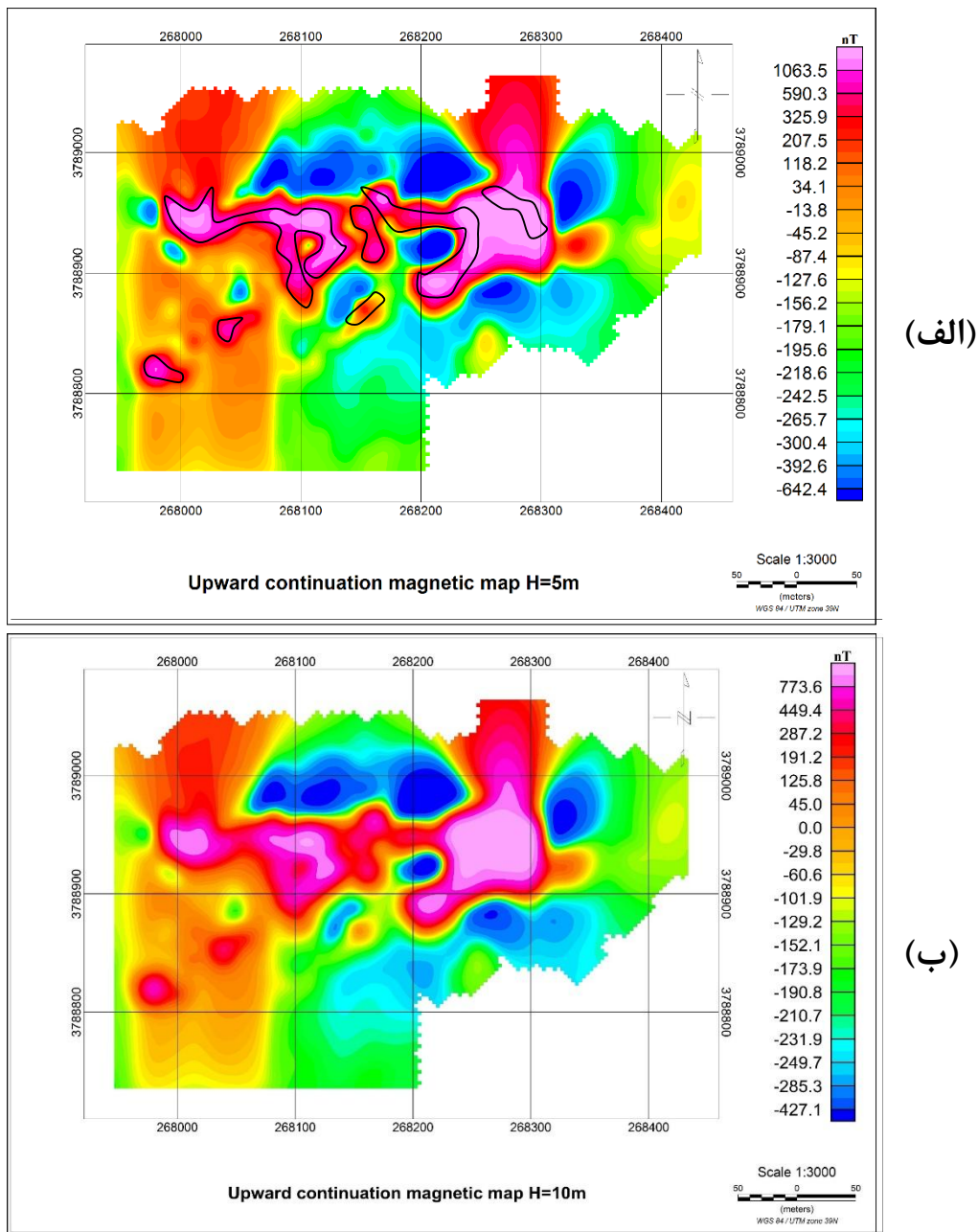
به منظور تفکیک بی‌هنجاری‌ها باید نقشه باقی‌مانده تولید و بررسی شود. این نقشه از برازش یک سطح به صورت صفحه یا رویه و حذف یک روند از داده‌ها حاصل می‌شود؛ که این سطح می‌تواند درجه‌ی یک، دو، سه و یا بیشتر باشد. با بالا رفتن درجه، بی‌هنجاری‌های سطحی نمایان‌تر می‌شود؛ این فرآیند بعد از اجرای فیلتر برگردان به قطب انجام شد؛ که نتایج آن در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. انتخاب درجه حذف روند بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و اطلاعات از میزان عمق کانی‌سازی صورت می‌پذیرد. در پژوهش حاضر روند سطحی درجه‌ی یک برای حذف بی‌هنجاری‌های محلی در نظر گرفته شد. چرا که تفاوت چندانی میان درجات مختلف حذف روند برای نشان دادن بی‌هنجاری‌های محلی، وجود نداشت.



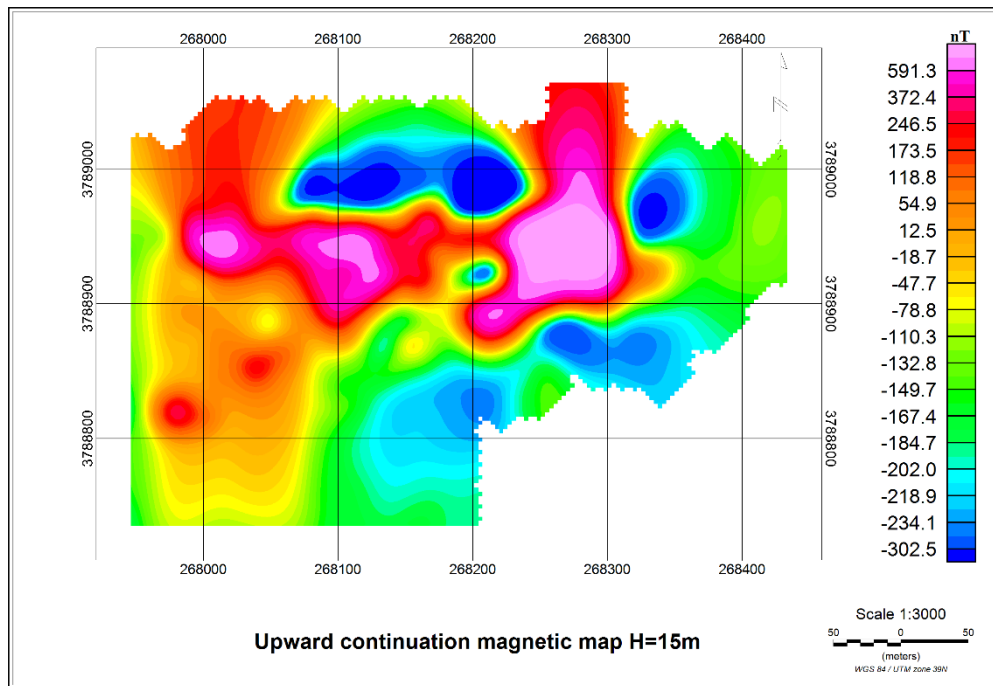
شکل (۳-۸): نقشه باقی‌مانده حاصل از اعمال فیلتر حذف روند سطحی درجه یک

۳-۲-۴ فیلتر ادامه به سمت بالا

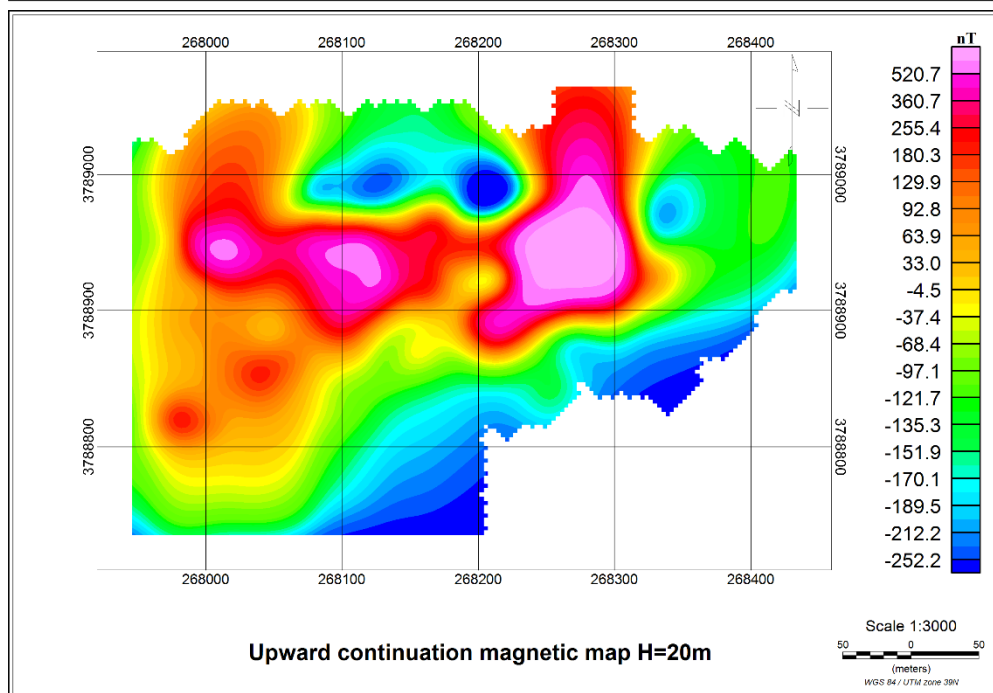
نقشه‌های ادامه به سمت بالا (فراسو) اثر بی‌هنجاری‌های سطحی با فرکانس بالا را حذف و به این طریق اثر بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر را بهتر آشکار می‌سازد [Gunn, 1996]. در شکل‌های (۳-۹) تا (۳-۱۴) نقشه‌های ادامه فراسو به ازای ارتفاعات ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ متر نشان داده شده است.



شکل (۳-۹): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع (الف) ۵ و (ب) ۱۰ متری سطح زمین

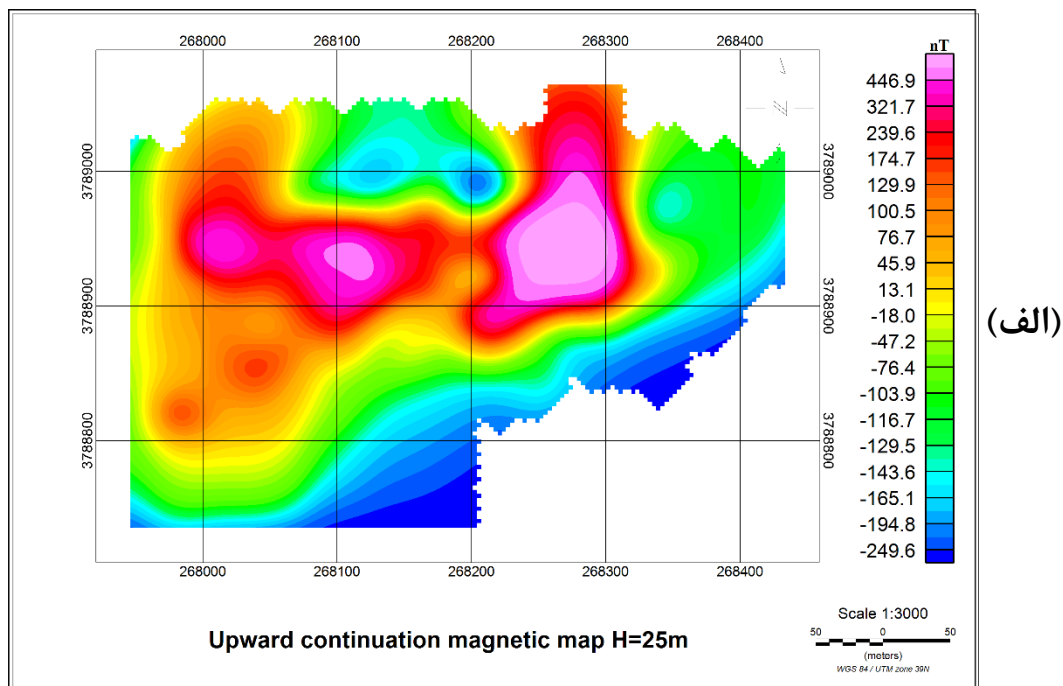


(الف)

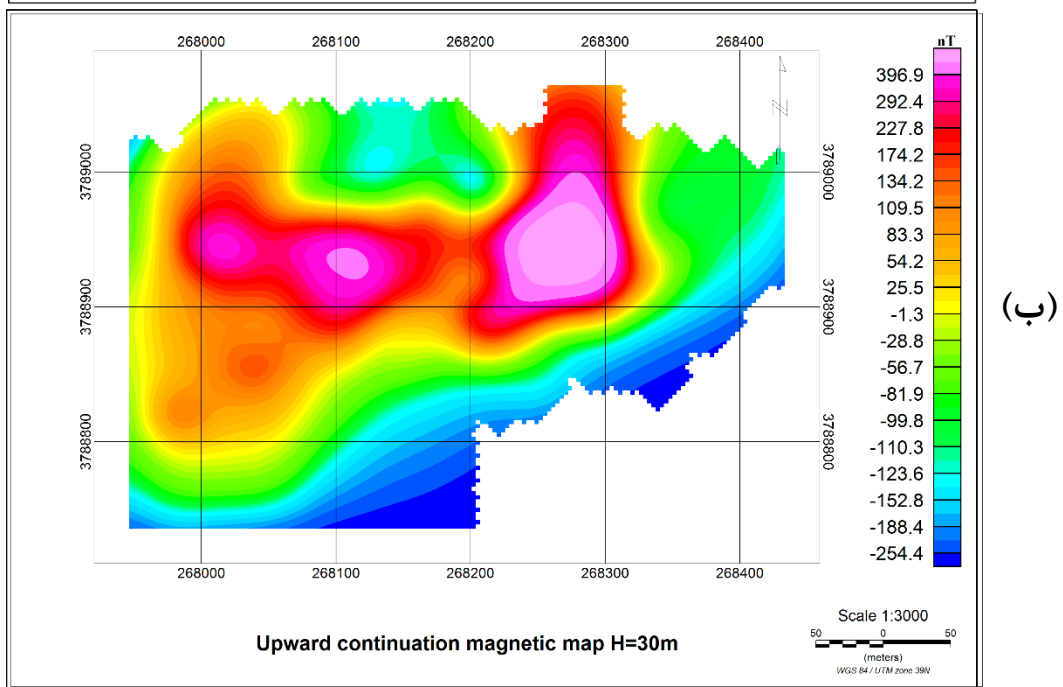


(ب)

شکل (۳-۱۰): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع الف) ۱۵ و ب) ۲۰ متری سطح زمین

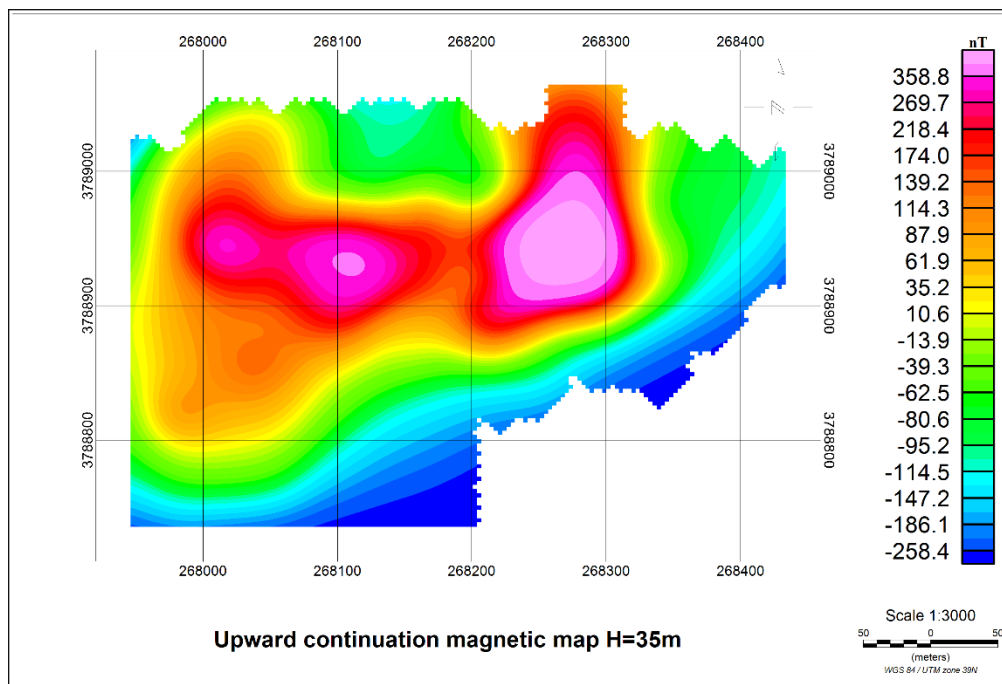


(الف)

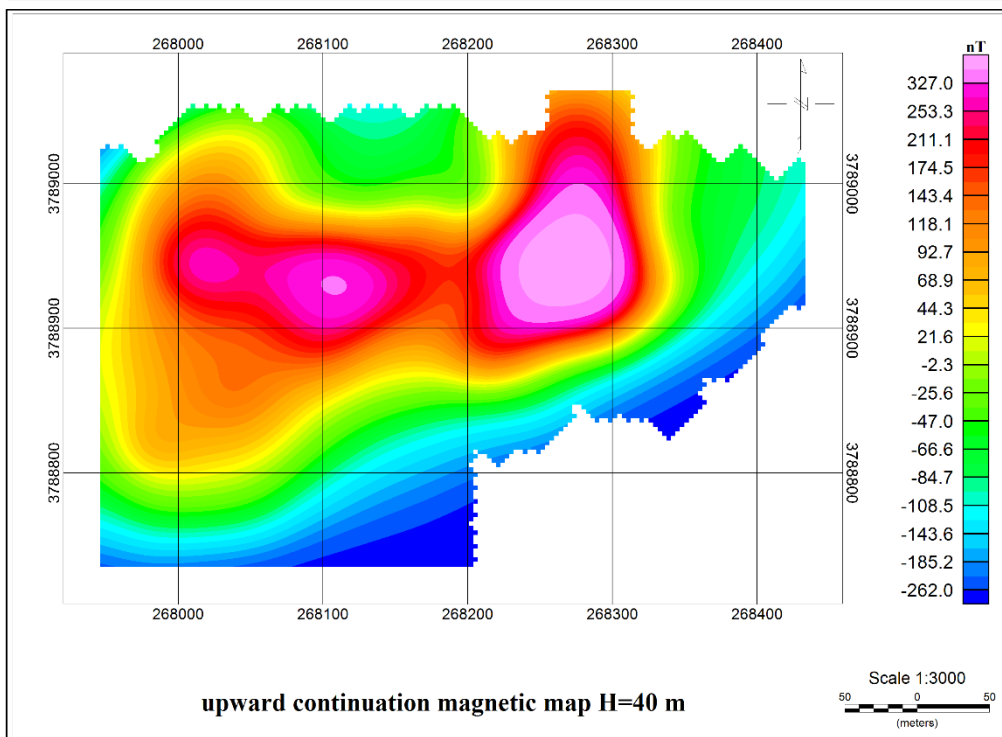


(ب)

شکل (۳-۱۱): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع الف) ۲۵ و ب) ۳۰ متری سطح زمین

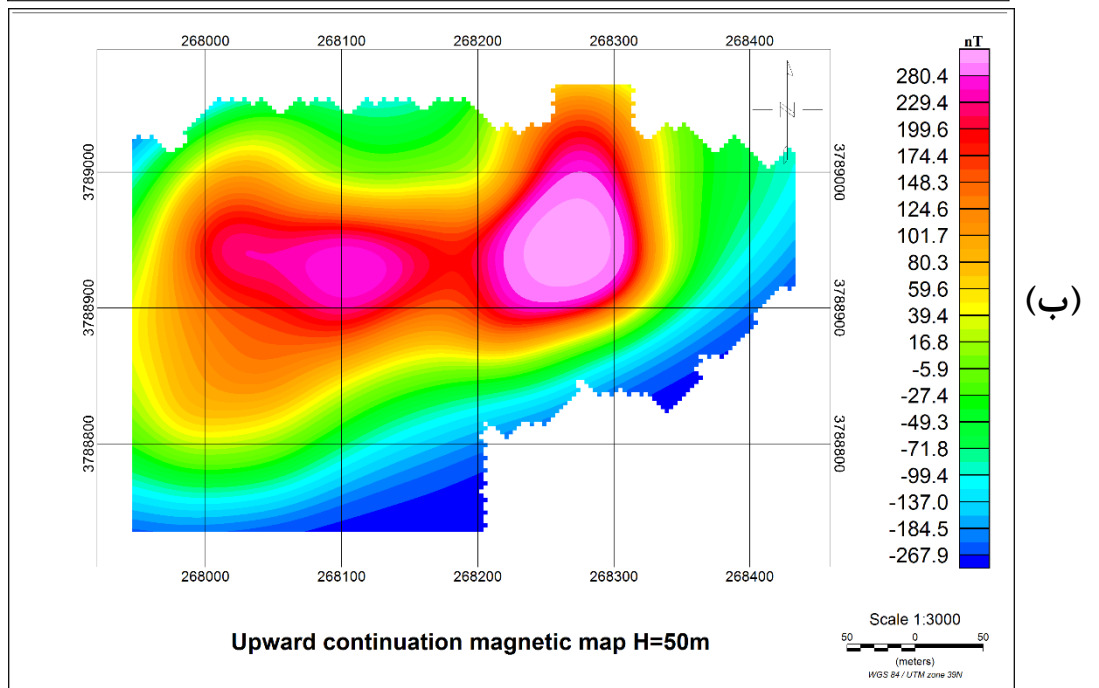
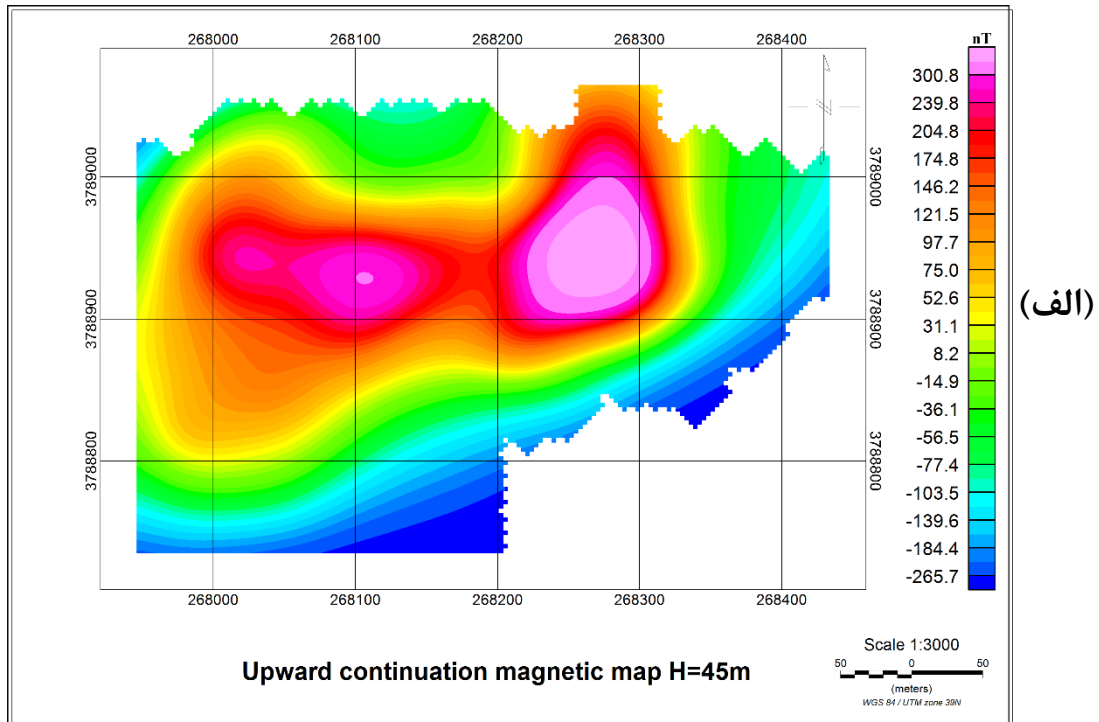


(الف)

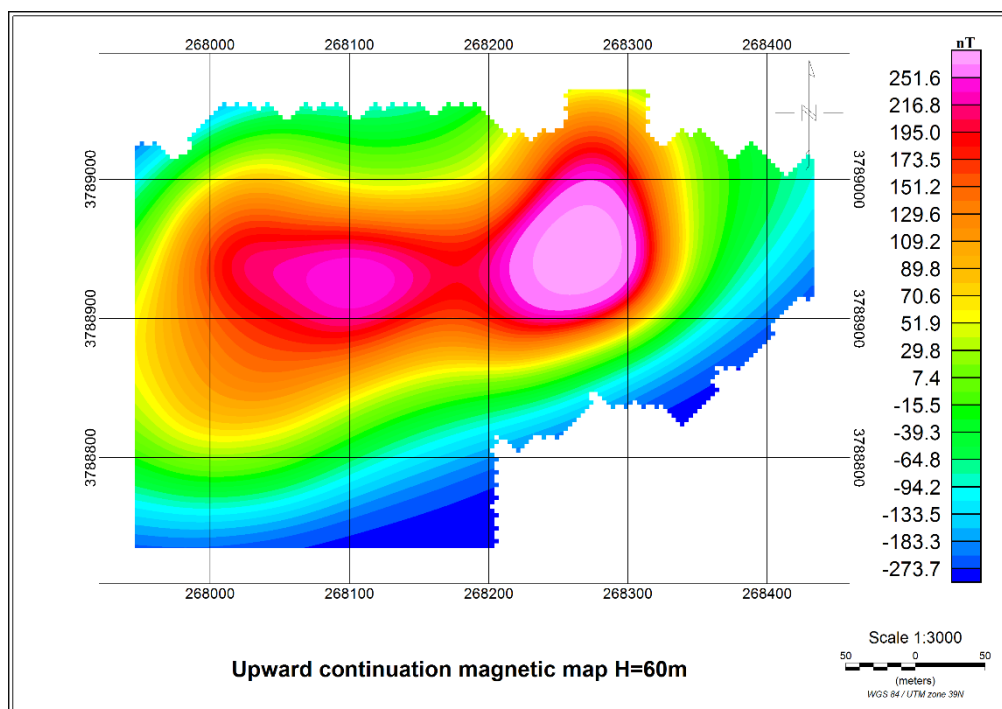
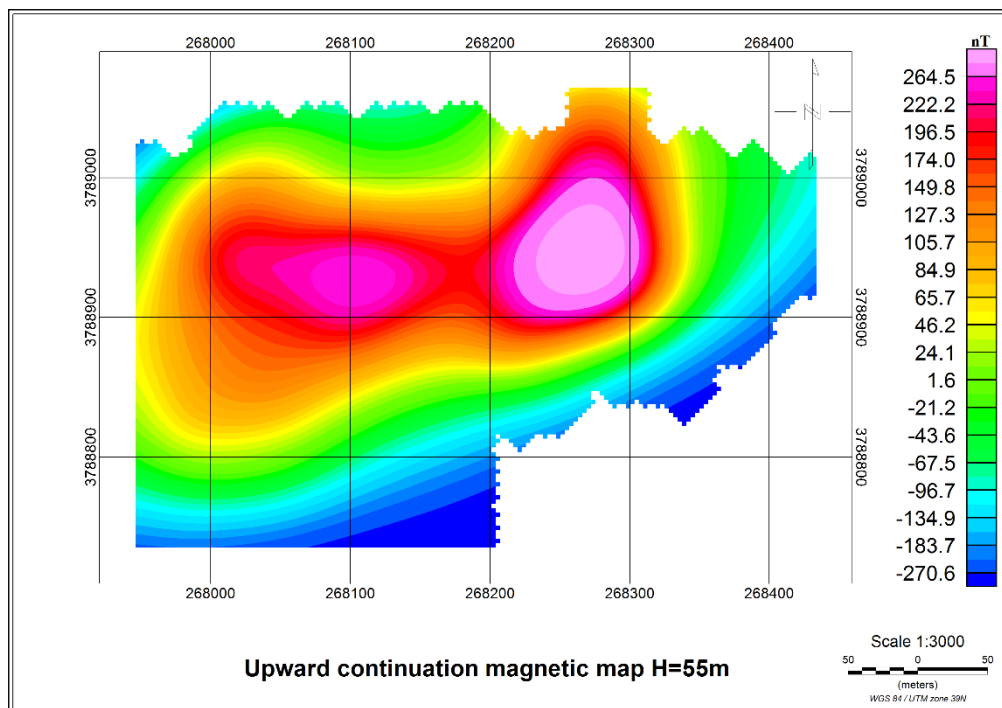


(ب)

شکل (۳-۱۲): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع الف) ۳۵ و ب) ۴۰ متری سطح زمین



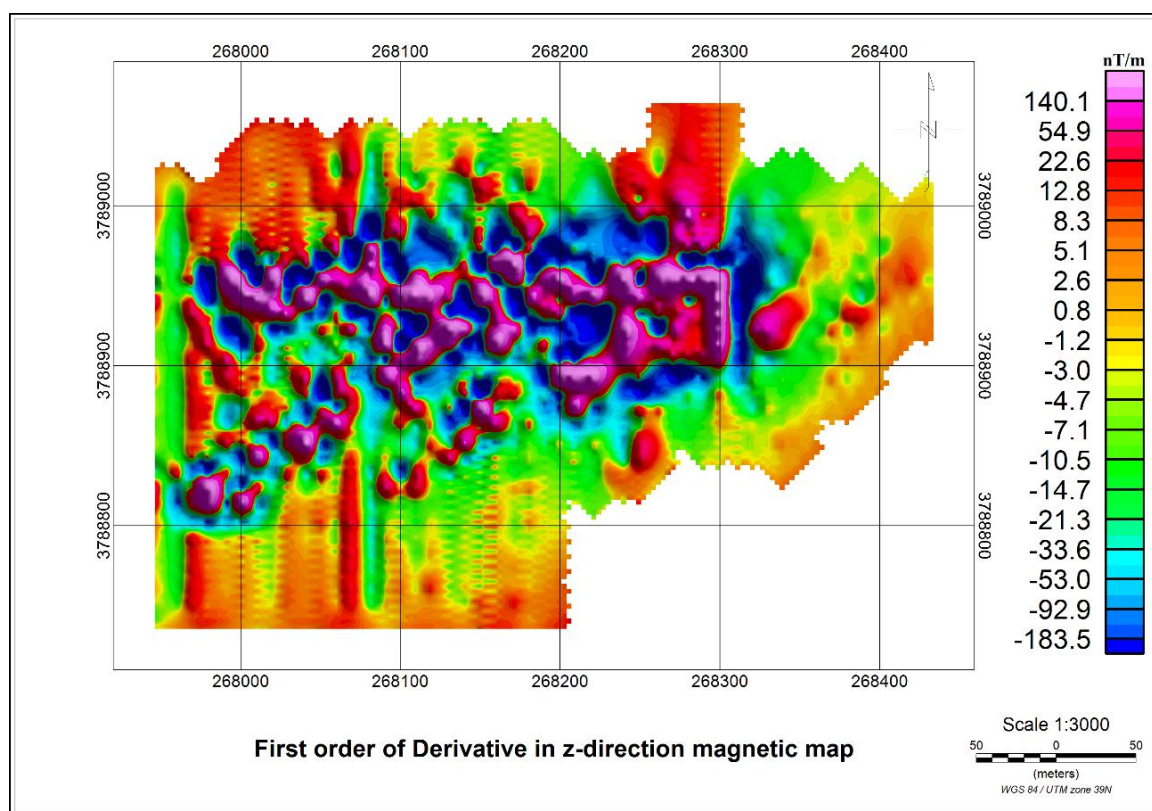
شکل (۳-۱۳): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع الف) ۴۵ و ب) ۵۰ متری سطح زمین



شکل (۳-۱۴): نقشه ادامه فراسو میدان مغناطیسی محدوده در ارتفاع الف) ۵۵ و ب) ۶۰ متری سطح زمین

۳-۲-۵ نقشه مشتق قائم مرتبه اول

یکی از بحث‌های مهم در تفسیر داده‌های مغناطیسی تعیین دقیق مرز ناهنجاری است. فیلترهای متعددی نیز برای این منظور استفاده می‌شوند. فیلترهای مشتق قائم، مشتق افقی، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت و... از این جمله هستند. همه این فیلترها از جمله فیلترهای بالاگذر هستند؛ که هدف آن‌ها برجسته‌سازی تغییرات مرتبط با توده منشأ بی‌هنجاری می‌باشد. اساس این روش برگرفته از روش ادامه فراسو است. روش مشتق‌گیری قائم در واقع استفاده از شدت میدان به دست آمده از روش ادامه فراسو در دو ارتفاع متفاوت است. در شکل (۳-۱۵) نقشه مشتق قائم مرتبه اول نشان داده شده است. از نظر تئوری، اندازه مشتق قائم در محل لبه‌های توده‌های زیرسطحی صفر است و از این خاصیت برای تخمین مرز استفاده می‌شود. در این نقشه رنگ‌های قرمز و صورتی موقعیت توده را نشان می‌دهد و دیگر رنگ‌ها مربوط به زمینه هستند.



شکل (۳-۱۵): نقشه مشتق قائم مرتبه اول منطقه مورد مطالعه

۳-۲-۶ سیگنال تحلیلی^۱

به منظور هر چه بهتر نمایش دادن گسترش طولی و عرضی آنومالی‌ها، نقشه سیگنال تحلیلی تهیه شد. نقشه‌های سیگنال تحلیلی باهدف تطابق لبه‌های آنومالی مغناطیسی با محدوده محیطی کانسار تهیه می‌شوند [عباسی‌نیا و ابراهیمی، ۱۳۹۳]. شکل (۳-۱۶) نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی را نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده وجود توده‌ها یا بی‌هنجاری‌های متعدد مغناطیس و بارز کننده موقعیت تقریبی لبه‌های توده‌های مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در این نقشه نیز از نظر نشان دادن موقعیت محل توده‌های مولد آنومالی این نقشه همانند نقشه تبدیل به قطب (شکل ۳-۶) عمل می‌کند. همانند نقشه تبدیل به قطب این نقشه نیز گسترش بی‌هنجاری مغناطیسی در امتداد شرقی - غربی را حدود ۳۰۰ متر و در امتداد شمالی - جنوبی حدود ۲۰۰ متر نشان می‌دهد.

طبق رابطه زیر، سیگنال تحلیلی تابعی است که میدان مغناطیسی را با مشتق ارتباط می‌دهد

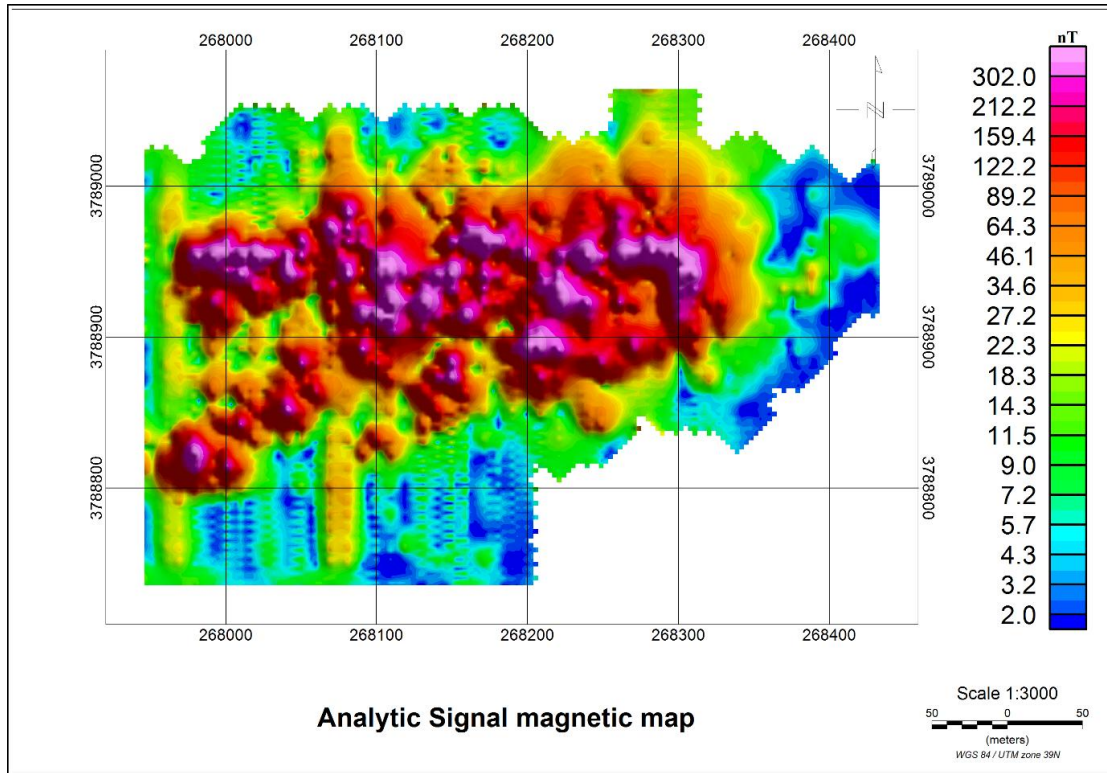
[Miller and Singh, 1994]

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial z}\right)^2} \quad (۳-۱)$$

که در آن m همان بی‌هنجاری مغناطیسی، $\frac{\partial m}{\partial x}$ مشتق افقی در جهت x ، $\frac{\partial m}{\partial y}$ مشتق افقی میدان در جهت y و $\frac{\partial m}{\partial z}$ مشتق قائم میدان است. این تابع در زمینه‌ی تفسیر کارایی بسیار جالبی دارد. این تابع کاملاً به جهت مغناطیسی شدن و جهت میدان زمین وابسته است. این بدان معنی است که همه توده‌ها با هندسه یکسان دارای سیگنال تحلیلی یکسانی هستند. علاوه بر این همچنان که این بیشینه‌ها متقارن هستند، مستقیماً در بالای لبه‌های توده‌های عریض و دقیق و بالای مرکز توده‌های باریک تشکیل می‌شوند. به این ترتیب به آسانی هندسه منبع مورد نظر تعیین می‌شود. به نظر می‌رسد که این تابع

^۱ Analytical signal

تحلیلی ابزار ارزشمندی برای تفسیر باشد. همچنین با استفاده از این تابع تحلیلی می توان موقعیت یک منبع مغناطیسی، بدون توجه به مغناطیس باقیمانده مربوط به منابع گوناگون را تعیین کرد [Dobrin and Savit, 1988]



شکل (۳-۱۶): نقشه سیگنال تحلیلی منطقه مورد مطالعه

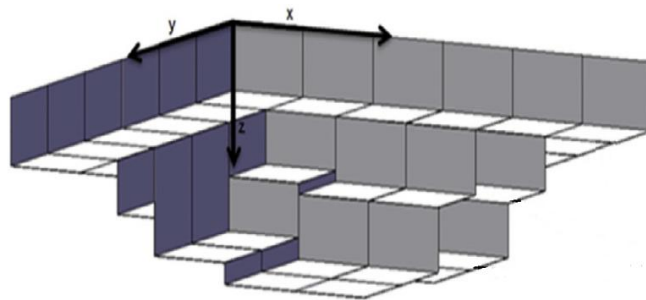
۳-۳ مدل سازی وارون سه بعدی داده های مغناطیسی

پس از انجام اندازه گیری های مغناطیس سنجی، تصحیح و پردازش داده ها و جداسازی بی هنجاری های ناحیه ای از محلی، تفسیر داده ها صورت می گیرد. در روند تفسیر باید از تمامی اطلاعات زمین شناسی، ژئوفیزیکی و سایر اطلاعات وابسته استفاده کرد؛ تا بتوان بهترین تفسیر ممکن را انجام داد. مدل سازی وارون از جمله روش های تفسیر ژئوفیزیکی می باشد که مشخصه های چشمه ی بی هنجاری مانند عمق و تباین مغناطیدگی را به صورت خودکار یا نیمه خودکار و با استفاده از داده های مشاهده ای محاسبه

می‌کند. به منظور وارون‌سازی داده‌های منطقه مورد مطالعه، در این پژوهش از روش وارون‌سازی هموار لی - اولدنبرگ استفاده شده است.

روش وارون‌سازی هموار لی - اولدنبرگ

در این روش زمین مورد بررسی به تعداد زیادی سلول مکعبی شکل در سه راستای x ، y و z ، که دارای ویژگی فیزیکی ثابتی هستند، تقسیم می‌شود (شکل ۳-۱۷). هر ناهنجاری مشاهده‌شده در بالای سطح را می‌توان به سلولی از یک مکعب مستطیل که به هر سلول آن مقدار ثابت مغناطیدگی ارزش داده شده است، نسبت داد. همچنین فرض بر این است که مغناطیس پسماند وجود نداشته و فقط مغناطیس القایی وجود دارد.



شکل (۳-۱۷): ساختار سه‌بعدی مدل‌شده به وسیله مجموعه‌ای از مکعب مستطیل‌ها با تباین مغناطیدگی ثابت

داده‌های مغناطیسی به وسیله نرم‌افزار UBC-GIF MAG3D^۱ که بر اساس الگوریتم لی - اولدنبرگ [Li and Oldenburg, 1996-1998] استوار است، وارون‌سازی می‌شوند. این الگوریتم با معادله (۳-۲) شروع می‌شود:

$$d = G \kappa \quad (۳-۲)$$

^۱ University of British Columbia geophysical inversion facility

که در آن d بردار داده‌های اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، K به‌عنوان مغناطیدگی هر سلول (یا بردار پارامترهای مدل) و g به‌عنوان ماتریس کرنل که هر سلول آن به مقدار پارامتر فیزیکی بخشی از مدل بستگی دارد، معرفی می‌گردد.

در وارون‌سازی خطی سه بعدی داده‌های میدان پتانسیل معمولاً تعداد پارامترهای مدل از تعداد داده‌ها بیشتر است. به دلیل وجود نوفه (e) در داده‌های اندازه‌گیری شده (d_{obs}) می‌توان نوشت:

$$d_{obs} = d + e \quad (3-3)$$

هدف از وارون‌سازی خطی داده‌های مغناطیسی به‌دست آوردن بردار پارامترهای مدل (K) با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای است؛ به‌گونه‌ای که توزیع مغناطیس‌پذیری سنگ‌ها و کانی‌ها را در زیر زمین تفسیر کند و این مدل از نظر زمین‌شناسی قابل قبول باشد.

در مدل‌سازی وارون پارامترهای مدل به وسیله کمینه کردن تابع هدف تیخونوف که بد حالت بودن آن کمتر است، به‌دست می‌آید [Tikhonov and Arsenin, 1977]. در صورت اعمال قید مثبت بودن، تابع هدف تیخونوف به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [Li and Oldenburg, 2003]:

$$\text{Minimize : } \varphi = \varphi_d + \mu \varphi_m \quad (4-3)$$

$$\text{Subject to : } m > 0$$

که در آن φ تابع هدف بوده و φ_d (تابع عدم برازش) به‌صورت معادله (3-5) تعریف می‌شود؛ همچنین μ پارامتر منظم‌سازی است که بین تابع عدم برازش و تابع منظم‌ساز تیخونوف توازن برقرار می‌کند.

$$\varphi_d = \|W_d(GK - d_{obs})\|^2 \quad (5-3)$$

در معادله فوق، $W_d = \text{diag} \{1/\sigma_1, \dots, 1/\sigma_N\}$ بوده و σ_i خطای انحراف معیار مربوط به i امین داده می‌باشد.

حل مسئله مدل سازی وارون و گرفتن خروجی زمانی رخ می دهد که محاسبات به تابع هدف نزدیک شده باشد. به عبارتی سنگ بنای روند وارون UBC-GIF ، به حداقل رساندن تفاوت بین خواص فیزیکی توضیح داده شده و داده های ورودی و خروجی است. تابع هدف مدل به صورت رابطه (۳-۶) تعریف می شود [Li and Oldenburg, 1996]:

$$\begin{aligned} \varphi_m(m) = & \alpha_s \int_v w_s [w_r(z)(m - m_{ref})]^2 dV \\ & + \alpha_x \int_v w_x \left[\frac{\partial}{\partial x} (w_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \\ & + \alpha_y \int_v w_y \left[\frac{\partial}{\partial y} (w_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \\ & + \alpha_z \int_v w_z \left[\frac{\partial}{\partial z} (w_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \end{aligned} \quad (۳-۶)$$

اولین پارامتر α_s از چهار پارامتر این معادله، تفاوت بین مدل مرجع، m_{ref} و مدل بهبود یافته، m و سه مؤلفه دیگر کنترل هموارسازی^۱ مدل را در فضای x ، y و z به عهده دارند. این چهار مؤلفه به منظور توزیع تفاوت بین m و m_{ref} در سراسر مدل به یک اندازه گنجانده شده اند. این شرایط، همه از طریق مشخص کردن توابع وزن آلفا (α_s به عنوان کنترل کمی و α_x ، α_y و α_z برای هموارسازی مدل در ابتدای شروع مدل سازی وارون امکان پذیر است) این پارامترها امکان تغییر برای رسیدن به فضای دلخواه و مرزهای خصوصیات فیزیکی مورد نظر را دارند [Li and oldenburg, 1996, 1998 - Williams, 2008]. در حل مسائل مدل سازی وارون برای رسیدن به جواب بهینه از روش کمترین مربعات^۲ استفاده می شود. کمترین مربعات در واقع روشی برای برازش^۳ داده ها است. در روش کمترین مربعات، بهترین مدل برازش بر مجموعه ای از داده ها، مدلی است که در آن مجموع مربع باقیمانده ها کمینه باشد؛ یعنی کمترین

^۱ Smoothness

^۲ Least Square

^۳ Fit

طول^۱ را داشته باشد یا به عبارتی نرم ۲ آن حداقل باشد که بدین معنی است که عدم برآزش^۲ آن نباید از یک مقداری تجاوز کند (تعداد داده‌ها). منظور از باقیمانده‌ها، اختلاف بین داده‌ی مشاهده‌شده و مقداری است که از مدل به دست می‌آید. بنابراین فرآیند تکرار در مدل‌سازی زمانی متوقف می‌شود که این مهم حاصل شود [Aster et al, 2013].

وارون‌سازی سه‌بعدی، فرآیندی است که به موجب آن توزیع مدل سه‌بعدی فضایی تغییرات خواص فیزیکی، از یک مجموعه از نشانه‌های ژئوفیزیکی مشاهده‌شده، مشتق می‌شود. ناهنجاری‌های مغناطیسی به دست آمده توسط برداشت‌های مغناطیسی به صورت تغییرات خودپذیری مغناطیسی زیر سطح ترسیم می‌شوند. توزیع خصوصیات فیزیکی تعریف‌شده توسط وارون‌سازی میدان پتانسیل لزوماً به طور مستقیم معادل مدل زمین‌شناسی نیستند؛ چرا که وارون‌سازی تغییرات چگالی و خودپذیری مغناطیسی لزوماً با تغییرات سنگ‌شناسی مطابقت ندارند.

یک مسئله اساسی در ارتباط با تمام مدل‌سازی‌های وارون‌گرانی یا مغناطیس، مسئله عدم یکتایی ذاتی مدل‌های مشتق شده از ناهنجاری‌های ژئوفیزیکی داده‌های میدان پتانسیل است [Li and Oldenburg, 1996]. به این دلیل که تعداد داده‌ها بسیار کمتر از تعداد پارامترهای مدل است، پس بی‌نهایت مدل می‌توان یافت که با داده‌ها مطابقت داشته باشند. مسئله دیگری همگام با مشکل عدم یکتایی وجود دارد، این واقعیت است که بررسی‌های ژئوفیزیکی ناقص هستند و ممکن است حاوی نقاط دارای خطا باشند. این مسائل سبب به وجود آمدن نیاز به نوعی محدودیت در حل مسئله مدل‌سازی وارون شده است [Bosch and McGaughey, 2001] که از طریق گنجاندن قید زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی که هدف آن محدود کردن راه‌حل‌های مدل مشتق شده به آن‌هایی که از نظر زمین‌شناسی

^۱ Minimum length

^۲ Misfit

عملی می‌باشند، عمل می‌کند. قیود ممکن می‌توانند از مرزهای صرفاً سطحی تعریف شده توسط نقشه- برداری زمین‌شناسی، مانند تعداد محدود رخنمون‌ها تا اطلاعات گمانه که می‌توانند محدودیت دقیق عمقی را روی ویژگی‌های فیزیکی واحدهای سنگی خالص فراهم کند، باشند. قابل اطمینان‌ترین نتیجه حاصل از مدل‌سازی وارون، مدل‌سازی است که توسط اطلاعات بیشتر و با داده‌های قابل اطمینان‌تر، محدود شده باشد.

۳-۴ مدل مصنوعی

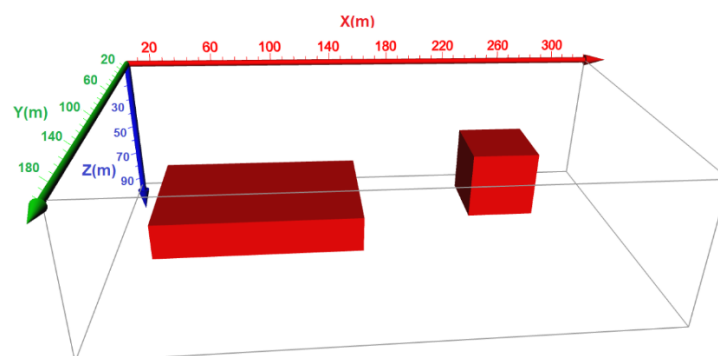
کارایی الگوریتم وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی‌سنجی، از طریق اعمال این الگوریتم بر روی مثال مصنوعی نشان داده می‌شود.

وارون‌سازی داده‌های مصنوعی مغناطیسی

جهت ارزیابی الگوریتم مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی، مطابق جدول (۳-۱) و شکل (۳-۱۸)، دو بلوک با خودپذیری مغناطیسی مشخص در یک زمینه غیرمغناطیسی، به‌عنوان داده‌ی مصنوعی و به‌صورت مدل مصنوعی طراحی گردید.

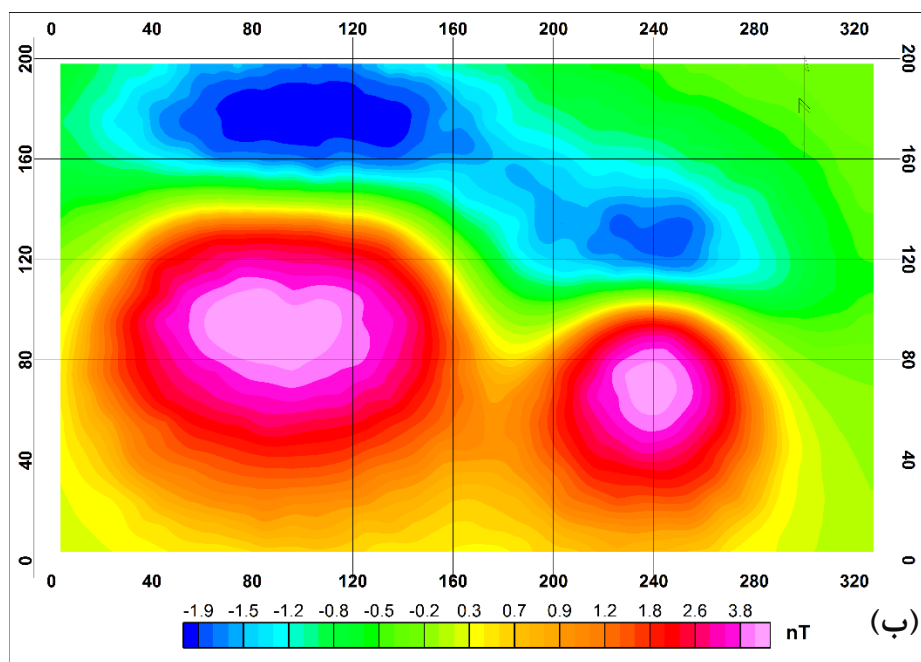
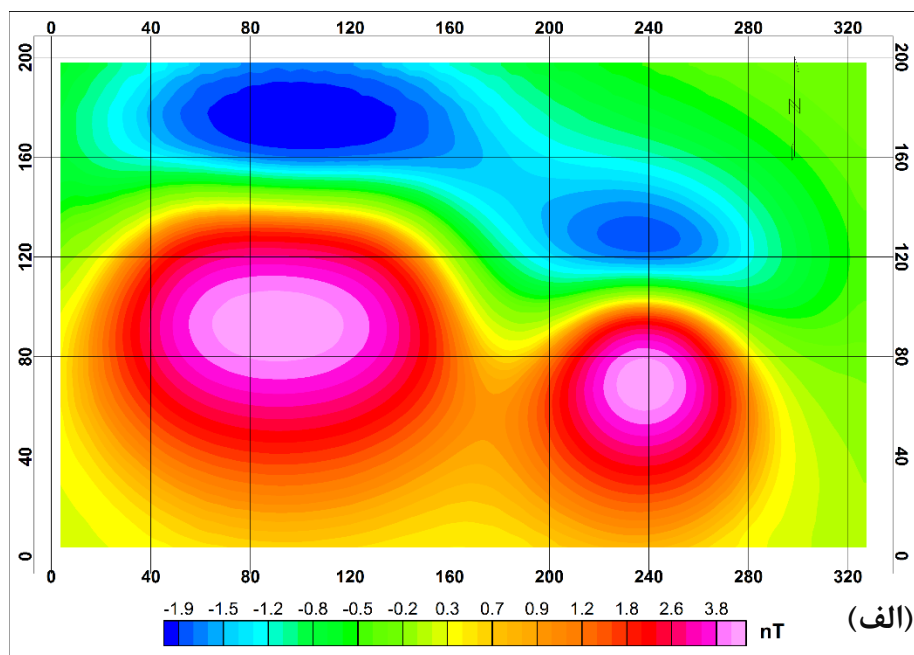
جدول (۳-۱): عمق و موقعیت جانبی بلوک‌های سه‌بعدی

مشخصات بلوک‌ها	X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Z_{min}	Z_{max}	تباين مغناطیدگی
۱	۴۰	۱۵۰	۹۰	۱۶۰	۴۰	۶۰	۰,۰۰۲
۲	۲۲۰	۲۶۰	۷۰	۱۱۰	۳۰	۷۰	۰,۰۰۲



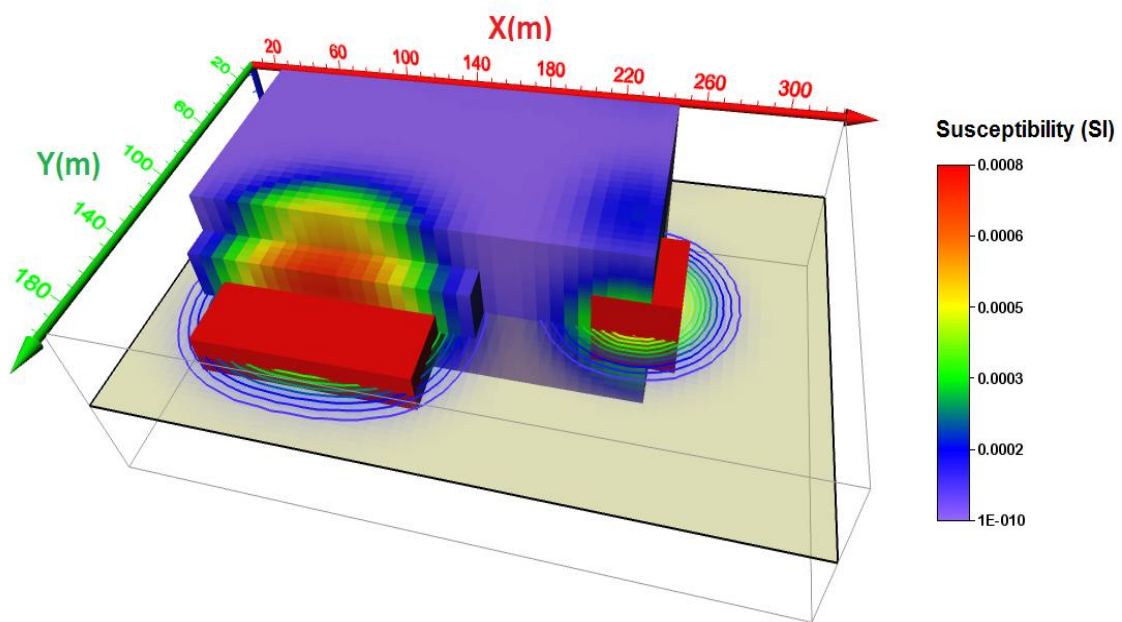
شکل (۳-۱۸): شمای سه‌بعدی از هندسه مدل‌های مصنوعی

میزان تباین خودپذیری مغناطیسی (مغناطیدگی) بین مدل‌های مصنوعی و زمینه $0,002$ در نظر گرفته شد و به داده‌های مصنوعی به میزان 5 درصد نویز اضافه گردید. همچنین زاویه میل و زاویه انحراف برای داده‌های مصنوعی به ترتیب 52 و 4 در نظر گرفته شد. شکل (۳-۱۹-الف) آنومالی مغناطیسی بدون نویز و شکل (۳-۱۹-ب) داده‌های مغناطیسی شامل 5 درصد نویز را نشان می‌دهند.

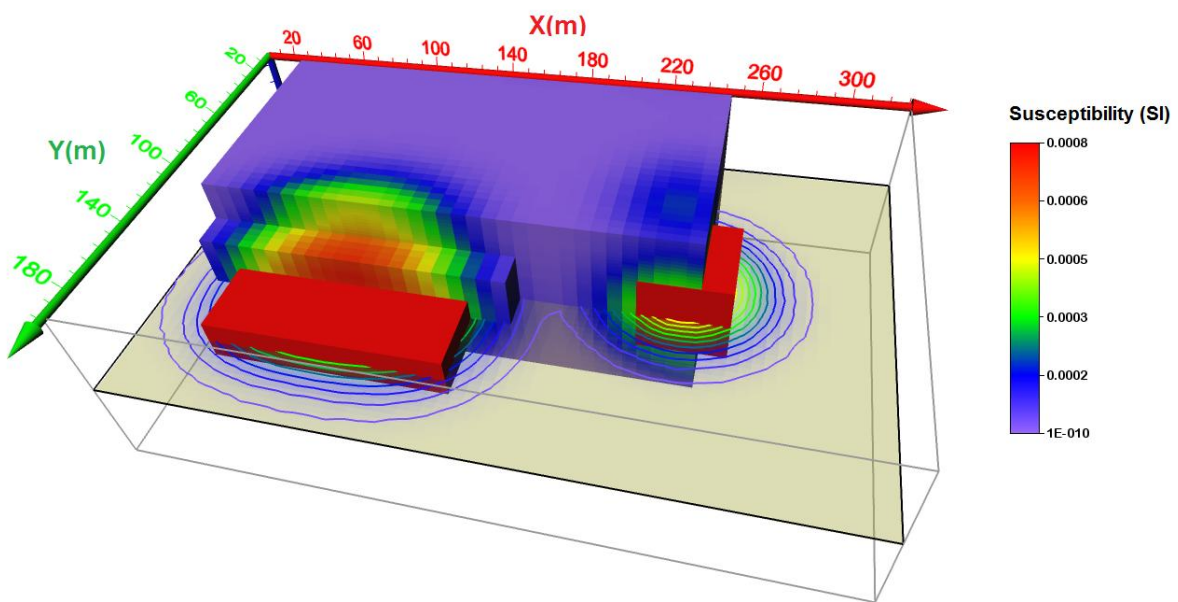


شکل (۳-۱۹): (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی مصنوعی بدون نویز (ب) آنومالی مغناطیسی مصنوعی حاوی 5% نویز

در گام بعدی، از مدل‌سازی پیشرو جهت تبدیل مدل به داده استفاده شد. بدین صورت که از پارامترهای مدل جهت رسیدن به داده استفاده شد؛ سپس از داده‌های استخراج‌شده در جهت رسیدن به پارامترهای مدل (مدل‌سازی وارون) استفاده گردید. شکل‌های (۳-۲۰-الف) و (۳-۲۰-ب) به ترتیب، مدل وارون‌یافته بدون نویز و حاوی ۵ درصد نویز را نشان می‌دهند. مقایسه شکل‌های مذکور نشان می‌دهد که توزیع خودپذیری مغناطیسی حاصل از فرآیند وارون‌سازی، به‌درستی پیرامون مدل مصنوعی متمرکز شده است. به‌عبارتی دیگر، مدل اولیه با مدل به‌دست‌آمده از مدل‌سازی وارون مطابقت داشته و این بدین معنی است که مراحل به‌درستی طی شده و از الگوریتم صحیحی در طی مدل‌سازی استفاده شده است.



(الف)



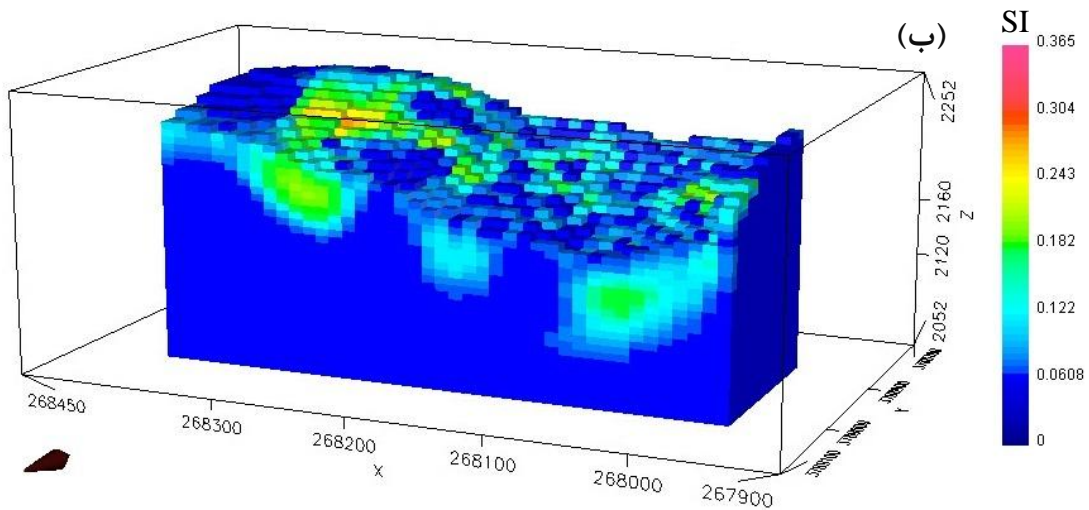
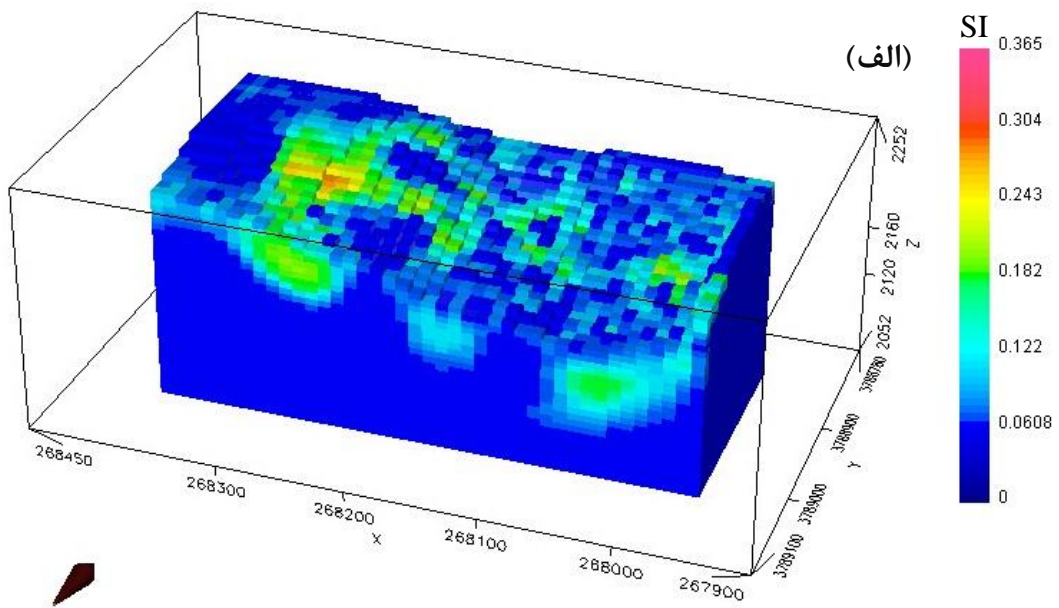
(ب)

شکل (۳-۲۰): هم‌پوشانی مدل وارون یافته با مدل مصنوعی (الف) برای داده‌های بدون نویز (ب) حاوی ۵ درصد نویز

بر اساس مدل‌های به‌دست آمده از وارون‌سازی داده‌های حاوی نویز به این نتیجه می‌توان رسید که نتایج حاصل از الگوریتم وارون‌سازی در برابر نویز پایدار می‌باشند.

۳-۵ مدل‌سازی وارون داده‌های واقعی (صحرائی)

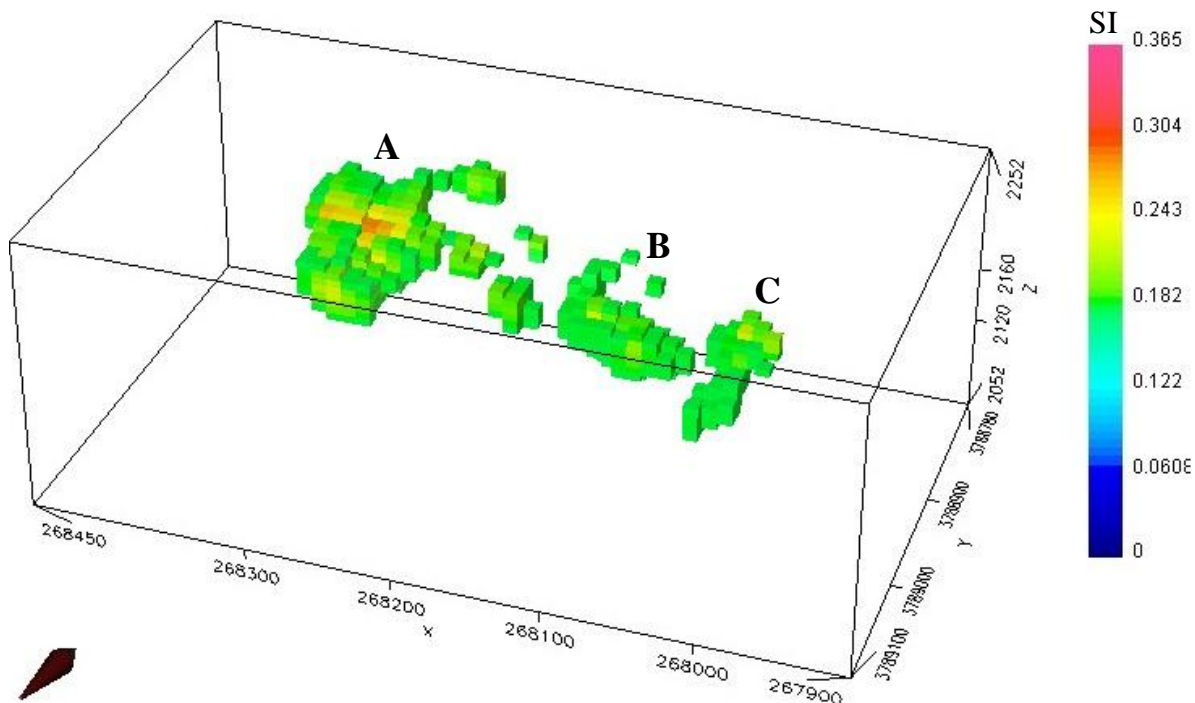
در پژوهش حاضر، به‌منظور مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی منطقه مورد نظر، مطابق شکل - های (۳-۲۱-الف و ۳-۲۱-ب)، از نرم‌افزار UBC Mag3D که بر اساس الگوریتم لی - اولدنبرگ در دپارتمان ژئوفیزیک دانشگاه بریتیش کلمبیا (UBC) طراحی شد، استفاده نمودیم.



شکل (۳-۲۱): مدل سازی سه بعدی وارون داده های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه الف) دید از بالا ب) دید از پهلو

شکل (۳-۲۱) مدل سه بعدی داده های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه را با اعمال توپوگرافی بر روی داده ها نشان می دهد؛ که در آن بی هنجاری های سطحی به رنگ سبز تا نارنجی متمایل به قرمز دیده

می‌شود. همچنین شکل (۳-۲۲) نمای سه‌بعدی از بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه مورد مطالعه را با تباين مغناطیدگی^۱ ۰,۱۸۲ تا ۰,۳۶۵ را نمایان می‌کند.



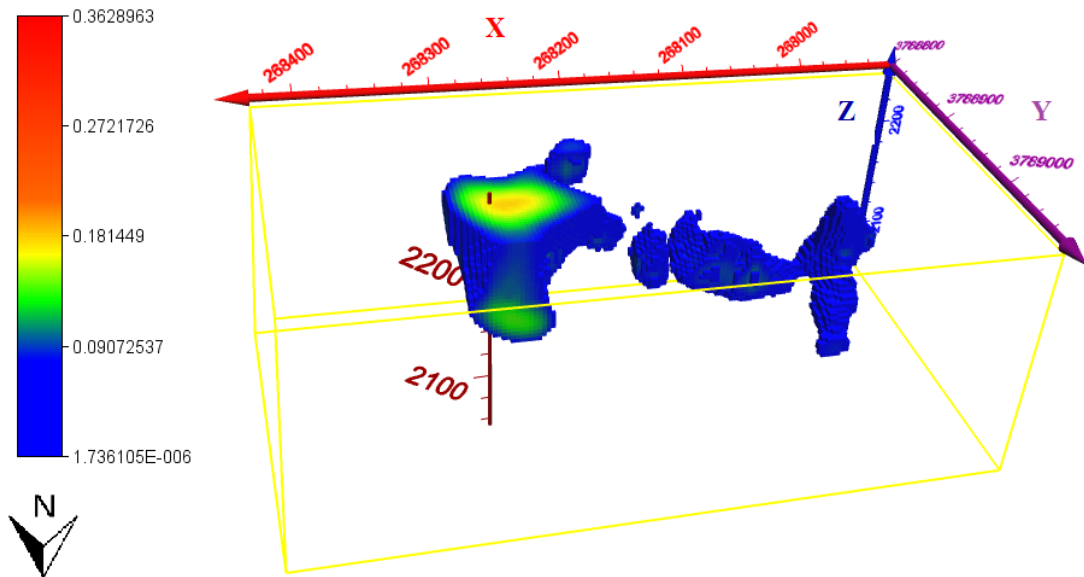
شکل (۳-۲۲): نمای سه‌بعدی از بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه مورد مطالعه به‌وسیله نرم‌افزار Mag3D

در نهایت جهت نمایش مدل‌های سه‌بعدی مغناطیس به‌صورت گرافیکی‌تر، از نرم‌افزار Voxler، مطابق شکل‌های (۳-۲۳) تا (۳-۲۶)، که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی حاصل از وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد، استفاده گردید.

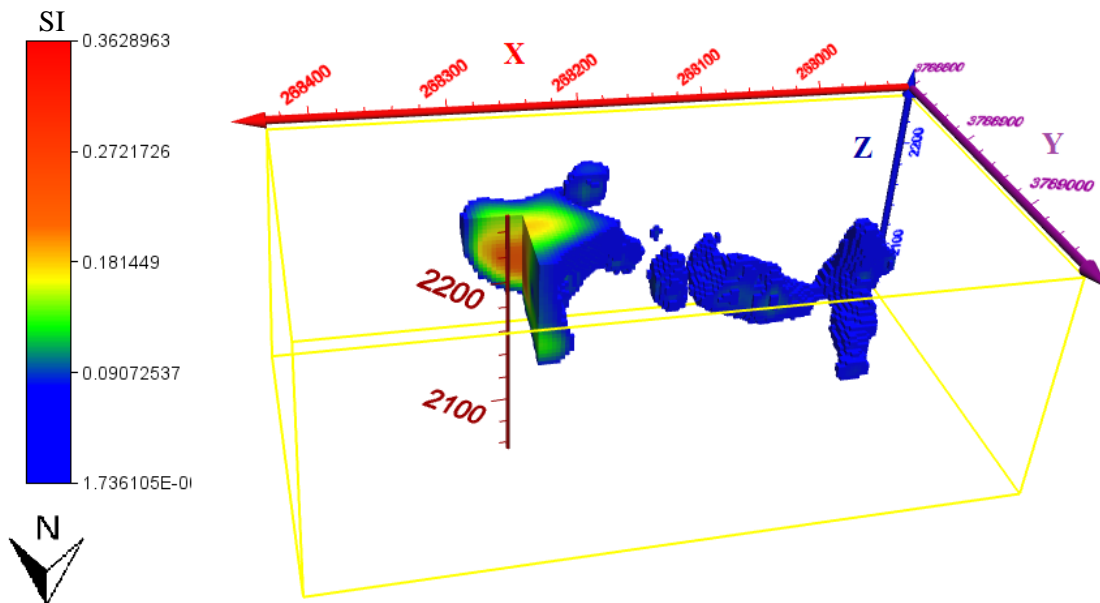
اگر ناهنجاری‌های نشان داده‌شده در شکل‌های مذکور را از چپ به راست به ترتیب A، B و C بنامیم، چنین به‌نظر می‌رسد که بی‌هنجاری A، دارای گسترش طولی در حدود ۱۶۰ متر، گسترش عرضی در حدود ۱۳۰ متر و گسترش عمقی در حدود ۶۵ متر می‌باشد. بی‌هنجاری B، دارای گسترش

^۱ susceptibility contrast

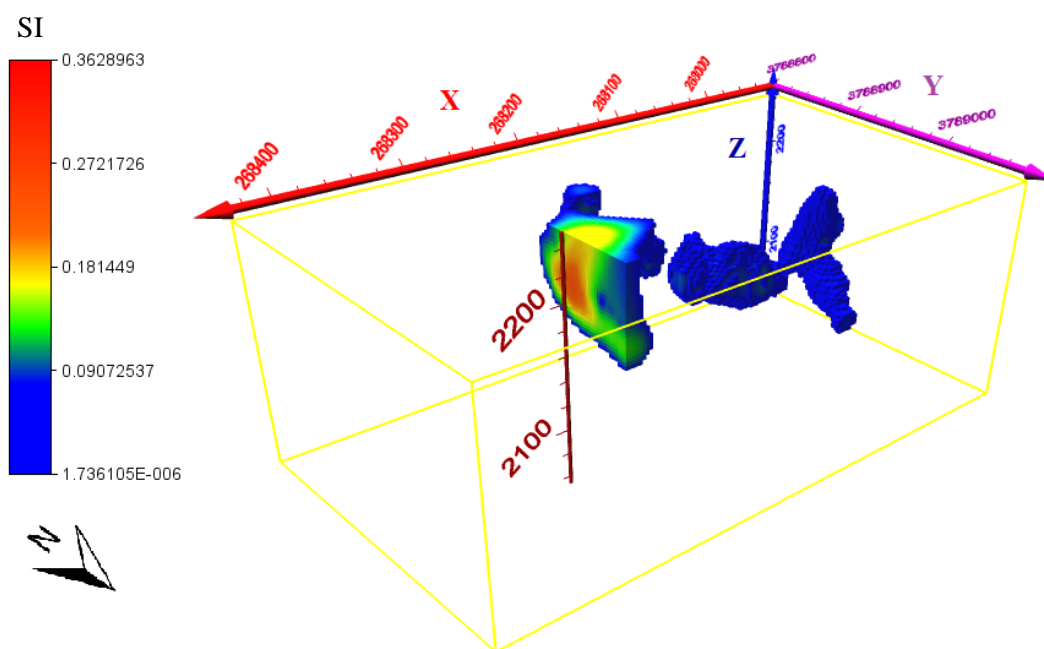
طولی در حدود ۱۰۰ متر، گسترش عرضی در حدود ۴۰ متر و گسترش عمقی در حدود ۳۰ متر بوده و نهایتاً، بی‌هنجاری C، دارای گسترش طولی در حدود ۵۰ متر، گسترش عرضی در حدود ۵۰ متر و گسترش عمقی در حدود ۱۴۰ متر می‌باشد.



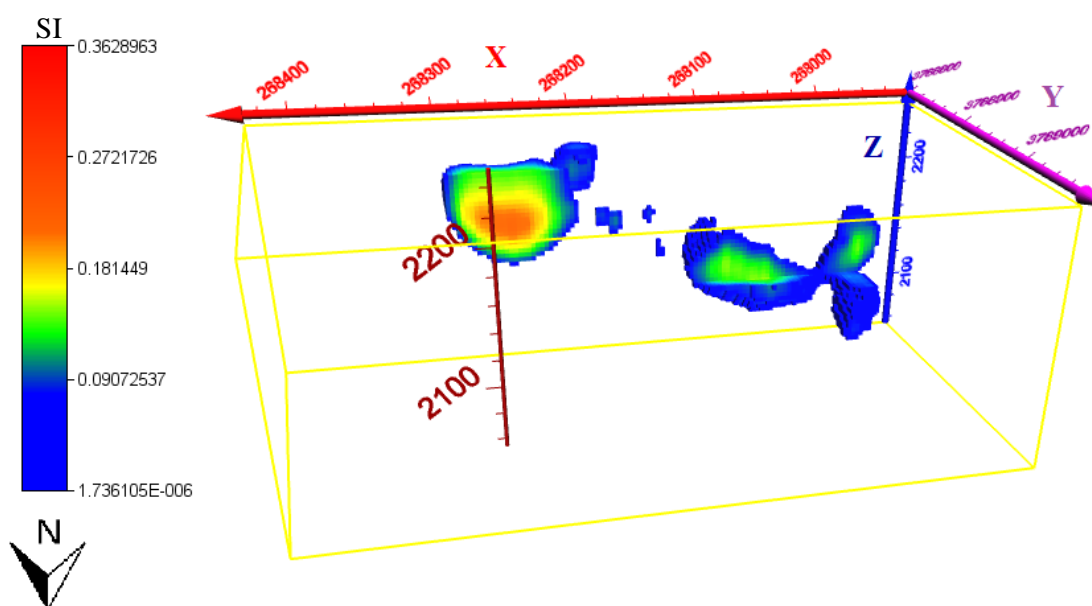
شکل (۳-۲۳): نمای سه‌بعدی بی‌هنجاری مغناطیسی ذخیره عشوند نه‌اوند در نرم‌افزار Voxler (دید از شمال)



شکل (۳-۲۴): نمایی از تغییرات توزیع شدت مغناطیسی در آنومالی A (دید از شمال)



شکل (۳-۲۵): نمایی از برش قائم آنومالی A و تغییرات شدت مغناطیدگی در آن (دید از شمال شرق)



شکل (۳-۲۶): نمایی از برش قائم آنومالی های A، B و C و تغییرات شدت مغناطیدگی در آنها (دید از شمال)

۳-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در فصل حاضر پس از اعمال فیلترهای مختلف بر روی نقشه میدان کل، دید خوبی نسبت به موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به دست آمد. لازم به ذکر است که در نقشه‌های مورد نظر شکل‌های (۳-۴) تا (۳-۱۶) رنگ‌های قرمز تا بنفش موقعیت آنومالی مغناطیسی را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه مورد مطالعه، بیش‌ترین شدت بی‌هنجاری مغناطیسی در محدوده بر روی واحدهای گرانیت، گرانودیوریت و اسکارن بوده و بر روی واحد سنگ آهک، شدت بی‌هنجاری مغناطیسی نسبت به دو واحد دیگر کمی کمتر می‌باشد. همچنین از بررسی نقشه‌های حاصله از فیلترهای مختلف و مدل‌های سه‌بعدی، ملاحظه می‌شود که روند توده‌های مغناطیسی شرقی- غربی بوده است. بی-هنجاری‌های به‌وجودآمده توسط توده‌های سطحی و عوامل نویزی که در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی دیده می‌شود در نقشه‌های گسترش رو به بالا حذف گردیده‌اند. هر یک از نتایج حاصله از نقشه‌های حاصل از فیلترها و مدل‌های سه‌بعدی تأییدکننده‌ی نتایج یک‌دیگر هستند.

فصل چهارم

بررسی های مقاومت ویژه و قطبش القایی در منطقه مورد مطالعه

۴-۱ مقدمه

امروزه به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف مواد معدنی و انتخاب محل‌های مناسب برای اکتشاف امری متداول به‌شمار می‌رود [کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۷]. در کلیه مراحل اکتشاف مواد معدنی می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی استفاده کرد.

از روش‌های ژئوفیزیکی که برای اکتشاف کانسارها به کار می‌رود می‌توان به روش‌های مغناطیس-سنجی، روش‌های الکتریکی، الکترومغناطیس، ثقل‌سنجی و لرزه‌نگاری اشاره نمود. انتخاب روش یا روش‌هایی برای تعیین محل یک کانسار، با طبیعت کانی‌های موجود در آن کانسار و سنگ‌های اطراف آن سروکار دارد [کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۷]. از جمله روش‌های مورد استفاده در این پژوهش روش مقاومت‌ویژه الکتریکی^۱ و همچنین قطبش‌القایی^۲ می‌باشند که به‌منظور شناسایی و پتانسیل‌یابی مس (بخشی از ماده معدنی پلی‌متال) در منطقه‌ی مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند.

در این فصل، پس از بیان تئوری روش‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی، به‌منظور تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی برداشتی به مدل‌سازی عددی دوبعدی و سه‌بعدی در نرم‌افزارهای RES2DINV و RES3DINV پرداخته می‌شود؛ همچنین جهت نمایش مدل‌های سه‌بعدی به‌صورت گرافیکی تر از نرم‌افزارهای Voxler و RockWork استفاده شده است.

۴-۲ روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

روش مقاومت‌ویژه از سال ۱۹۲۰ میلادی با کار برادران شلومبرژه^۳ آغاز شد [Loke, 2012]. در اواخر دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ روش‌های اکتشاف ژئوفیزیکی به‌طور گسترده‌ای در جست‌وجوی فلزات پایه و سولفیدها به‌کاربرده شد [Paterson and Hallof, 1991]. روش‌های الکتریکی در اوایل قرن نوزده

^۱ Resistivity

^۲ Induced Polarization (IP)

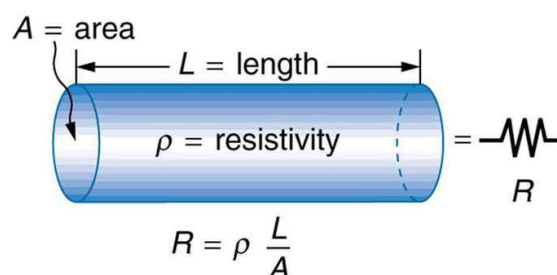
^۳ Schlumberger

میلادی گسترش پیدا کردند؛ اما در دهه ۱۹۷۰ به دلیل پیشرفت و دسترسی آسان به رایانه برای پردازش و تفسیر داده‌ها این گستردگی افزایش بیشتری یافت [Reynolds, 1997]. هدف از برداشت‌های الکتریک، تعیین توزیع زیرسطحی مقاومت ویژه به وسیله اندازه‌گیری‌های زیرسطحی و به دنبال آن تخمین مقاومت ویژه واقعی توده‌های زیرسطحی است [Loke, 2000].

در روش مقاومت ویژه الکتریکی از یک چشمه‌ی الکتریکی مصنوعی، برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین استفاده می‌شود. برای این منظور، معمولاً از چهار الکترود استفاده می‌گردد که از دوتای آن‌ها برای فرستادن جریان الکتریکی و از دوتای دیگر، برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی استفاده می‌شود. در صورت غیرهمگن^۱ و غیرهمسانگرد^۲ بودن زمین، داده‌های حاصل از این روش، نشان‌دهنده‌ی مقادیر مقاومت ویژه‌های واقعی زمین نیستند، بلکه این مقادیر نشان‌دهنده‌ی مقاومت ویژه-های ظاهری زیر سطح زمین می‌باشند [Loke, 2012].

مقاومت ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین را نشان می‌دهد. در مورد رسانایی مواد با مقاومت ویژه R ، طول L و سطح مقطع A در زیر سطح زمین، همان‌طور که در شکل (۱-۴) دیده می‌شود؛ رابطه (۱-۴) برقرار است:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1-4)$$



شکل (۱-۴): توده استوانه در زیر سطح زمین [www.geotomo.com].

^۱ inhomogeneous

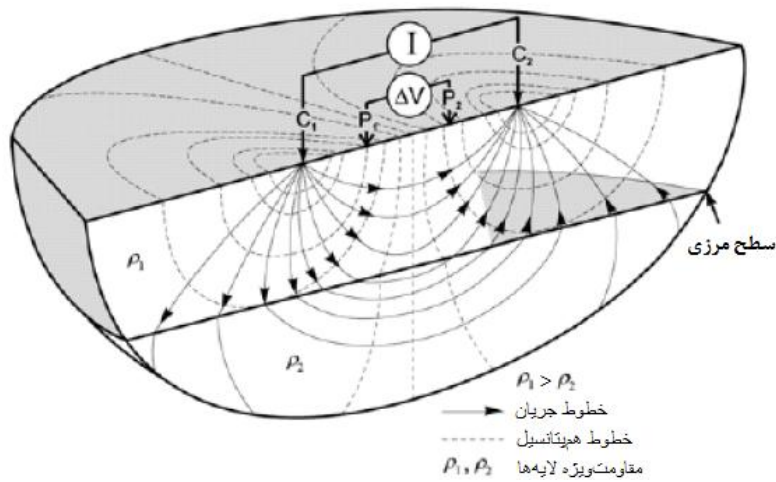
^۲ anisotropy

بر اساس قانون اهم، معادله‌ی (۴-۱) به شکل زیر در می‌آید:

$$\rho = \frac{\Delta V \cdot A}{I \cdot L} \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه، ρ بیان‌کننده مقاومت ویژه الکتریکی، I جریان الکتریکی، ΔV برابر اختلاف پتانسیل و L طول استوانه فرضی می‌باشند. رابطه (۴-۲) برای تعیین مقاومت ویژه‌ی محیط همگن و همسانگرد مناسب است؛ اما برای یک محیط ناهمگن و ناهمسانگرد باید مقاومت ویژه را در هر نقطه تعیین نمود [Ozebo et al., 2008].

در شکل (۴-۲)، نمونه‌ای از یک آرایش چهار الکترودی نشان داده شده است. در این شکل، الکترودهای C_1 و C_2 نشان‌دهنده الکترودهای جریان و الکترودهای P_1 و P_2 الکترودهای پتانسیل می‌باشند. در این آرایش چهار الکترودی، اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، طبق رابطه‌ی (۴-۳) محاسبه می‌شود:



شکل (۴-۲): نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل در یک آرایش چهار الکترودی به صورت سه‌بعدی

[After Corvallis, 2000]

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} - \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right) \quad (۴-۳)$$

که در آن ΔV برابر اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکترو پتانسیل، $r_{C_1P_1}$ فاصله بین الکترودهای C1 و P1، $r_{C_2P_1}$ فاصله بین الکترودهای C2 و P1، $r_{C_1P_2}$ برابر فاصله بین الکترودهای C1 و P2 و نهایتاً $r_{C_2P_2}$ فاصله بین الکترودهای C2 و P2 می‌باشند.

برداشت‌های صحرائی بر روی زمین‌های غیرهمگن که مقاومت ویژه الکتریکی آن‌ها در سه جهت محورهای مختصات متغیر است، صورت می‌گیرد و هدف از این برداشت‌ها به دست آوردن اندازه‌ی مقاومت ویژه الکتریکی زمین می‌باشد. بعد از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل می‌توان اندازه‌ی مقاومت ویژه‌ی ظاهری زمین را طبق رابطه‌ی (۴-۴) محاسبه نمود [Loke, 2004]:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (۴-۴)$$

که در این رابطه ρ_a مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری زمین و K ضریب هندسی برای آرایش مورد استفاده، نامیده می‌شود و طبق رابطه‌ی (۵-۴) به دست می‌آید.

$$K = \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right) \quad (۵-۴)$$

ضریب هندسی، بستگی به چگونگی موقعیت هندسی قرارگیری چهار الکترو در هر آرایش دارد. دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه، معمولاً مقدار مقاومت زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. رابطه‌ی بین مقاومت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری به صورت رابطه‌ی (۶-۴) تعریف می‌شود [Loke, 2004; Reynolds, 1997]:

$$\rho_a = KR \quad (۶-۴)$$

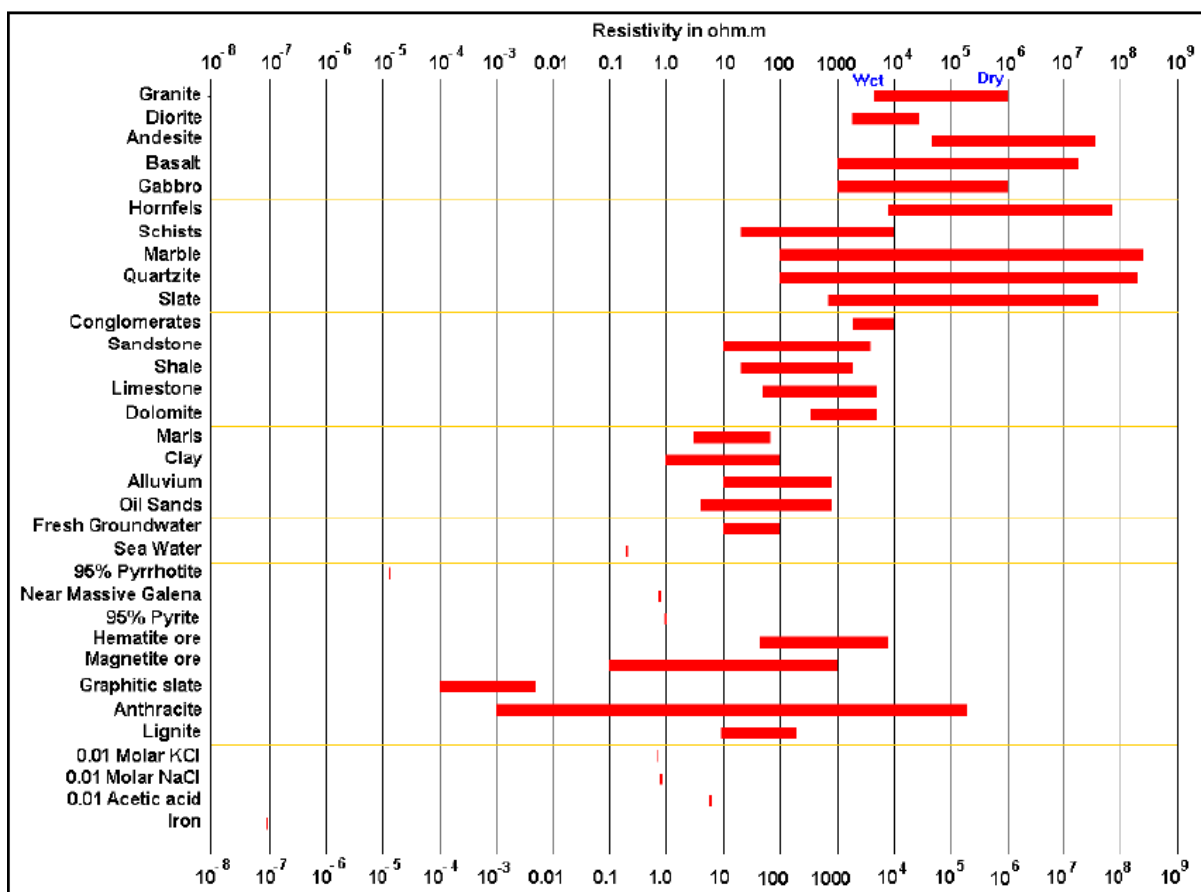
۴-۲-۱ تقسیم‌بندی مواد مختلف از لحاظ مقاومت ویژه

به‌طور کلی مقاومت ویژه‌ی سنگ‌ها عمدتاً به میزان خردشدگی، درصد تخلخل و درصد شکستگی‌ها در سنگ‌ها بستگی دارد. سنگ‌های رسوبی که معمولاً متخلخل بوده و دارای اشباع‌شدگی آب بالاتری می‌باشند، به‌طور معمول از مقاومت ویژه‌ی کمتری برخوردارند. خاک‌های رسی معمولاً مقاومت ویژه‌ی پایین‌تری نسبت به خاک‌های ماسه‌ای دارند؛ اما نکته قابل توجه، هم‌پوشانی مقادیر مقاومت ویژه‌ی سنگ‌ها و خاک‌ها می‌باشد. این امر به دلیل این است که مقاومت ویژه‌ی الکتریکی سنگ و یا نمونه‌ی خاک به عوامل دیگری مثل تخلخل، اشباع آب و غلظت نمک‌های غیرمحلول نیز وابسته می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱]. جدول (۴-۱) و شکل (۴-۳) گستره‌ی میانگین مقاومت ویژه چند نوع سنگ و کانی را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱): میانگین مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها [Telford et al., 1990]

نوع سنگ	مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم‌متر
طلا	$2,44 \times 10^{-8}$
روی	$5,90 \times 10^{-8}$
کالکوسیت	10^{-4}
کالکوپیریت	4×10^{-3}
پیریت	3×10^{-1}
مولیبدنیت	۱۰
هماتیت	$3,5 \times 10^{-3} - 10^7$
مارن	۳۰-۷۰
رس	۱-۱۰۰
مگنتیت	$10^{-3} - 50$
کوارتز	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
آهک	۵۰-۱۰۰۰۰۰۰۰
دولومیت	۳۵۰-۵۰۰۰
کلسیت	2×10^{12}

بیوتیت	$2 \times 10^2 - 10^6$
ماسه سنگ آرژیلیکی	۵۰-۳۰۰
شیست آرژیلیتی	۱۰۰-۳۰۰
شیست سالم	۳۰۰-۳۰۰۰



شکل (۳-۴): محدوده مقاومت ویژه برخی از سنگها، خاکها و کانیها [Loke, 2012].

۲-۲-۴ انتخاب آرایش الکترودی مناسب

موقعیت هندسی قرارگیری الکترودها نسبت به هم را آرایه گویند. آرایه‌های الکترودی دارای تنوع زیاد می‌باشند؛ که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. انتخاب آرایه مناسب به فضای موجود برای گسترش آرایه مورد استفاده و سختی هر روش بستگی دارد [Reynolds, 1997]. انتخاب بهترین آرایش الکترودی برای اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی، به وضعیت ساختارهای زیر سطح

زمین، حساسیت دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه و به میزان نوفه‌ی زمینه بستگی دارد. چهار مؤلفه اصلی یک آرایش عبارت‌اند از [Loke, 2004]:

(۱) عمق نفوذ

(۲) حساسیت آرایش به تغییرات عمقی و جانبی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی در داخل زمین

(۳) پوشش افقی داده‌ها

(۴) نسبت سیگنال به نوفه

برای اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه، آرایش‌های الکترودی مختلفی پیشنهاد شده است. از متداول‌ترین آرایش‌هایی که در روش مقاومت ویژه به کار برده می‌شوند، می‌توان به آرایش‌های ونر^۱، شلومبرژه، دوقطبی- دوقطبی^۲، قطبی- دوقطبی^۳ و قطبی- قطبی^۴ اشاره کرد. آرایش ونر در پروفیل‌زنی، آرایش شلومبرژه در سونداژزنی و آرایش دوقطبی- دوقطبی در تهیه شبه‌مقاطع و برداشت‌های قطبش‌القایی محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. جدول (۲-۴) مقایسه‌ای بین مؤلفه‌های مذکور برای چند آرایش الکترودی را به صورت تعداد * بیان می‌کند. هر چه تعداد * برای آرایشی بیشتر باشد، آرایش مذکور از نظر خصوصیت یا ویژگی مورد نظر بهتر خواهد بود.

جدول (۲-۴): خصوصیات مختلف چند آرایش الکترودی [Samouelian et al., 2005].

قطبی- دوقطبی	قطبی- قطبی	دوقطبی- دوقطبی	شلومبرژه	ونر	
**	**	*	**	****	حساسیت آرایش به ساختارهای افقی
*	**	****	**	*	حساسیت آرایش به ساختارهای قائم
***	****	***	**	*	عمق نفوذ
***	****	***	**	*	پوشش افقی داده‌ها
**	****	*	**	****	نسبت سیگنال به نویز

^۱ Wenner

^۲ Dipole- Dipole

^۳ Pole- Dipole

^۴ Pole- Pole

۴-۲-۳ آرایش دوقطبی - دوقطبی

آرایش دوقطبی - دوقطبی به طور وسیعی در برداشت‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی به دلیل کوچک بودن مقدار جفت‌شدگی مغناطیسی که بین سیم جریان و پتانسیل رخ می‌دهد، استفاده می‌شود. در شکل (۴-۴) نحوه آرایش این آرایه و در شکل (۵-۴) مقطع دویعدی این آرایش نشان داده شده است. همچنین نحوه محاسبه‌ی فاکتور هندسی در معادله (۷-۴) نشان داده شده است [Loke, 2004].

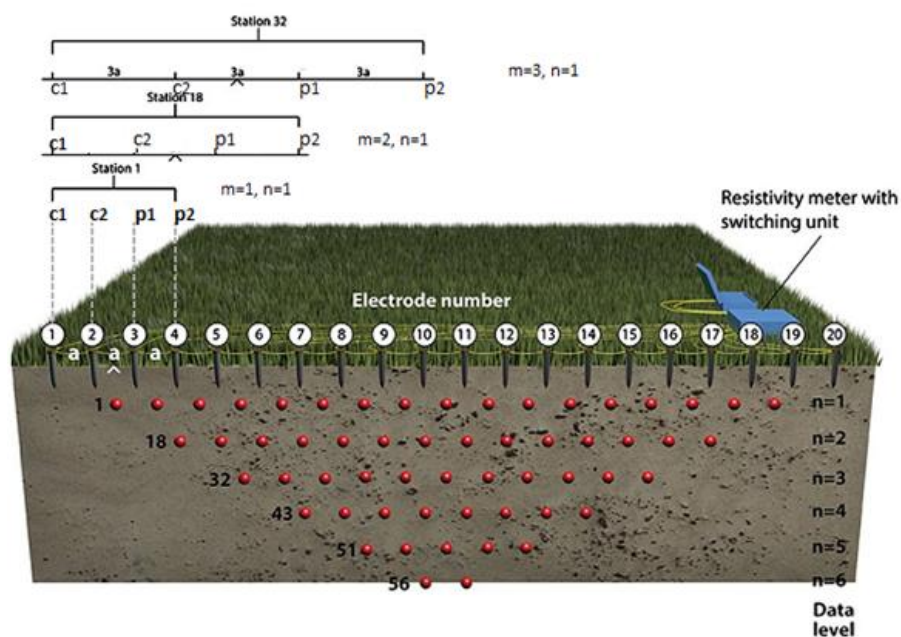


شکل (۴-۴): آرایش دوقطبی - دوقطبی [Loke, 2004].

$$K = 2\pi n(n+1)(n+2)a \quad (7-4)$$

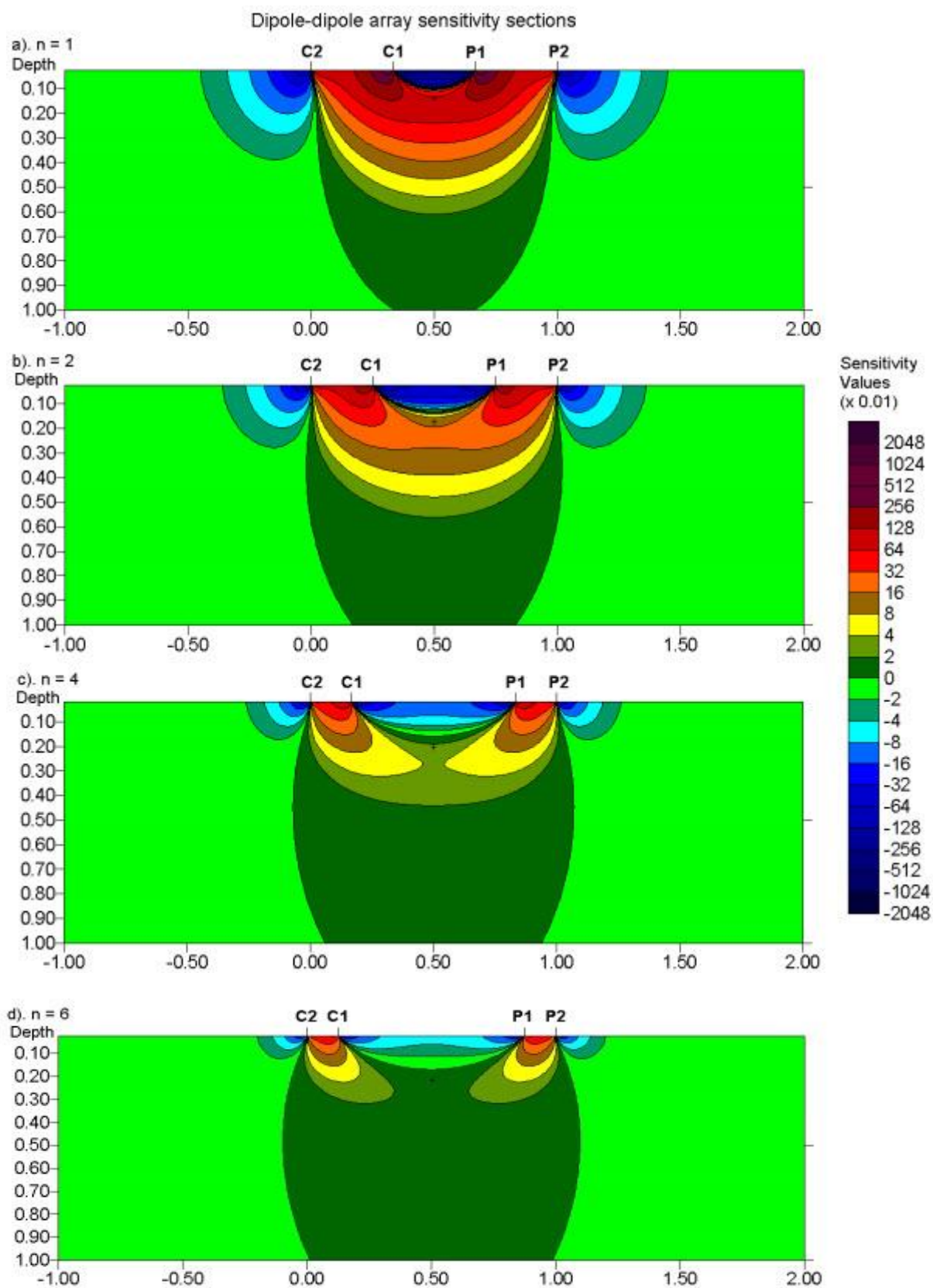
فاصله بین الکترودهای جریان C1-C2 برابر با مقدار a است که برابر با فاصله الکترودهای پتانسیل P1-P2 است. فاکتور n هم که در این آرایش اهمیت دارد برابر با فاصله بین C1 و P1 بر a است. برای برداشت‌های با این آرایش، a در طول برداشت ثابت می‌ماند و فاکتور n از ۱، ۲، ...، ۶ به منظور افزایش عمق نفوذ افزایش می‌یابد. شکل (۶-۴) مقطع حساسیت را برای این آرایش با n های مختلف نشان می‌دهد. بیش‌ترین حساسیت معمولاً مربوط به فاصله الکترودهای C1-C2 و P1-P2 است. این بدین معنی است که بیش‌ترین میزان حساسیت مربوط به الکترودهاست. به طوری که هرچه میزان n بیشتر شود، فاصله الکترودی افزایش می‌یابد. الگوی کنتوری حساسیت برای n های بزرگ‌تر از ۲ تقریباً به صورت عمودی در می‌آید. این آرایه نسبت به تغییرات افقی مقاومت ویژه برعکس تغییرات عمودی بسیار حساس است که این بدین معنی است که برای نقشه کردن ساختارهای عمودی مانند دایک و حفره مناسب است؛ اما

برای ساختارهای افقی همچون سیل^۱ یا لایه‌های رسوبی مناسب نیست. میانگین عمق نفوذ این آرایه بستگی به فاصله الکترودی a و فاکتور n دارد، در مجموع این آرایه عمق نفوذ کمتری نسبت به آرایه وئر دارد. برای مثال به ازای $n=1$ عمق نفوذ برابر با $0,416a$ در مقایسه با عمق نفوذ $0,512a$ آرایش وئر نوع آلفا است. برای برداشت‌های دوبعدی این آرایه پوشش افقی داده‌ای بهتری نسبت به آرایش وئر دارد. اما از معایب این آرایه قدرت سیگنال پایین آن برای n های بزرگ است؛ یک روش برای غلبه بر این مشکل این است که a را زیاد نماییم تا افت ولتاژ کمتر گردد. برای استفاده موثر از این آرایه دستگاه باید حساسیت بالا و مدار حذف نوفه خوبی داشته باشد و درعین حال تماس الکتروود با زمین باید به خوبی برقرار باشد [Loke, 2004].



شکل (۴-۵): مقطع دوبعدی آرایش دوقطبی - دوقطبی [Loke, 2004].

^۱ Sill



شکل (۴-۶): مقطع حساسیت آرایش دوقطبی- دوقطبی برای مقادیر $n=1$, $n=2$, $n=4$, $n=6$ [Loke, 2004].

در حالت کلی، در صورت استفاده از تجهیزات مناسب و روش‌های درست برداشت صحرائی، آرایش دوقطبی-دوقطبی در بسیاری از نقاط برای آشکارسازی ساختارهایی همچون حفره‌ها که تفکیک‌پذیری افقی این آرایه به‌عنوان مزیت استفاده از آن مد نظر است، موفق عمل کرده است.

۳-۴ روش قطبش‌القایی (IP)

اولین بار در اواخر دهه ۱۹۴۰ روش IP برای اکتشاف توده‌های کانسنگی مخصوصاً برای سولفیدهای پراکنده مورد استفاده قرار گرفت [Loke, 2012]. تا سال ۱۹۵۰ تمام اندازه‌گیری‌ها با جریان پیوسته (روش حوزه زمان) انجام گرفت. در سال ۱۹۵۰ اندازه‌گیری IP با جریان متناوب در فرکانس‌های مختلف (روش حوزه فرکانس) صورت گرفت [نوروزی، ۱۳۹۲].

IP روشی است که اغلب در اکتشافات فلزات پایه به‌کار گرفته می‌شود. در اکتشاف مس، روش‌های مقاومت‌ویژه و IP بسیار کارایی دارند. علاوه بر اینکه مقدار قطبش‌القایی بالا در شناسایی زون‌های سولفور از اهمیت بالایی برخوردار است، با مقایسه توأم مقاطع مقاومت‌ویژه و IP می‌توان تا حدودی به نوع کانی‌زایی مس پی برد. به این‌گونه که وقتی مقدار IP بالا و مقاومت‌ویژه پایین باشد، کانسار از نوع اسکارن (دارای ضریب همبستگی منفی) و در صورتی که مقدار قطبش‌القایی بالا و مقاومت‌ویژه بالا (دارای ضریب همبستگی مثبت) است، کانسار از نوع پورفیری است [Sumner and Stewart, 1976].

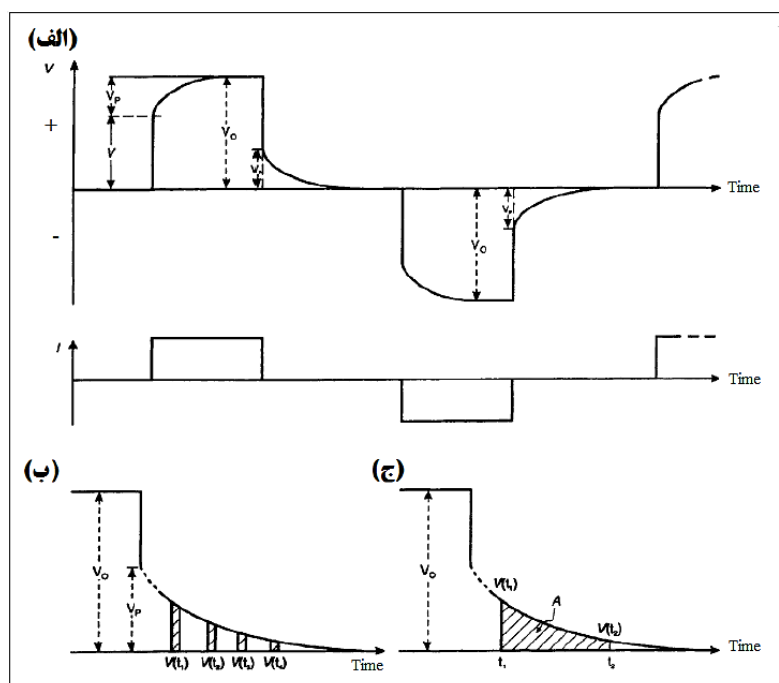
۱-۳-۴ روش‌های اندازه‌گیری IP

اندازه‌گیری‌های IP را به کمک دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل و همراه با برداشت‌های مقاومت‌ویژه انجام می‌دهند. در این مطالعات از آرایه‌های دوقطبی-دوقطبی، مستطیلی و قطبی-دوقطبی بیشتر استفاده می‌کنند [نوروزی، ۱۳۹۲].

پدیده IP را می‌توان هم در حوزه‌ی زمان و هم در حوزه‌ی فرکانس مشاهده کرد. اگر چه پدیده IP را می‌توان مشابه با تخلیه یک خازن (حوزه‌ی زمان) و یا تغییرات امپدانس یک مدار شامل یک مقاومت و یک خازن موازی با آن (حوزه فرکانس) دانست [حجت و رنجبر، ۱۳۹۰].

حوزه‌ی زمان

هنگام اندازه‌گیری IP، جریان مستقیم (DC) طی مدت کوتاهی به زمین تزریق می‌شود. اگر پس از شارژ شدن زمین جریان را قطع کنند، ولتاژ اضافی (V_p) ایجاد شده بعد از زمان کوتاهی به مقدار صفر می‌رسد (شکل ۴-۷-الف) [Reynolds, 1997]. پتانسیل حالت شارژ زمین (V_0) دو قسمت است؛ یکی پتانسیل حقیقی مربوط به جریان تزریق شده و دیگری ولتاژ اضافی که از اثر قطبش زمین ایجاد شده است. پس از قطع کردن جریان، ولتاژ زمین ابتدا به میزان V به صورت لحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند (شکل ۴-۷-ب). در ادامه ولتاژ اضافی به صورت منحنی تخلیه می‌شود و به صفر می‌رسد. معمولاً اندازه‌گیری پتانسیل، روی منحنی زوال و در زمان کوتاهی پس از قطع جریان انجام می‌گیرد [نوروزی، ۱۳۹۲].



شکل (۴-۷): اندازه‌گیری IP در روش حوزه زمان، الف) منحنی تغییرات پتانسیل در حالت شارژ و تخلیه و تغییرات جریان تزریقی، ب) پارامتر قطبش ظاهری، ج) پارامتر بارپذیری [After Reynolds, 1997]

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

$$P_a = \frac{\Delta V_t}{V_0} \quad (۸-۴)$$

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

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

$$(M_{t_1, t_2}^T)_a = (1/V) \int_{t_2}^{t_1} \Delta V_{IP} dt \quad (۹-۴)$$

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

۲-۳-۴ منشأ پدیده قطبش‌القایی

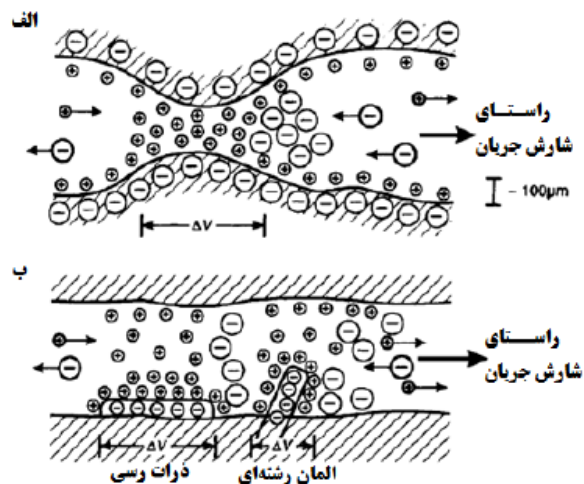
اگر چه انرژی انباشته از لحاظ نظری می‌تواند به اشکال گوناگونی همچون مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی وجود داشته باشد، ولی مطالعات آزمایشگاهی قطبش در انواع مختلف سنگ‌ها ثابت کرده است که انرژی شیمیایی به مراتب مهم‌تر از سایرین است. این انباشش شیمیایی به دلایل زیر نتیجه می‌شود:

الف) تغییر تحرک یون‌ها در مایعات موجود در ساختار سنگ‌ها، ب) تغییر در رسانندگی یونی و الکترونی در جاهایی که کانی‌های فلزی وجود دارند. اثر اول به نام قطبش غشایی یا الکترولیتی موسوم

است و اثر IP زمینه یا IP نرمال را به وجود می آورد. این اثر ممکن است در سنگ‌هایی که شامل کانی‌های فلزی نیستند، روی دهد. اثر دوم به نام قطبش الکترودی یا ولتاژ اضافی نامیده می‌شود. مقدار این اثر عموماً بزرگ‌تر از زمینه است و با مقدار کانی‌های فلزی در سنگ‌ها ارتباط دارد. این دو اثر توسط IP قابل تمیز از یکدیگر نیستند. به علاوه به نظر می‌آید که این اثرها مستقل از ساختار اتمی یا مولکولی در سنگ‌ها و کانی‌ها باشند، به عبارت دیگر، IP یک اثر حجمی است [Telford et al., 1990].

الف) قطبش الکترولیتی (غشایی)

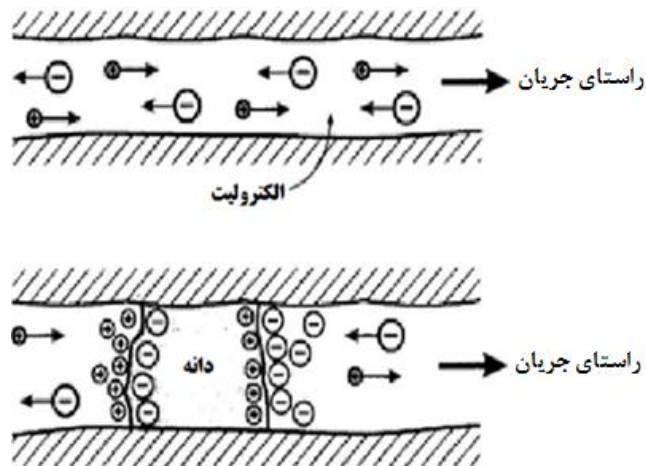
رسانش الکترولیتی عامل غالب در بیشتر سنگ‌ها می‌باشد و وقتی فلزی وجود نداشته و فرکانس پایین است، این تنها شکل رسانش است که وجود دارد. لذا ساختار سنگ‌ها باید تا حدودی متخلخل باشند تا در جایی که کانی‌های فلزی وجود ندارند، شارش جریان را ممکن سازد. در اکثر کانی‌های سنگی مقداری بار منفی در سطح مشترک بین رویه سنگ و مایع داخل خلل و فرج وجود دارد. در نتیجه یون‌های مثبت به این سطح مشترک جذب شده و یون‌های منفی از آن دور می‌شوند. این تراکم یون ممکن است تا عمق حدود ۶ تا ۱۰ سانتی‌متر در داخل مایع گسترش یابد. اگر این رقم حدود پهنای خلل و فرج باشد، وقتی یک پتانسیل جریان مستقیم به دو سر آن وصل شود، یون‌های منفی در یک طرف آن جمع شده و از طرف دیگر دور می‌شوند. در نتیجه‌ی چنین توزیع قطبیده‌ای، جریان قطع می‌شود. با برقراری مجدد جریان، یون‌ها به وضعیت اولیه برمی‌گردند؛ درحالی‌که این عمل در زمانی معین صورت می‌گیرد (شکل ۴-۸) [Telford et al., 1990].



شکل (۴-۸): چگونگی گسترش قطبش القایی غشایی، الف) تنگ شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی، ب) بار منفی ذرات رسی و المان رشته‌ای موجود در دیواره کانال ارتباطی

ب) قطبش الکترودی (فلزی)

این نوع قطبش هنگامی رخ می‌دهد که در داخل سنگ مواد فلزی وجود داشته و قسمتی از عبور جریان الکترولیتی و قسمتی دیگر الکترونی باشد که سبب فعل و انفعال شیمیایی در سطح مشترک بین کانی و مایع می‌گردد. وقتی جریان عبور نماید، تبادل الکترون بین فلز و محلول یون‌ها در سطح مشترک صورت می‌پذیرد و عمل الکترولیز انجام می‌شود. در شیمی فیزیک این اثر به نام ولتاژ اضافی موسوم است. چون سرعت شارش جریان در الکترولیت خیلی کندتر از داخل فلز است، تجمع یون‌ها توسط ولتاژ خارجی صورت می‌گیرد. وقتی جریان قطع شود ولتاژ باقی‌مانده، با پخش یون‌ها به عقب و به طرف حالت تعادل اولیه آن‌ها، واپاشی می‌یابد (شکل ۴-۹) [Telford et al., 1990].



شکل (۴-۹): قطبش الکتروودی الف) شارش جریان در یک کانال باز ب) قطبش دانه رسا که در کانال ارتباطی سنگ قرار گرفته است [After Reynolds, 1997]

جدول (۴-۳) فهرستی از انواع کانی‌ها با یک درصد در تراکم حجمی را با پاسخ‌های بارپذیری آن‌ها

نشان می‌دهد. زوال زمانی موج جریان مربعی سه ثانیه و واپاشی در طول یک ثانیه اندازه‌گیری شده

است.

جدول (۴-۳): بارپذیری در انواع کانی‌ها [Telford et al., 1990].

میزان بارپذیری (میلی ثانیه)	کانی
۱۳,۴	پیریت
۱۳,۲	کالکو پیریت
۱۲,۳	مس
۱۱,۲	گرافیت
۹,۴	گالن
۲,۲	مگنتیت
۰,۲	مالاکیت
۰	هماتیت

۴-۴ مدل سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و IP برداشت شده در منطقه مورد

مطالعه

همان‌طور که می‌دانیم داده‌های برداشت شده یک سری داده‌های خام می‌باشند که دارای نوفه‌های مختلف هستند و تفسیر مستقیم آن‌ها نتایج مطلوبی در پی نخواهد داشت. به عبارت دیگر داده‌های برداشت شده در عملیات صحرایی در حقیقت یک سری داده‌های خام می‌باشند که توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیرسطحی از روی این داده‌ها (به‌طور مستقیم) غیرممکن است. بنابراین تعیین رابطه بین داده‌های صحرایی به دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به عبارت دیگر، مدل سازی داده‌های برداشت شده برای توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری است. در مدل سازی ریاضی، روابط فیزیکی توسط یک سری معادلات دیفرانسیل و معادلات انتگرالی بیان می‌شوند، به گونه‌ای که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود [Dey and morrison, 1979].

در ادامه فصل، مطالبی در رابطه با مدل سازی، روش‌های مدل سازی و لزوم انجام آن‌ها برای دستیابی به تفسیرهای ژئوفیزیکی ارائه خواهد شد.

۴-۴-۱ روش‌های مدل سازی ژئوفیزیکی

مدل سازی ژئوفیزیکی به دو دسته کلی مدل سازی فیزیکی و مدل سازی عددی تقسیم بندی می‌شود [کلاگری، ۱۳۷۱].

الف- مدل سازی فیزیکی

مدل سازی فیزیکی، شبیه سازی ساختار زمین در مقیاس آزمایشگاهی است. این روش مدل سازی بسیار وقت گیر و پرهزینه است. همچنین شرایط کنترل شده آزمایشگاهی به خوبی شرایط غیرقابل

پیش‌بینی زمین را فراهم نمی‌کند. با پیشرفت علوم رایانه این روش عمدتاً جای خود را به مدل‌سازی عددی توسط برنامه‌های رایانه‌ای داده است [Dey and morrison, 1979].

ب- روش‌های مدل‌سازی عددی

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

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

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) آن قدر ادامه می‌یابد تا پاسخ مدل، برازش خوبی با داده‌های صحرائی پیدا کند؛ یعنی از مدل، داده‌ها به دست می‌آیند. مدل‌سازی پیشرو بر مبنای روش آزمون و خطا انجام می‌شود. در این روش یک توزیع خاص برای اجزای زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شود؛ سپس پاسخ این مدل تحت آرایش الکترونی مورد نظر محاسبه می‌شود [Dey and morrison, 1979].

ب) مدل سازی معکوس (وارون): در مدل سازی وارون سعی می شود تا با توجه به داده های برداشت شده، مدل تخمین زده شود. بقیه مراحل مدل سازی وارون همانند مدل سازی پیشرو است. در واقع تفاوت مدل سازی وارون با مدل سازی پیشرو در نحوه انتخاب مدل اولیه است. انتخاب مدل در روش وارون کمی سخت تر است، ولی پاسخ های حاصل به واقعیت نزدیک تر است. همچنین تعداد تکرارها برای کاهش خطا کمتر می باشد. به دلیل پیچیده تر بودن مدل در روش وارون، زمان لازم برای محاسبه پاسخ های مدل و حجم اشغالی، بیشتر است [Loke, 2004].

در روش مقاومت ویژه الکتریکی پارامترهای مدل، مقادیر مقاومت ویژه سلول های مدل و داده ها، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده هستند. رابطه ریاضی بین پارامترهای مدل و پاسخ آن ها از روش های تفاضل محدود^۱ [Hedlin and Constable, 1990] و یا اجزا محدود^۲ [Okan, T., 2002] فراهم می شوند. در تمامی روش های بهینه سازی، مدل اولیه در فرآیندی تکرارشونده طوری بهبود می یابد تا اختلاف بین داده های برداشت شده (y) و پاسخ های مدل (f) کاسته شود.

$$y = col(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (10-4)$$

m تعداد قرائت ها است. پاسخ های مدل را می توان به طریق مشابهی نشان داد:

$$f = col(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (11-4)$$

پارامترهای مدل به صورت بردار زیر ارائه می شوند:

$$q = col(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (12-4)$$

^۱ Finite-difference

^۲ Finite-Element

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.

$$g = y - f \quad (۱۳-۴)$$

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.

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (۱۴-۴)$$

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 [Loke and Barker, 1995]:

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (۱۵-۴)$$

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

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (۱۶-۴)$$

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

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (۱۷-۴)$$

^۱ Marquardt-Levenberg

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

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T - \lambda F q_k \quad (18-4)$$

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (19-4)$$

C_x ، C_y و C_z ماتریس‌های هموارسازی در جهت‌های x ، y و z هستند. α_x ، α_y و α_z وزن‌های نسبی داده شده به فیلترهای هموارسازی در جهات یادشده می‌باشند. معادله (۱۹-۴)، مربع تغییرات فضایی یا سختی مقادیر مقاومت ویژه مدل را نیز کمینه می‌کند. در واقع این همان روش بهینه‌سازی هموارسازی است. روش مذکور مدلی با تغییرات تدریجی مقاومت ویژه تولید می‌کند. استفاده از این روش وارون‌سازی برای مناطقی مناسب است که تغییرات زمین‌شناسی آن‌ها به صورت تدریجی بوده و ناگهانی نباشد. در شرایطی که مناطق در زیر سطح به صورت درونی همگن هستند، ولی با محیط پیرامون خود متفاوت بوده و دارای مرزهای تند هستند، بهینه‌شده معادله فوق که به روش وارون‌سازی بلوکی معروف است، جواب‌های به مراتب قابل قبول تری می‌دهد که به صورت زیر است [Loke and Barker, 1995]:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (20-4)$$

^۱ Jacobwin

^۲ Damping factor

$$F = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z \quad (۲۱-۴)$$

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

۴-۵ روش‌های عددی برای حل مسائل وارون‌سازی

از میان روش‌های عددی حل مسائل وارون‌سازی، روش کمترین - مربعات به دلیل سادگی ریاضی، از پرطرفدارترین روش‌ها است. همچنین به دلیل اینکه در الگوریتم نرم‌افزار مورد استفاده در این پایان - نامه، این روش به کار برده شده است، به توضیح آن پرداخته می‌شود. در این مدل‌سازی قبل از هر چیز به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز می‌باشد [Loke and lane, 2004].

مدل اولیه در نرم‌افزار RES2DINV یک مدل همگن متناسب با داده‌های مشاهده‌ای است، به گونه‌ای که منجر به تغییرات شدید در مراحل تکرار نشود. پس از تخمین مدل اولیه نوبت به تصحیح این مدل

^۱ Bounary element method

باهدف رسیدن به تطابق قابل قبول با داده‌های صحرایی می‌رسد. برای این منظور دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارت‌اند از روش کمترین مربعات گوس- نیوتن^۱ و روش شبه نیوتن^۲.

۴-۵-۱ روش کمترین مربعات گوس - نیوتن

یکی از روش‌های معمول برای حل مسائل غیرخطی، روش بهینه‌سازی گوس- نیوتن می‌باشد. این روش به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل وارون‌سازی از جمله در نرم‌افزار RES2DINV به کار می‌رود [Sasaki, 1992]. روش مدل‌سازی وارون کمترین مربعات گوس- نیوتن در سه مرحله انجام می‌شود. مرحله اول، محاسبه مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری برای مدل به کار گرفته‌شده می‌باشد. این مرحله با استفاده از روش تفاضل محدود یا روش اجزا محدود انجام می‌شود. مرحله دوم، محاسبه ماتریس ژاکوبین (ماتریس مشتقات جزئی مرتبه اول) می‌باشد. مرحله سوم، حل سیستم معادلات خطی می‌باشد. این مراحل به‌صورت تناوبی تکرار می‌شود تا همخوانی مناسبی بین مدل فرض شده با مدل صحرایی ایجاد شود و یا برنامه به حداکثر تکرار تعریف‌شده خود برسد [Loke and lane, 2004].

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

۴-۵-۲ روش شبه‌نیوتن

در روش گوس- نیوتن ماتریس ژاکوبین در هر بار تکرار محاسبه می‌شود [Loke and lane, 2004]. روش شبه‌نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین به‌وسیله استفاده از یک روش به‌روزرسانی اجتناب می‌کند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین برای

^۱ Gauss- Newton

^۲ Quasi- Newton

مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد، مشتقات جزئی می‌توانند به طور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن به عنوان مدل اولیه، محاسبه شوند. روش شبه نیوتن از معادله به‌روزرسانی زیر استفاده می‌کنند:

$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^t \quad (22-4)$$

$$B_{i+1} u_i = \frac{\Delta y_i - B_i P_i}{P_i P_i^t} B_i + u_i P_i^t \quad (23-4)$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i \quad (24-4)$$

در روابط بالا y_i پاسخ مدل برای i امین تکرار، B_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای $i+1$ امین تکرار با استفاده از تقریب ماتریس ژاکوبین و P_i و B_i بردار انحراف پارامتر می‌باشند. لازم به ذکر است که روش‌های دیگری نیز برای روش شبه‌نیوتن وجود دارد. مدل‌سازی وارون شبه‌نیوتن در چهار گام اصلی انجام می‌شود. در گام اول پارامترهایی که فرآیند وارون‌سازی را کنترل می‌کنند، باید انتخاب شوند. میرایی اولیه، میرایی کمینه و همچنین ماکزیمم تعداد تکرارها برای این روش مدل‌سازی تعیین می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر ۰,۲ و ۰,۰۴ برای دو عامل میرایی اولیه و میرایی کمینه نتایج رضایت بخشی را برای اکثر داده‌های صحرایی ارائه می‌دهند [Loke and lane, 2004].

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

$$e_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{\varepsilon_i} \quad (25-3)$$

^۱ Root Mean Square

که ε_i و ε_{i+1} ، خطای RMS برای i امین و $i+1$ امین تکرار و e_i میزان خطای RMS کمینه می باشد. به طور معمول فرآیند مدل سازی وارون زمانی که e_i کمتر از $0,05$ است، متوقف می شود.

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 مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده f_i به صورت زیر محاسبه می شود:

$$f(x) = r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (26-4)$$

حال مقاومت ویژه ظاهری برای مدل جدید با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه می شود. در این رابطه n تعداد نقاط داده ها است. در این مرحله ماتریس ژاکوبین B_0 محاسبه شده و در حافظه رایانه 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 (4-27) انجام می شود.

$$r_1 = r_0 + P_0 \quad (27-4)$$

در گام سوم به 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، جستجوی خطی با استفاده از درون یابی 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 یک مدل جدید به دست می آید؛ بردار انحراف پارامتر P_{i+1} ، با استفاده از ماتریس ژاکوبین اندازه گیری شده و B_{i+1} اندازه گیری شده، محاسبه می شود. مراحل سوم و چهارم مرتباً تکرار می شود تا اینکه برنامه همگرا شود، یا اینکه به ماکزیمم تعداد تکرارها برسد [Loke and lane, 2004].

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 رایانه را نیز اشغال می کند. این مزایا باعث شده تا در وارون سازی بیشتر روش شبه نیوتن استفاده شود [Loke and lane, 2004].

۴-۶ وارون سازی هموار دو بعدی توسط نرم افزار RES2DINV

در مدل سازی دوبعدی هموار، از روش بهینه یابی حداقل مربعات استفاده می شود و یک زمین تک لایه همگن به عنوان مدل اولیه در نظر گرفته می شود [Loke and Barker, 1996]. معادله این روش عبارت است از [Loke, 2004]:

$$(J^T J + \lambda F) d = J^T g \quad (۴-۲۸)$$

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

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (۴-۲۹)$$

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 اجزای محدود استفاده می شود. در مناطقی که تصحیح توپوگرافی نیاز است، نرم افزار به طور پیش فرض از روش اجزا محدود استفاده می کند. ابتدا فاکتور تعدیل، یک مقدار بزرگ انتخاب

می‌شود (λ_0) سپس بعد از تکرار این مقدار کاهش می‌یابد تا به حد مینیمم برسد (λ_m) (که معمولاً ۰,۱ مقدار اولیه است).

$$F = \lambda_m = 0.1 \lambda_0 \quad (۳۰-۴)$$

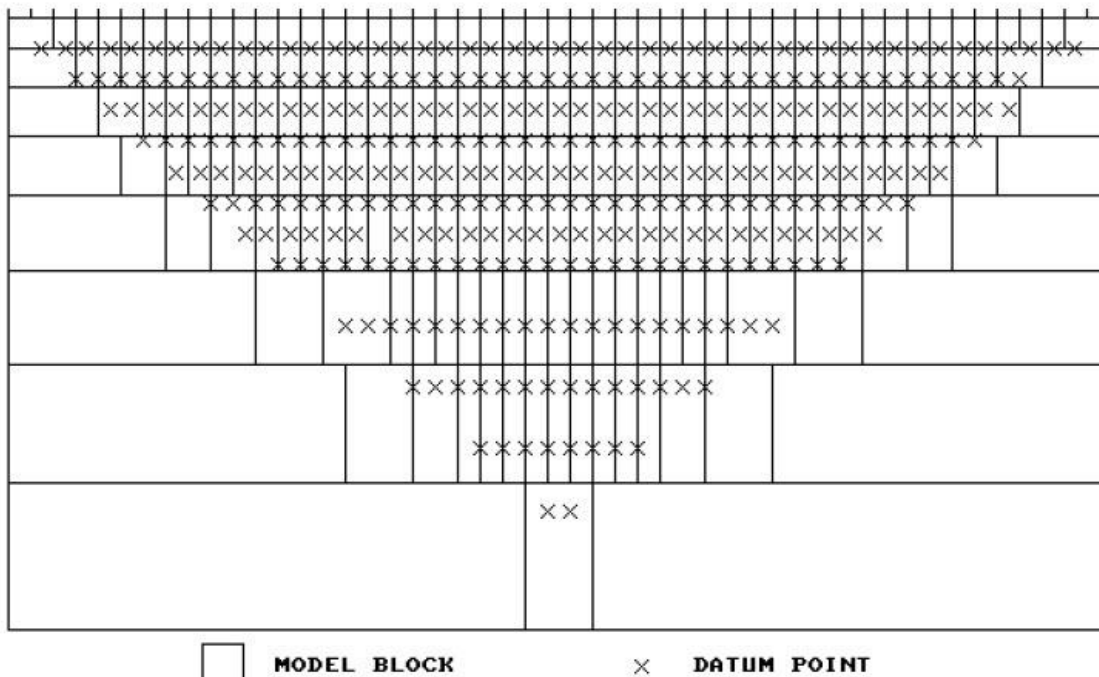
λ_0 به سطح نوفه منطقه بستگی دارد. هر چه سطح نوفه بیشتر باشد، مقدار اولیه فاکتور تعدیل هم بیشتر است. نرم‌افزار RES2DINV برای انجام مدل‌سازی، از روش کمترین مربعات به همراه روش عددی گوس-نیوتن یا شبه نیوتن استفاده می‌کند [Loke and Dahlin, 2002]. برنامه در هر بار تکرار، خطای RMS را محاسبه می‌کند و سعی در کاهش آن دارد. مقدار خطای جذر میانگین مربعات توسط معادله زیر تعریف می‌شود [Zohdy, 1989]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\rho_{0j} - \rho_{ej})^2}{N}} \times 100 \quad (۳۱-۴)$$

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

برای مدل‌سازی داده‌های قطبش‌القایی و مقاومت ویژه از نرم‌افزار RES2DINV استفاده شد. در این نرم‌افزار مدل استفاده شده به عنوان مدل اولیه شامل یک سری بلوک‌های مستطیلی دوبعدی می‌باشد که در شکل (۴-۱۰) 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 شدند. همچنین عمق مراکز بلوک‌ها در محاسبه عمق میانگین تحت بررسی برای بازه‌های الکترونی مختلف مورد استفاده قرار گرفتند [Loke and Lane, 2004].

ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS



شکل (۴-۱۰): مدل اولیه مورد استفاده در نرم افزار RES2DINV

این نرم افزار، مدل سازی مقاومت ویژه و قطبش القایی را به طور همزمان انجام می دهد. داده های IP و مقاومت ویژه حاصل از به کارگیری آرایش های ونر، شلومبرژه، قطبی- قطبی و دو قطبی- دو قطبی در این نرم افزار قابل مدل سازی اند (امکان تعریف آرایش های غیرمرسوم دیگری نیز وجود دارد). در این نرم افزار مدل سازی وارون با روش اجزا محدود و تفاضل محدود برای تعداد زیادی از داده های صحرائی 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 صحرائی داشته باشد. در حقیقت مدل به دست آمده بیانگر یک پاسخ ریاضی مطابق با ساختار زمین شناسی می باشد.

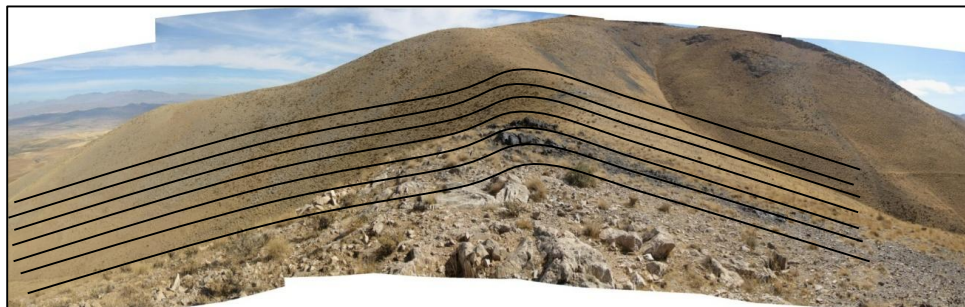
پارامترهای مدل در مرحله تکرار در فرآیند وارون سازی، آن قدر تغییر می کنند تا بیشترین تطابق بین پاسخ مدل ارائه شده و داده های صحرائی حاصل گردد. همچنین مدل به دست آمده باید با داده های زمین شناسی تطبیق داده شوند تا صحت آن نیز از نظر زمین شناسی مورد تأیید قرار گیرد [Loke,

2004]

۷-۴ عملیات صحرایی برداشت داده‌های مقاومت ویژه و قطبش القایی

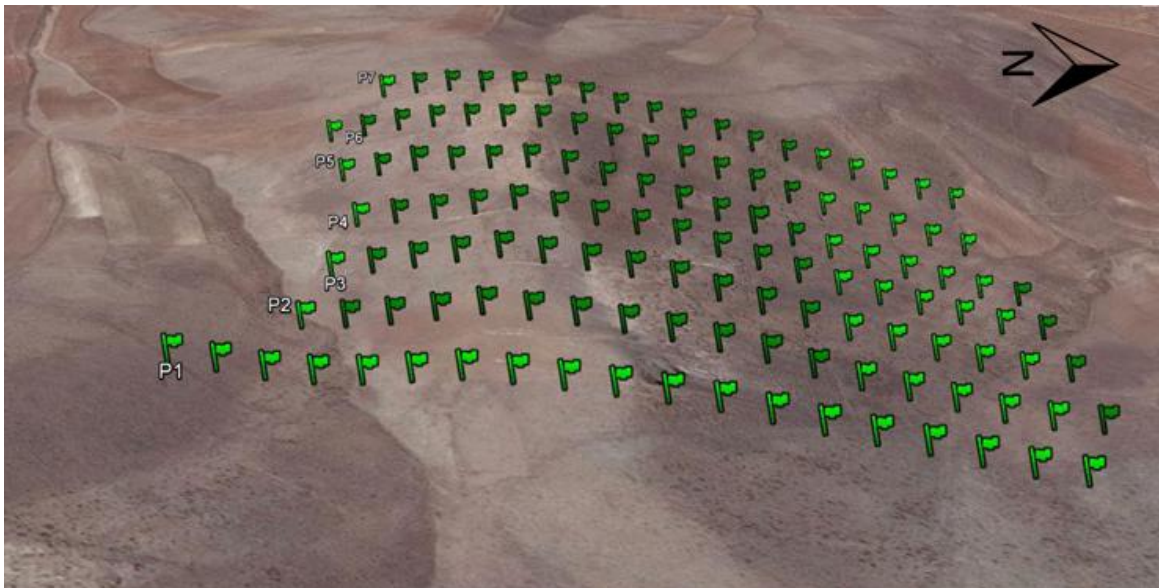
به منظور برداشت داده‌های صحرایی ژئوالکتریک، با توجه به شواهد و اطلاعات زمین‌شناسی موجود، شبکه‌ای مستطیلی با ابعاد 350×400 متر و با آرایش دوقطبی-دوقطبی در ۱۲۹ ایستگاه برداشت و در قالب ۷ پروفیل موازی با یکدیگر (شکل ۴-۱۱ و ۴-۱۲)، عمود بر امتداد توده در جهت شمالی-جنوبی، به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر (مجموعاً ۵۵۳ نقطه) برای دو پارامتر قطبش القایی بر حسب میلی‌ولت بر ولت و مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر اندازه‌گیری شد. هر یک از این پروفیل‌ها دارای فاصله الکترودی ۲۰ متر، پرش ۲۰ متر و تا ۸ پرش ۲۰ متری برای الکترودهای پتانسیل می‌باشند. (به دلیل تغییرات شدید مقادیر مقاومت ویژه در نزدیکی سطح، جهت دقت بیشتر در فرآیند مدل‌سازی وارون دوبعدی، از نصف آرایه الکترودی (۱۰ متر) استفاده گردید).

تعیین رابطه‌ی بین داده‌های صحرایی به دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به عبارت دیگر مدل‌سازی داده‌های برداشت شده، جهت توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، امری ضروری است.



شکل (۴-۱۱): دید محدوده (از غرب به شرق) به همراه امتداد تقریبی پروفیل‌های برداشت

مقاومت ویژه و IP



شکل (۴-۱۲): موقعیت ایستگاه‌های برداشتی بر روی هر یک از پروفیل‌ها (دید از شرق) [برگرفته شده از Google]

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

ویژه و IP

وارون سازی داده‌های مقاومت ویژه و IP، امکان تعیین موقعیت دقیق بی‌هنجاری‌ها را فراهم می‌کند. این کار با وارون سازی مقادیر به روش وارون سازی هموار به کمک نرم افزار RES2DINV انجام می‌شود. این نرم افزار با به حداقل رساندن خطای RMS (جذر میانگین مربعات) بین مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر محاسبه شده به یک مدل فیزیکی از زمین می‌رسد که با شرایط زمین شناسی انطباق دارد. این مدل‌ها در واقع نمایش دوبعدی مقاومت ویژه و قطبش القایی هستند.

در مطالعه حاضر، تفسیر و مدل سازی وارون هموار داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و قطبش القایی به همراه توپوگرافی، با استفاده از نرم افزار مذکور برای هفت پروفیل که داده‌های معتبری داشتند، صورت گرفت. داده‌های این پروفیل‌ها پس از ورود به نرم افزار و انجام تصحیحات اولیه از جمله حذف داده‌های پرت به روش وارون سازی کمترین مربعات، وارون سازی شده و نتایج حاصله به صورت مقاطع دوبعدی

ارائه شدند. برای هر مدل سازی، اولین مدل، مربوط به داده‌های مقاومت ویژه و در زیر آن مدل قطبش-القایی ارائه شده است.

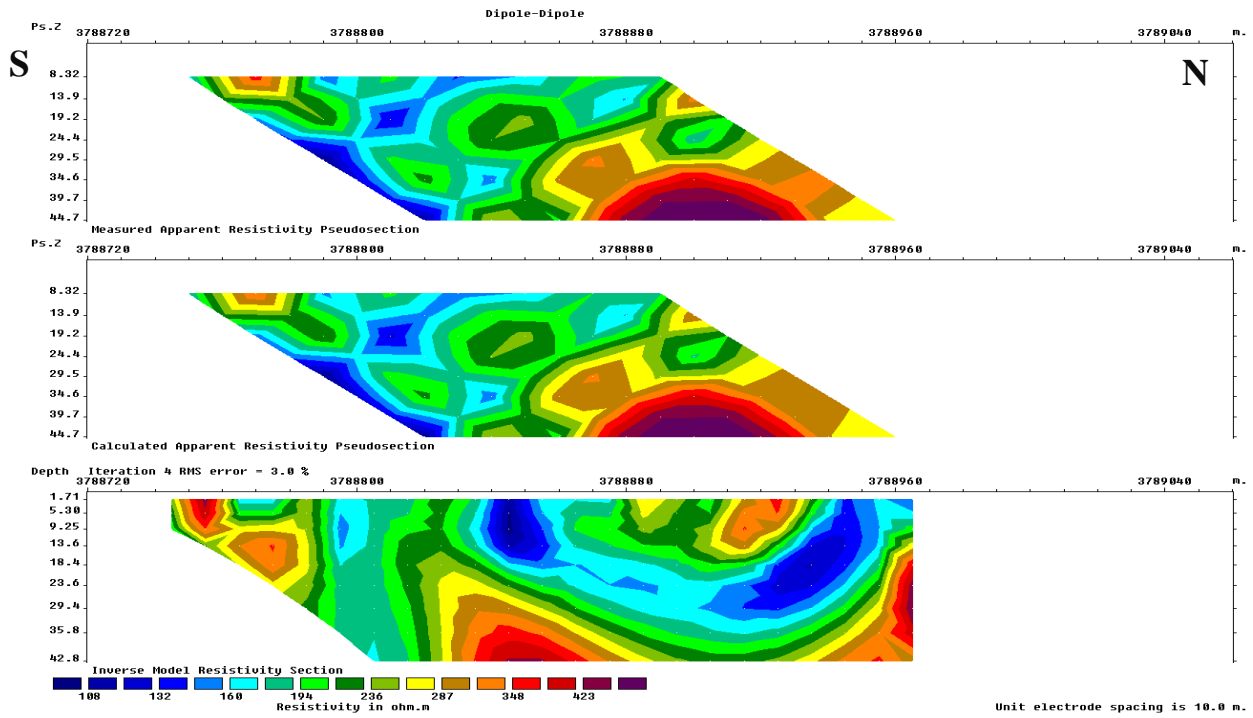
۴-۸-۱ تفسیر نتایج مدل سازی وارون پروفیل P1

شروع این پروفیل، با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۸۷۲۰ و ۳۷۸۸۷۴۰ در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته، به طوری که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۹۰۸۰ و ۳۷۸۹۰۶۰ قرار گرفته است. به این ترتیب ۹ پرش برای الکترودهای جریان و جمعاً ۶۴ نقطه بر روی این پروفیل برای دو پارامتر قطبش القایی ظاهری بر حسب میلی ثانیه و مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر ($\Omega.m$) اندازه‌گیری شده است.

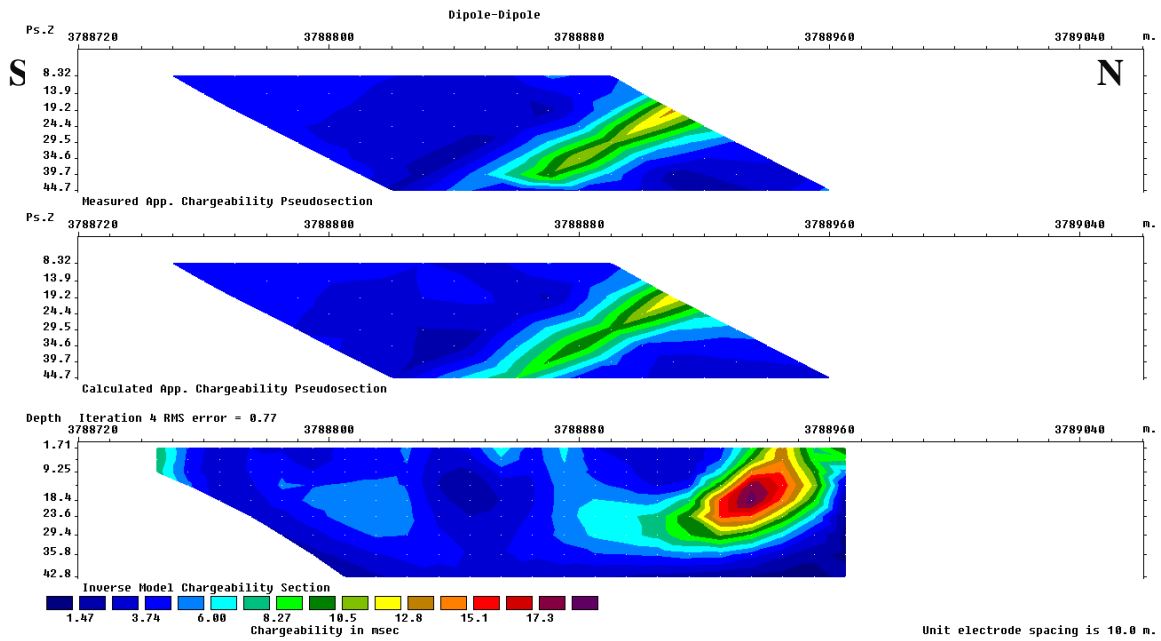
شکل‌های شماره (۴-۱۳) و (۴-۱۴)، به ترتیب مقطع مقاومت ویژه ظاهری و قطبش القایی ظاهری را بر روی پروفیل یک به همراه مدل نشان می‌دهند. همچنین شکل شماره (۴-۱۵) و (۴-۱۶)، به ترتیب مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی و پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش القایی را بر روی این پروفیل نشان می‌دهد.

بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل بخش‌های قرمز تا سبز را می‌توان بخش‌های مقاوم منطبق بر سنگ‌های آهکی و بخش‌های آبی را منطبق بر توده‌های سنگی با مقاومت کم مثل شیست یا رسوبات سطحی و در بعضی جاها منطبق بر توده معدنی دانست. همچنین بر روی نقشه مدل قطبش القایی این پروفیل یک بخش کاملاً بارز در فواصل ۳۷۸۸۹۳۰ تا ۳۷۸۸۹۷۰ (از مبدأ پروفیل) به پهنای ۴۰ متر در شمال با رنگ قرمز پر رنگ دیده می‌شود؛ که به سمت عمق به زیر تپه اصلی کشیده شده است. این بی‌هنجاری دارای پلاریته نسبتاً خوبی بوده و احتمالاً سنگ آهن به همراه مقادیری سولفید و اکسیدهای مس در آن دیده می‌شود. در نهایت می‌توان بیان کرد که توده معدنی بیشتر با بخش‌های کم مقاومت

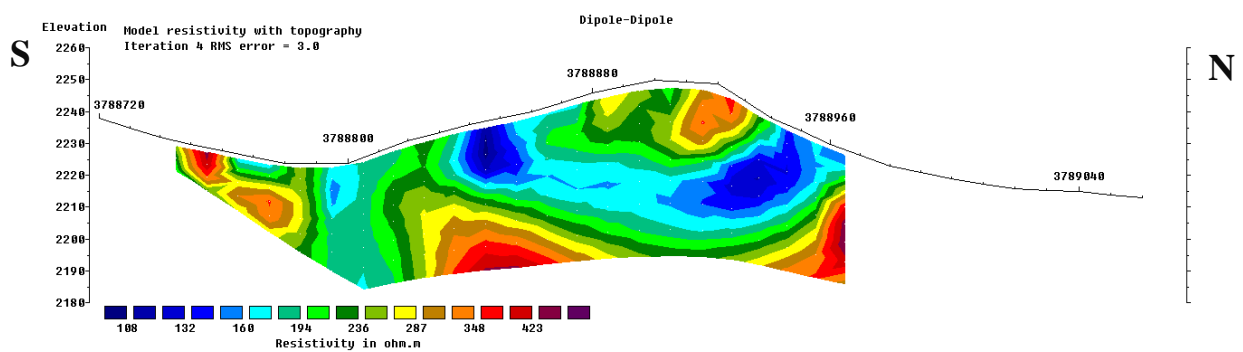
همخوانی داشته و این ممکن است به دلیل تشکیل توده در بخش‌های خردشده و هم به دلیل خاصیت فلزی توده معدنی باشد.



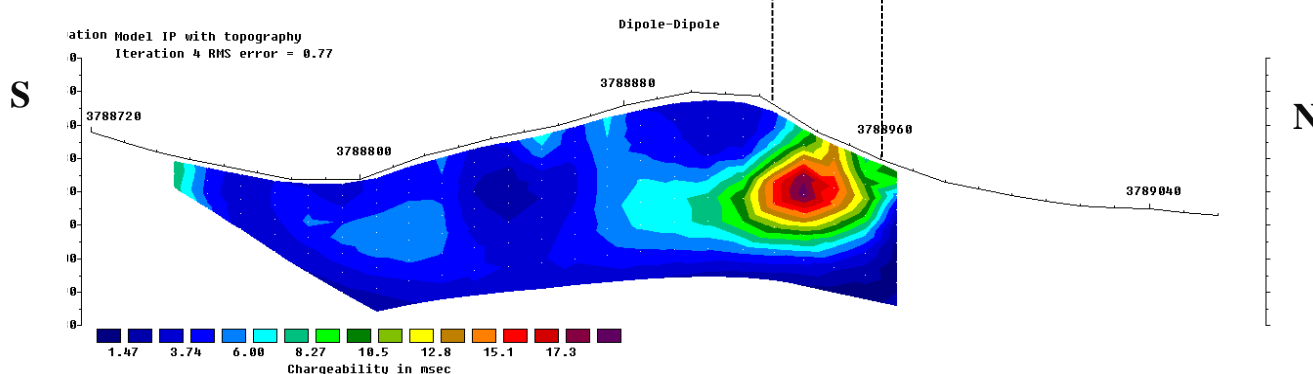
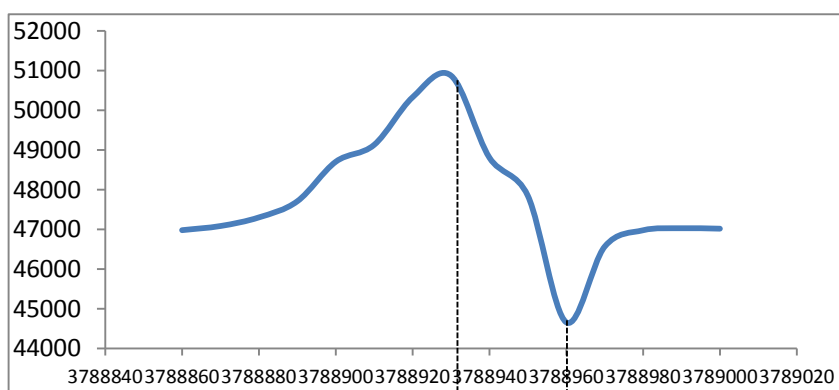
شکل (۴-۱۳): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل مقاومت ویژه پروفیل شماره یک



شکل (۴-۱۴): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل قطبش‌القایی پروفیل شماره یک



شکل (۴-۱۵): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره یک

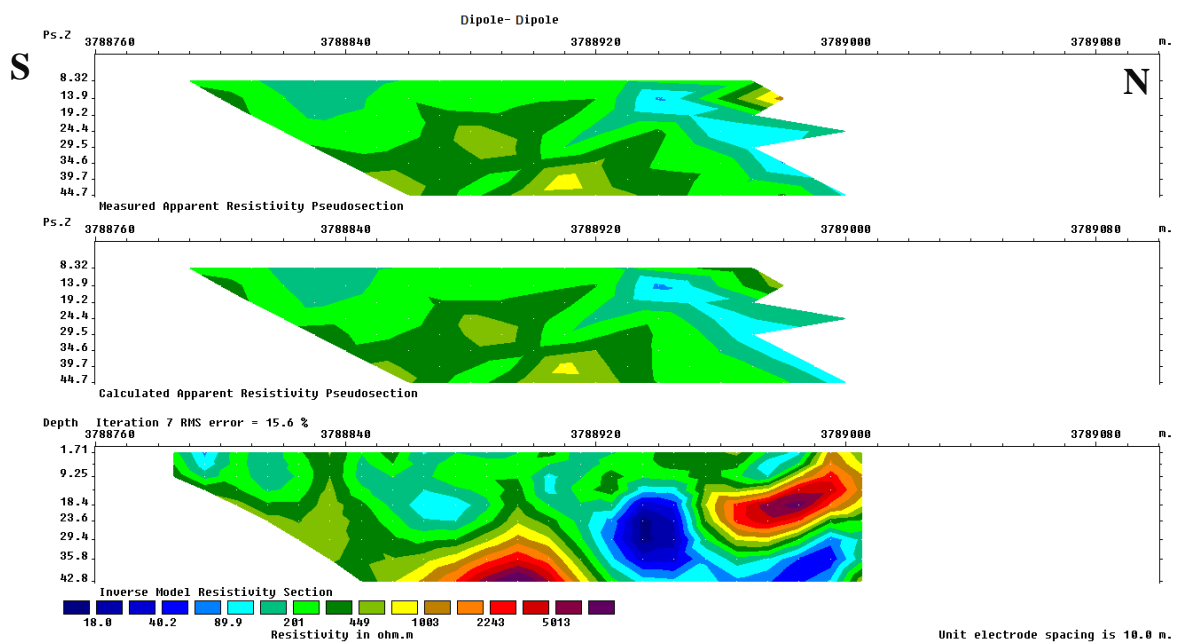


شکل (۴-۱۶): قسمتی از پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره یک

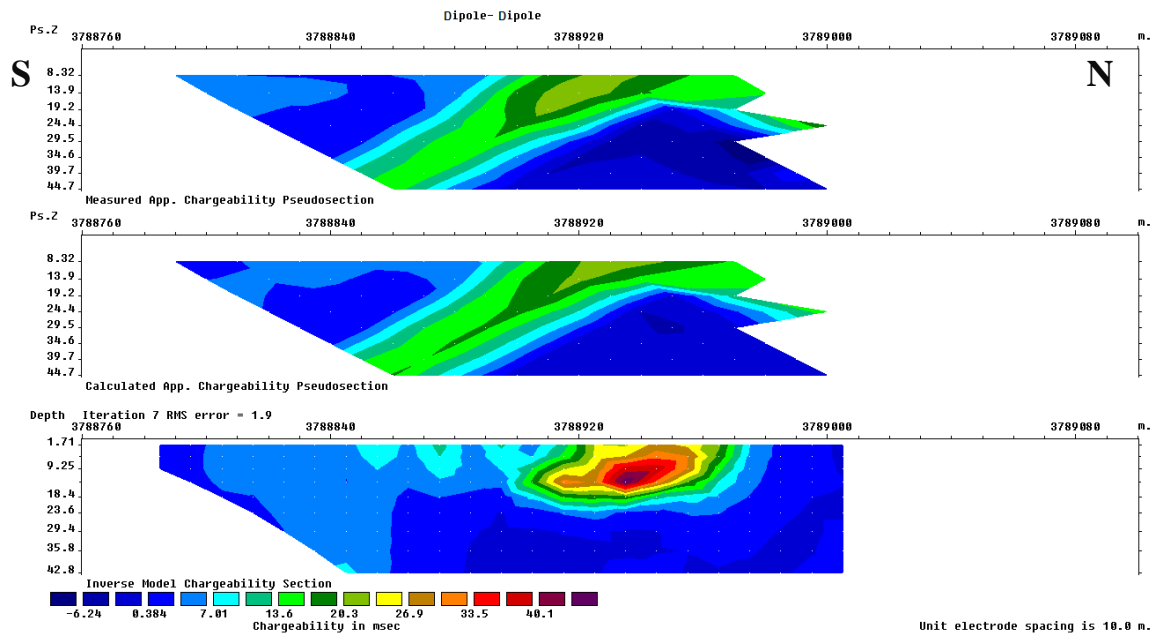
۴-۸-۲ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل P2

شروع این پروفیل با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۸۷۶۰ و ۳۷۸۸۷۸۰ در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته به‌طوری‌که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۹۰۸۰ و ۳۷۸۹۱۰۰ قرار گرفته است. به این ترتیب ۱۰ پرش برای الکترودهای جریان و جمعاً ۶۸ نقطه بر روی این پروفیل اندازه‌گیری شده است. مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری و قطبش‌القایی ظاهری بر روی پروفیل دو به‌همراه مدل، همچنین مدل مقاومت‌ویژه به‌همراه توپوگرافی و پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی در شکل‌های شماره (۴-۱۷، ۴-۱۸، ۴-۱۹ و ۴-۲۰) نشان داده شده است.

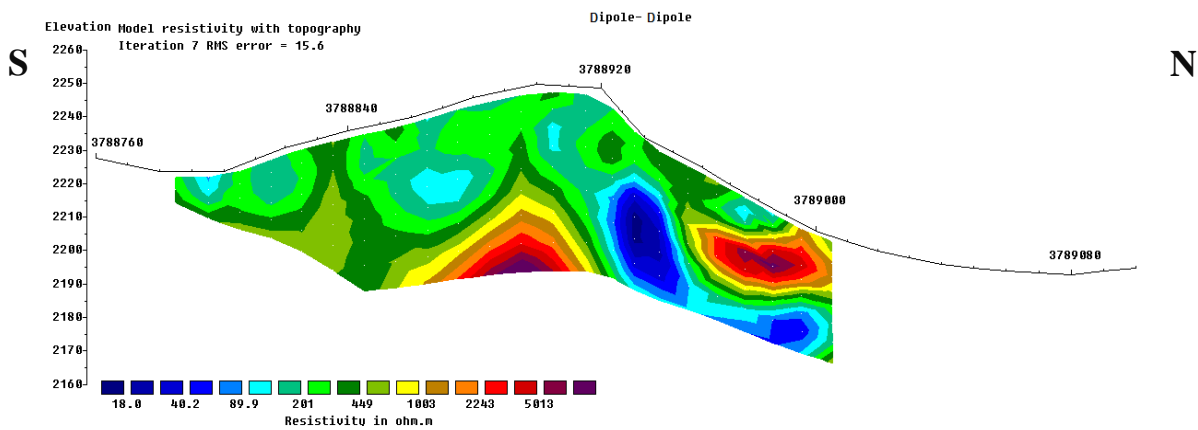
بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل مشابه پروفیل شماره یک، بخش‌های قرمز رنگ احتمالاً توده‌های آهکی مقاوم و بخش‌های آبی شیبست با مقاومت کم را جدا نموده است. به این ترتیب بخش باریکی از جنس آهک بین ایستگاه ۳۷۸۸۹۱۰ تا ۳۷۸۸۹۵۰ دیده می‌شود که در زیر آن مقاومت کم شده و در شمال از ایستگاه ۳۷۸۸۹۸۰ مقاومت بالا رفته و در جنوب نیز در عمق مقدار مقاومت افزایش یافته است. بر روی نقشه مدل قطبش‌القایی این پروفیل از ایستگاه ۳۷۸۸۹۱۰ تا ۳۷۸۸۹۷۰ به طول ۶۰ متر مقدار پلاریته به مقدار قابل توجه بالا بوده که با رنگ قرمز به خوبی جدا شده و ضخامت آن نسبت به پروفیل شماره یک کمتر شده ولی تا عمق ۲۰ متر همچنان ادامه داشته است. همانند پروفیل یک شیب توده به زیر دره بوده است.



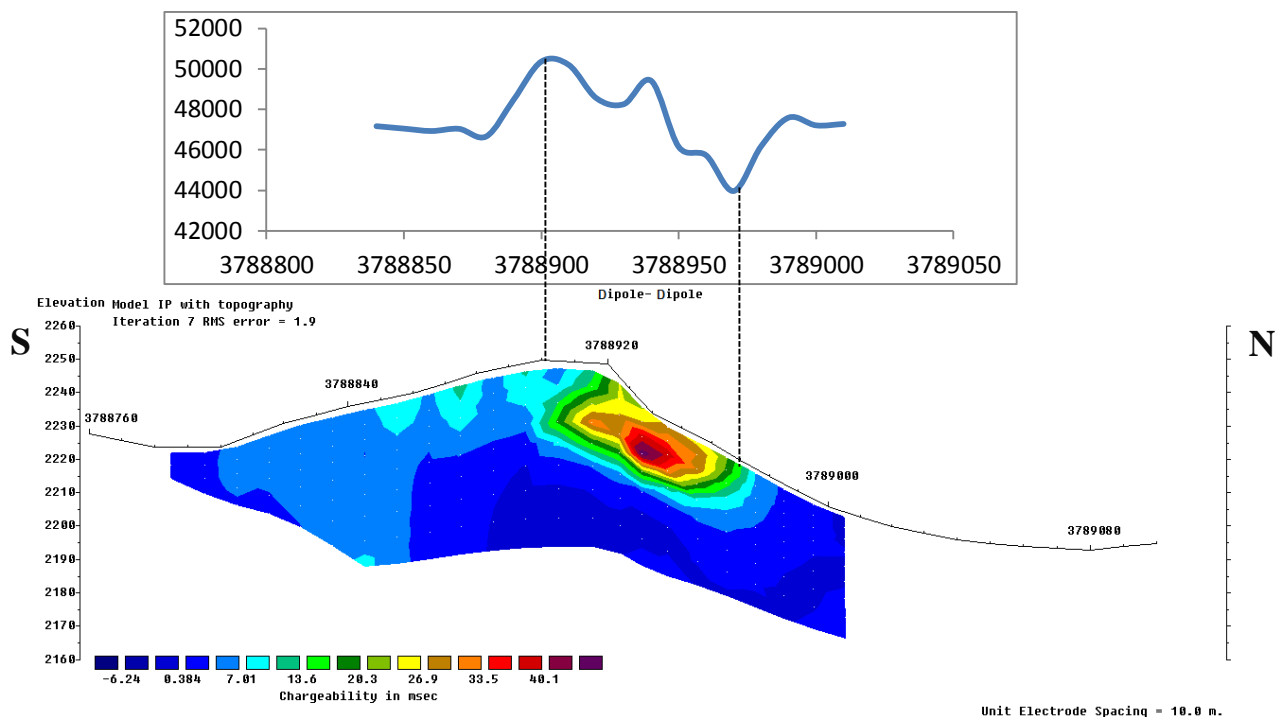
شکل (۴-۱۷): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل مقاومت ویژه پروفیل شماره دو



شکل (۴-۱۸): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل قطبش‌القایی پروفیل شماره دو



شکل (۴-۱۹): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره دو



شکل (۴-۲۰): قسمتی از پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره دو

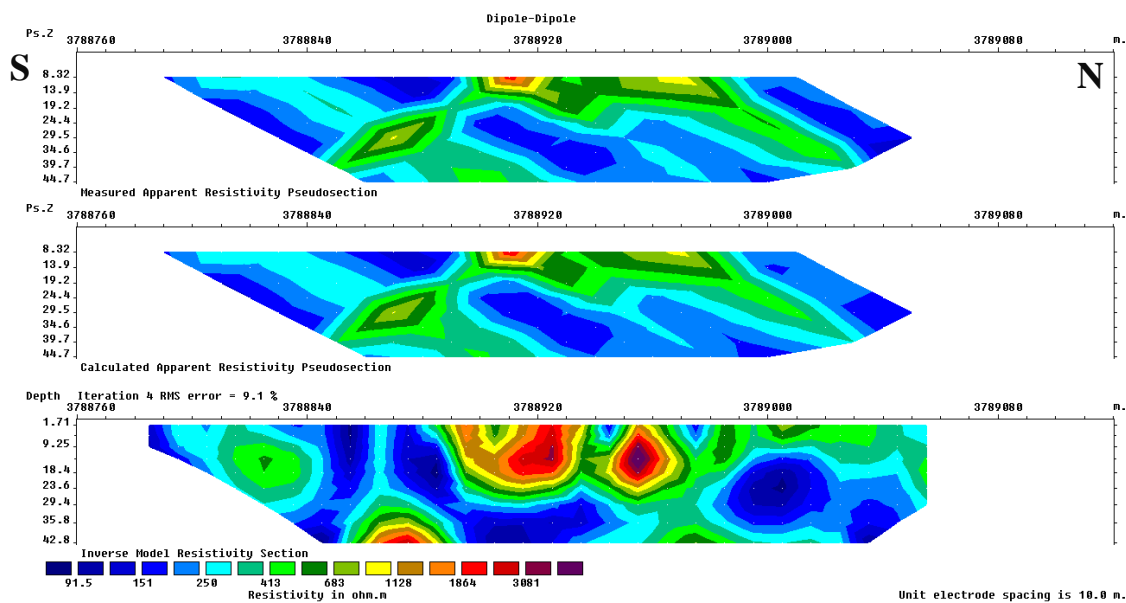
۳-۸-۴ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل P3

شروع پروفیل شماره سه، با قرار دادن الکترودهای جریان روی ایستگاه‌های ۳۷۸۸۷۶۰ و ۳۷۸۸۷۸۰ در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته به طوری که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۹۰۸۰ و ۳۷۸۹۱۰۰ قرار گرفته است. به این ترتیب ۱۱ پرش برای الکترودهای جریان و جمعاً ۸۲ نقطه بر روی این پروفیل اندازه‌گیری شده است.

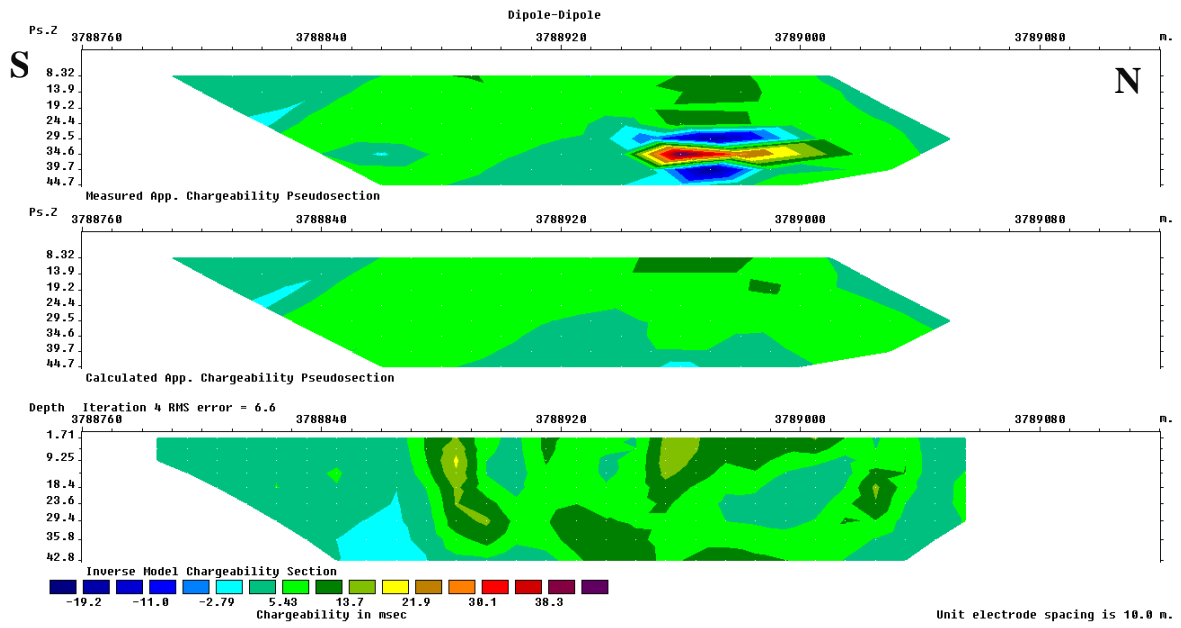
مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری و قطبش‌القایی ظاهری بر روی پروفیل سه به همراه مدل، همچنین مدل مقاومت‌ویژه به همراه توپوگرافی و پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش‌القایی در شکل‌های شماره (۴-۲۱، ۴-۲۲، ۴-۲۳ و ۴-۲۴) نشان داده شده است.

بر روی مدل مقاومت‌ویژه این پروفیل بخش مقاوم با رنگ قرمز از ایستگاه ۳۷۸۸۸۸۰ در دامنه جنوبی شروع شده و با انفصال‌های کوچکی تا ایستگاه ۳۷۸۹۰۰۰ در دامنه شمالی ادامه یافته است. در

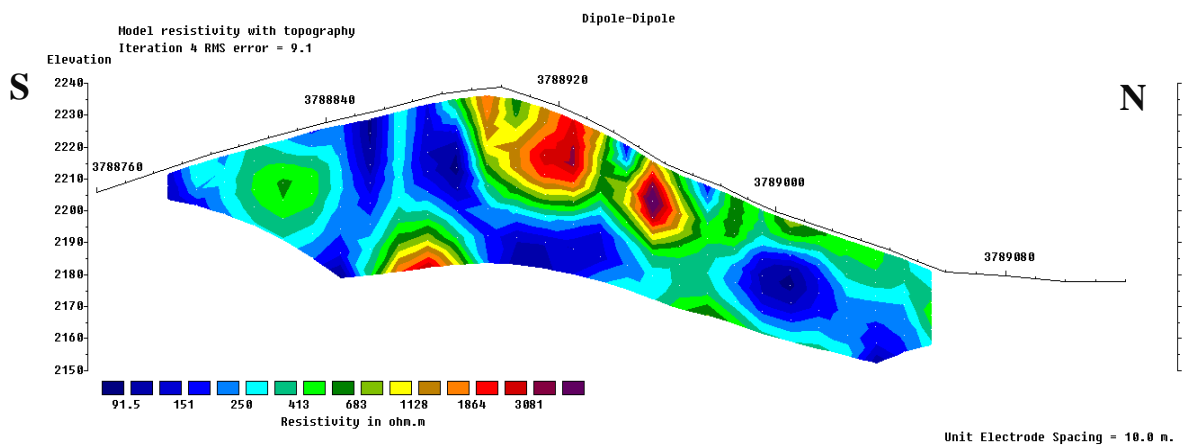
زیر این بخش مقاوم که تا عمق ۲۰ الی ۳۰ متر ادامه داشته، محدوده‌هایی با مقاومت کم و رنگ آبی دیده می‌شود؛ که بخش مرکزی آن بین ایستگاه ۳۷۸۸۹۰۰ تا ۳۷۸۸۹۴۰ در عمق ۲۰ متری هم مقاومت کمی داشته و هم مقدار قطبیت زیادی نشان داده است. بر روی مدل قطبش‌القایی این پروفیل تقریباً بخش‌های سبز رنگ و بیشتر بخش‌های زرد تا قرمز پلاریته بالایی داشته؛ که بیانگر وجود ماده معدنی در این بخش‌هاست. اما بخش اشاره شده در بالا در مرکز پروفیل بین ایستگاه ۳۷۸۸۹۰۰ تا ۳۷۸۸۹۴۰، چنانچه دیده می‌شود در عمق بیش از ۴۰ متر نیز ادامه داشته و از اهمیت بیشتری برخوردار است.



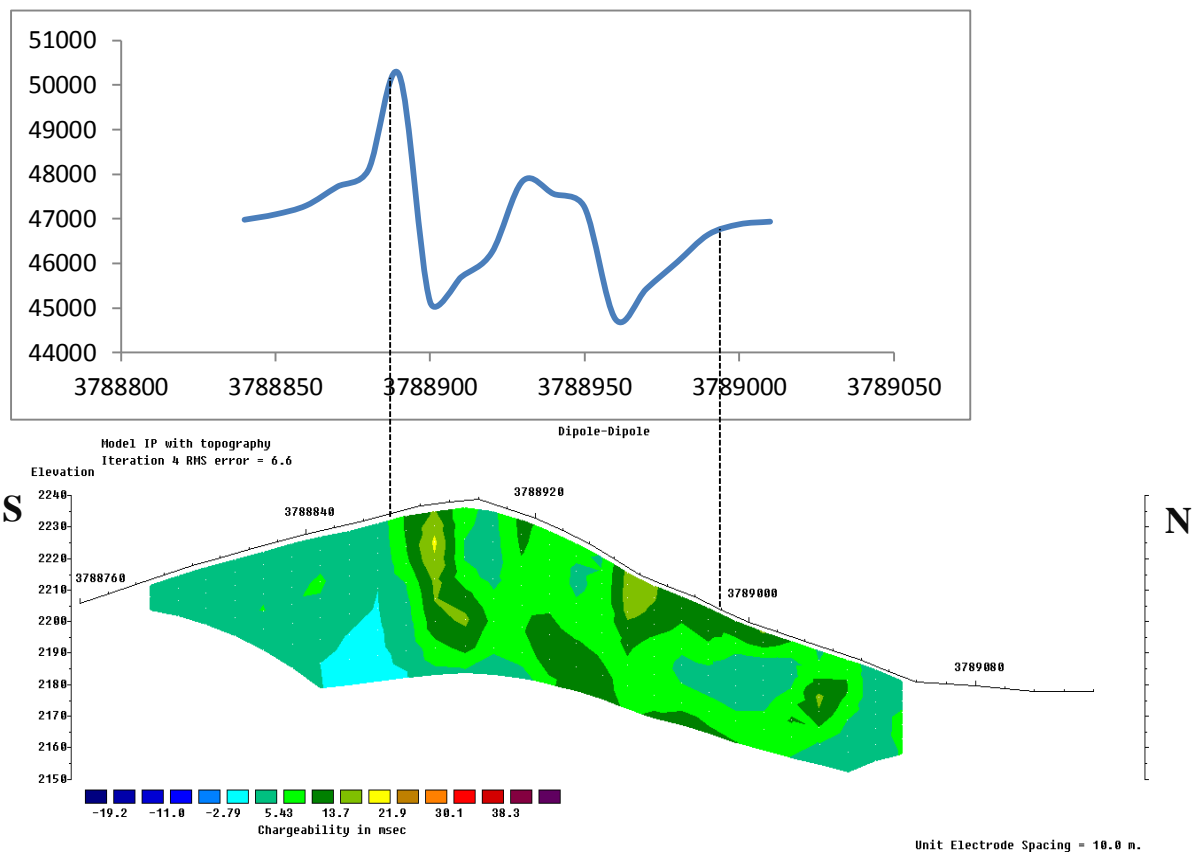
شکل (۴-۲۱): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل مقاومت‌ویژه پروفیل شماره سه



شکل (۴-۲۲): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل قطبش القایی پروفیل شماره سه



شکل (۴-۲۳): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره سه



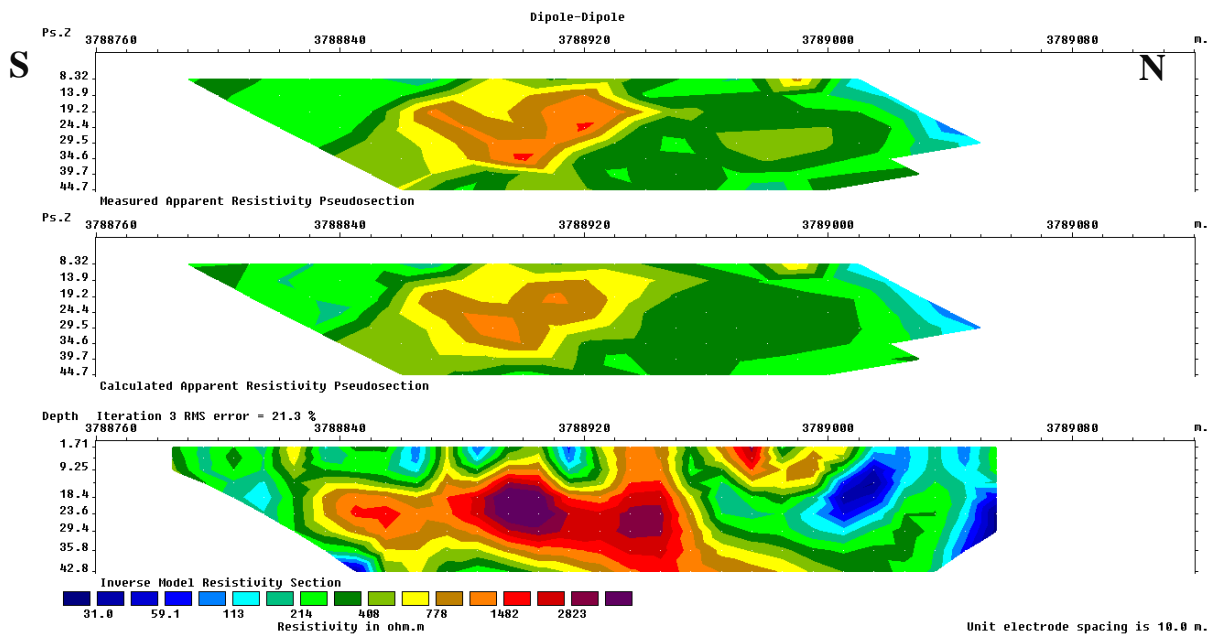
شکل (۴-۲۴): قسمتی از پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره سه

۴-۸-۴ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل P4

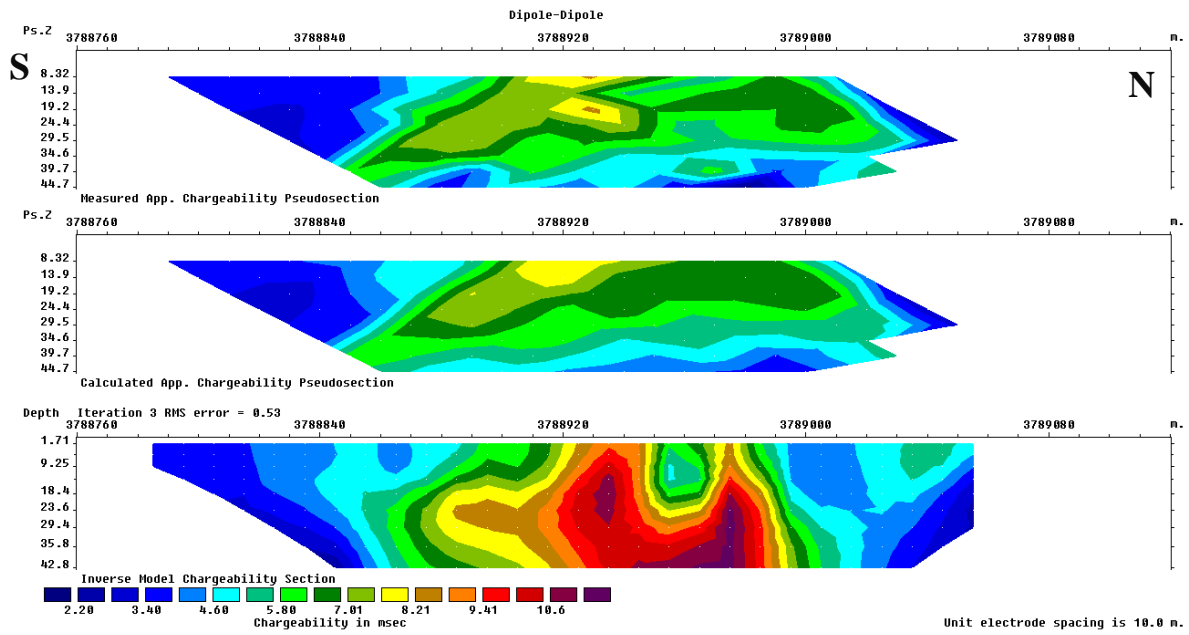
این پروفیل مشابه با پروفیل شماره سه بوده و الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۸۷۶۰ و ۳۷۸۸۷۸۰ در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته به طوری که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۹۰۸۰ و ۳۷۸۹۱۰۰ قرار گرفته است. به این ترتیب ۱۱ پرش برای الکترودهای جریان و جمعاً ۸۱ نقطه بر روی این پروفیل اندازه‌گیری شده است.

مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری و قطبش‌القایی ظاهری بر روی پروفیل سه به همراه مدل، همچنین مدل مقاومت‌ویژه به همراه توپوگرافی و پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی در شکل‌های شماره (۴-۲۵، ۴-۲۶، ۴-۲۷ و ۴-۲۸) نشان داده شده است.

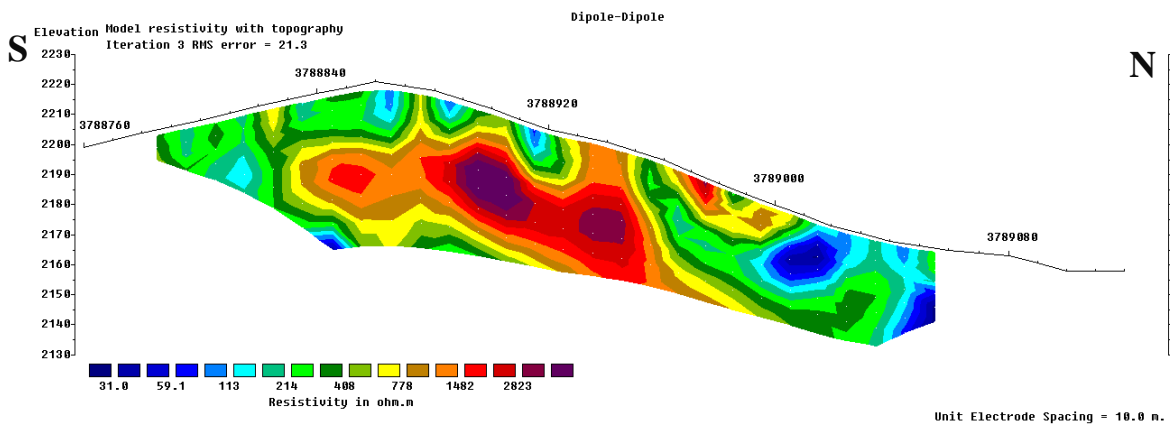
بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل بخش مقاوم با رنگ زرد از حدود ایستگاه ۳۷۸۸۸۴۰ شروع شده و تا ایستگاه ۳۷۸۹۰۰۰ در شمال ادامه داشته است. این بخش در سطح ممکن است برونزد چندانی نداشته باشد؛ اما در عمق کم شروع شده و تا عمق ۳۰ الی ۴۰ متر و نه بیشتر ادامه می‌یابد. نکته قابل توجه بر روی این پروفیل و اختلاف آن با پروفیل‌های قبلی در انطباق بخش‌های مقاوم با بخش‌های با پلاریته بالاتر نسبت به محیط اطراف می‌باشد. این حالت ممکن است ناشی از تغییر نوع کانی‌سازی یا سنگ درونگیر بر روی این پروفیل باشد. بر روی مدل قطبش‌القایی این پروفیل مقدار پلاریته بین ایستگاه ۳۷۸۸۸۷۰ در جنوب و ۳۷۸۸۹۶۰ در شمال و با یک انفصال کوچک در زیر ایستگاه ۳۷۸۸۹۶۰ شمالی تا ایستگاه ۳۷۸۹۰۰۰ بالا بوده است. این بخش‌ها دارای مقاومت ویژه بالاتری نیز می‌باشد.



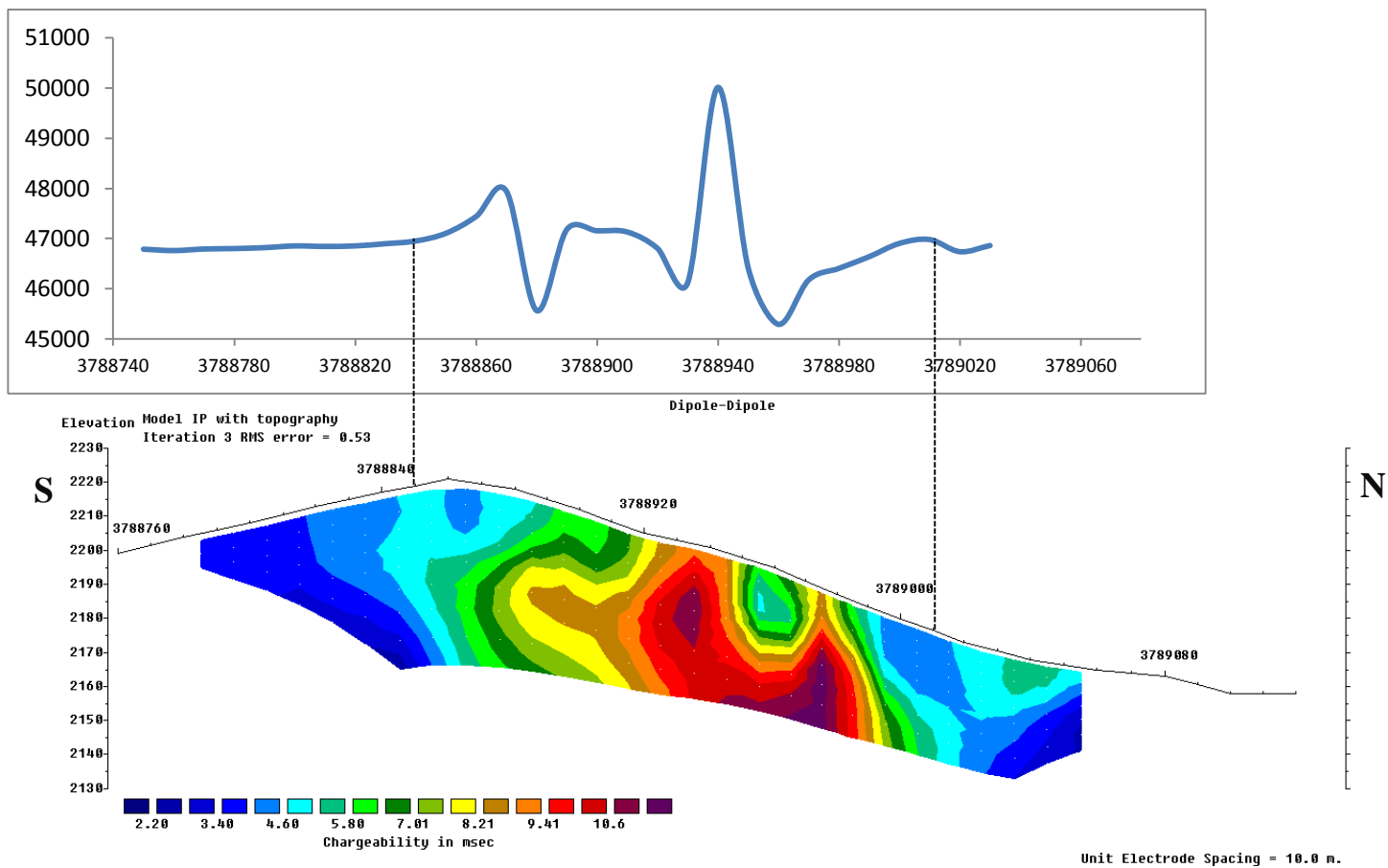
شکل (۴-۲۵): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل مقاومت ویژه پروفیل شماره چهار



شکل (۴-۲۶): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل قطبش‌القایی پروفیل شماره چهار



شکل (۴-۲۷): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره چهار

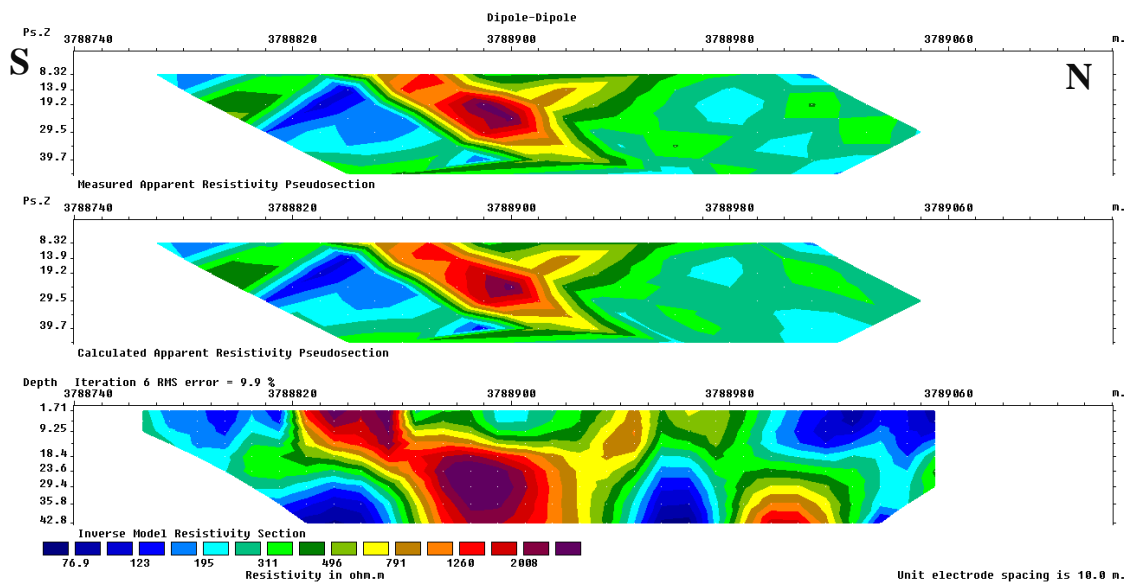


شکل (۴-۲۸): قسمتی از پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره چهار

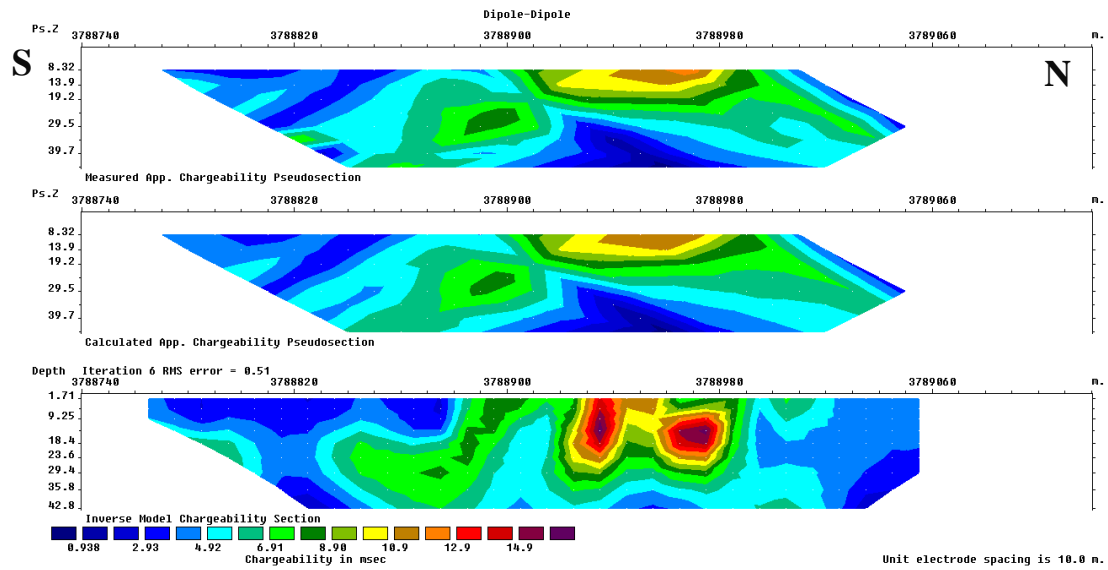
۵-۸-۴ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل P5

شروع این پروفیل با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۸۷۶۰ و ۳۷۸۸۷۴۰ در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته به طوری که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۹۰۸۰ و ۳۷۸۹۱۰۰ قرار گرفته است. به این ترتیب ۱۲ پرش برای الکترودهای جریان و جمعاً ۸۶ نقطه بر روی این پروفیل اندازه‌گیری شده است. مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری و قطبش‌القایی ظاهری بر روی پروفیل سه به همراه مدل، همچنین مدل مقاومت‌ویژه به همراه توپوگرافی و پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش‌القایی در شکل‌های شماره (۴-۲۹، ۴-۳۰، ۴-۳۱ و ۴-۳۲) نشان داده شده است.

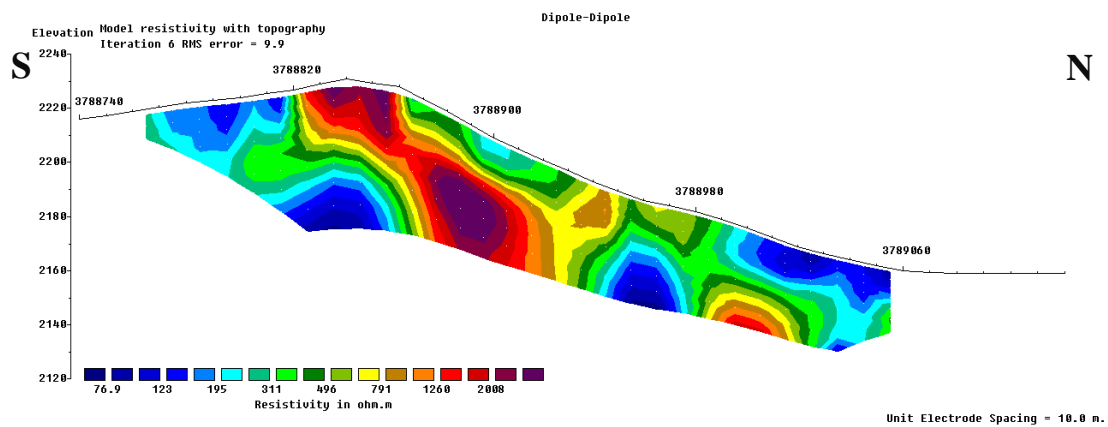
بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل بخش قرمز رنگ به خوبی بخش مقاوم را که منطبق بر سنگ آهکی کرم رنگ در محدوده است به خوبی نشان داده است. این بخش بین ایستگاه ۳۷۸۸۸۶۰ تا ۳۷۸۸۸۲۰ برونزد داشته و سپس به سمت شمال به عمق کشیده شده و دوباره بین ایستگاه ۳۷۸۸۹۴۰ تا ۳۷۸۸۹۸۰ شمالی احتمالاً برونزد داشته است. بی‌هنجاری مقاوم در شمال این پروفیل بعد از یک انفصال از ایستگاه ۳۷۸۹۰۰۰ شمالی به سمت ۳۷۸۹۰۶۰ در عمق دیده می‌شود، اما بر روی نقشه مدل قطبش‌القایی این پروفیل اگر بخش‌های سبز تا زرد و قرمز رنگ را بی‌هنجاری در نظر گرفته شوند تقریباً از ایستگاه ۳۷۸۸۸۲۰ تا ۳۷۸۹۰۰۰ به طول ۳۷۸۹۰۸۰ متر بی‌هنجاری وجود دارد. بیش‌ترین شدت بی‌هنجاری از ایستگاه ۳۷۸۸۹۲۰ تا ۳۷۸۸۹۸۰ به طول ۶۰ متر و عمق حداکثر ۲۰ متر دیده می‌شود؛ که به احتمال زیاد دو بی‌هنجاری نزدیک به هم را تشکیل داده است. یک بی‌هنجاری ضعیف‌تر نیز بین ایستگاه ۳۷۸۸۸۴۰ تا ۳۷۸۸۸۶۰ در عمق ۲۰ تا ۳۰ متری دیده می‌شود.



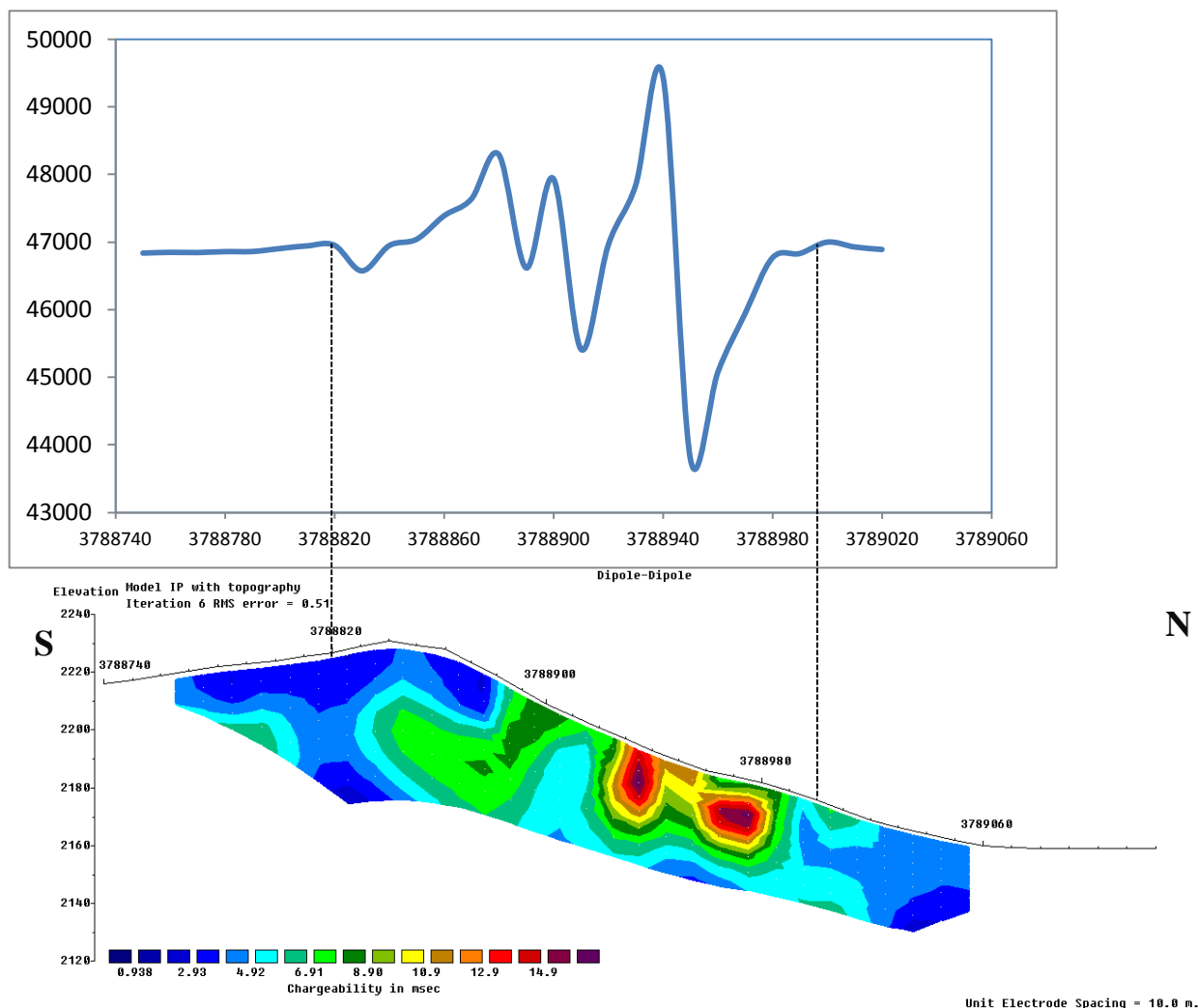
شکل (۴-۲۹): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل مقاومت ویژه پروفیل شماره پنج



شکل (۴-۳۰): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل قطبش‌القایی پروفیل شماره پنج



شکل (۴-۳۱): مدل مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره پنج



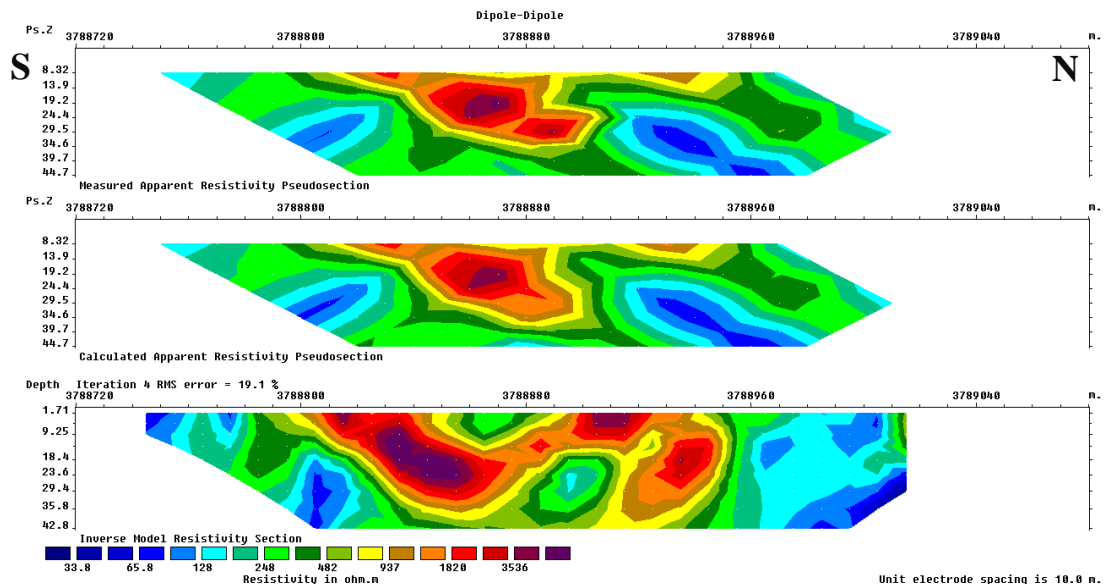
شکل (۴-۲۲): قسمتی از پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره پنج

۴-۸-۶ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل P6

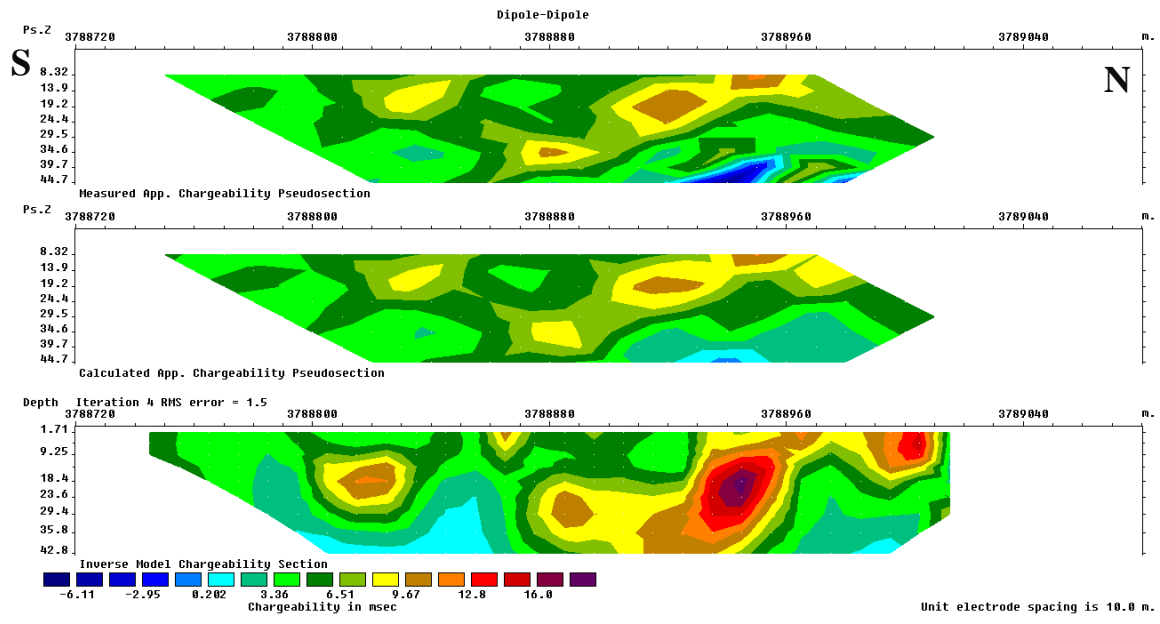
آغاز این پروفیل با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۸۷۲۰ و ۳۷۸۸۷۴۰ در جنوب پروفیل شروع و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته به‌طوری‌که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۹۰۸۰ و ۳۷۸۹۱۰۰ قرار گرفته است. به این ترتیب ۱۲ پرش برای الکترودهای جریان و جمعاً ۹۰ نقطه بر روی این پروفیل اندازه‌گیری شده است. مقطع مقاومت‌ویژه‌ظاهری و قطبش‌القایی ظاهری بر روی پروفیل شش به‌همراه مدل، همچنین مدل مقاومت‌ویژه به‌همراه

توپوگرافی و پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش القایی در شکل‌های شماره (۴-۳۳، ۴-۳۴، ۴-۳۵ و ۴-۳۶) نشان داده شده است.

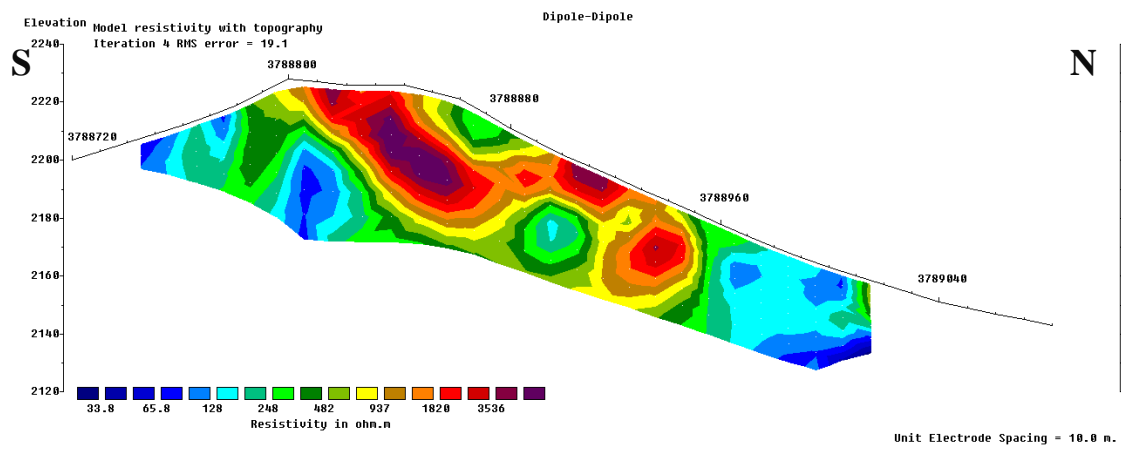
بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل مشابه پروفیل شماره ۵ بخش مقاومی با رنگ قرمز دیده می‌شود؛ که از ایستگاه ۳۷۸۸۷۸۰ تا ۳۷۸۸۸۶۰ برونزد داشته و سپس به سمت شمال دوباره از ایستگاه ۳۷۸۸۹۰۰ تا ۳۷۸۸۹۴۰ به احتمال زیاد قابل مشاهده است و تا ایستگاه ۳۷۸۸۹۶۰ در شمال نیز ادامه می‌یابد. روی این بخش آهکی مقدار کمی خاک و به احتمال زیاد در زیر و طرفین آن، بخشی با مقاومت کم با رنگ آبی و احتمالاً از جنس شیست قرار گرفته است. بر روی مدل قطبش القایی این پروفیل اگر بخش‌های زرد تا قرمز رنگ را بخش‌های مورد نظر به لحاظ شدت بالای بی‌هنجاری در نظر بگیریم، یک بخش بین ایستگاه ۳۷۸۸۸۰۰ تا ۳۷۸۸۸۸۰ قابل جداسازی است. بخش دیگری که از گستردگی شدت بیشتری هم برخوردار است؛ از زیر ایستگاه ۳۷۸۸۸۸۰ شروع و سپس با شدت بیشتر بین ایستگاه ۳۷۸۸۹۲۰ تا ۳۷۸۸۹۷۰ ادامه و برونزد پیدا کرده و با یک انفصال تا انتهای پروفیل نیز قابل ردیابی است.



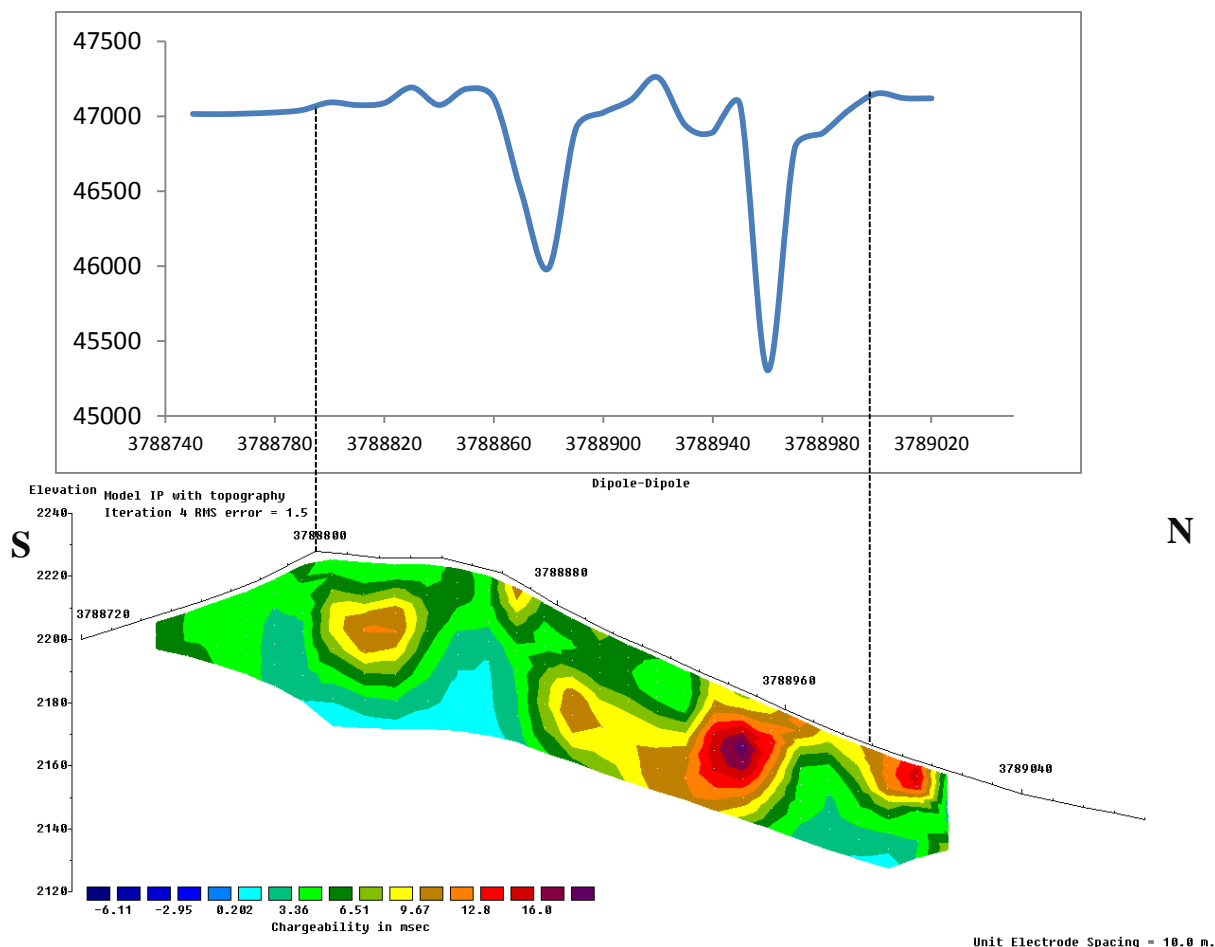
شکل (۴-۳۳): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل مقاومت ویژه پروفیل شماره شش



شکل (۴-۳۴): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل قطبش‌القایی پروفیل شماره شش



شکل (۴-۳۵): مقطع مقاومت‌ویژه به‌همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره شش

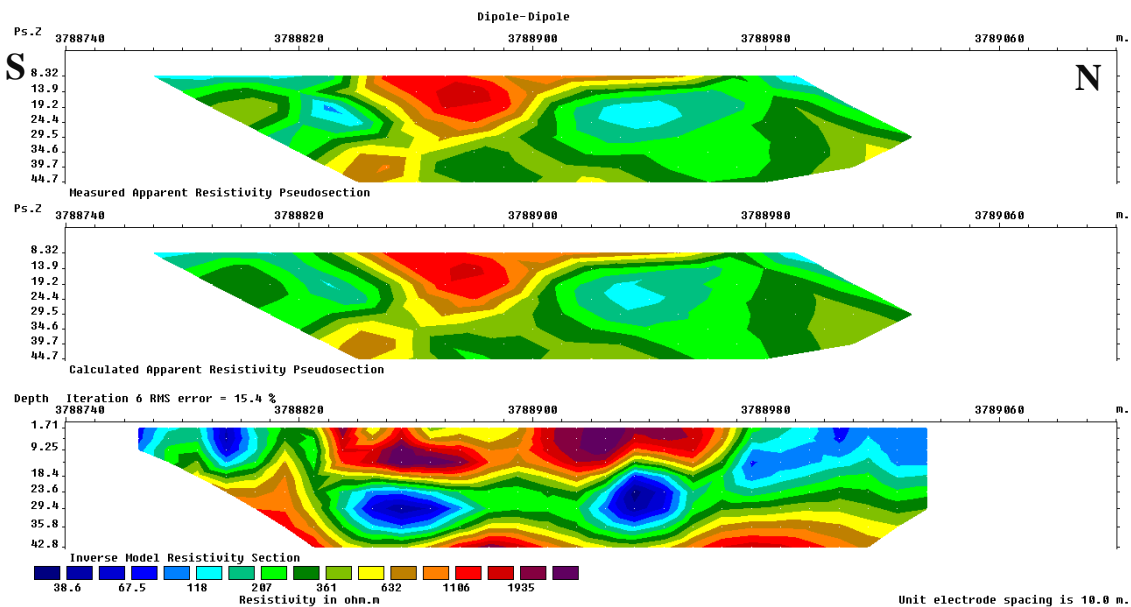


شکل (۴-۳۶): قسمتی از پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره شش

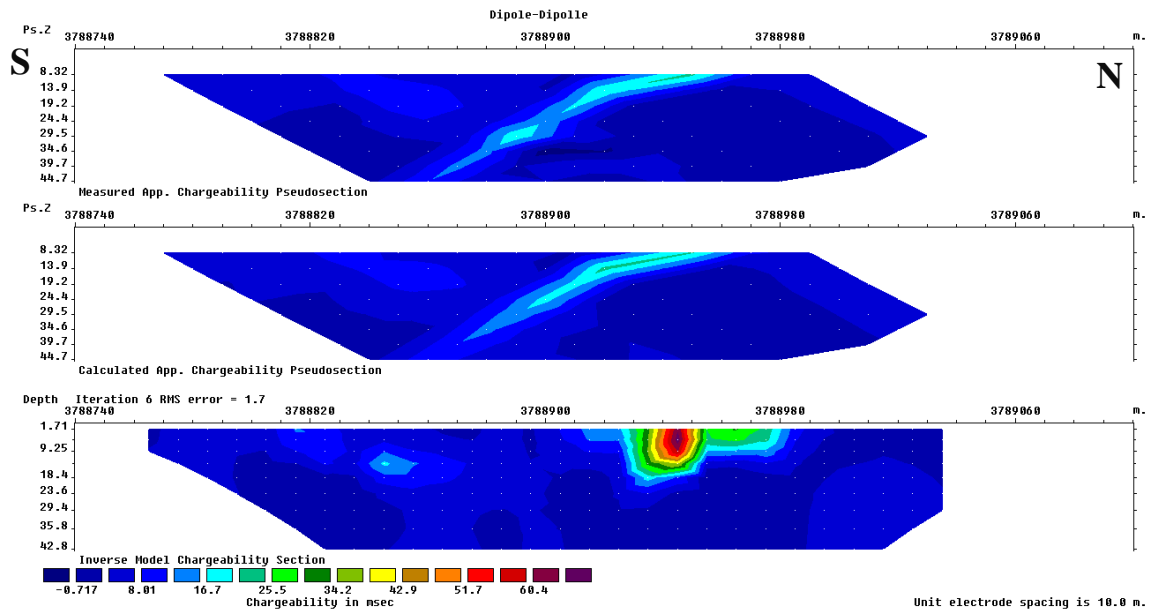
۷-۸-۴ تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون پروفیل P7

شروع این پروفیل با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۸۷۴۰ و ۳۷۸۸۷۶۰ در جنوب پروفیل آغاز و اندازه‌گیری در جهت شمال پروفیل ادامه یافته به طوری که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی ایستگاه‌های ۳۷۸۹۰۸۰ و ۳۷۸۹۰۶۰ قرار گرفته است. به این ترتیب ۱۱ پرش برای الکترودهای جریان و جمعاً ۸۲ نقطه بر روی این پروفیل اندازه‌گیری شده است. مقطع مقاومت‌ویژه‌ظاهری و قطبش‌القایی ظاهری بر روی پروفیل هفت به همراه مدل، همچنین مدل مقاومت‌ویژه به همراه توپوگرافی و پروفیل مغناطیس منطبق بر مدل قطبش‌القایی در شکل‌های شماره (۴-۳۷، ۴-۳۸، ۴-۳۹ و ۴-۴۰) نشان داده شده است.

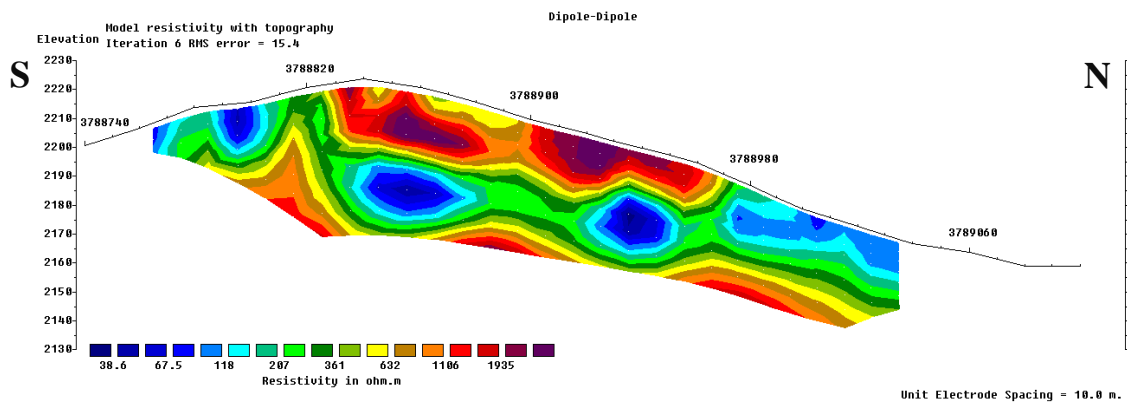
بر روی مدل مقاومت ویژه این پروفیل که از نظر فرم کلی مشابه ۲ پروفیل قبلی است، یک بخش مقاوم آهکی بین ایستگاه ۳۷۸۸۸۲۰ تا ۳۷۸۸۹۶۰ به طول ۱۴۰ متر دیده می‌شود؛ که ممکن است در بعضی جاها سطح آن با خاک سطحی پوشیده شده باشد. زیر این بخش در عمق ۲۰ متری یک لایه با مقاومت کم که احتمالاً از جنس شیست بوده قرار گرفته و سپس به احتمال زیاد دوباره لایه مقاوم آهکی در عمق بیش از ۴۰ متر تکرار می‌شود. بر روی مدل قطبش‌القایی این پروفیل از ایستگاه ۳۷۸۸۸۲۰ تا ۳۷۸۸۹۴۰ یک بی‌هنجاری از نزدیکی سطح تا عمق ۲۰ الی ۳۰ متر، و پس از یک فاصله ۶۰ متری یک بی‌هنجاری شدید تر هم از نظر شدت مغناطیس و هم از نظر شدت پلاریته از ایستگاه ۳۷۸۸۹۲۰ در عمق شروع و تا ایستگاه ۳۷۸۸۹۹۰ به طول تقریبی ۷۰ متر ادامه یافته است.



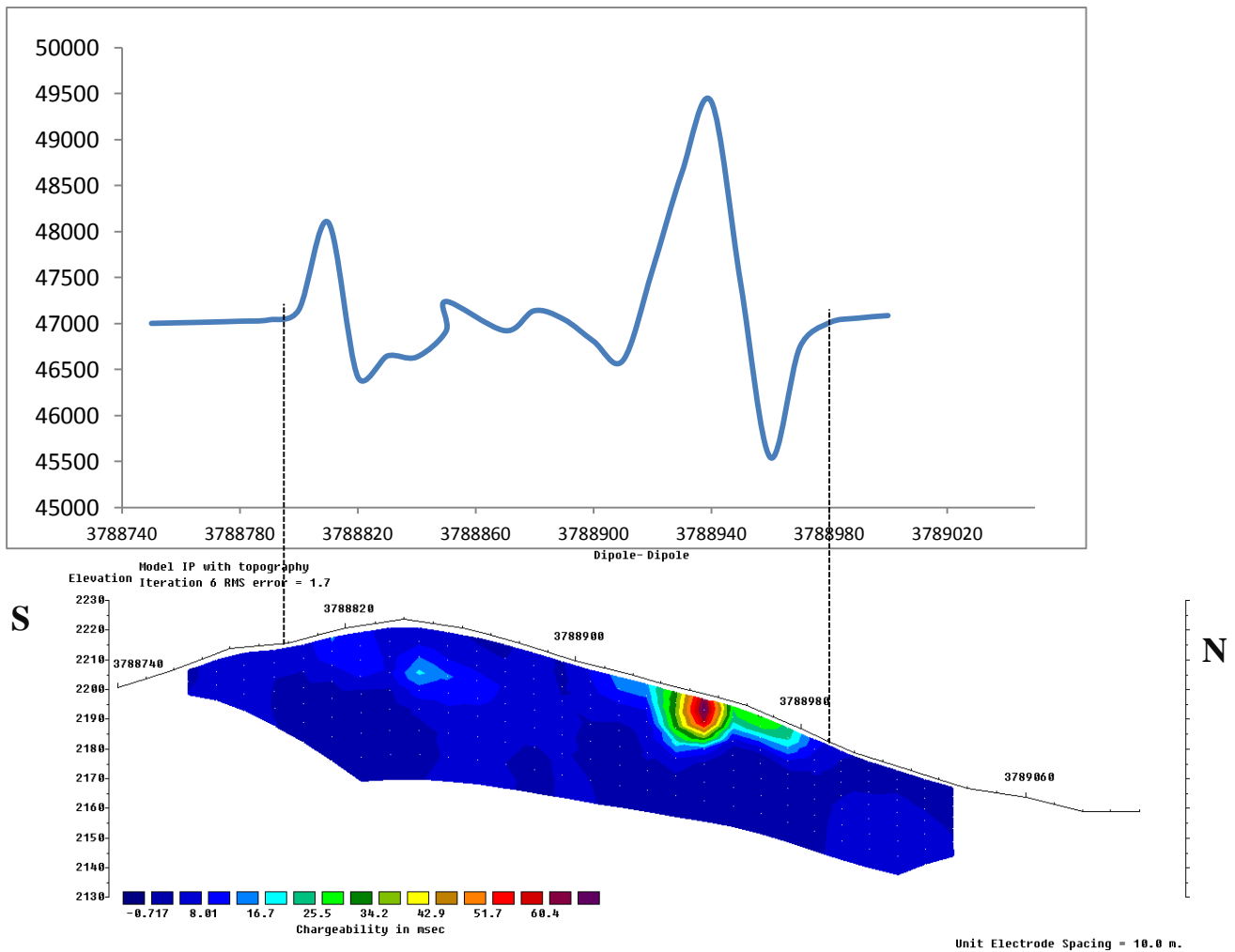
شکل (۴-۳۷): شبه‌مقاطع اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مدل مقاومت ویژه پروفیل شماره هفت



شکل (۴-۳۸): شبه مقاطع اندازه گیری شده، محاسبه شده و مدل قطبش القایی پروفیل شماره هفت



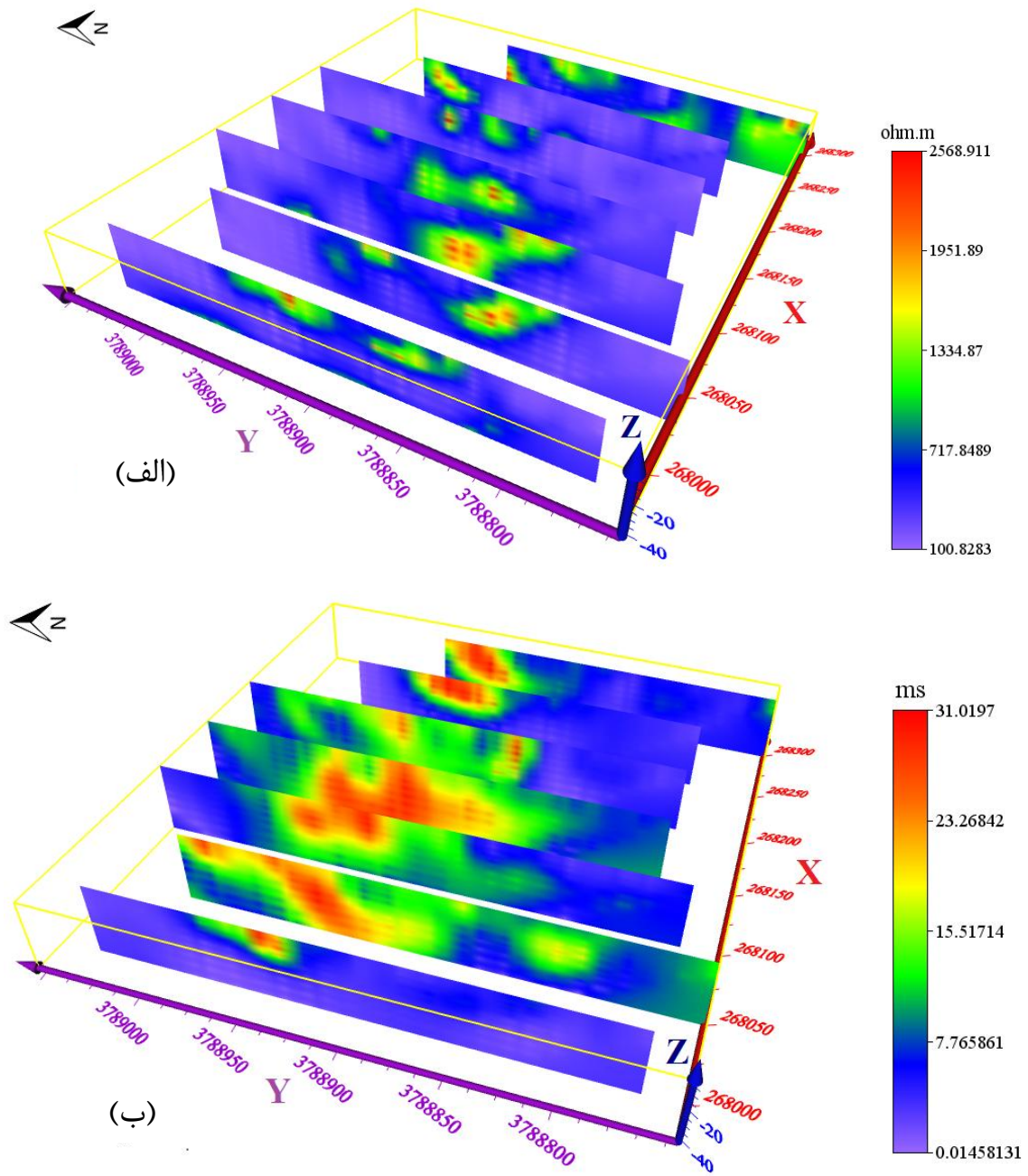
شکل (۴-۳۹): مقطع مقاومت ویژه به همراه توپوگرافی بر روی پروفیل شماره هفت



شکل (۴-۴): قسمتی از پروفیل مغناطیس‌سنجی منطبق بر مدل قطبش‌القایی بر روی پروفیل شماره هفت

۹-۴ نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی

با نگاه به نمایش سه‌بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی (شکل ۴-۴) در محیط نرم‌افزار Voxler می‌توان مناطق محتمل کانی‌سازی را دید و روند کانی‌سازی را تا حدودی تشخیص داد.



شکل (۴-۴): نمایش سه بعدی نتایج وارون سازی دوبعدی داده های الف) مقاومت ویژه و ب) قطبش القایی

۴-۱۰ مدل سازی وارون سه بعدی داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی

در مدل سازی وارون سه بعدی مقاومت ویژه های مدل زیر سطحی طوری محاسبه می شوند که پاسخ

مدل برابر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده در نقاط مشخص روی سطح زمین باشد [Sasaki,

1994- Santos and Sultan, 2008]

از آنجاکه رابطه بین پارامترهای مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده رابطه‌ای غیرخطی است از این رو به منظور وارون‌سازی، فرآیند تکرار محاسبات برای حل مسئله مورد نیاز است. وارون‌سازی داده‌های مقاومت - ویژه به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\Delta d = J\Delta p \quad (31-4)$$

که $\Delta d = d^c - d^{obs}$ بردار اختلاف بین پاسخ مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده، Δp بردار تصحیح پارامترهای مدل نسبت به مقدار اولیه‌اش p_0 و J ماتریس ژاکوبین یا ماتریس مشتقات جزئی پاسخ مدل نسبت به پارامترهای مدل ($J_{ij} = \partial d_i^c / \partial p_j$) است. برای پارامتری کردن مدل طبق رویه معمول، آن را به تعدادی بلوک با مقاومت ویژه ثابت و نامعلوم تقسیم می‌کنند. برای پایداری عملیات وارون‌سازی از لگاریتم مقاومت ویژه مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود و سپس در صورتی که خطای داده‌های اندازه‌گیری شده در اختیار باشد، برای برآورد صحیح Δp در هر فرآیند تکرار محاسبات تابع هدف زیر باید کمینه شود [Sasaki, 1994].

$$Q = \|W_d(\Delta d - J\Delta p)\|^2 + \lambda \|C\Delta p\|^2 \quad (32-4)$$

با کمینه کردن رابطه فوق، معادلات معمولی زیر نتیجه می‌شود.

$$(J^T W_d^T W_d J + \lambda C^T C)\Delta p = J^T W_d^T W_d \Delta d \quad (33-4)$$

که W_d ماتریس قطری وزنی است که عناصر آن را عکس مقدار خطای (انحراف معیار) داده‌ها تشکیل می‌دهند و عملگر C نیز ماتریس ناهمواری مدل است. پارامتر λ یک ضریب لاگرانژ است که همواری مدل را حین فرآیند مدل‌سازی کنترل می‌کند. با حل دستگاه معادلات معمولی (34-4) با روش‌های متفاوت مثل روش تجزیه مقادیر تکین و یا روش گرادینان مزدوج و با اضافه کردن بردار Δp به مقدار اولیه

p_0 ، پارامترهای مدل به‌هنگام^۱ می‌شود. این فرآیند به‌صورت تکراری تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا آنکه منطبق نبودن پاسخ مدل مورد نظر با داده‌های اندازه‌گیری شده کاهش یابد و به حد قابل قبول تعیین شده برسد. به عبارت دیگر پاسخ مدل برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی داشته باشد.

در نرم‌افزار RES3DINV [Loke, 2002] به‌منظور مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه اندازه‌گیری شده از روش کمترین مربعات هموار مقید شده^۲ استفاده می‌شود. در این روش با فرض اینکه خطای داده‌های اندازه‌گیری شده در اختیار نباشد، دستگاه معادلات معمولی داده‌شده در معادله (۴-۳۴) به‌صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$(J^T J + \lambda C^T C) \Delta p = J^T \Delta d \quad (۴-۳۴)$$

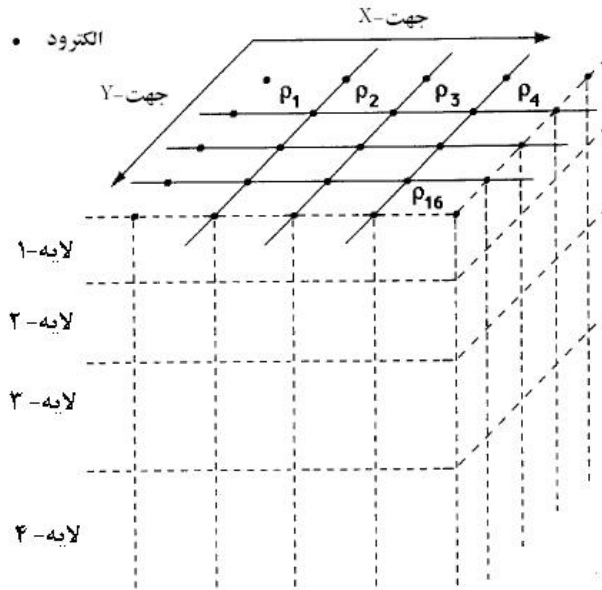
در این نرم‌افزار $C^T C$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C^T C = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (۴-۳۵)$$

که f_x و f_z به ترتیب فیلتر هموارساز افقی و عمودی در مدل‌سازی هستند. برای حل مسئله وارون-سازی داده‌ها و پارامتری کردن مدل، ساختار زیرسطحی مدل مورد نظر مطابق شکل (۴-۴۲) به چندین لایه تقسیم‌بندی شده است و هر لایه نیز به تعدادی بلوک‌های (سلول‌های) مکعب مستطیلی شکل که هر یک از آن‌ها دارای مقاومت‌ویژه متفاوت ولی مجهول هستند تقسیم می‌شود. با تقسیم این سلول‌ها به اجزای کوچک‌تر، تعداد پارامترهای مدل و نیز زمان مورد نیاز برای وارون‌سازی این دسته از داده‌ها به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی وارون هدف این است تا مقاومت‌ویژه هر یک از سلول‌های مدل به طریقی تعیین شوند تا پاسخ مدل در تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت‌ویژه باشد.

^۱ Update

^۲ Smoothness constrained least squares



شکل (۴-۴): پارامتری کردن مدل سه بعدی زمین مورد بررسی در نرم افزار RES3DINV که در آن از تعدادی لایه و بلوک های مکعبی شکل که هر یک دارای مقاومت ویژه نامعلوم خاص خودشان هستند برای مدل زیرسطحی استفاده شده است.

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

مدل سازی های سه بعدی به دو صورت درونیابی داده های پروفیل های موازی و وارون سازی داده های برداشت سه بعدی امکان پذیر می باشند [Zhou et al., 2001]. در این مطالعه از روش اول استفاده شده

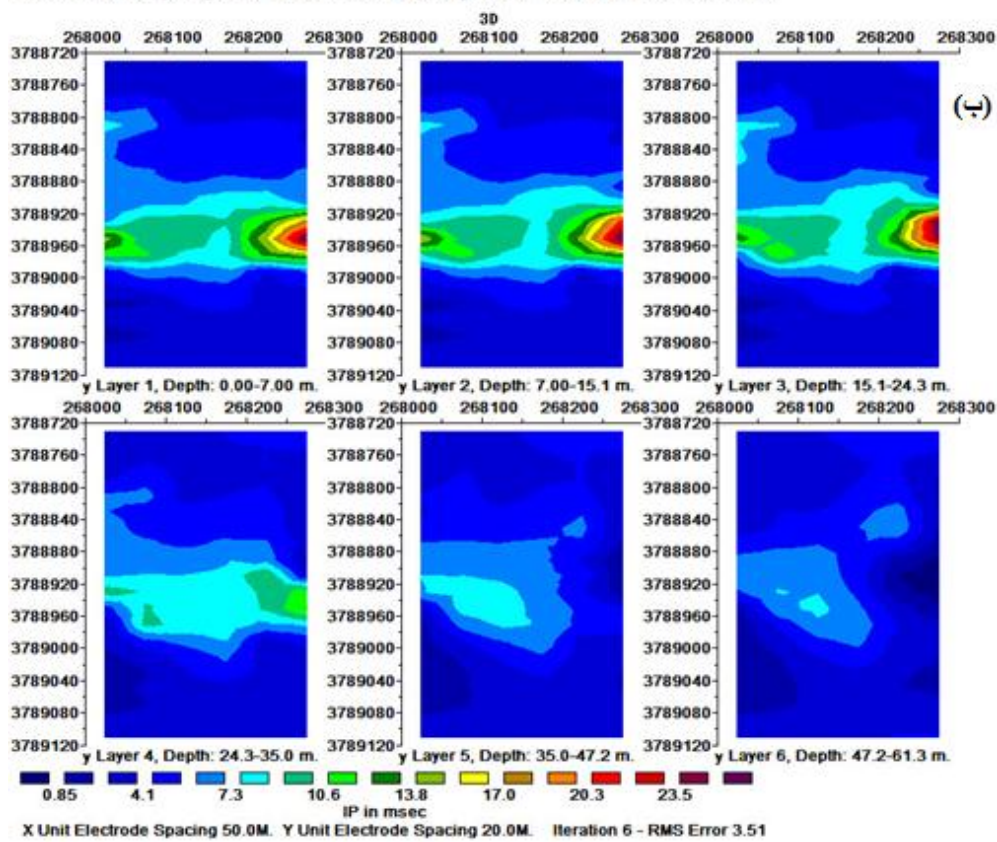
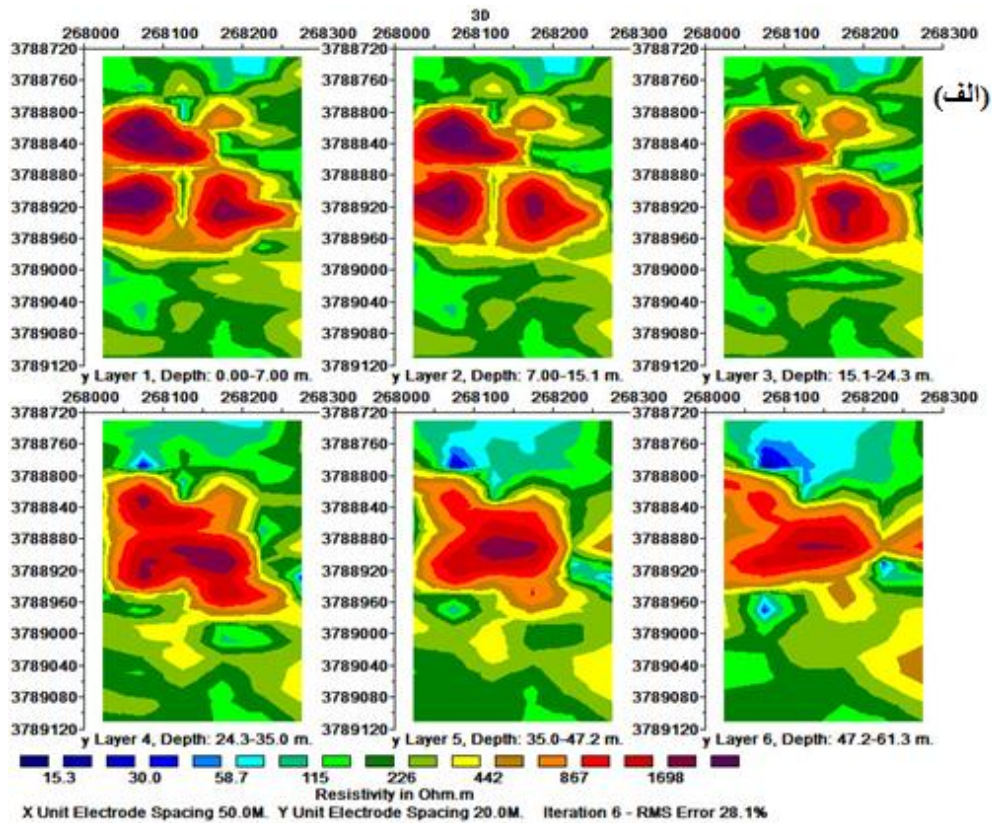
^۱ Finite-difference

^۲ Finite-element

است. استفاده از پروفیل‌های دوبعدی موازی در تولید یک مجموعه داده سه‌بعدی مقاومت‌ویژه و IP، روشی سریع و مقرون به صرفه می‌باشد [Aizebeokhai et al. 2009].

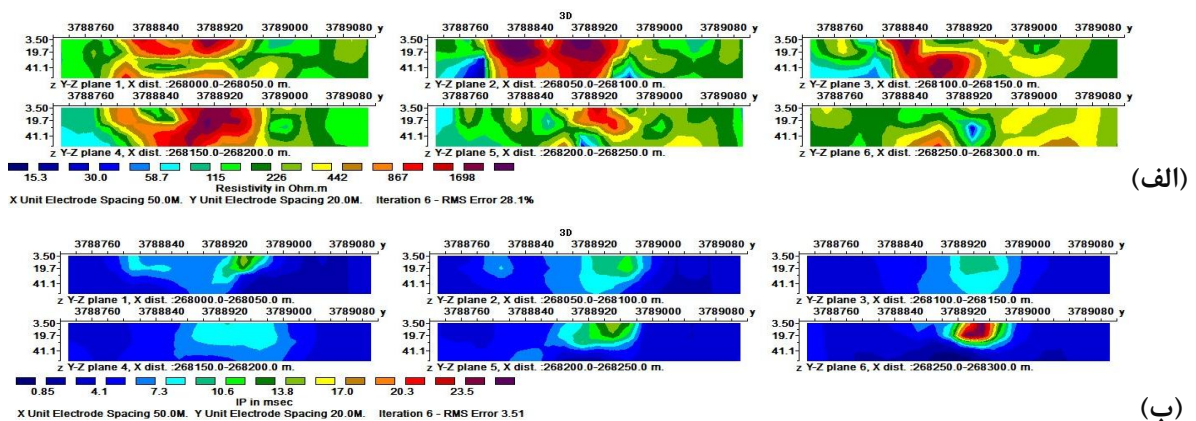
۴-۱۱ واریان سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی منطقه مورد مطالعه

با توجه به محدودیت‌های عملیاتی و بودجه، برداشت‌های دوبعدی ژئوالکتریک با آرایش دوقطبی - دوقطبی در امتداد هفت پروفیل موازی با هم، با فاصله الکترودی ۲۰ متر و فاصله پروفیلی ۵۰ متر از یکدیگر انجام شد. داده‌های حاصل از این برداشت‌ها، به‌وسیله نرم‌افزار RES2DINV مدل‌سازی واریان دوبعدی گردیدند و سپس به‌وسیله نرم‌افزار مذکور با یکدیگر تلفیق شدند و نهایتاً یک مجموعه داده سه‌بعدی ایجاد شد. این مجموعه داده، به‌منظور مدل‌سازی واریان سه‌بعدی به نرم‌افزار RES3DINV فراخوانی شد. مقاطع حاصل از مدل‌سازی واریان سه‌بعدی در شکل‌های (۴-۴۳) و (۴-۴۴) نشان داده شده است. در نهایت برای نمایش بهتر نتایج سه‌بعدی از نرم‌افزارهای Voxler و Rockworks استفاده گردید. نتایج حاصله در شکل‌های (۴-۴۵، ۴-۴۶، ۴-۴۷) نشان داده شده است.



شکل (۴-۴۳): مقاطع افقی حاصل از مدل سازی سه بعدی الف) مقاومت ویژه ب) قطبش القایی در بازه های متفاوت عمقی

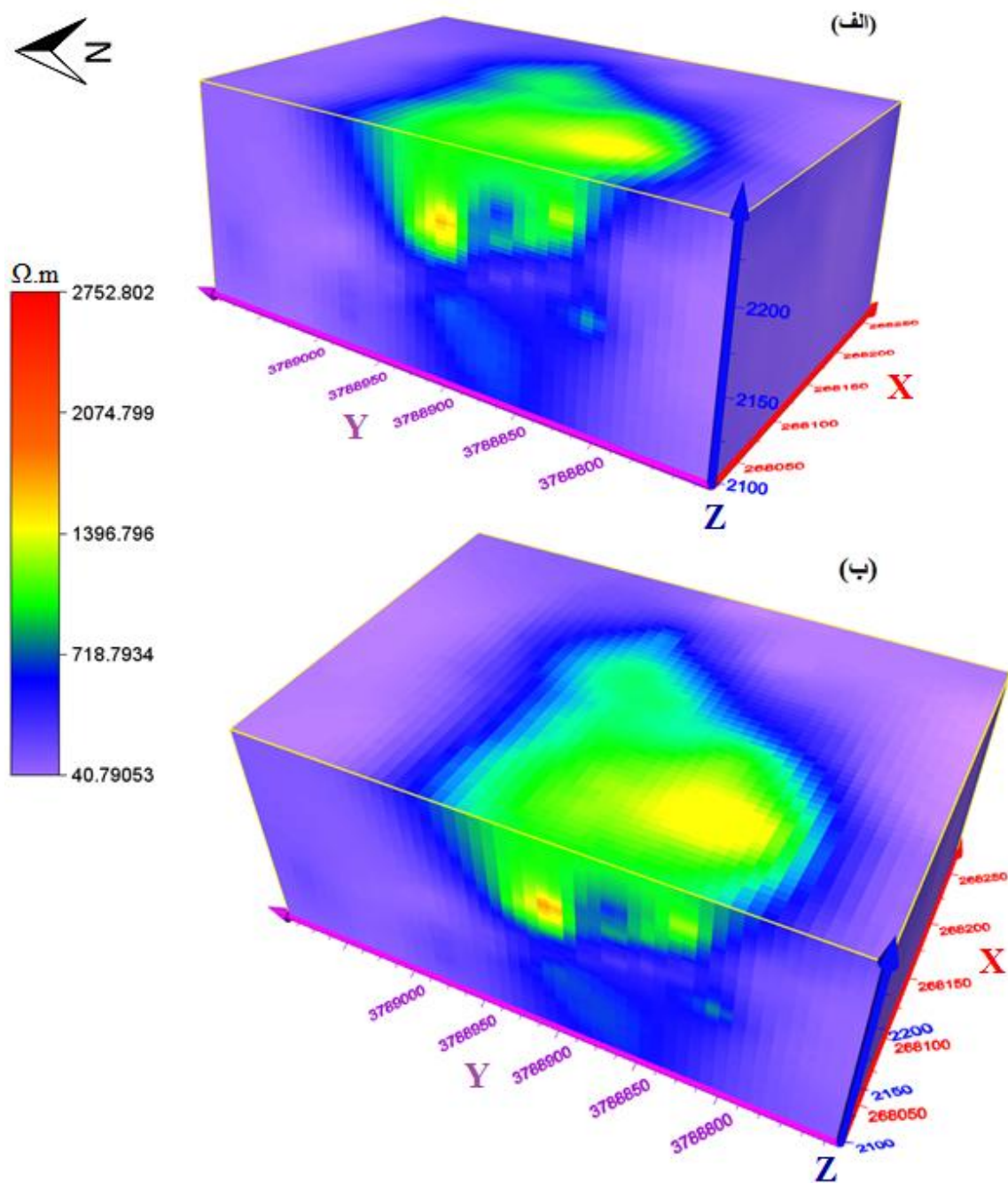
همان‌طور که در شکل (۴-۴۳) مشاهده می‌شود نتایج مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت شش مقطع افقی مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی در بازه‌های متفاوت عمقی آورده شده است. با توجه به مقاطع به دست آمده در شکل (۴-۴۳-الف)، نواحی با مقاومت‌ویژه بالا که با رنگ‌های قرمز و بنفش در مرکز هر مقطع وجود دارند، از اعماق سطحی تا عمق حدود ۶۰ متری قابل مشاهده می‌باشند و رفته‌رفته با افزایش عمق از مقادیر مقاومت‌ویژه آن‌ها کاسته شده است. در این مقاطع، چنین به نظر می‌رسد که توده با مقاومت‌ویژه بالا (بیشتر از ۷۰۰ اهم متر) در یک محیط با مقاومت‌ویژه نسبتاً پایین، از عمق حدود ۶۰ متری به سمت سطح کشیده شده و در نزدیکی سطح، این توده به سه قسمت مجزا گردیده است. همچنین در شکل (۴-۴۳-ب) می‌توان ملاحظه نمود که بخش‌های با مقادیر IP بالا (که در مجاورت بخش‌های با مقاومت‌ویژه بالا قرار گرفته‌اند)، از عمق حدود ۴۰ متری تا سطح ادامه یافته است و در اعماق بیشتر از ۴۰ متری از میزان آن کاسته شده است. با مقایسه دو شکل (۴-۴۳-الف) و (۴-۴۳-ب)، می‌توان دریافت که بخش‌های با IP بالا و مقاومت‌ویژه پایین (که با توجه به ماهیت ماده معدنی پلی‌متال، ویژگی شاخص برای مناطق هدف محسوب می‌شود) بر هم منطبق بوده و احتمالاً جز مناطق محتمل کانی‌سازی و اهداف اکتشافی به‌شمار می‌آیند.



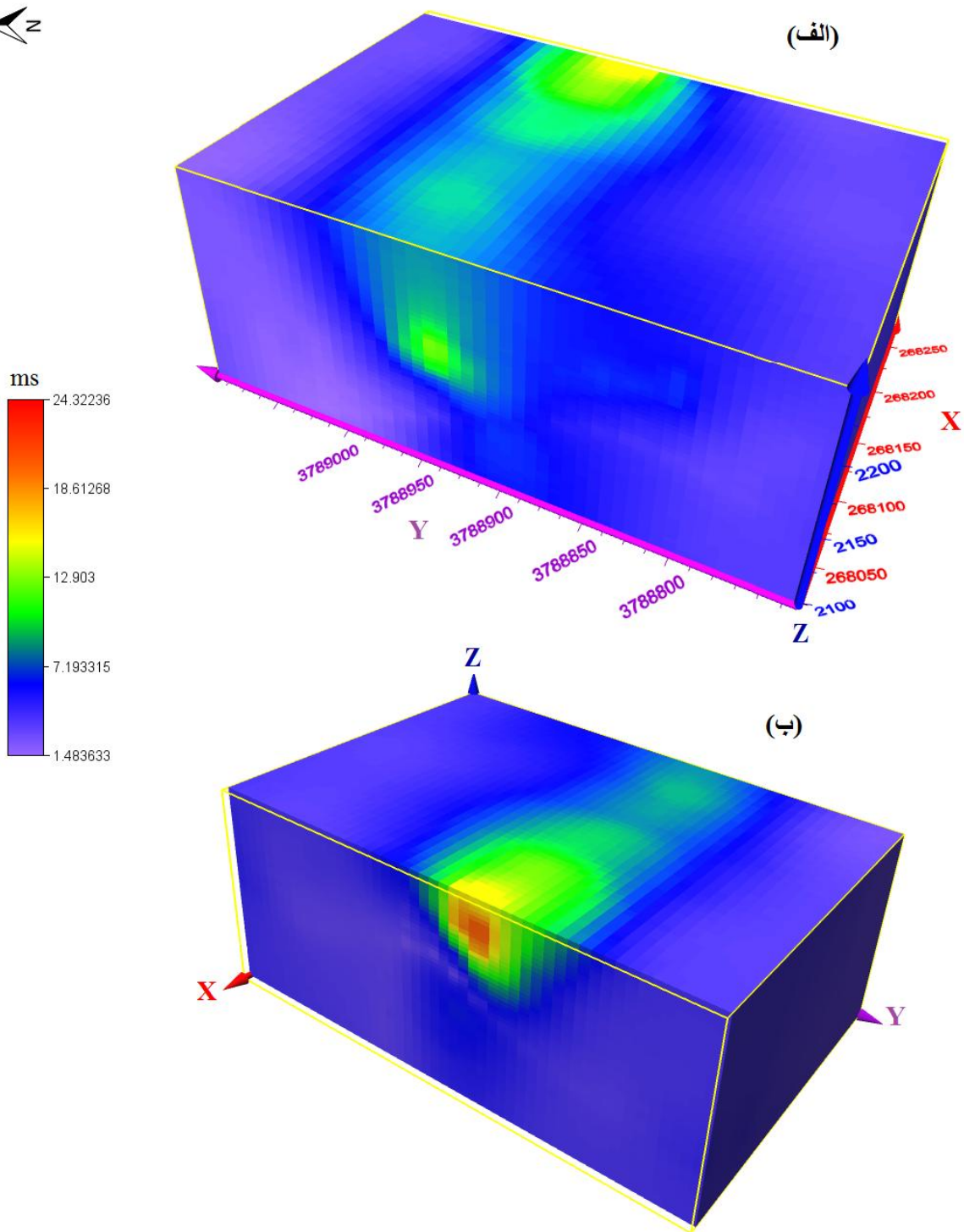
شکل (۴-۴۴): مقاطع قائم الف) مقاومت‌ویژه ب) قطبش‌القایی (در امتداد محور Y) حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار RES3DINV

شکل (۴-۴۴) نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی را به صورت مقاطع قائم در جهت y نشان می‌دهد. در این شکل، حضور نواحی با مقاومت ویژه نسبتاً کم (که به رنگ آبی، سبز تا زرد دیده می‌شود) منطبق بر نواحی با IP بالا می‌باشد. در تمامی مقاطع، بخش‌های با IP نسبتاً بالا از ایستگاه ۳۷۸۸۹۲۰ تا نزدیکی ایستگاه ۳۷۸۹۰۰۰ از $x=268000$ از سطح شروع شده و در $x=268300$ به بیش‌ترین مقدار خود رسیده‌اند. چنین به نظر می‌رسد که بیش‌ترین تمرکز ماده معدنی بین $x=268250$ و $x=268300$ باشد.

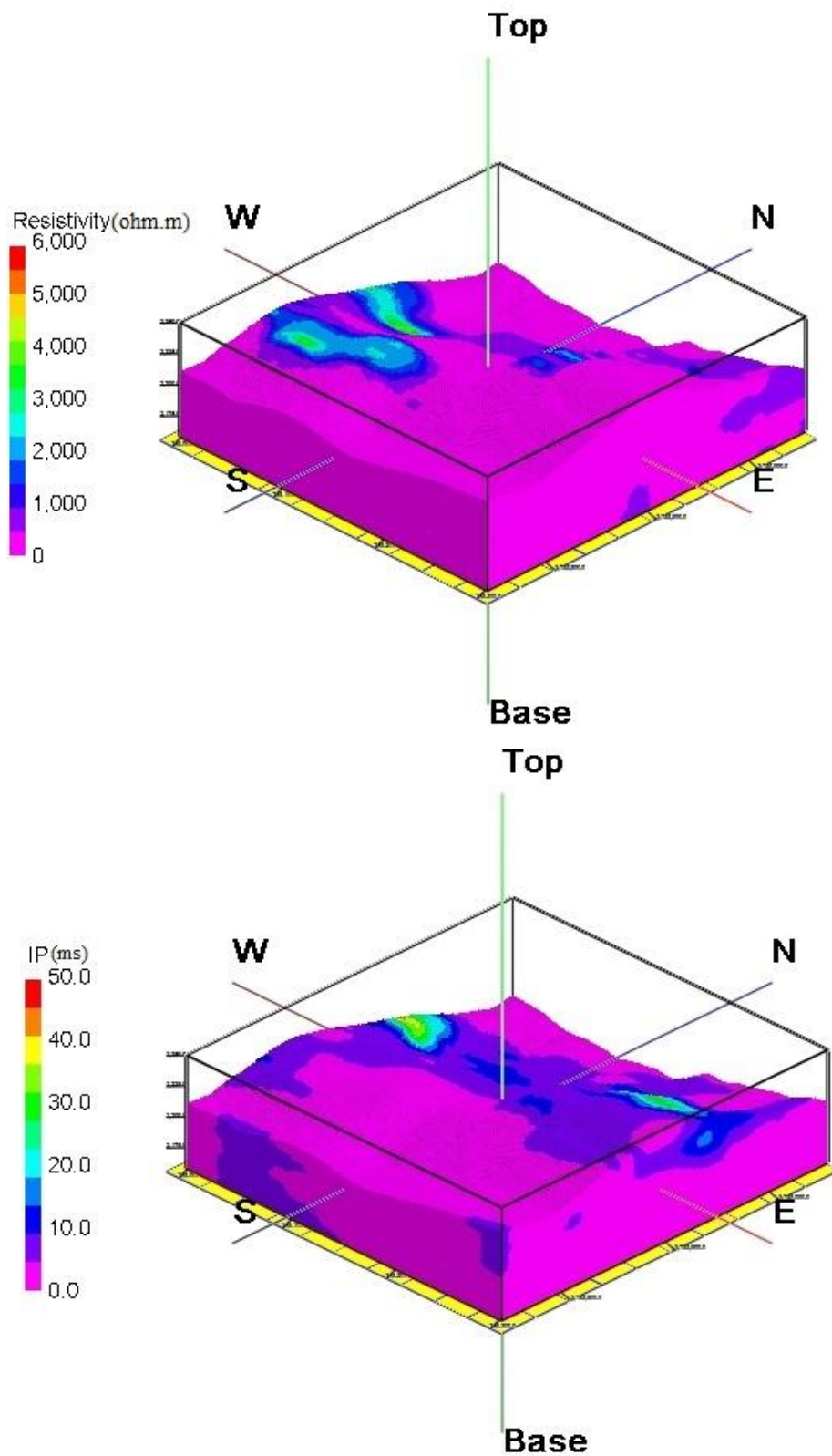
شکل‌های (۴-۴۵) و (۴-۴۶) نمایش سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه و IP منطقه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار Voxler و شکل (۴-۴۷) نمایش سه‌بعدی داده‌های مذکور را در محیط نرم‌افزار Rockworks نشان می‌دهند.



شکل (۴-۴۵): نمایش سه بعدی داده های مقاومت ویژه در منطقه مورد مطالعه الف) دید از پهلو ب) دید از بالا



شکل (۴-۴۶): نمایش سه‌بعدی داده‌های قطبش‌القایی در منطقه مورد مطالعه الف) دید از پهلو چپ ب) دید از پهلو راست



شکل (۴-۴۷): نمایش سه بعدی داده های مقاومت ویژه و IP منطقه مورد مطالعه با توپوگرافی به وسیله نرم افزار Rockworks

۴-۱۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

از آنجا که داده‌های خام در اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی نمی‌توانند هیچ‌گونه اطلاعات کمی درباره عمق حقیقی، ابعاد و یا توزیع مقاومت‌ویژه حقیقی الکتریکی در زیر زمین بیان کنند، لذا مدل‌سازی داده‌ها، امری اجتناب‌ناپذیر است. در روش‌های ژئوالکتریکی، تفسیرهای یک‌بعدی، خطا و عدم یکتایی بیشتری نسبت به تفسیرهای دوبعدی و متعاقباً سه‌بعدی دارند. بنابراین تفسیر صحیح بی‌هنجاری‌های زیرسطحی نیز منوط به اندازه‌گیری‌های دوبعدی و سه‌بعدی داده‌ها است. از آنجا که الگوریتم‌های مدل‌سازی دو بعدی به خوبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ژئوفیزیکدان‌ها به دلیل سادگی و دقت قابل قبول این روش، برای مقاصد گوناگونی از آن‌ها استفاده می‌کنند.

در بررسی‌های ژئوفیزیکی به منظور افزایش دقت و حصول نتایج با صحت بالاتر، از ترکیب چند روش استفاده می‌شود. از این‌رو، در پژوهش حاضر، برداشت‌های مقاومت‌سنجی و قطبش‌القایی به‌وسیله آرایه ژئوالکتریکی دوقطبی - دوقطبی، به دلیل حساسیت بالای این آرایه به تغییرات جانبی در منطقه مورد مطالعه، انجام شد و نیز مدل‌سازی روی آن‌ها صورت پذیرفت. همچنین به منظور بررسی انطباق مدل‌های حاصل از وارون‌سازی مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی، اقدام به وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه و IP به‌وسیله نرم‌افزار RES2DINV شد.

به منظور ارتقای صحت و دقت در عملیات اکتشافی، وجود پارامترهای کلیدی از قبیل موقعیت سه‌بعدی کانسار و حجم پتانسیل معدنی بسیار موثر است و از طرفی، مدل‌های سه‌بعدی اطلاعات قابل‌توجهی در تخمین ذخیره کانسار به کارشناس می‌دهند. فرآیند مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، علاوه بر اینکه تفسیری جزئی‌تر از هندسه ساختارهای زمین‌شناسی در عمق و ارتباط آن‌ها ارائه می‌دهد؛ اطلاعات اساسی درباره مکان، شکل و جهت این ساختارها نیز نمایان می‌کند. همچنین این مدل‌ها می‌توانند برای پیش‌بینی پتانسیل معدنی و ارزیابی منابع معدنی مفید واقع شوند. به‌همین دلیل در این پژوهش نتایج حاصل از وارون‌سازی دوبعدی، توسط نرم‌افزار RES3DINV وارون‌سازی سه‌بعدی شدند

و تا حدودی شکل و هندسه کانسار، عمق قرارگیری آن و دیگر خصوصیات توده زیرسطحی مشخص گردید؛ که بر اساس کلیه نتایج و اطلاعات به دست آمده نقاط حفاری بر روی این پروفیل‌ها در بخش پیشنهادات ارائه گردید.

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۵-۱ نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پایان‌نامه، اکتشاف دقیق‌تر کانسار پلی‌متال عشوند نهاوند به‌وسیله وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی، مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی بود. برای انجام این کار ابتدا از برداشت‌های مغناطیس‌سنجی به‌منظور تعیین امتداد و روند کانی‌زایی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد و سپس با در نظر گرفتن این مطلب که ماده‌معدنی از مالاکیت و کالکوپیریت تشکیل شده است؛ برداشت‌های قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه عمود بر امتداد توده با آرایش دوقطبی- دوقطبی در جهت شمال- جنوب به فاصله ۵۰ متر از هم انجام شد تا وضعیت قرارگیری توده‌ها در عمق به‌خوبی روشن شود و نهایتاً با انجام عملیات مدل‌سازی وارون دوبعدی و سه‌بعدی بر روی داده‌های ژئوفیزیکی برداشت‌شده و تطبیق آن‌ها با اطلاعات حاصله از ترانسه‌های حفرشده در منطقه مورد مطالعه، مناطق محتمل کانی‌سازی شناسایی و نقاط بهینه جهت عملیات حفاری اکتشافی پیشنهاد گردید.

با توجه به مطالب گفته‌شده و مقایسه مدل‌سازی‌ها در فصل‌های قبل، موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتایج حاصل از این تحقیق به‌طور خلاصه ذکر کرد:

با توجه به اینکه بخش عمده منطقه را سنگ‌های نفوذی (گرانیت و گرانودیوریت) پوشانده است، برداشت‌های مغناطیسی را می‌توان به‌عنوان روشی مناسب در تعیین محدوده‌های بی‌هنجار مرتبط با کانی‌سازی در این منطقه به‌شمار آورد. بدین منظور مدل سه‌بعدی مغناطیسی دید خوبی نسبت به گسترش مغناطیس در منطقه در اختیار قرار می‌دهد؛ که جهت شناسایی مناطق کانی‌سازی موثر واقع خواهد شد.

با توجه به نقشه برگردان به قطب با ادامه فراسو تا ۵ متر که در محدوده مورد مطالعه برای تفسیر مناسب‌تر به نظر می‌رسد می‌توان دید که توده‌های معدنی در جهت شرق به غرب کشیده شده‌اند. محدوده این توده‌ها با خطوط آبی اطراف آن در شکل (۳-۹) جدا شده است؛ همچنین بیشتر توده‌ها تا عمق بیش از ۲۰ متر نیز ادامه داشته‌اند.

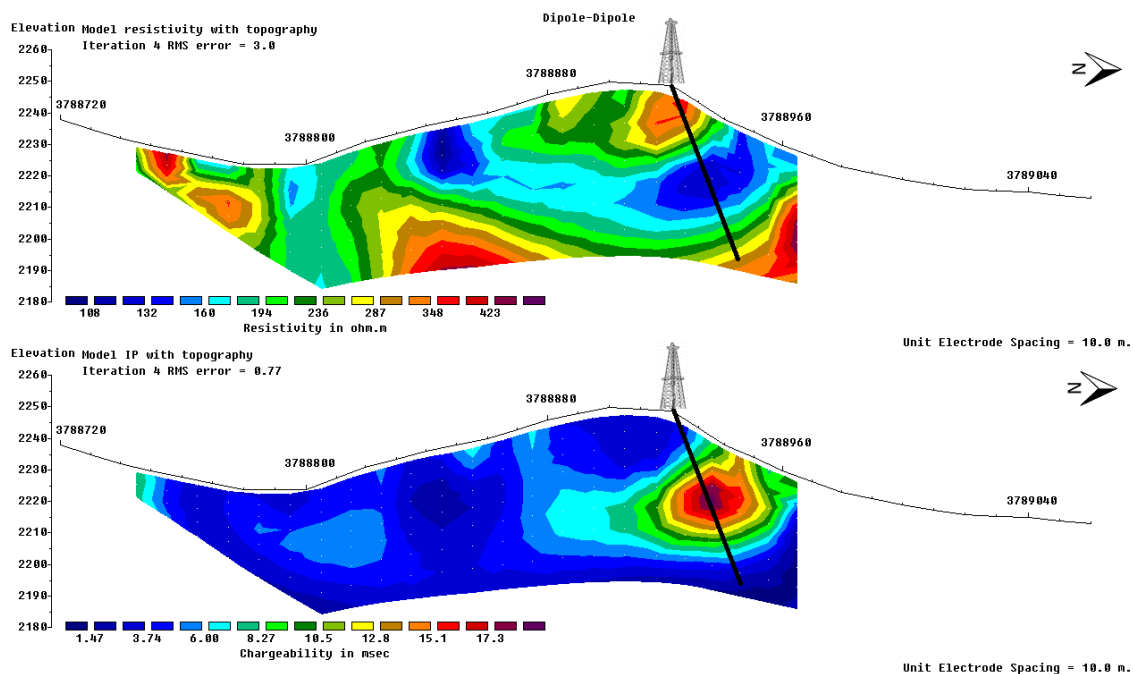
در محدوده مورد مطالعه، پس از انجام برداشت‌های قطبش‌القایی و مقاومت‌ویژه و مدل‌سازی داده‌ها، محل‌های مناسب جهت حفاری ارائه شد که در بخش پیشنهادات آورده شده است. همچنین تمام مقاطع مدل به‌دست آمده همراه با پروفیل مغناطیس آن در اشکال شماره (۴-۱۶)، (۴-۲۰)، (۴-۲۴)، (۴-۲۸)، (۴-۳۲)، (۴۳-۳۶) و (۴-۴۰) نمایش داده شده که می‌توان دید تقریباً در تمام بخش‌هایی که تغییرات بی‌هنجاری مغناطیس دیده می‌شود بی‌هنجاری قطبش‌القایی هم وجود داشته و شکل توده به مقدار بسیار زیادی مشخص شده است. تنها می‌توان گفت در بخش‌هایی که بی‌هنجاری مغناطیس ضعیف‌تر بوده به احتمال زیاد مقدار آهن توده کمتر و یا در عمق بیشتری بوده است.

همچنین به روشنی می‌توان دید تقریباً بیشتر توده‌ها شیبی به سمت جنوب داشته است. توده مورد مطالعه از سطح زمین شروع شده و در بعضی موارد تا عمق‌های بیش از ۴۰ متر نیز ادامه داشته است. همچنین توده‌هایی مجزا از هم با شیب و عمق متفاوت که ممکن است در اثر گسل از هم جدا شده باشد به‌خوبی تفکیک شده است.

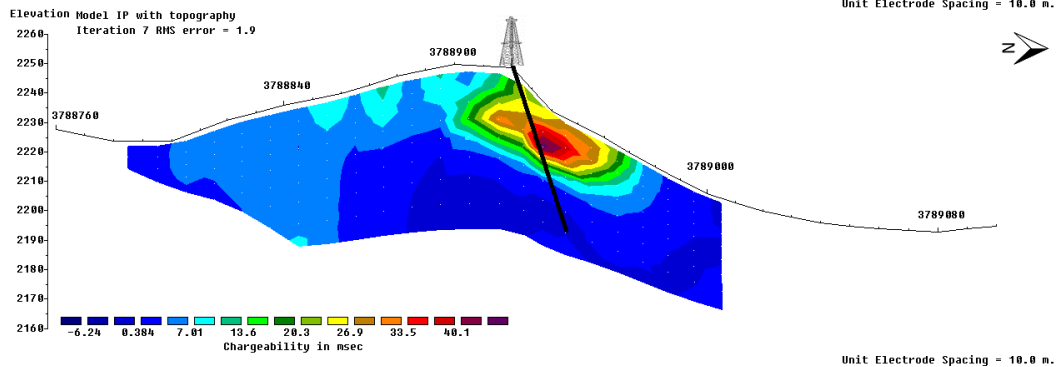
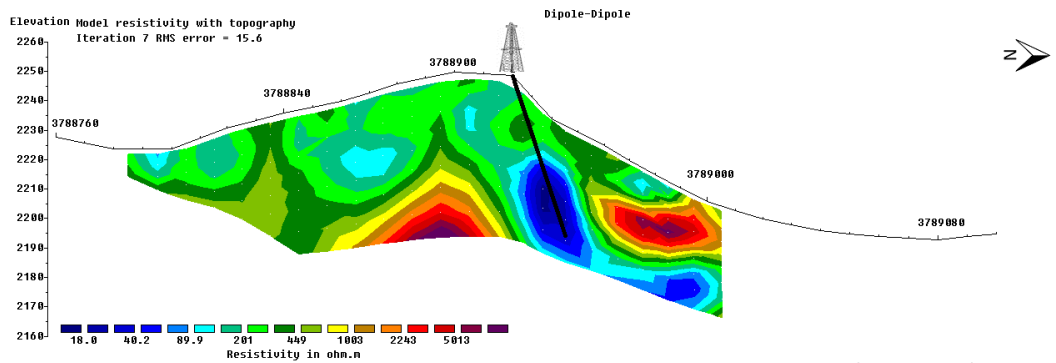
بر اساس مدل‌های به‌دست آمده از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی منطقه مورد مطالعه، چنین به‌نظر می‌رسد که از سه بی‌هنجاری موجود، بی‌هنجاری A هم از نظر اندازه و هم از نظر شدت مغناطیدگی نسبت به دو آنومالی B و C بزرگ‌تر بوده و از اهمیت بیشتری برخوردار است.

۲-۵ پیشنهادات

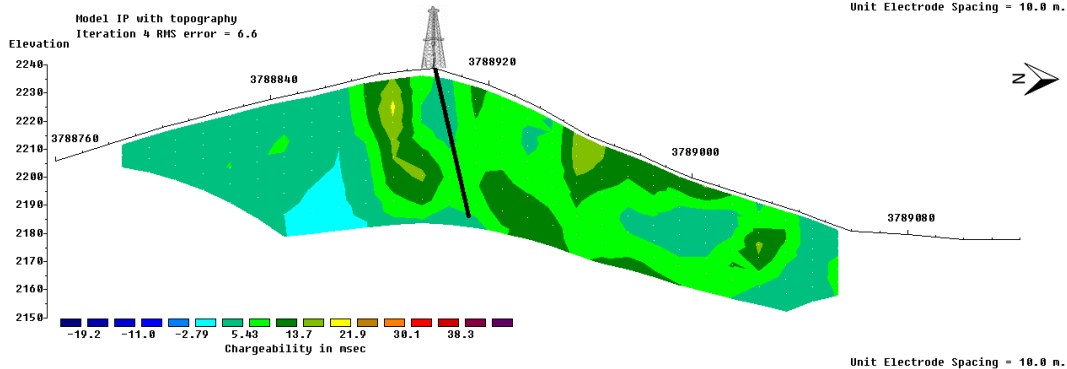
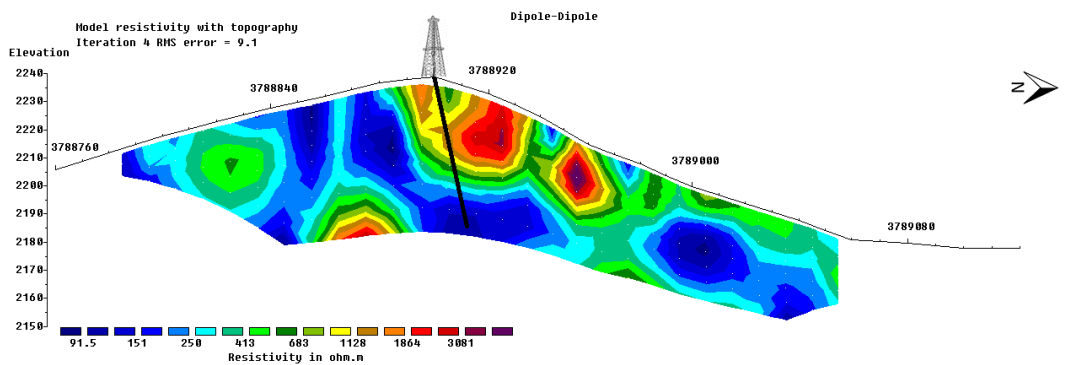
به منظور حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته، توصیه می‌شود حفاری در نقاط پیشنهادی زیر صورت گیرد و نتایج حاصله از آن با نتایج حاصله از مدل‌سازی‌ها مقایسه گردد. مطابق جدول (۱-۵) و شکل‌های (۱-۵) تا (۷-۵)، ایستگاه‌های زیر با توجه به برداشت‌های مغناطیس، قطبش‌القایی، مقاومت‌ویژه الکتریکی و اطلاعات حاصله از ترانسه‌ها جهت حفاری پیشنهاد می‌گردند.



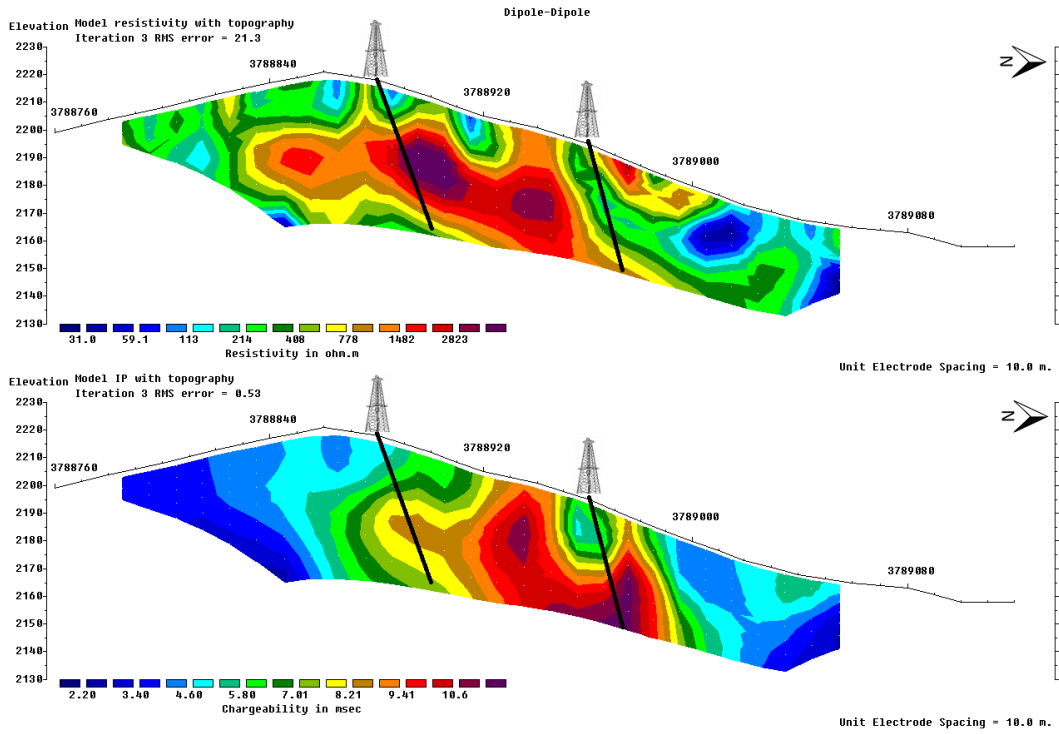
شکل (۱-۵): مدل دوبعدی مقاومت‌ویژه، قطبش‌القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره یک



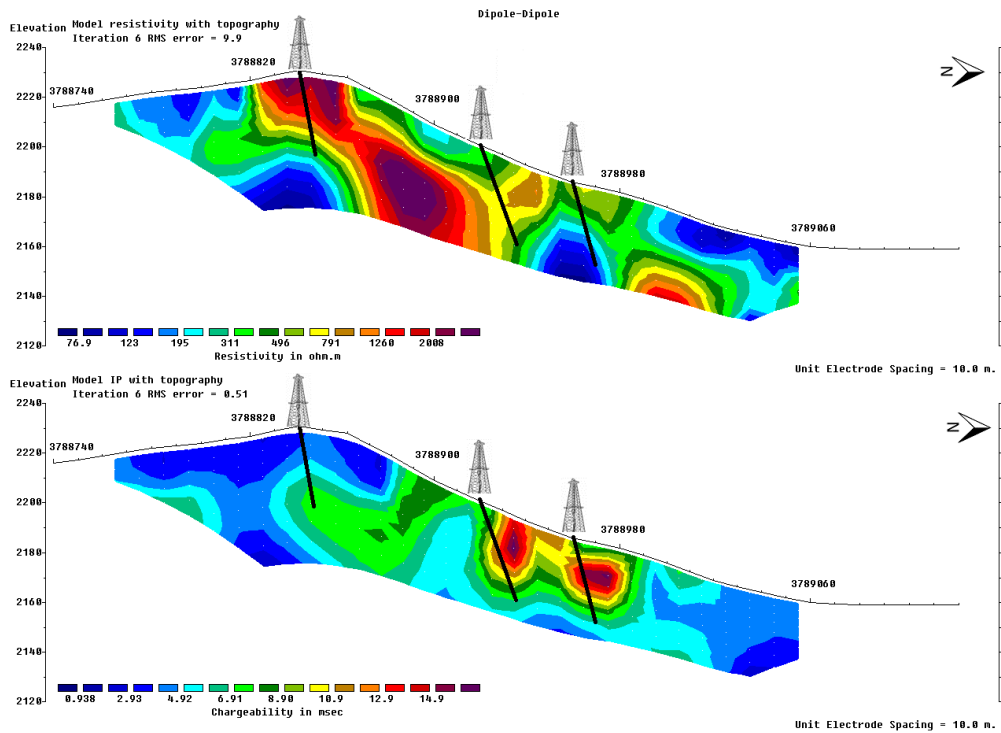
شکل (۲-۵): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره دو



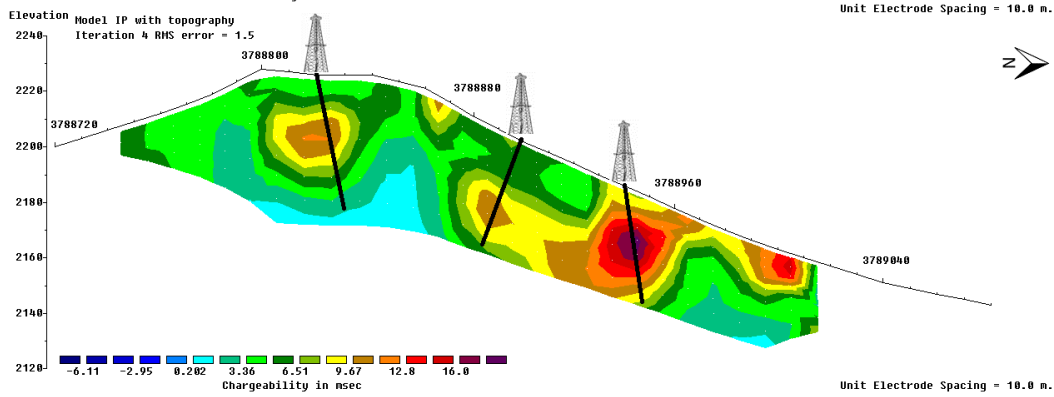
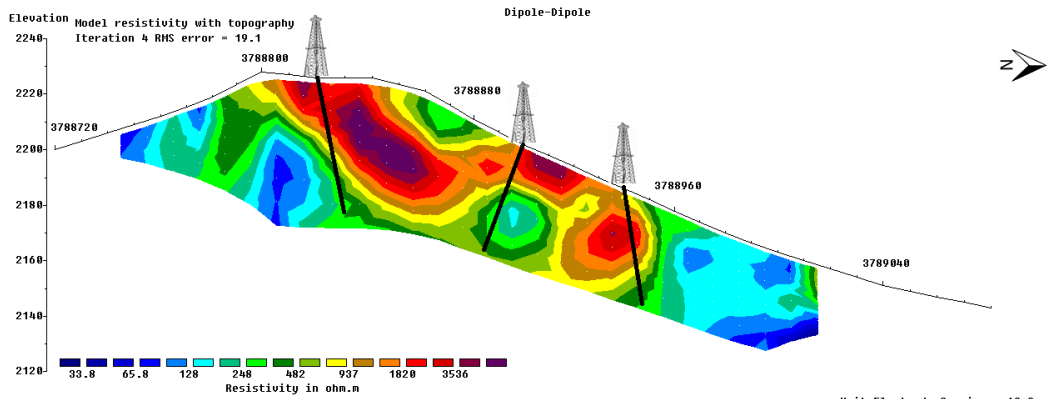
شکل (۳-۵): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره سه



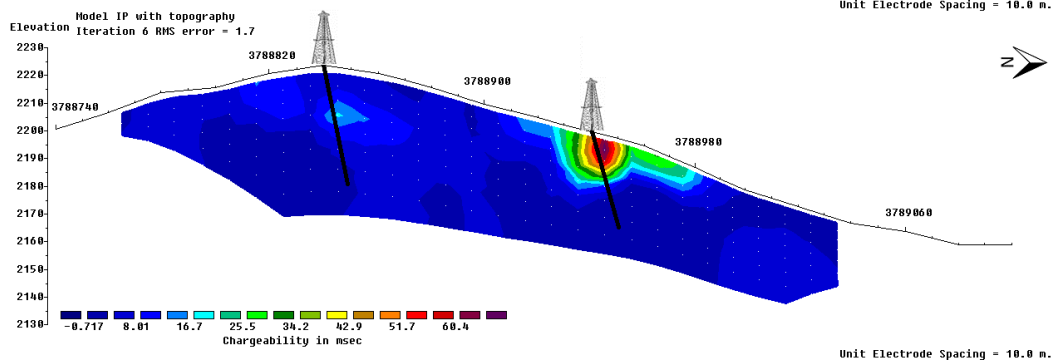
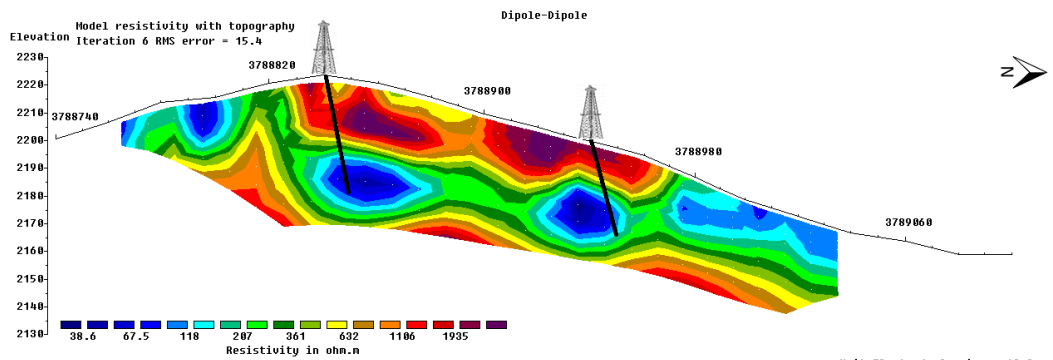
شکل (۴-۵): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره چهار



شکل (۵-۵): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره پنج



شکل (۵-۶): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره شش



شکل (۵-۷): مدل دوبعدی مقاومت ویژه، قطبش القایی و نقاط پیشنهادی حفاری پروفیل شماره هفت

جدول (۵-۱): نقاط پیشنهادی برای حفاری

نقاط پیشنهادی	مختصات X	مختصات Y	عمق (متر)
P1	۲۶۸۳۰۰	۳۷۸۸۹۲۰	۶۰
P2	۲۶۸۲۵۰	۳۷۸۸۹۲۰	۶۰
P3	۲۶۸۲۰۰	۳۷۸۸۹۰۰	۶۰
P4	۲۶۸۱۵۰	۳۷۸۸۸۸۰	۶۰
P4	۲۶۸۱۵۰	۳۷۸۸۹۶۰	۶۰
P5	۲۶۸۱۰۰	۳۷۸۸۸۴۰	۴۰
P5	۲۶۸۱۰۰	۳۷۸۸۹۲۰	۴۰
P5	۲۶۸۱۰۰	۳۷۸۸۹۶۰	۴۰
P6	۲۶۸۰۵۰	۳۷۸۸۹۴۰	۵۰
P6	۲۶۸۰۵۰	۳۷۸۸۸۲۰	۵۰
p6	۲۶۸۰۵۰	۳۷۸۸۹۰۰	۵۰
P7	۲۶۸۰۰۰	۳۷۸۸۸۴۰	۵۰
P7	۲۶۸۰۰۰	۳۷۸۸۹۴۰	۵۰

منابع و مأخذ

منابع و مأخذ فارسی

- جعفری، ف.، (۱۳۹۰)، "طرح اکتشاف کانسار پلی‌متال در منطقه عشوند نهاوند استان همدان"، گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- جمالی، ف.، عرب امیری، ع.، کامکار روحانی، ا.، محمدی‌ویژه، م.، بهرامی، ع.، (۱۳۹۳)، "پی‌جویی و اکتشاف ژئوفیزیکی ذخایر پلی‌متال در منطقه کبودان - بردسکن"، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران؛ ۲۳-۲۵ اردیبهشت - ۲۹۸-۳۰۲.
- حجت، آ.، رنجبر، ح.، (۱۳۹۰)، "اصول ژئوالکتریک کاربردی"، چاپ اول، انتشارات ستایش، تهران.
- حسینی‌دوست، ج.، مهدوی، م.، علوی، م.، (۱۹۹۲)، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نهاوند، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حیدریان شهری، م.، (۱۳۸۴)، "مبانی اکتشافات ژئوفیزیک"، دانشگاه فردوسی مشهد.
- خزایی‌فر، ا.، نجاتی‌کلاته، ع.، روشندل‌کاهو، ا.، الله‌وردی‌میگونی، ف.، (۱۳۹۴)، "تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی کانسار پلی‌متال منطقه عشوند و مقایسه نتایج با وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی"، فیزیک‌زمین و فضا، دوره ۴۱، شماره ۲، صفحه ۱۹۳-۲۰۶.
- زارعان، ا.، فرخی، م.، چایچی‌زاده، س.، (۱۳۸۹)، "مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های ژئوفیزیک (IP,RS) در اندیس طلای گلوجه زنجان"، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران (۲۱-۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۹، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران).

ژولیده سر، ف.، نوروزی، غ.، جهان تیغ، م.، حسینیان، ش.، (۱۳۹۰)، "بررسی اندیس معدنی درح با استفاده از مدل سازی وارون (IP,RS و M)"، اولین همایش ملی مس، پژوهشکده صنایع معدنی دانشگاه شهید باهنر کرمان.

عباسی نیا، م.، ابراهیمی، م.، (۱۳۹۳)، "اکتشافات ژئوفیزیکی کانسار آهن قبله داغی به روش مگنتومتري"، کنفرانس ملی علوم معدنی، مازندران-ساری.

علیلو، س.ک.، عابدی، م.، نوروزی، غ.، دولتی، ف.، (۱۳۹۲)، "به کارگیری روش های تلفیقی مغناطیسی، مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی در اکتشاف کانسارهای اسکارن آهن و مس، مطالعه موردی: کانسار آهن و مس قلندر، اهر"، اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی (۱۹-۲۰ آذر ۱۳۹۲، دانشگاه شاهرود).

قاری، ح.، (۱۳۹۱)، وارون سازی سه بعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از روش المان محدود، پایان نامه کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد.

کامکار روحانی، ا.، بیگی، م.، (۱۳۸۸)، "پردازش و تفسیر داده های مغناطیس هوایی به منظور پی جویی ذخایر کرومیت در منطقه ی سبزوار"، مجله فیزیک زمین و فضا، ش ۳، د ۳۵، ص ۱۳-۳۶.

کریم پور، م. ح.، سعادت، س.، (۱۳۸۲)، زمین شناسی اقتصادی کاربردی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۵۳۵.

کریم پور، م. ح.، ملک زاده، آ.، حیدریان، م.، (۱۳۸۷)، "اکتشاف ذخایر معدنی"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

کلاگری، ع. (۱۳۷۱)، " اصول اکتشاف ژئوفیزیکی "، چاپ اول، انتشارات تابش، تهران، ص ۵۸۸.

مجیدی، ب.، عمیدی، س. م. (۱۳۵۹)، شرح نقشه زمین شناسی چهار گوش همدان گزارش

داخلی سازمان زمین شناسی کشور.

مرادزاده، ع.، عرب امیری، ع. (۱۳۸۳)، " مدل سازی وارون پارامتری داده های

پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه اندیس معدنی پاینده "، مجموعه مقالات هشتمین همایش

انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

موحدی، م. (۱۳۸۹)، گزارش زمین شناسی منطقه نهاوند در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین-

شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

مهدوی، م. ع. (۱۹۹۲)، گزارش ورقه نهاوند، نقشه زمین شناسی ایران، سری ۱:۱۰۰۰۰۰.

میرزائزاد، ی.، حفیظی، م. ک.، یوسفی، پ. (۱۳۸۹)، " اکتشاف مس به روش IP و مقاومت ویژه

در منطقه قلعه ریگی، استان کرمان "، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت

۱۳۸۹، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

نوروزی، غ. (۱۳۹۲)، " روش های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی "، چاپ اول، انتشارات

دانشگاه تهران، تهران، ص ۳۷۵.

نوروزی، غ.، غلامی، س. (۱۳۸۴)، " تحلیل و مدل سازی داده های ژئوفیزیکی (IP,RS و M)

در محل اندیس معدنی سونا جیل "، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹، شماره ۲، صفحه ۲۶۵-۲۵۳.

ولی زاده، م. و. (۱۹۷۵)، تعیین سن مجموعه نفوذی همدان با روش پتاسیم- آرگون، پردیس

علوم، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران، ایران.

یوسفی، ب.، اسکویی، ب.، (۱۳۹۲). " استفاده از روش لی - اولدنبرگ در برگردان سه بعدی

داده های مغناطیسی زمینی منطقه گزستان، استان یزد"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۹،

شماره ۱، صفحه ۷۳-۸۸.

منابع و مأخذ انگلیسی

Aizebeokhai, A.P., Olayinka, A.I. and Singh, V.S., (2009), January. *Numerical evaluation of 3D geoelectrical resistivity imaging for environmental and engineering investigations using orthogonal 2D profiles*. In 2009 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.

Alilou, S., Norouzi, Gh.H., Doulati, F., and Abedi, M., (2014). *'Application of magnetometry, electrical resistivity and induced polarization for exploration of polymetal deposits, a case study: Halab Dandi, Zanjan, Iran*.

Amidi, S.M., Alavi Tehrani, N., Gorashi, M., Sabzaei, M., (1977). *Geology of the Hamadan Quadrangle*. Geological Survey of Iran.

Aster, R.C., Borchers, B. and Thurber, C.H., (2013), *Parameter Estimation and Inverse Problems*, 2nd edition, Elsevier, E-book.

Bosch, M., McGaughey, J., (2001). "Joint inversion of gravity and magnetic data under lithologic constraints". *The Leading Edge* 877-881 August.

Cheng, Zh., Li, Abbassi, B., and Boszczuk, P., (2015), *Three-dimensional interpretation of geophysical data and geological implications*, International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications Chengdu, China. April 19-22, 2015.

Clark, D.A., (1999), "Magnetic petrology of igneous intrusions-Implications for exploration and magnetic interpretation" *Exploration Geophysics*, v. 20, p. 5-26.

Corvallis, O. (2000). "DC resistivity method. Northwest Geophysical Associates", Inc

DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S., (1990). *Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data*. *Geophysics*, 55(12), pp.1613-1624.

Dey, A. and Morrison, H.F., (1979). *Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures*. Geophysics, 44(4), pp.753-780.

Dobrin, D. B., and Savit, C. H., (1988), "*Introduction to geophysical prospecting*", Mc Graw-Hill Book Company, New York, USA.

Fedi, Maurizio, and Antonio Rapolla. (1999). *3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution*, Geophysics, 64, 452-60.

Ferneyhough, A.B., (2000), —*Case history study of the Batu Hijau copper-gold porphyry deposit in Indonesia*, in Ellis, R.B., Irvine, R., and Fritz, F., eds., Northwest Mining Association 1998 Practical Geophysics Short Course, selected papers on CD-ROM: Spokane, Washington, Northwest Mining Association, paper 5, 9 p.

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

Gunn P. J. (1996), Workshop *Interpretation of aeromagnetic data*. AGSO Journal of Australian Geology & geophysics.

<http://www.geotomo.com>

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

Li, Y. and Oldenburg, D.W., (1996), *3-D inversion of magnetic data*, Geophysics, 61 (2), 394-400.

Li, Y. and Oldenburg, D.W., (1998), *3-D inversion of gravity data*, Geophysics, 63 (1), 109-119.

Loke, M.H. and Barker, R.D., (1996). *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*. Geophysical prospecting, 44(3), pp.499-523.

Loke, M.H., (1998). RES2DINV. *Rapid 2D Resistivity and IP inversion using the least squares method*—user's manual.

Loke M. H., (2000), *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A practical guide to 2-D and 3-D surveys.*

Loke, M.H. and Dahlin, T., (2002). A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 49(3), pp.149-162.

Loke, M.H., (2002). RES3DINV ver. 2.11 for Windows 95/98 & NT-Rapid 3D Resistivity & IP inversion using the least squares method.

Li, Y. and Oldenburg, D.W., (2003), *Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method*, *Geophysical Journal International*, 152 (2), 251-265.

Loke, M.H. and Lane Jr, J.W., (2004). *Inversion of data from electrical resistivity imaging surveys in water-covered areas*. *Exploration Geophysics*,35(4), pp.266-271.

Loke, M.H., 2004, *2D and 3D electrical imaging surveys.*

Loke, M. H. (2012), "*Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys' Course Notes for USGS Workshop 2-d and 3-d Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data.* Pp 172.

Louro, V. H. A., Mantovani, M.S.M., (2012). “3D inversion and modeling of magnetic and gravimetric data characterizing the geophysical anomaly source in Pratinha I in the southeast of Brazil” *Journal of Applied Geophysics* 80 (2012) 110–120.

MAG3D, A., (2005), *A Program Library for Forward Modelling and Inversion of Magnetic Data Over 3D Structures*, Version 4.0, Department of Geophysics and Astronomy, University British Columbia, Vancouver.

Miller, H.G. and Singh, V., 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3), pp.213-217.

Montaj, O., 2006. *Gravity and magnetic software*, user manual. Oasis Montaj, 6.

Okan, T., (2002), “ *interpretation of field observation in induced polarization*”, international conference on earth science and electronic.

Oldenburg, D.W. and D.A. Pratt, (2007), "*Geophysical inversion for mineral exploration: A decade of progress in theory and practice.*"

Oldenburg, D.W., Li, Y., and Ellis, R.G., (1997), *Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit—A case history for Mt. Milligan*: Geophysics, v. 62, p.1419–1431.

Park, Stephen K, and Gregory P Van. (1991). *'Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes'*, Geophysics, 56: 951-60.

Paterson, N. R., and Hallof, P., G., (1991), *Gold metallogeny and exploration-Geophysical exploration for gold*, Springer.

Reynolds, J. .M. 1997. *An introduction to applied and environmental Geophysics*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester.

Ribeiro, V. B., Louro, V. H. A., Mantovani, M.S.M.,(2013). “*3D Inversion of magnetic data of grouped anomalies –Study applied to São José intrusions in Mato Grosso, Brazil*” Journal of Applied Geophysics 93 (2013) 67–76.

R.M.S. White, S. Collins, R. Denne, R. Hee, P. Brown ” *A new survey design for 3D IP inversion modelling at Copper Hill*” Exploration Geophysics (2001) 32, 152 – 155.

Santos, M., F.A. and Sultan, S.A., (2008). *On the 3-D inversion of vertical electrical soundings: Application to the South Ismailia area-Cairo Desert road, Cairo, Egypt*. Journal of applied geophysics, 65(2), pp.97-110.

Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). *Electrical resistivity survey in soil science: a review*. Soil & Tillage Research, 83,173-193.

Sasaki, Y., (1992). *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical SIMULATION1*. Geophysical prospecting, 40(4), pp.453-463.

Sasaki, Y., (1994). *3-D resistivity inversion using the finite-element method*.Geophysics, 59(12), pp.1839-1848.

Smith, N.C. and Vozoff, K., (1984). *Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (1), pp.21-28.

Sumner, Stewart J., (1976), *Principles of induced polarization for geophysical exploration*.

Telford W.W.M. and Sheriff R.E. (1990), "*Applied geophysics*", Vol. 1, Cambridge University Press, UK. pp 340- 380.

Tikhonov, A.N. and Arsenin, V.Y., (1977). *Solutions of ill-posed problems*.

Thoman, M.W., Zonge, K.L., and Liu, D., (2000), *Geophysical case history of North Silver Bell, Pima County, Arizona—A supergene-enriched porphyry copper deposit*, in Ellis, R.B., Irvine, R., and Fritz, F., eds., *Northwest Mining Association 1998 Practical Geophysics Short Course Selected Papers on CD-ROM: Spokane, Washington*, Northwest Mining Association, paper 4, 42 p.

Uchida, T., Takakura, Sh., Ueda, T., Sato, T., and Abe, Y., (2015) "*Three-Dimensional Resistivity Structure of the Yanaiizu-Nishiyama Geothermal Reservoir, Northern Japan*" Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April.

Wang, G., Zhu, Y., Zhang, S., Yan, Ch., Song, Yaowu., Ma, Zh., Hong, D., Chen, T., "*3D geological modeling based on gravitational and magnetic data inversion in the Luanchuan ore region, Henan Province, China*" *Journal of Applied Geophysics* 80 (2012) 1–11.

Ward, S.H., (1990). *Resistivity and induced polarization methods. Geotechnical and environmental geophysics*, 1, pp.147-189.

Williams, N.C., (2008). *Geologically-constrained UBC–GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew-Wiluna greenstone belt, Western Australia* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).

Zhou, Q.Y., Shimada, J., Sato, A., (2001). *Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography*. *Water Resour. Res.* 37, 273–285.

Abstract

Geophysical methods have high efficiency in the Prospecting and Exploration of mineral deposit. These methods if chosen properly, these will provide valuable information of mineralization in Surface or depth. A Magnetometric survey with 1060 sampling points of 10 meters distances was applied in this study with the aim of more accurate evaluation of poly metal skarn deposit of copper, gold, zinc and iron. The survey was conducted in northeast of Nahavand near the village of Oshvand in a region with area of 350×400 square meters. After determining the extent of anomaly and also Mineralization along the trend, the best place for acquiring Resistivity and Induced Polarization data was obtained. Seven parallel profiles with 50 m spacing and Dipole-Dipole arrays and perpendicular trends to the mass were designed to investigate the dip and trend of the masses in depth and to determine the optimum points for drilling. In order to determine the source geometry and mass magnetization contrast to the surroundings, 3D inversion of magnetic data was applied using Li-Oldenburg algorithm (software UBC MAG3D). For optimum utilization of the algorithm, it's application on the synthetic data was firstly investigated and then used for modeling actual data. The surveyed Resistivity and IP data were entered to RES2DINV Software and inverted after primary corrections including removing outliers and results were presented as 2D sections. Finally, in order to reduce the risk of future studies and drilling costs, three-dimensional inversion modeling was used to analyze the data by RES3DINV Software . Regarding Reduction to the pole magnetic map with 5m upward continuation, it can be seen that masses are extended from east to west and most of them had depths up to 20 m. In almost all parts with magnetic anomaly changes, induced polarization anomaly changes were observed and the shapes of the masses were also well determined. It can only be said that weak magnetic anomaly sections are less likely to have iron content or the masses are in more depths. It was also observed that the dip direction of nearly all masses were to the south. The mass under study started from the Earth's surface and extended to depths of over 40 meters in some places. The separate masses with different slopes and depths that might be separated by fault were also well determined. Based on the obtained models from 3D inversion of magnetic data of the studied area, it seems that from 3 existing anomalies, the anomaly A is greater than the others from both size and magnetic intensity points of view.

Based on all the information and results of the three-dimensional modeling of Magnetic, Resistivity and Induced Polarization data, Promising areas for exploratory boreholes were identified and introduced.

Key words: 3D inversion modeling, Resistivity, Induced Polarization, Magnetometry, Poly-metal, Oshvand, Hamedan



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics
Mine Exploration Department
MSc Thesis in Mining Exploration

**3D Inversion of Magnetic, Resistivity and Induced Polarization
Data. Case Study: Poly Metals Deposit In Oshvand, Hamedan
Province, Iran.**

By: Matin Tabibzadeh Genaveh

Supervisor:

Dr. Ali Nejati Kalateh

Dr. Alireza Arab-Amiri

Advisor:

Alireza Ameri

August 2016