

اکتشافات فلزی پلاریزاسیون القایی و مغناطیس هوابرد در منطقه پیرمردان ترود - شاهرود

شراره ولی^{۱*}، علی نجاتی کلاته^۲ و علیرضا عرب امیری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک- گرایش ژئومغناطیس دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: sharare_valii@yahoo.com

چکیده

واژگان کلیدی

روش های ژئوفیزیکی از جمله روش های مناسبی هستند؛ که در پی جویی و اکتشاف ذخایر معدنی کاربرد وسیعی دارند. استفاده از دو یا چند روش اکتشافی در کنار یکدیگر و ترکیب آن ها با اطلاعات دیگری همچون زمین شناسی، می تواند احتمال کشف و امکان دستیابی به مناطق امیدبخش را افزایش دهد. با توجه به شواهد کانی زایی فلزی و سولفیدی در منطقه مورد مطالعه (پیرمردان از توابع دهستان ترود، شهرستان شاهرود)، استفاده از روش های مغناطیس هوابرد، قطبش القایی (IP) و مقاومت ویژه الکتریکی (Res) به منظور پی جویی و اکتشاف کانی سازهای احتمالی و انجام مطالعات زمین شناسی از اهمیت بالایی برخوردار است. جایگاه و ارتباط فضایی ذخایر با خطواره ها از دیرباز مورد توجه زمین شناسان قرار گرفته است. در این مقاله از داده های ژئومغناطیس هوابرد و اطلاعات زمین شناسی برای تشخیص و تفکیک روندهای عمومی ساختارها، خطواره ها و گسل های بزرگ با بهره گیری از فیلتر کجی (Tilt)، استفاده شده است. با پردازش و تفسیر داده های مغناطیس هوابرد منطقه به بررسی ساختارهای موجود در منطقه پرداخته شده است. همچنین با توجه به شواهد زمین شناسی موجود در منطقه برداشت داده های قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی به صورت یک آرایش مستطیلی به منظور پی جویی اولیه محدوده های بی هنجار و دو پروفیل با آرایش دوقطبی- دوقطبی به منظور بررسی های جانبی و گسترش عمقی این بی هنجاری ها طراحی و انجام شده است. پردازش داده های مغناطیس هوابرد با استفاده از نرم افزار Oasis Montaj و همچنین پردازش و مدل سازی داده های قطبش القایی و مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از نرم افزار RES2DINV و انجام شده است. نتایج نهایی از تفسیر داده های ژئوفیزیکی تایید کننده ارتباط بین خطواره های مغناطیسی با احتمال وجود ذخایر پنهان مس در محدوده مورد مطالعه می باشد. بررسی های انجام شده در این منطقه در نهایت منجر به ارائه ۵ نقطه پیشنهادی برای حفاری شده است.

مغناطیس هوابرد

قطبش القایی (IP)

مقاومت ویژه الکتریکی

آرایه دوقطبی- دوقطبی

کانی سازی مس

ترود

مقاومت‌ویژه ظاهری سنگ‌ها، اطلاعاتی مربوط به هندسه، ابعاد و ویژگی‌های الکتریکی منابع بی‌هنجار زیرسطحی به‌دست آورد (Dentith and Mudge, 2014). گرگانی در سال ۱۳۹۲ به تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی به منظور اکتشاف کانسار مس دو چپله در سال ۱۳۹۲ در ۸ پروفیل پرداخت و در نهایت نتایج تفسیر روش‌های مختلف اکتشافی با یکدیگر ترکیب شد تا نتایج مطمئن‌تر و قابل اعتمادتری برای انجام مراحل نهایی اکتشاف به‌دست آید. مدل-سازی و تفسیر داده‌های پلاریزاسیون القایی و مقاومت‌ویژه به-منظور اکتشاف ذخایر مس در منطقه هفت کوه کرمان در سال ۱۳۹۳ انجام گرفت و چهار پروفیل دوقطبی-دوقطبی در مناطق مستعد وجود بی‌هنجاری برداشت شد. در نهایت، مناطق با پتانسیل بالا با داده‌های حفاری اعتبارسنجی شدند (موسوی، ۱۳۹۳). بست و همکاران (۲۰۱۵) به‌منظور بررسی توانایی روش‌های IP و مقاومت‌ویژه در تشخیص کانی‌سازی‌های فلزی سولفیدی (مس، سرب، روی، نقره و طلا)، برداشت داده‌ها را با سه آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی و شلومبرژه معکوس در محل ۹ ذخیره معدنی اکتشاف شده در کانادا انجام دادند. در حالت کلی، موفقیت روش‌های IP و مقاومت‌ویژه در اکتشاف کانی‌سازی‌های مذکور به اثبات رسید؛ هر چند که دو آرایه دوقطبی-دوقطبی و شلومبرژه معکوس نتایج قابل اعتمادتری از خود نشان دادند.

در این پژوهش ابتدا با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد به بررسی ساختارهای زمین‌شناختی و همچنین بررسی توده‌های نفوذی و موقعیت گسل خوردگی‌های موجود در منطقه پرداخته شده است. سپس با استفاده از روش IP و مقاومت‌ویژه به بررسی وضعیت کانی‌سازی مس در منطقه پرداخته شده است. نظر به این‌که بررسی‌های اولیه با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد در فاز پی‌جویی انجام شده است، بررسی‌های نهایی با استفاده از روش IP و مقاومت‌ویژه در نهایت منجر به ارائه ۵ نقطه حفاری شد.

۲- زمین‌شناسی منطقه

محدوده اکتشافی مس شمال پیرمردان به عنوان بخشی از رشته‌کوه تروود- چاه شیرین در پهنه نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ معلمان قرار دارد. نزدیک‌ترین و مهم‌ترین ساختار تکتونیکی به محدوده گسل رو رانده رشم- پیرمردان در جنوب و گسل باغو در شمال می‌باشد. محدوده مس پیرمردان در فاصله ۱۳۰ کیلومتری جنوب غرب شاهرود، ۷۵ کیلومتری شرق معلمان و ۲۵ کیلومتری غرب دهستان تروود و شمال روستای پیرمردان واقع شده است. وسعت محدوده برابر با ۵/۱۱ کیلومتر مربع می‌باشد؛ که جنوب آن در مجاورت اندیس معدنی چشمه حافظ و شمال آن واقع در کوه توتو است (شفقی و همکاران، ۱۳۹۴). مجموعه آتشفشانی تروود- چاه‌شیرین دارای روند شمال شرقی- جنوب غرب بوده و در قسمت شمال به موازات گسل عطاری و در جنوب با گسل درونه محدود شده است. همچنین این مجموعه آتشفشانی در شمال با گسل انجیلو و از جنوب با تروود در بر گرفته شده است (Hessami et al., ۲۰۱۵).

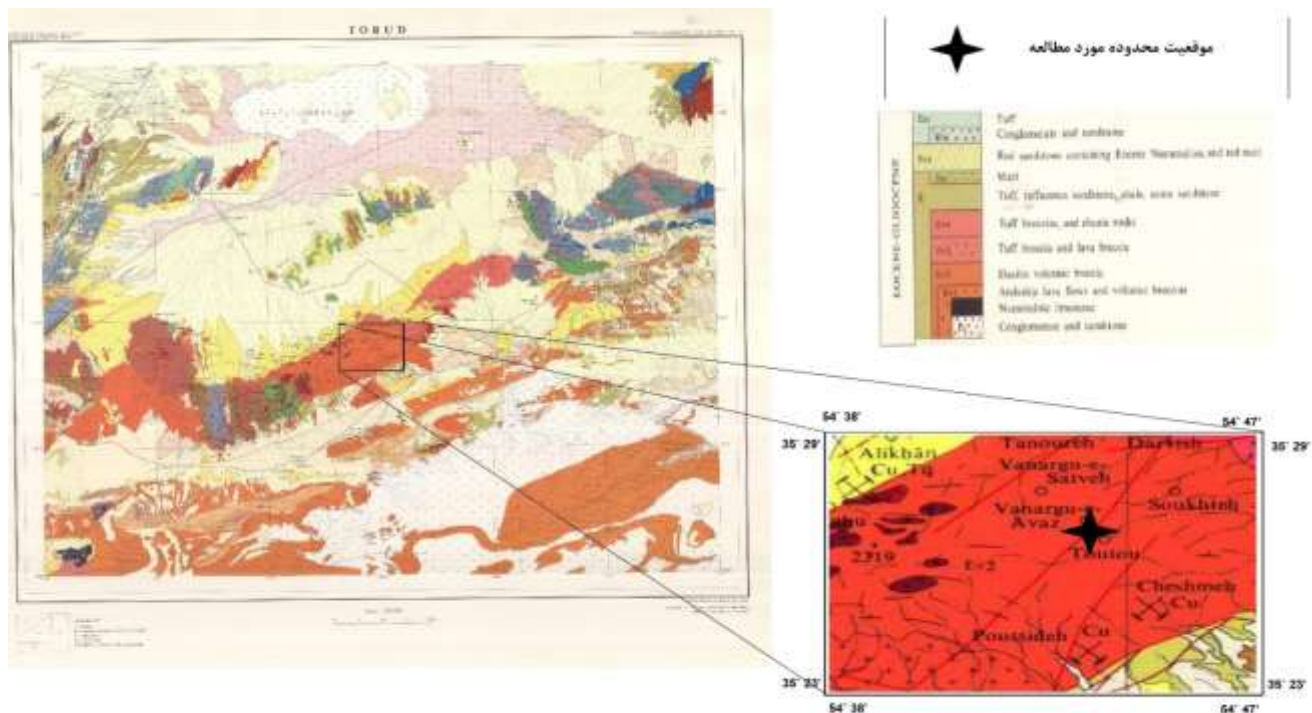
امروزه روش‌های ژئوفیزیکی به‌طور گسترده در کارهای معدنی به‌کار گرفته می‌شود. در روش‌های ژئوفیزیکی با هزینه و زمان کم نتایج قابل قبولی به‌دست می‌آید. این روش‌ها اطلاعاتی در مورد مناطق هدف بدون نیاز به حفاری ارائه می‌دهند. روش‌های ژئوفیزیکی نسبت به روش‌های اکتشافی مستقیم از جمله حفاری، ارزان بوده و غیر مخرب هستند (selley et al., 2005). روابط مابین خطواره‌ها و ذخایر معدنی از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان و مکتشفین بوده است. ریچارد (۲۰۰۰) خطواره‌ها را به عنوان اشکال زمین‌شناختی، ساختاری، ژئومورفولوژیکی و یا ژئوفیزیکی با پهنای ۳۰ کیلومتر و با چند صد کیلومتر به صورت نواری و منطبق با روندهای زمین‌شناختی معرفی و روابط این عارضه‌ها را با ذخایر نشان داده است. به‌کارگیری داده‌های مغناطیس هوابرد یکی از موثرترین روش‌ها در بررسی و تشخیص خطواره‌ها است. ریچارد و همکاران (۲۰۰۱) و چرنیکوف و همکاران (۲۰۰۲) نیز با استفاده از داده‌های مغناطیسی هوابرد و نقشه‌های زمین‌شناسی به استخراج خطواره‌ها پرداخته و جایگاه و ارتباط ذخایر را با خطواره‌ها مشخص ساخته‌اند. الیورا و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از شواهد زمین‌شناسی و داده‌های مغناطیس هوابرد، توانستند مناطق امیدبخشی در کشور پرتغال کشف کنند، که پیش‌تر با دیگر روش‌ها شناسایی نشده بودند. با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد و رادیومتری و همچنین خواص مختلف ذخایر سولفیدی در منطقه شرقی کشور فنلاند جایگاه ذخایر کشف نشده یا پنهان مشخص شد (Airo and Loukola, 2004). در کشور ایران معمولاً برای تشخیص ساختارهای زمین‌شناختی و گسل‌های پنهان و توده‌های نفوذی نیمه عمیق از اطلاعات ژئوفیزیک هوابرد استفاده می‌شود و بهره از این اطلاعات در اکتشافات کم‌تر کاربرد دارد.

کلارک و همکاران (۲۰۰۴) برای افزایش کارایی روش مغناطیس‌سنجی در زمینه اکتشاف ذخایر IOCG مدل‌های مفهومی مغناطیس‌سنجی مختلفی را تهیه کردند. مدل‌های تهیه شده با توجه به نظرات زمین‌شناسان و همچنین مشخصات مغناطیس ایجاد شده در کانی‌سازی مطابقت دارد. طبق مدل تهیه شده توسط کلارک و همکاران یک زون پتاسیک در عمق ۵۰۰ متر و با سطوح مختلف فرسایشی و همچنین میزان مختلف مغناطیس پذیری با توجه به درصد کانی‌های آهن‌دار و همچنین میزان نزدیکی به زون پتاسیک مشخص شده و در هر کدام از سطوح فرسایشی میزان میدان مغناطیس حاصله شده قابل اندازه‌گیری است.

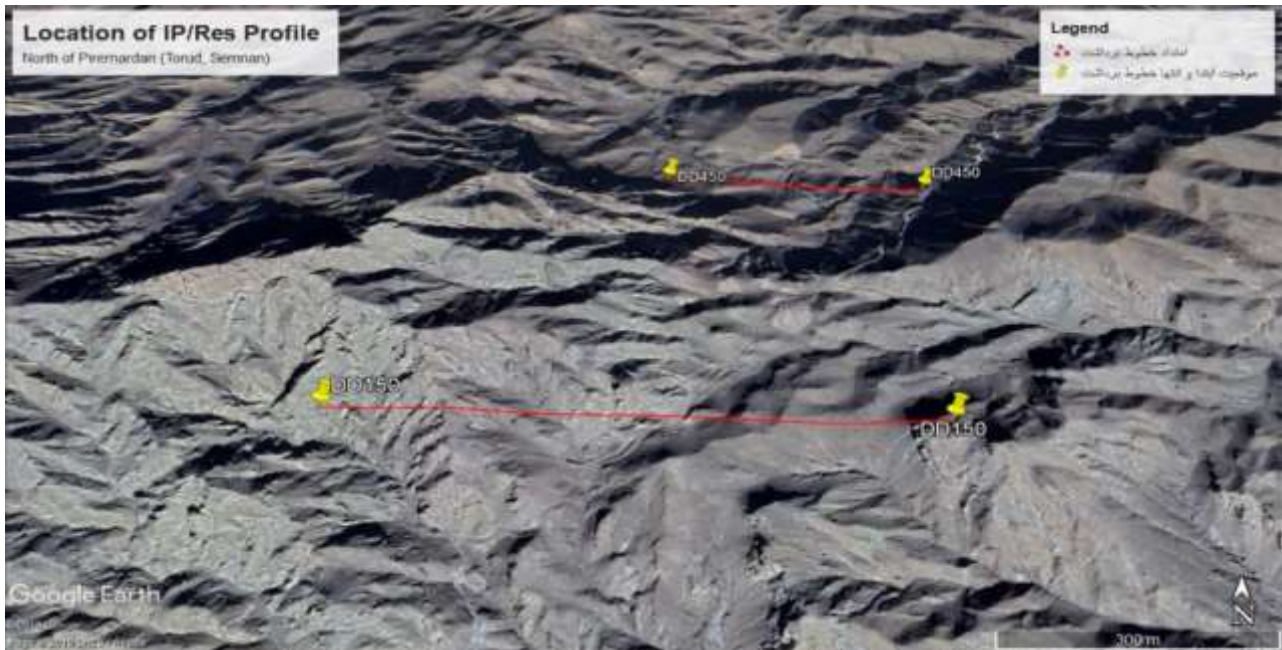
روش IP یک روش کارآمد در اکتشاف فلزات پایه و شناسایی مناطق کانی‌سازی سولفیدی پراکنده است و در اکتشاف زون‌های کانی‌سازی شده رگه‌ای و توده‌ای نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Telford et al., 1990). در روش مقاومت‌سنجی، به‌منظور تعیین خواص الکتریکی مواد زیرسطحی و بررسی وضعیت ساختارهای زمین‌شناسی منطقه، پس از تولید و ارسال یک جریان مصنوعی به داخل زمین، اختلاف پتانسیل ناشی از این عمل با استفاده از آرایه‌های الکترودی مختلف ثبت می‌شود. با به‌کارگیری این روش در کنار روش IP، می‌توان علاوه بر تعیین مقدار

با ۱۶۰۰ متر و حداکثر ارتفاع برابر با ۱۸۵۰ متر از سطح آب‌های آزاد است. مرتفع‌ترین قسمت محدوده نوار میانی محدوده می‌باشد. این توپوگرافی نشان دهنده مشکل بودن جاده‌سازی برای دسترسی به نقاط مستعد محدوده می‌باشد. در محدوده ۷ قله وجود دارد. نکته مهم در محدوده آن است که اندیس‌های مس مشخص شده در امتداد آبراهه‌هایی نیستند که با کمک آن‌ها می‌توان به کانی‌سازی‌ها دسترسی پیدا نمود و این اندیس‌ها در یال‌های ارتفاعات واقع شده‌اند. در کمربند تروود-چاه‌شیرین تطابق جالبی بین کانی‌زایی‌ها و دگرسانی‌ها و گسل‌ها دیده می‌شود. در واقع اکثریت قریب به اتفاق کانی‌زایی‌ها و زونهای کانه‌دار از گسل‌ها متابعت می‌نمایند. از این رو مطالعه تکتونیک این منطقه در بررسی کانی‌زایی‌ها روند شرقی-غربی داشته و دارای رگه‌های کربنات کلسیم به‌عنوان پرکننده زون برشی‌شده می‌باشند و این گسل‌ها فاقد کانی‌زایی است. با توجه به نفوذ توده‌های نفوذی در مجموعه ولکانیکی تروود-چاه‌شیرین و شکستگی‌های حاصل از آن در کنار گسل خوردگی‌های متعدد سیستم‌های درزه و شکاف متعددی در این مجموعه ایجاد شده است و این شکستگی‌ها نیز محیط‌هایی برای ته‌نشست کانه‌ها می‌باشند؛ به گونه‌ای که کانی‌زایی‌های طلا، مس، سرب و روی و حتی فیروزه در برخی از این درزه و شکاف‌ها دیده می‌شود (شفقی و همکاران، ۱۳۹۴). در (شکل-۱) تصویر بزرگ‌نمایی شده از محدوده مورد مطالعه برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تروود به نمایش در آمده است. همچنین در این تصویر منطقه مورد مطالعه در یک نمای بزرگ‌تر به نمایش گذاشته شده‌است. همچنین موقعیت پروفیل‌های IP و مقاومت‌ویژه در (شکل-۲) به نمایش در آمده است.

مجموعه آتشفشانی تروود-چاه‌شیرین متأثر از نفوذ توده‌های متعدد و همچنین تزریق دایک‌های جوان‌تر تحت تأثیر دگرسانی‌های مختلف قرار گرفته است. شایع‌ترین دگرسانی‌ها در این مجموعه سیلیسی، آرژیلیکی، پروپیلیتی و فلیک می‌باشند؛ که با شدت کم یا زیاد در بیشتر نقاط منطقه دیده می‌شوند. جوانترین دگرسانی‌ها در این مجموعه دگرسانی سیلیسی است؛ به گونه‌ای که تمام مجموعه‌های قبل از خود و سنگ‌شناسی‌ها را قطع کرده است (علوی و همکاران، ۱۹۷۶). محدوده مورد مطالعه تراکم زیادی از شکستگی‌ها را نشان می‌دهد. از نظر جهت‌گیری شبکه شکستگی‌ها در کل محدوده دو دسته شکستگی فراوانی بالاتری دارند. در قسمت شمال محدوده شکستگی‌هایی با روند شمال غرب-جنوب شرق و شمال شرق-جنوب غرب بیشترین فراوانی را نشان می‌دهند. نکته مهم وجود کانی‌زایی‌ها در نقاط مختلف بخش شمالی محدوده در راستای شکستگی‌های با روند غالب شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد. در واقع کانی‌زایی‌ها از این راستا تبعیت می‌کنند. لازم به ذکر است وسعت و ابعاد رخنمون‌های مس‌دار در نقاط تلاقی شکستگی‌ها و گسل‌های یاد شده قابل توجه می‌باشد. از نظر سن نسبی شکستگی‌های با روند شمال غرب-جنوب شرق قدیمی‌ترین شکستگی‌ها و شکستگی‌های با روند شمال شرق-جنوب غرب جوانتر می‌باشند. علاوه بر این گروه شکستگی و گسل‌ها در قسمت شمال محدوده جوانترین شکستگی‌ها با فراوانی بسیار کم روند شمالی-جنوبی دارند؛ که دو گروه شکستگی قبل‌تر از خود را جابجا نموده است. انحنای روند شکستگی‌ها در قسمت شمال محدوده ناچیز می‌باشد. محدوده مورد مطالعه در ارتفاعات نوار تروود-چاه‌شیرین قرار دارد و حداقل ارتفاع در محدوده برابر



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تروود (علوی و همکاران، ۱۹۷۶)



شکل ۲: نمایی از منطقه برداشت و موقعیت پروفیل‌های برداشت ژئوفیزیکی، بر روی تصویر Google Earth

۳- روش تحقیق

بسامدهای پایین بهتر مشخص شوند. در داده‌های ناحیه‌ای، فیلترهای بالاگذر، داده‌های باقیمانده را مشخص می‌کنند. بنابراین برای به‌دست آوردن خطواره‌ها و شکستگی‌های بزرگ از این نوع فیلترها استفاده می‌شود. در (شکل-۳) نقشه داده‌های مغناطیس هوابرد در منطقه تروود به نمایش در آمده است. این نقشه نمی‌تواند در مورد محل ساختارهای زمین‌شناسی نتایجی را در اختیار ما قرار دهد، و فقط می‌تواند به‌صورت کیفی شدت میدان را در قسمت‌های مختلف نشان دهد. اثر پدیده‌های زمین‌شناسی متعددی در مقدار میدان مغناطیسی کل موثر می‌باشد. جهت بررسی روندهای ساختاری و شکستگی‌های موجود در محدوده مورد مطالعه بر اساس داده‌های مغناطیس هوابرد از نقشه‌های فیلتر زاویه کجی و سیگنال تحلیلی استفاده شده است. با توجه به نقشه‌های موجود به نظر می‌رسد محدوده از نظر تکتونیکی فعال و دارای گسل خوردگی‌های زیادی است.

۴-۱- فیلتر برگردان به قطب

یک توده‌ی متقارن در قطب‌های مغناطیسی که جهت میدان ناحیه‌ای و قطبش در آن‌ها عمودی است، یک بی‌هنجاری متقارن تولید می‌کند و شکل یک بی‌هنجاری مغناطیسی فقط به ابعاد فیزیکی و خودپذیری مغناطیسی توده بستگی ندارد؛ بلکه به جهت قطبش توده و جهت میدان ناحیه‌ای نیز وابسته است (Hinz, 1982). بنابراین روش برگردان به قطب، روشی برای حذف نامتقارنی‌های ایجادشده به‌وسیله میدان ناحیه‌ای و قطبش غیر عمودی می‌باشد. به عبارت دیگر این روش برای رفع اثرات تغییر شکل ناشی از تغییرات زاویه میل و زاویه انحراف قطبش مغناطیسی با فرض این که قطبش به وسیله میدان زمین هدایت می‌شود، به کار

در این تحقیق پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد و همین‌طور تصویرسازی داده‌های IP و مقاومت‌ویژه الکتریکی با آرایه مستطیلی با استفاده از نرم افزار Oasis Montaj 7.2 انجام گرفته است. فرایند پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد در این نرم افزار با اعمال فیلتر-هایی نظیر فیلتر برگردان به قطب، فیلتر زاویه کجی (Tilt angle)، فیلتر سیگنال تحلیلی و همچنین فیلتر ادامه فراسو صورت گرفته است. نتایج حاصل از این پردازش ساختارهای زمین‌شناسی و روند خطواره‌های مغناطیسی و گسلش موجود در محدوده مورد مطالعه را مشخص می‌کند. با در دست داشتن اطلاعات مغناطیس هوابرد با فواصل برداشت ۷/۵ کیلومتر ایران و پس از تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی-توپوگرافی محدوده و انتقال نتایج به‌دست آمده روی نقشه تهیه شده نسبت به برداشت داده‌های IP و مقاومت‌ویژه الکتریکی با آرایش مستطیلی به تعداد ۲۸۵ نقطه اقدام شد. بعد از شناسایی نقاط مستعد کانی‌زایی برداشت‌های IP و مقاومت ویژه با آرایش دوقطبی-دوقطبی به تعداد ۳۶۶ نقطه بر روی دو پروفیل انجام گرفت.

۴- مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد

فیلتر سازی داده‌های مغناطیسی راهی برای جداسازی سیگنال‌های مختلف برای آشکارسازی و بهسازی اشکال بی‌هنجاری با یک طول موج مشخص است. فیلترها به طور عموم پایین‌گذر یا بالاگذر هستند. وقتی بی‌هنجاری‌ها منطقه‌ای است فیلترهای پایین‌گذر اجازه می‌دهند که

تکتونیکی فعال و دارای گسل خوردگی‌های زیاد است و روندهای مختلفی در این بخش از محدوده عمل کرده است.

۴-۳- فیلتر سیگنال تحلیلی

عملگر سیگنال تحلیلی بر پایه میدان مغناطیسی کل و تبدیل هیلبرت آن و یا بر پایه مشتق‌های افقی و عمودی میدان کل تعریف می‌شود [Nabighian, 1972]. دامنه سیگنال تحلیلی مختلط (Amplitude of Analytic Signal) بر پایه مشتق‌های افقی و عمودی میدان کل با رابطه (۲) تعریف می‌شود:

(۲)

که در آن، دامنه سیگنال تحلیلی سه‌بعدی در موقعیت (x, y) را می‌توان از گرادیان‌های عمود بر هم میدان مغناطیسی کل یا بی‌هنجاری میدان کل به دست آورد. در این رابطه $|A(x, y)|$ دامنه سیگنال تحلیلی در نقطه (x, y) است. برای محاسبه سیگنال تحلیلی ابتدا گرادیان افقی تعیین و سپس از تبدیل هیلبرت برای تعیین گرادیان قائم استفاده می‌شود. تبدیل هیلبرت بدون تغییر در مقدار تابع، روی طیف فاز تغییر ۹۰ درجه ایجاد می‌کند و به عبارت دیگر گرادیان افقی به قائم تبدیل می‌شود و لبه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی را با محدوده محیطی کانسار تطابق می‌دهد و بدین ترتیب گسترش طولی و عرضی کانسار را روی سطح زمین با دقت بیشتری نسبت به نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی نشان می‌دهد. در هر حال یکی از ویژگی‌های مهم سیگنال تحلیلی این است که برای یک جسم سه بعدی باریک مانند دایک، دامنه مستقل از سوی بردار میدان مغناطیسی القایی دارد؛ منحنی متقارنی به شکل زنگ دارد که درست در بالای چشمه مغناطیسی جای می‌گیرد. ایراد وارد به روش سیگنال تحلیلی این است که برای یک جسم سبتر هنگامی که ابعاد افقی جسم از ژرفای بالای توده بیشتر است، به دلیل اثرهای تداخلی، تعیین مرزهای چشمه‌های مغناطیسی از دامنه بیشینه سیگنال تحلیلی دقت کافی ندارد (Roset, 1993). در (شکل-۷) داده‌های مغناطیسی هوابرد منطقه مورد مطالعه با اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی به نمایش در آمده است. با در نظر گرفتن اطلاعات زمین‌شناسی و نتایج حاصل از نقشه سیگنال تحلیلی وجود یک توده نفوذی در قسمت شرقی منطقه قابل تشخیص است. همچنین این پدیده انطباق خوبی با تصویر Google earth در منطقه مورد مطالعه دارد (شکل-۸). وجود یک بی‌هنجاری منفی در قسمت مرکزی نقشه‌های مغناطیسی هوابرد نشان دهنده وجود یک زون دگرسان در این بخش است (شکل‌های ۶ و ۸).

می‌رود. رفع این انحراف به وسیله روش برگردان به قطب با تعدیل داده‌ها به حالت تصویر قطبش عمودی در قطب‌ها انجام می‌شود و با این روش بی‌هنجاری‌ها به مرکز توده‌های مولد بی‌هنجار برمی‌گردند (Hinze, 1982). برای تعیین موقعیت دقیق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی از فیلتر برگردان به قطب استفاده شده است (شکل-۴). به همین منظور برای ترسیم نقشه برگردان به قطب این منطقه، زوایه میل و انحراف برای این منطقه به ترتیب $53/54^\circ$ و $3/91^\circ$ درجه در نظر گرفته شده است. با توجه به مشاهدات صحرایی در قسمت شرقی این نقشه حجم بیشتر توده‌های نفوذی را شاهد هستیم، که همچنین با اعمال فیلتر برگردان به قطب مقادیر بیشینه بی‌هنجاری مغناطیسی با توده‌های بازالیتی و آندزیتی موجود در منطقه مطابقت دارد.

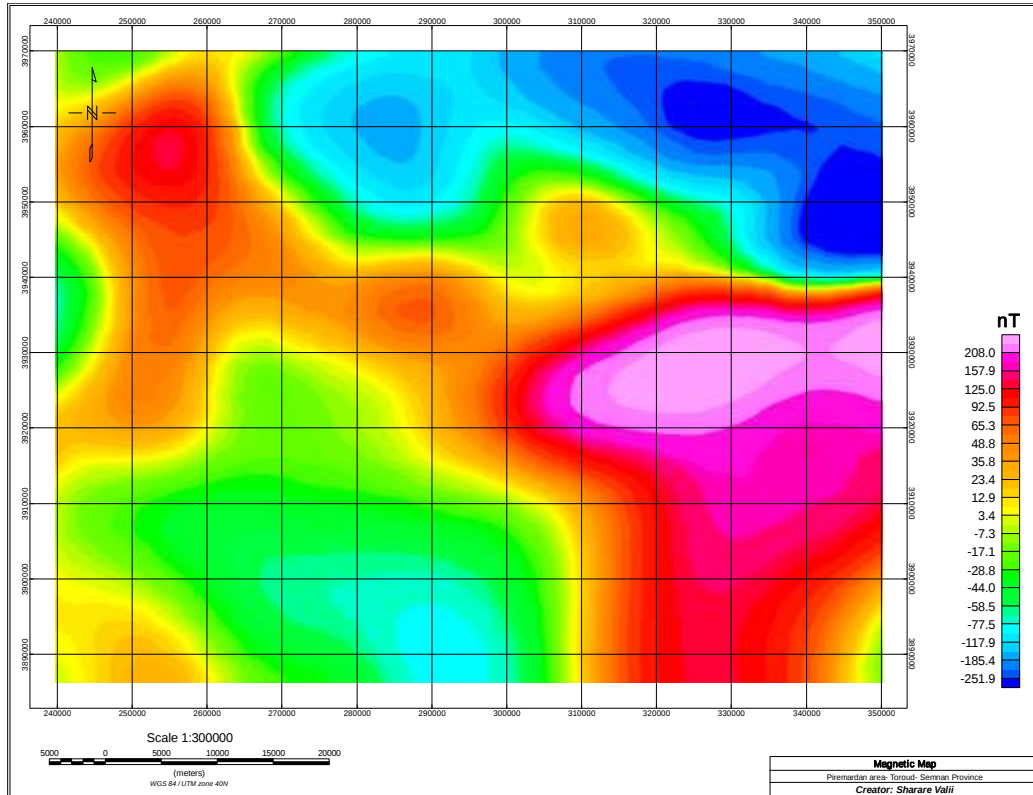
۴-۲- فیلتر زاویه کجی

برای تشخیص خطواره‌ها و شکستگی‌ها در مقیاس ناحیه‌ای باید داده‌های ژئومغناطیس هوابردی را با فیلتر زاویه کجی پالایش کرد. این فیلتر، یک فیلتر بالاگذر است؛ که در آن مشتق قائم نسبت به مشتق افقی بهینه می‌شود. در این فیلتر به دلیل آن که خروجی آن در بازه ۹۰ درجه تا ۹۰- درجه بهینه می‌شود، بی‌هنجاری‌های عمیق و سطحی به یک نسبت آشکارسازی می‌شوند و ساختارهای عمیق و سطحی به تقریب به صورت بی‌هنجاری‌های یکنواخت مشاهده خواهند شد. با استفاده از این فیلتر نمی‌توان در مورد شدت بی‌هنجاری‌ها اظهار نظر کرد. اولین فیلتر فازی، زاویه کجی است؛ که میلر و سینگ (۱۹۹۴) به صورت رابطه (۱) معرفی کردند.

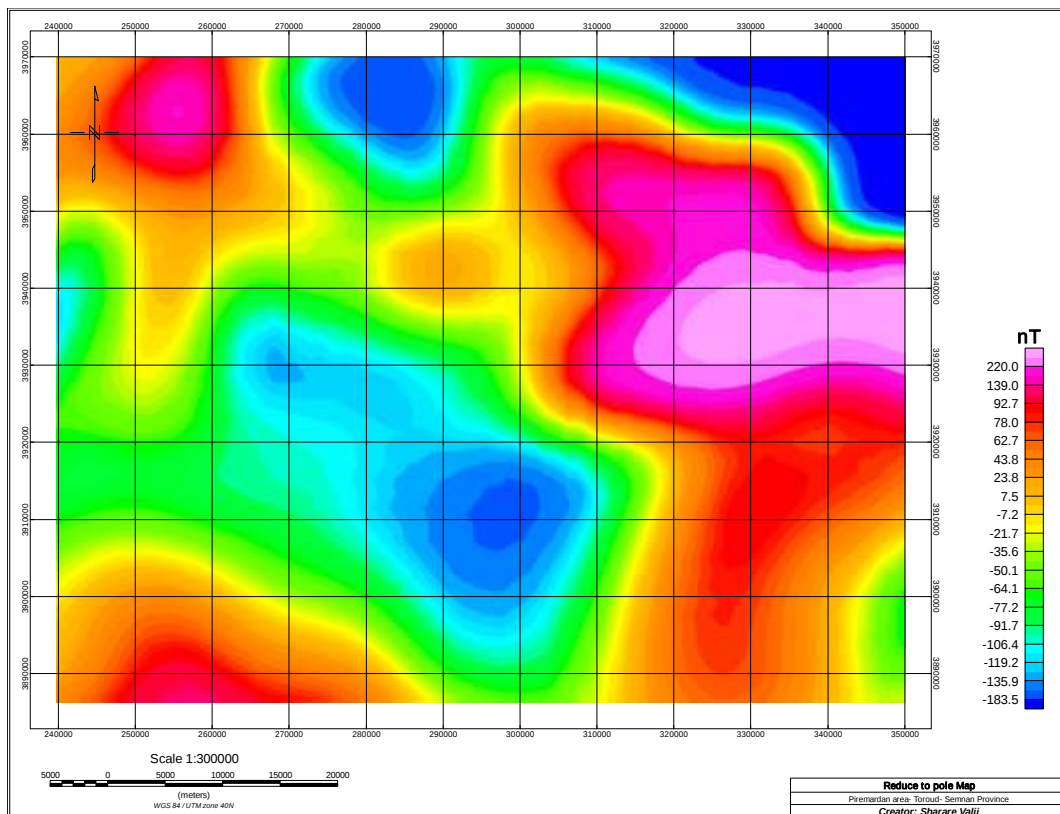
(۱)

در (شکل-۵) نقشه داده‌های مغناطیسی هوابرد با اعمال فیلتر زاویه کجی به نمایش در آمده است و همان‌طور که در (شکل-۵) مشاهده می‌شود، امتداد بی‌هنجاری‌های مثبت موجود در شکل احتمال وجود شکستگی و گسل‌های موجود در منطقه را نشان می‌دهد. همچنین در (شکل-۶) مطابقت نقشه زاویه کجی داده‌های مغناطیسی هوابرد با تصویر Google earth نشان داده شده است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (شکل-۱)، و انطباق نقشه زاویه کجی با تصویر Google earth (شکل-۶)، می‌توان ساختار یک گسل اصلی در منطقه را مشخص نمود. همچنین با توجه به نقشه‌های موجود به نظر می‌رسد محدوده از نظر

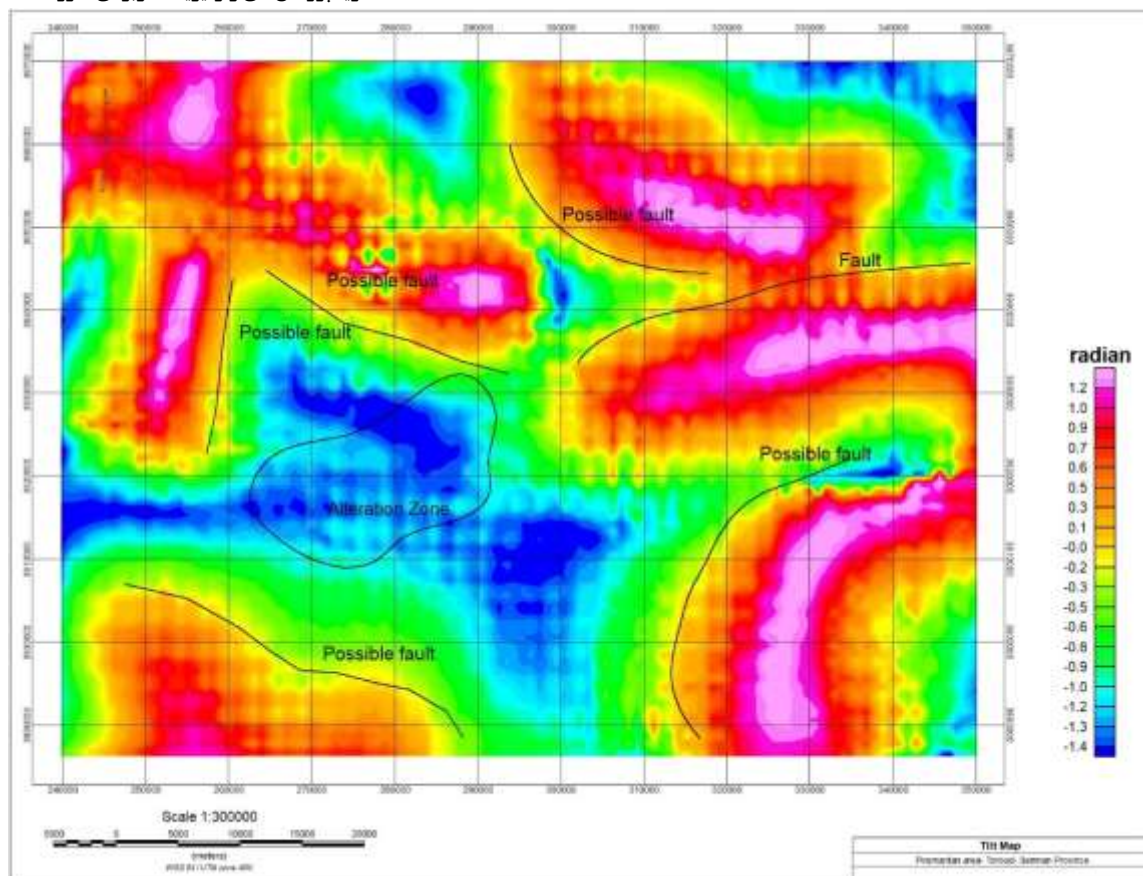
ولی و همکاران، اکتشافات فلزی پلاریزاسیون القایی و مغناطیس هوابرد در منطقه پیرمردان تروود-شاهرود، صفحات ۱-۱۵.



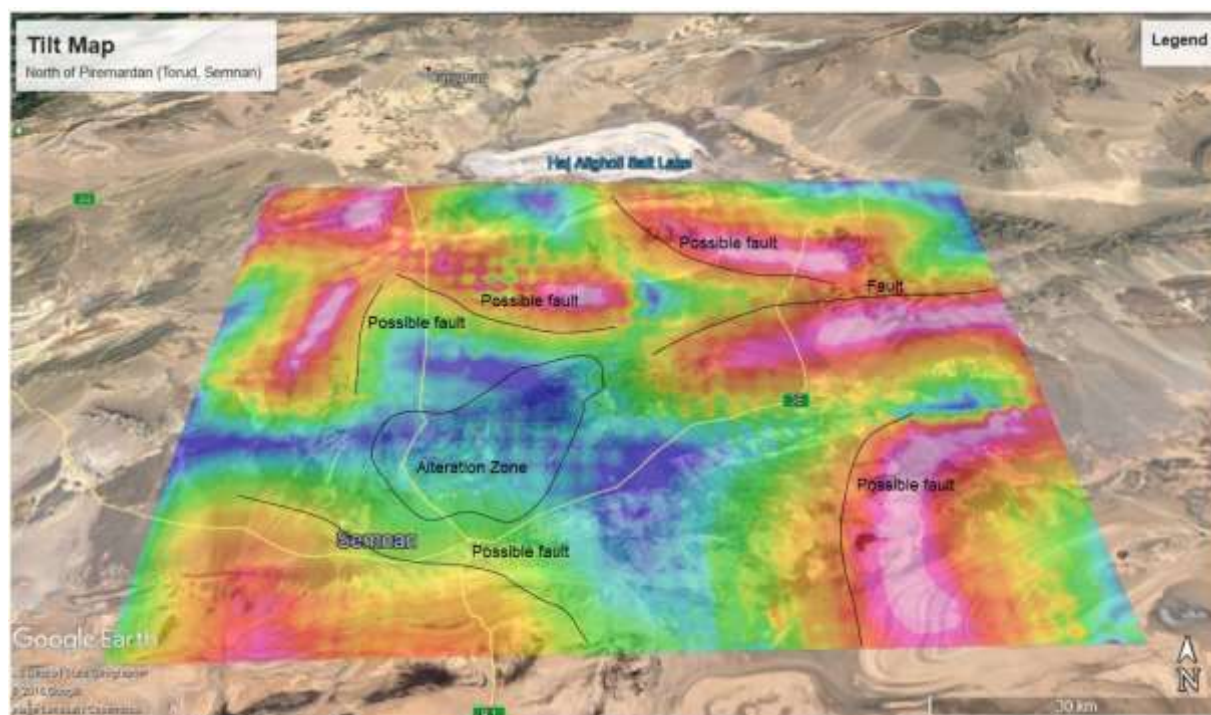
شکل ۳: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده مغناطیس هوابرد محدوده مورد مطالعه



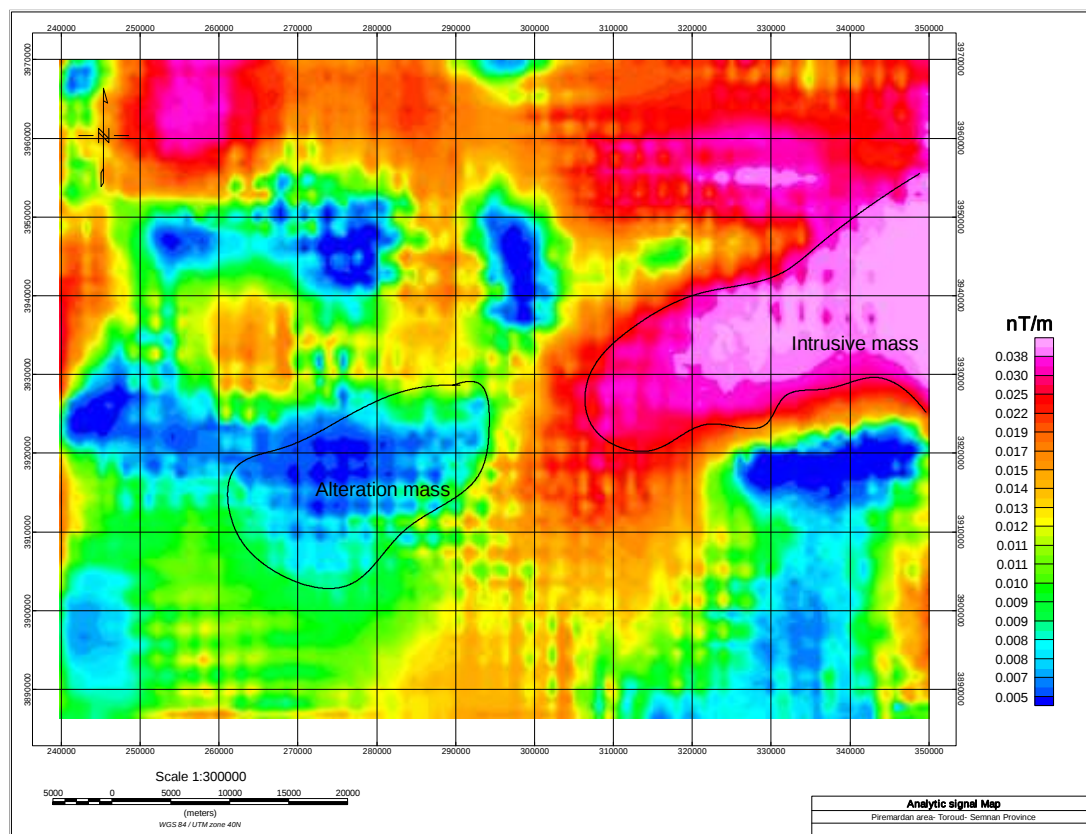
شکل ۴: نقشه مغناطیس هوابرد محدوده مورد مطالعه با اعمال فیلتر برگردان به قطب.



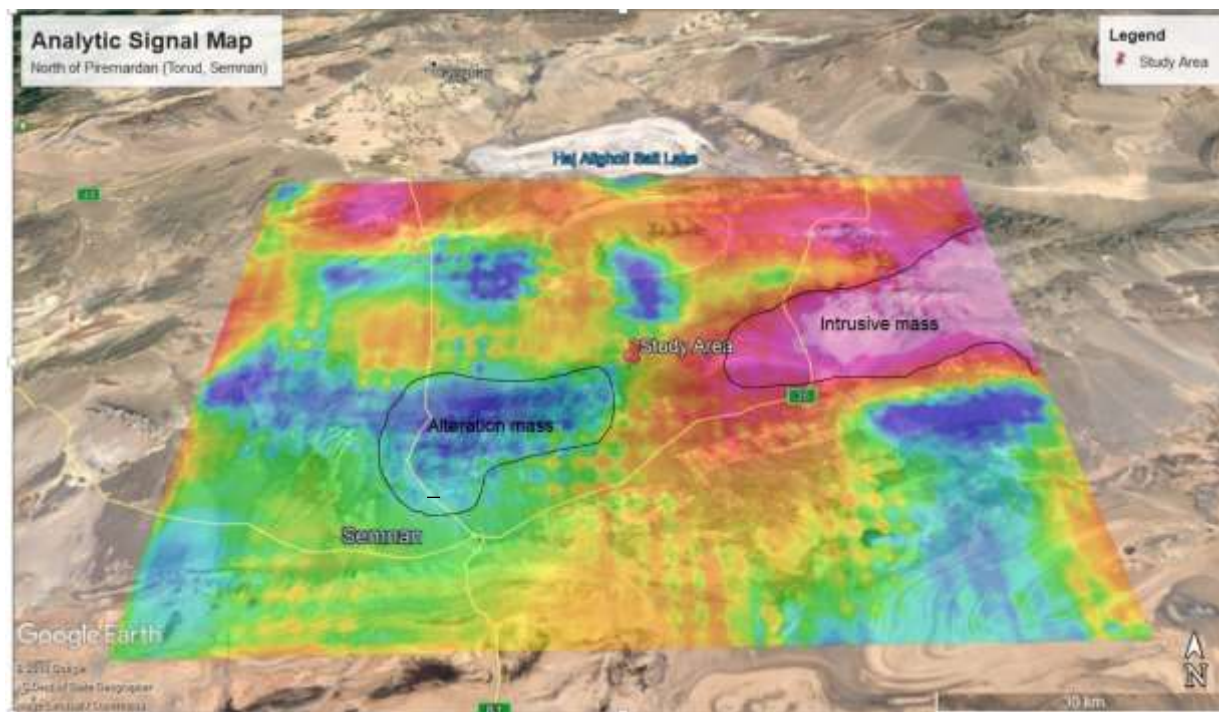
شکل ۵: نقشه مغناطیس هوابرد منطقه مورد مطالعه با اعمال فیلتر زاویه کجی.



شکل ۶: مطابقت نقشه زاویه کجی داده‌های مغناطیس هوابرد با تصویر Google earth.



شکل ۷: نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیس هوابرد محدوده مورد مطالعه



شکل ۸: مطابقت نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیس هوابرد با تصویر Google earth.

۵- مدل سازی و تفسیر داده‌های IP و مقاومت ویژه الکتریکی

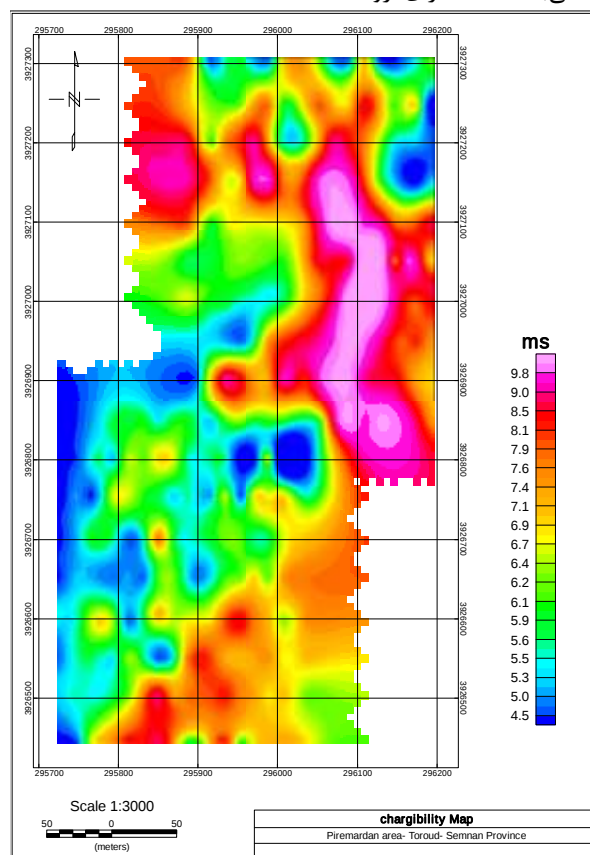
برای انجام پی‌جویی‌های اولیه و معرفی نقاط احتمال کانی سازی برای برداشت داده‌های دوقطبی-دوقطبی در منطقه ابتدا برداشت‌ها با آرایه مستطیلی انجام گرفت و از روی نتایج حاصل از این برداشت‌ها

۵-۱ آرایه مستطیلی

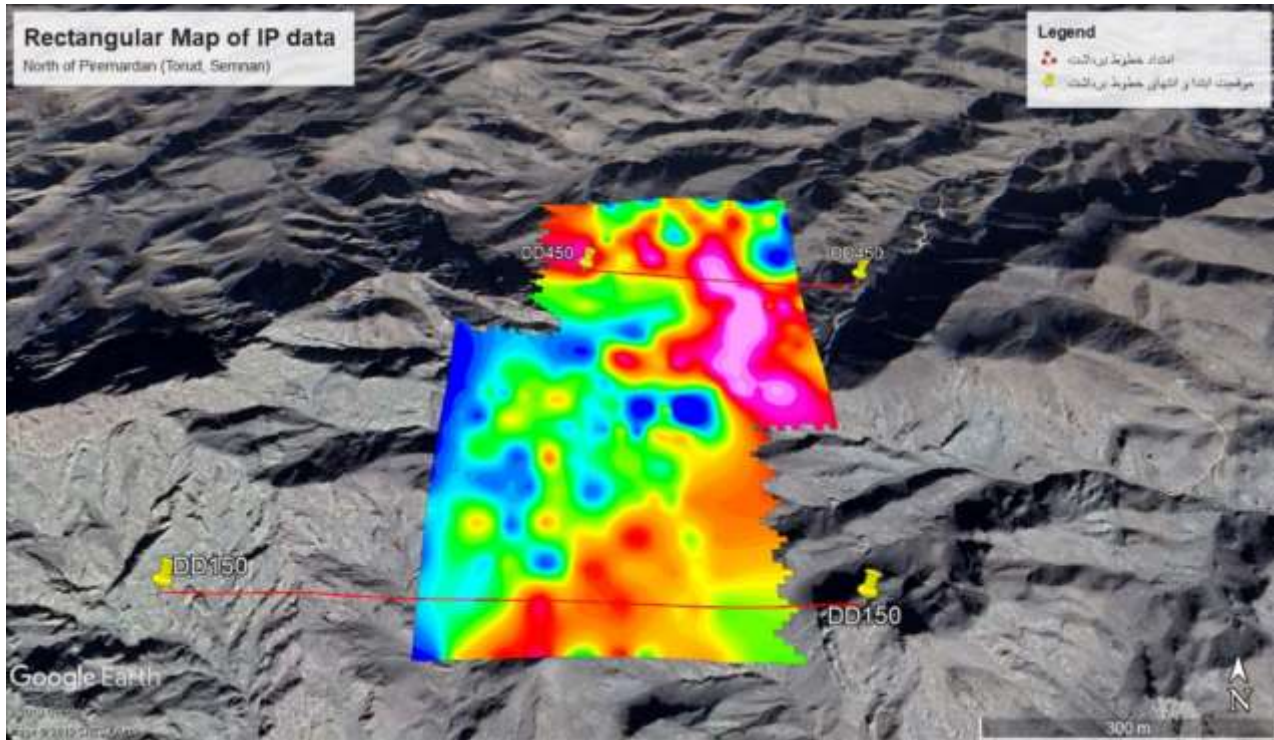
تقریبی شمالی-جنوبی بوده و با توجه به گزارش‌های زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات صحرایی انجام شده کانی سازی در ارتباط با گسلش در منطقه است. بخش اصلی کانی سازی در آرایش مستطیل پایینی در قسمت جنوب شرقی منطقه می‌باشد؛ که مقدار مقاومت ویژه در محل حضور این بی‌هنجاری‌ها به‌طور تقریبی بالاست و می‌تواند مربوط به واحدهای آذرین (آندزیت‌ها) و سایر واحدهای آتش‌فشانی باشد.

با توجه به توضیحات فوق و مقاطع حاصل از مدل سازی برای آرایش‌های مستطیلی تصمیم بر این شد که دو پروفیل با روند شرقی-غربی با آرایه دوقطبی- دوقطبی عمود بر گسترش کانی سازی در منطقه برداشت شود. طول پروفیل‌ها از عرض کانی سازی در منطقه باید بیشتر باشد؛ تا گستره کانی سازی با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد.

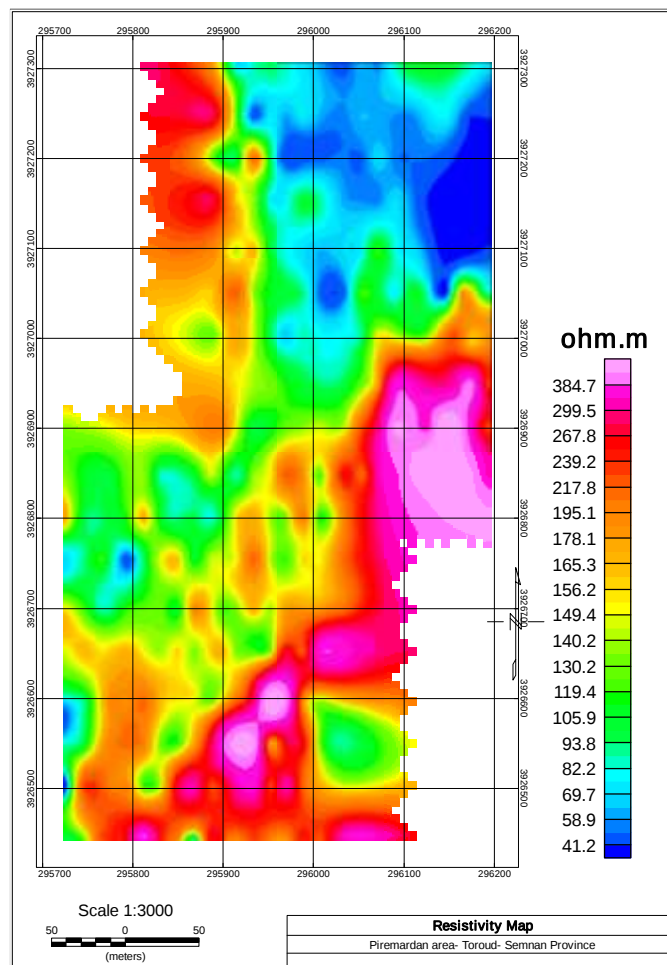
محل پروفیل‌ها دوقطبی برای شناسایی گسترش عمقی و جانبی کانی سازی ارائه شد. تعداد نقاط برداشت در آرایه مستطیلی ۲۸۵ نقطه با فاصله نمونه برداری ۲۰ متر در خطوط برداشت موازی به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر می‌باشد. در (شکل-۹) نقشه داده‌های IP آرایش مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار oasis montaj به نمایش در آمده است. همچنین در (شکل-۱۰) مطابقت نقشه مربوط به داده‌های IP با تصویر Google Earth به نمایش در آمده است. از تطابق نقشه مقاومت ویژه با تصویر Google Earth (شکل-۱۲) احتمال وجود یک گسل در شمال محدوده مورد مطالعه وجود دارد که با توجه به (شکل-۹) مقدار بارپذیری (Chargeability)، نیز در قسمت شمال و شمال شرقی محدوده بالا است. نکته مهم وجود کانی‌زایی‌ها در نقاط مختلف بخش شمالی در راستای شکستگی‌ها در محدوده می‌باشد؛ که دارای روند



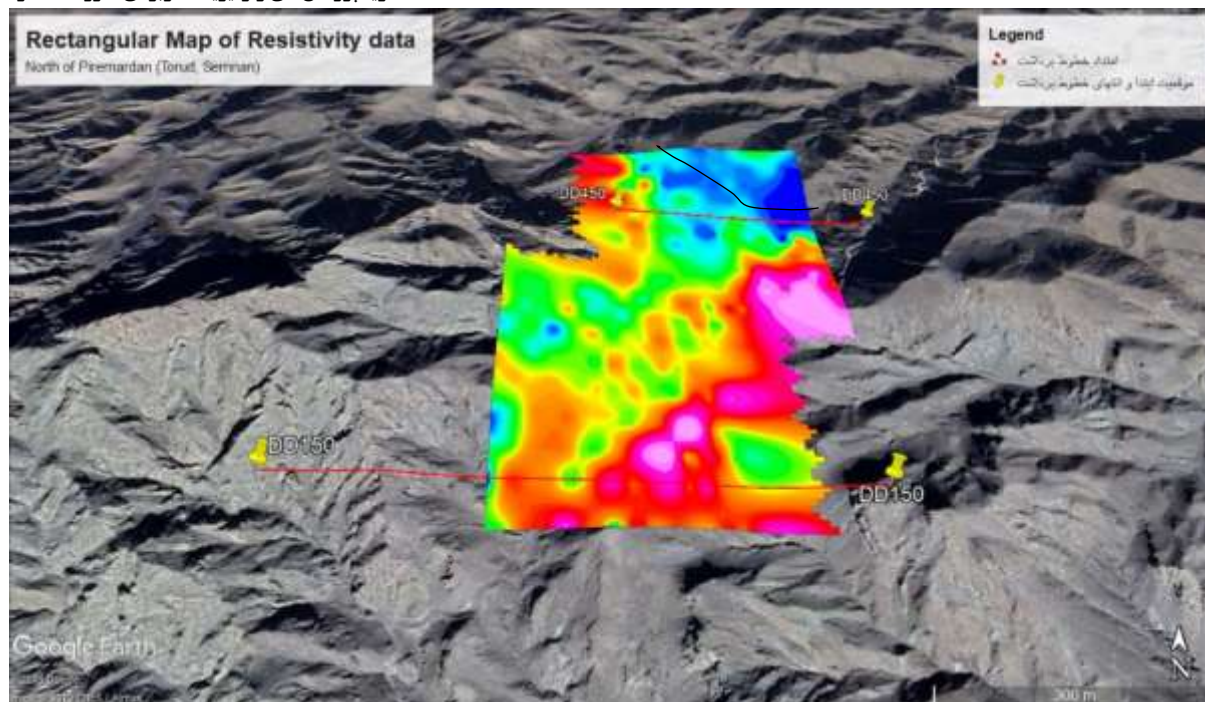
شکل ۹: نقشه بارپذیری حاصل از مدل سازی داده‌های IP آرایه مستطیلی با نرم‌افزار oasis montaj



شکل ۱۰: تطابق نقشه IP برداشت شده با آرایه مستطیلی با تصویر Google Earth محدوده مورد مطالعه



شکل ۱۱: نقشه مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه آرایه مستطیلی با نرم افزار oasis montaj



شکل ۱۲: تطابق نقشه مقاومت ویژه برداشت شده با آرایه مستطیلی با تصویر Google Earth محدوده مورد مطالعه

(et al., 1980). مدل سازی وارون هموار داده های حاوی اثر پستی و بلندی بهترین نتیجه را در پی دارد؛ که نرم افزار مربوطه این کار را با استفاده از روش حداقل مربعات با قید هموارسازی مستقیم بر روند وارون سازی انجام می دهد (Macinnes et al., 1996).

یکی از ویژگی های بارز در مدل سازی وارون، غیر منحصر به فرد بودن و عدم یکتایی در پاسخ مدل سازی می باشد. کیفیت و دقت در برداشت صحت داده ها می تواند تا حد زیادی پاسخ مدل سازی وارون را به سمت یک پاسخ واحد همگرا کند. به این منظور در این پژوهش برای اطمینان بیشتر در صحت مدل سازی از نرم افزار RES2DINV برای مدل سازی وارون داده های قطبش القایی و مقاومت ویژه استفاده شده است.

۲-۵ پروفیل DD-150

پروفیل DD-150 با روند تقریبی غربی- شرقی، اولین پروفیل برداشت شده در محدوده مورد مطالعه است. شبه مقطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون مربوط به پروفیل DD-150 با اعمال اثر پستی و بلندی در (شکل-۱۳) نشان داده شده است. خطای RMS داده های این خط برداشت با تعداد ۶ تکرار در نرم افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه الکتریکی برابر ۱۳/۷ درصد و برای مدل بارپذیری برابر ۰/۶۹ درصد می باشد. برداشت با فاصله الکترودی ۲۰ متر انجام شده است. با توجه به شکل حاصل از مدل سازی با نرم افزار RES2DINV سه بی هنجاری مهم در مقطع بارپذیری وجود دارد؛ البته این سه بی هنجاری در مقطع مقاومت ویژه نیز قابل مشاهده است. بی هنجاری احتمالی اول در فاصله ۳۱۰- متری تا ۲۶۰- متری مبدأ پروفیل قرار دارد. مقدار بارپذیری در نقاط سطحی این مقطع به بیش از ۱۰ میلی ثانیه می رسد؛ که با توجه به پیمایش های انجام شده در منطقه و گزارش های زمین شناسی منطقه حضور کانی های مس غالباً به صورت مالاکیت در قسمت های سطحی رؤیت شده است؛ اما در اعماق

یکی از مسائل مهم در تفسیر داده های ژئوفیزیکی، مدل سازی آنهاست. مدل ریاضی، نمایش ایده آل مقطعی از زمین به صورت ریاضی است. هر مدل دارای پارامترهایی است که هر یک از آنها یک کمیت فیزیکی است و در مدل سازی هدف تخمین این کمیت ها با استفاده از داده های برداشت شده است (Loke, 2004). امروزه انگیزه اصلی مدل سازی کانسارها و کاربرد اکتشافی آنها افزایش احتمال کشف و کاهش هزینه- هاست. از این رو یک کانسار را به مدل خاصی نسبت می دهند؛ تا بتوان برای هر یک از ویژگی های کمی و کیفی آن با تکیه بر مقدار پارامترهای مشابه در مدل انتخاب شده تخمین های لازم را با دقت کافی انجام داد (حسنی پاک و شجاعت، ۱۳۹۲). روش های مدل سازی به طور کلی به دو دسته مدل سازی مستقیم (پیشرو) و وارون (معکوس) تقسیم می شود. با توجه به این که روش پیشرو سرعت پایینی در انجام مدل سازی دارد؛ لذا مدل سازی وارون در پروژه های اکتشافی و تفسیر داده های صحرایی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. نرم افزار RES2DINV یک برنامه رایانه ای است که به طور خودکار مدلی دوبعدی (بر پایه بلوک بندی مستطیلی) از داده های به دست آمده از روش تصویرنگاری الکتریکی تولید می کند و برای انجام مدل سازی از روش مدل سازی وارون هموار استفاده می کند (Edwards, 1977). شکل سطح زمین می تواند تأثیر زیادی بر روی خطوط جریان و سطوح هم پتانسیل حتی در شرایط زمین همگن داشته باشد و نیز می تواند بی هنجاری های محلی تولید کند؛ که می تواند بی هنجاری های واقعی را مغشوش کند و یا به اشتباه بی هنجاری های مرتبط با کانی سازی در نظر گرفته شوند. تأثیر پستی و بلندی عمدتاً بر روی اندازه گیری های مقاومت ویژه است؛ به طوری که عملاً بر روی پاسخ های IP به جز افزایش یا کاهش فاصله الکترودهای سطحی از منشأ بی هنجاری زیر سطحی، تأثیر قابل ملاحظه ای ندارد (Fox et al., 1980). در نرم افزار RES2DINV گزینه های متعددی برای وارد کردن داده های ایستگاهی حاوی اثر پستی و بلندی وجود دارد (Fox

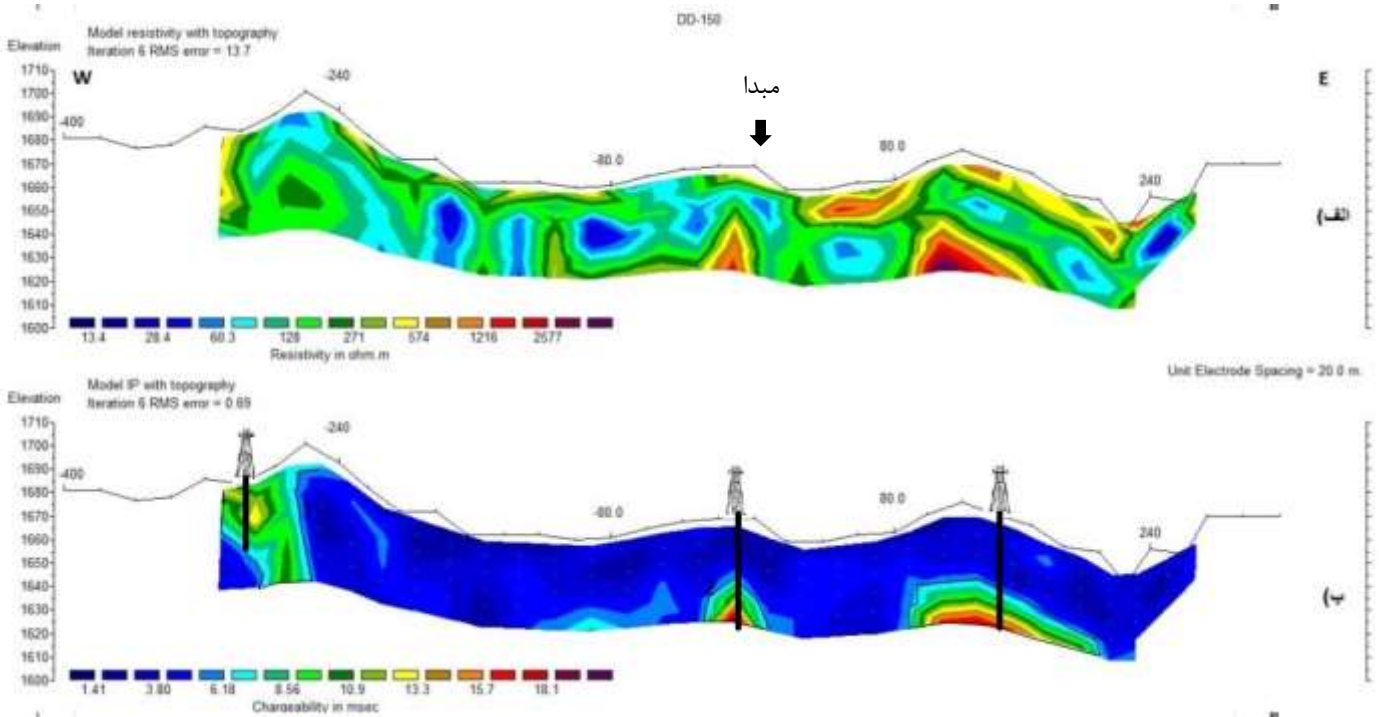
بوده و از عمق تقریبی ۲۵ متری زیر سطح زمین شروع شده و تا عمق بیش از ۴۰ متری زیر سطح زمین ادامه دارد. بیشترین مقدار بی‌هنجاری در عمق ۴۰ متری بوده و به مقدار تقریبی بیش از ۱۰ میلی‌ثانیه می‌رسد. مقدار مقاومت‌ویژه در محل حضور این بی‌هنجاری نیز بالاست و در بعضی نقاط به حدود بالاتر از ۱۰۰۰ اهم‌متر نیز می‌رسد. با توجه به گزارش زمین‌شناسی منطقه، کانی زایی در داخل یک واحد آتشفشانی و همین‌طور دایک‌های آندزیتی قرار گرفته؛ که همه این موارد جزء سنگ‌های آذرین بوده و دارای مقاومت‌ویژه بالایی هستند.

بی‌هنجاری احتمالی سوم در فاصله تقریبی ۸۰ تا ۲۲۰ متری مبدأ برداشت قرار گرفته، این بی‌هنجاری نیز مانند بی‌هنجاری دوم عمیق بوده و از عمق تقریبی ۲۵ متری زیر سطح زمین شروع شده و تا عمق بیش از ۴۰ متری ادامه پیدا می‌کند، البته در مورد گسترش دقیق این بی‌هنجاری و بی‌هنجاری دوم با دقت کامل نمی‌توان سخن گفت، چون مدل‌سازی‌های انجام‌یافته تا عمق ۴۵ متری انجام شده است. مقدار مقاومت‌ویژه نیز در محل این بی‌هنجاری بالاست؛ که با توجه به نکاتی که قبلاً اشاره شد، می‌تواند مربوط به واحدهای آندزیتی که میزبان اصلی کانی‌سازی در منطقه است؛ باشد.

بیشتر از مقدار بارپذیری کاسته می‌شود؛ به‌طوری‌که مقدار بالای بارپذیری تا عمق تقریبی ۴۰ متری زیر سطح وجود دارد و پایین‌تر از آن از مقدار بارپذیری کاسته می‌شود.

با توجه به (شکل-۱۳) مقدار مقاومت‌ویژه در محل حضور بی‌هنجاری اول در نقاط سطحی کم بوده و با افزایش عمق مقدار مقاومت‌ویژه نیز افزایش پیدا می‌کند؛ اما نکته مهمی که در این زمینه وجود دارد احتمال وجود یک گسل کوچک در محل حضور این بی‌هنجاری است؛ که با توجه به گزارش زمین‌شناسی منطقه احتمالاً کانی‌سازی در ارتباط با گسلش در منطقه اتفاق افتاده است. گسل احتمالی اول در ۲۷۰- متری مبدأ برداشت قرار دارد، که با شیب تقریبی ۶۰ درجه نسبت به سطح زمین به سمت غرب کشیده شده است. با توجه به زمین‌شناسی منطقه بخشی از کانی زایی ناحیه در واحد دایک‌های آندزیتی اتفاق افتاده است؛ که دلیل مقاومت‌ویژه پایین این دایک در مناطق نزدیک زمین می‌تواند مربوط به فرسایش این دایک در نقاط سطحی باشد؛ که این عمل در نقاط عمیق‌تر اتفاق نیفتاده است.

بی‌هنجاری احتمالی دوم در فاصله ۵۰- متری تا ۱۰+ متری مبدأ برداشت قرار دارد. این بی‌هنجاری از نظر عمق یک بی‌هنجاری عمیق



شکل ۱۳: (الف) مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی و (ب) مدل قطبش القایی پروفیل DD-150 حاصل از نرم‌افزار RES2DINV.

با تعداد تکرار ۶ در نرم‌افزار RES2DINV برای مدل مقاومت ویژه الکتریکی برابر ۷/۲ درصد و برای مدل بارپذیری برابر ۰/۶۲ درصد می‌باشد. بی‌هنجاری اصلی و مهم در منطقه، بی‌هنجاری اول است؛ که در فاصله ۱۴۵ تا ۲۷۰ متری مبدأ برداشت قرار دارد. از عمق تقریبی ۱۰ متری زیر سطح زمین شروع شده و تا عمق ۲۲ متری که مقطع نشان می‌دهد، ادامه دارد. شایان ذکر است که با توجه به باز بودن بی‌هنجاری

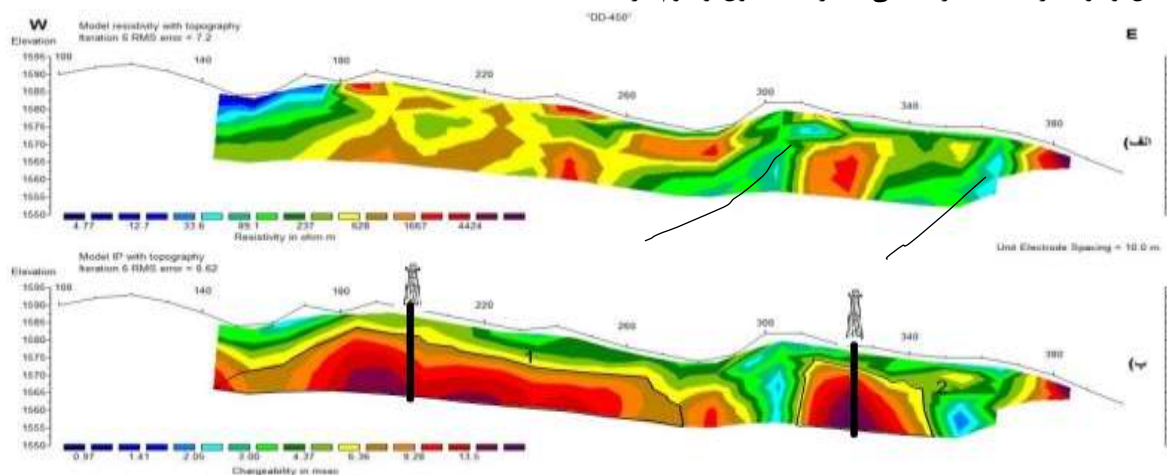
۳-۵ پروفیل DD-450

این پروفیل بافاصله الکترودی ۲۰ متر با روند شرقی غربی برداشت شده با توجه به (شکل-۱۵) مدل‌سازی معکوس هموار حاصل از نرم‌افزار RES2DINV با اعمال اثر پستی و بلندی، سه بی‌هنجاری احتمالی در منطقه وجود دارد. خطای RMS داده‌های این خط برداشت

قسمت‌های فرادیواره و فرودیواره این دیوار گسلی واقع شده‌اند و به احتمال زیاد کانی زایی در ارتباط با همین واحد گسلی باشد. از طرفی با توجه به این که احتمال وجود یک گسل دیگر در فاصله ۳۶۰ متری مبدأ برداشت نیز هست؛ لذا می‌توان از وجود یک دایک احتمالی در محل حضور بی‌هنجاری دوم نیز یاد کرد؛ که با توجه کارهای اکتشافی انجام شده بر روی دایک‌ها، دایک خود را به شکل دو گسل در مقطع مقاومت ویژه نشان می‌دهد.

بی‌هنجاری احتمالی سوم در فاصله ۳۷۵ تا ۳۸۵ متری مبدأ برداشت قرار دارد، یک بی‌هنجاری سطحی بوده در مورد گسترش عمقی و گسترش جانبی این بی‌هنجاری با قطعیت نمی‌توان صحبت کرد؛ چون در لبه مقطع واقع شده است و شایان ذکر است که مدل‌سازی در لبه‌های مقطع از دقت پایینی برخوردار است. مقدار مقاومت‌ویژه نیز در محل حضور این بی‌هنجاری بالاست.

در زیر، احتمالاً گسترش اصلی آنومالی در عمق بیشتر از ۲۲ متری بوده است. بیشترین مقدار بی‌هنجاری در زیر ایستگاه‌های ۱۹۰ و ۲۲۰ می‌باشد و مقدار بارپذیری به ۱۴ میلی‌ثانیه می‌رسد. مقاومت‌ویژه در محل حضور این بی‌هنجاری نیز بالاست؛ که به احتمال زیاد مربوط به واحدهای آذرین (آندزیت‌ها که بخش اصلی کانی سازی در آن‌ها انجام گرفته) می‌باشد. بی‌هنجاری احتمالی دوم در فاصله ۳۱۵ تا ۳۵۰ متری مبدأ برداشت قرار دارد، از عمق ۵ متری زیر سطح زمین شروع شده و تا عمیق‌ترین یعنی ۲۲ متری ادامه پیدا می‌کند. مقاومت‌ویژه در حضور این بی‌هنجاری نیز بالاست؛ که به احتمال زیاد به واحدهای آندزیت مربوط می‌باشد. بیشترین مقدار بارپذیری برای این بی‌هنجاری زیر ایستگاه ۳۲۵ در حدود ۱۳ میلی‌ثانیه است. در فاصله بین دو بی‌هنجاری اول و دوم یعنی در فاصله ۲۷۰ تا ۳۱۰ متری مبدأ برداشت با توجه به مقطع مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی RES2DINV (شکل- ۱۵) احتمال وجود یک گسل وجود دارد که به ترتیب بی‌هنجاری‌های اول و دوم در



شکل ۱۵: (الف) مدل مقاومت‌ویژه و (ب) مدل بارپذیری الکتریکی پروفیل DD-450 حاصل از نرم‌افزار RES2DINV.

مستطیلی انجام شد. با توجه به پیمایش‌های مختلف در محدوده مورد مطالعه و نتایج مثبت حاصل از روش قطبش القایی با ارایه مستطیلی اقدام به برداشت دو پروفیل با ارایه دوقطبی- دوقطبی برای بررسی‌های جانبی و گسترش عمقی بی‌هنجاری‌ها در محدوده شد. در نهایت نتایج حاصل از دو پروفیل DD-150 و DD-450 گسترش احتمالی بی‌هنجاری‌ها در منطقه شناسایی شد و متناسب با آن حفر گمانه‌هایی پیشنهاد گردید (جدول ۱).

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی داده‌های مغناطیس‌هوابرد و اعمال فیلترهای متعدد بر روی آن یک گسل اصلی در شمال شرق محدوده مورد مطالعه شناسایی شد؛ که با توجه به زمین‌شناسی منطقه کانی زایی در محدوده در ارتباط با گسلش می‌باشد. با توجه به این اطلاعات حاصل از ژئومغناطیس‌هوابرد و گزارش‌های زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه، پی‌جویی و شناسایی اولیه با استفاده از روش قطبش القایی و مقاومت‌ویژه الکتریکی با ارایه

جدول ۱: مختصات گمانه‌های پیشنهادی برای حفاری

نام پروفیل برداشت	گمانه پیشنهادی	مختصات محلی	شیب نسبت به سکوی حفاری کاملاً افقی (درجه)	عمق حفاری (m)	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)
DD-150	BH-1	-280	-90	45	295590	3926502
DD-150	BH-2	-10	-90	45	295867	3926502
DD-150	BH-3	+140	-90	45	296017	3926500
DD-450	BH-4	+200	-90	25	295979	3927102
DD-450	BH-5	+325	-90	25	296040	3927102

Edwards L.S., (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced polarization, *Geophysics*, 42, pp.1020-1036.

Fox R.C., Hohmann G.W., Killpack T.J., Rijo L., (1980). "Topographic effect of resistivity and induced polarization surveys", *Geophysics*, No. 1, Vol. 45, pp. 79-93.

Hessami, K., Jamali, F., Tabassi, H., (2003) "Map of Major active Faults of Iran. Tech. rep., International Institute of Earthquake Engineering and seismology", Iran, [Http//www.iiees.ir](http://www.iiees.ir).

Hinz, K., Dostmann, H., and Fritsch, J., (1982), "The Continental Margin of Morocco: Seismic Sequences, Structural Elements and Geological Development, in von, Rad", Springer Verlag, Berlin, pp. 34-59.

Loke M. H., (2004). "Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys". pp. 73-91.

Macinnes S., and Zonge K., (1996). "Two-dimensional Inversion of resistivity and IP data with topography", 102 Annual Northwest Mining Association Convention Session *Geophysics/Geochemistry*, spokane, Washington.

Miller, H. G., Singh, V., 1994. "Potential Field Tilt-a new concept for location of potential filed sources", *Journal of Applied Geophysics* 65, pp 556-556.

Nabighian, M. N., (1972), "the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation", *Geophysics*, v.37, no.3, pp.507-517.

Oliveira, W.J., (1998). Caracterização das Emanações gasosas de hidrocarbonetos na região do Remanso do Fogo (MG) através do uso integrado de sensoriamento remoto, geoquímica, geofísica, geologia estrutural e espectrometria de reflectância. PhD. Thesis, State University of Campinas, Brazil, 239p.k.

Richards, J.P., (2000). "Lineaments revisited. Society of Economic Geologists", *Newsletter* 25 (5), pp. 52- 50.

Richards, J.P., Boyce, A.J., Pringle, M.S., (2001). Geological evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology* 67, pp. 565-602.

Roest, W. R. & Pilkington, M., (1993), "identifying remnant magnetization effects in magnetic data", *Geophysics*, v.58, no.5, pp.653-659.

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

Telford W.M. Geldart L.P. and Sheriff R.E. (1990), "An Introduction to Applied geophysics", Cambridge University Press, New York.

حسنی پاک، ع.، شجاعت، ب.، (۱۳۹۲). "مدل سازی کانسارهای فلزی و غیرفلزی و کاربردی اکتشافی آن". انتشارات دانشگاه تهران، ص ۵۱۲.

شفقی، شکری، محمدی، مهتری، م.، زنبوری، (۱۳۹۴). "گزارش عملیات اکتشاف پایانی محدوده مس شمال پیرمردان". سازمان صنعت، معدن و تجارت استان سمنان.

گرگانی ی.، (۱۳۹۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد: " تلفیق داده های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی به منظور اکتشاف کانسار مس دوچپله-میامی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

علوی، م.، هوشمندزاده، ا.، اطمینان، ه.، (۱۹۷۶). "نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه تروود در استان سمنان". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، معاونت اکتشاف، مدیریت امور اکتشاف.

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

Airo, M. L., Loukola-Ruskeeniemi, K., (2004). Characterization of sulfide deposits by airborne magnetic and gamma-ray responses in eastern Finland. *Ore Geology Reviews* 24, 67-84.

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

Chernicoff, C.J., Richards, J.P., Zappettini, E.O., (2002). "Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence". *Ore Geology Reviews* 55, pp. 556-522.

Clark, D.A., Geuna, S.E., Schmidt, P.W., 2004. Predictive magnetic exploration models for porphyry, epithermal and iron oxide Cu-Au deposits. P700 Final Report, 398 p. + CD Atlas of Geophysical Signatures + Relational Database of Porphyry, Epithermal and Iron Oxide Cu-Au Deposits, AMIRA International (Report can be downloaded from: <https://wiki.csiro.au/confluence/download/attachments/457769088/Clark+etal+2004+P700+CSIRO+1073Rs.pdf>).

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