

اکتشاف کانه آهن مگنتیتی در کانسار مَرور با استفاده از تحلیل تصاویر ماهواره ای و وارون سازی داده‌های مغناطیسی

۱- فراز سخائیان، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- سید محمد ابطحی فروشانی، استادیار، گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسؤول)

۳- حمزه صادقی سرخنی، استادیار، گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴- یونس قاسمی پور، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

نیاز روز افزون صنایع فولاد سازی به کانه آهن و کاهش عیار و تناژ معادن فعال بزرگ موجود، انگیزه اکتشاف کانسارهای آهن کوچک مقیاس و یا پنهان را افزایش داده است. پژوهش حاضر به پی جویی یکی از این کانسار در واقع در استان یزد پرداخته است. در این راستا، قدم اول انجام دورسنجی با تولید ترکیب های رنگی کاذب و نسبت های بانندی تصاویر ماهواره استر و لندست ۸ بود. این روشها حضور اکسیدهای آهن فرو و فریک و دگرسانی های محل کانسار آهن مرور را آشکار ساختند. همچنین محاسبه سیگنال تحلیلی داده های مغناطیسی محدوده، مرزهای بی هنجاری های مغناطیسی را مشخص نمود. این مراحل نشان داد که همبستگی فضایی معناداری بین اکسید آهن فرو و بی هنجاری های مغناطیسی وجود دارد. افزون بر این، نتایج روشهای واهمامیخت اوپلر و طیف توان نشان داد که منابع مغناطیسی در عمق حدود ۶۵ متر واقع شده اند. بعداً از عمق تخمین زده شده برای تعریف وزن دهی عمقی در یک وارون سازی سه بعدی داده های مغناطیسی استفاده شد. این وارون سازی، مدلی سه بعدی از شکل توزیع خودپذیری مغناطیسی در عمق را ارائه کرد. بر اساس مدل تخمین زده شده، مناطق دارای بزرگترین خودپذیری مغناطیسی با محلهای عیار بالای آهن در طول چاه های اکتشافی مطابقت دارند. این مقایسه همچنین نشان داد که زون های با خودپذیری مغناطیسی بالا غالباً در عمق ۵۰ تا ۱۰۰ متری قرار گرفته اند.

واژه های کلیدی: دورسنجی، مغناطیس سنجی، وارون سازی سه بعدی، خودپذیری مغناطیسی، کانسار آهن.

۱. مقدمه

امروزه توسعه روش‌های پیشرفته اکتشاف آهن برای افزایش احتمال کشف و کاهش هزینه‌های مربوط به حفر گمانه‌های اکتشافی، با توجه به کاهش عیار و تناژ ذخایر جهانی این فلز، یک ضرورت انکار ناپذیر است. کانسارهای آهن مگنتیتی به لحاظ عیار و تناژ از ارزشمندترین کانسارهای آهن محسوب می‌شوند. این کانسارها به دلیل تباین خودپذیری مغناطیسی بالایی که در مقایسه با سنگ‌های میزبان نشان می‌دهند همواره هدف مطلوبی برای روش مغناطیس‌سنجی محسوب شده‌اند (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). همچنین آهن موجود در سنگ‌های نزدیک به سطح زمین همواره در محیط‌های غنی از اکسیژن دچار هوازدگی و اکسیداسیون می‌شود و در صورت وجود شرایط برای حرکت به سطح، رخنمون‌های غنی از اکسیدهای آهن را در سطح زمین ایجاد می‌کنند که می‌تواند اهداف مناسبی برای مطالعات دورسنجی باشد (گوپتا و روی، ۲۰۰۶ و کیامپالینی و همکاران، ۲۰۱۳). تصاویر دورسنجی دریافت شده از ماهواره‌ها، دربرگیرنده اطلاعاتی از امواج الکترومغناطیسی بازتاب یافته از سطح زمین هستند که در هر فرکانس بسته به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سطح بازتاب دهنده، دامنه موج بازتاب یافته متفاوت می‌باشد (ساینز، ۱۹۹۹). وجود دگرسانی در سنگ‌ها یکی از عوامل مهم تغییر در میزان انعکاس امواج الکترومغناطیسی از آن‌ها است. بنابراین، در مرحله شناسایی کانسارها می‌توان با اعمال پردازش‌های مورد نیاز بر تصاویر محدوده و تفسیر نتایج به دست آمده، مناطق هاله‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی را شناسایی نمود (شیرازی و همکاران، ۲۰۱۸ و مرادپور و همکاران، ۲۰۲۲). سپس با متمرکز شدن بر محدوده‌های دارای دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی آهن، می‌توان پی‌جویی‌های ژئوفیزیکی مانند مغناطیس‌سنجی را در آن محدوده انجام داده و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مرتبط به کانی‌سازی آهن مگنتیتی را شناسایی نمود. سپس با انجام وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی، امکان مطالعه شکل و گسترش کانسار احتمالی فراهم می‌شود.

در سال‌های اخیر استفاده توأم از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مغناطیسی به طور گسترده در اکتشاف کانسارهای آهن مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال صفایی و همکاران (۱۳۹۴) به کمک تصاویر Aster در محدوده کانسار آهن سنقر، مکان حضور

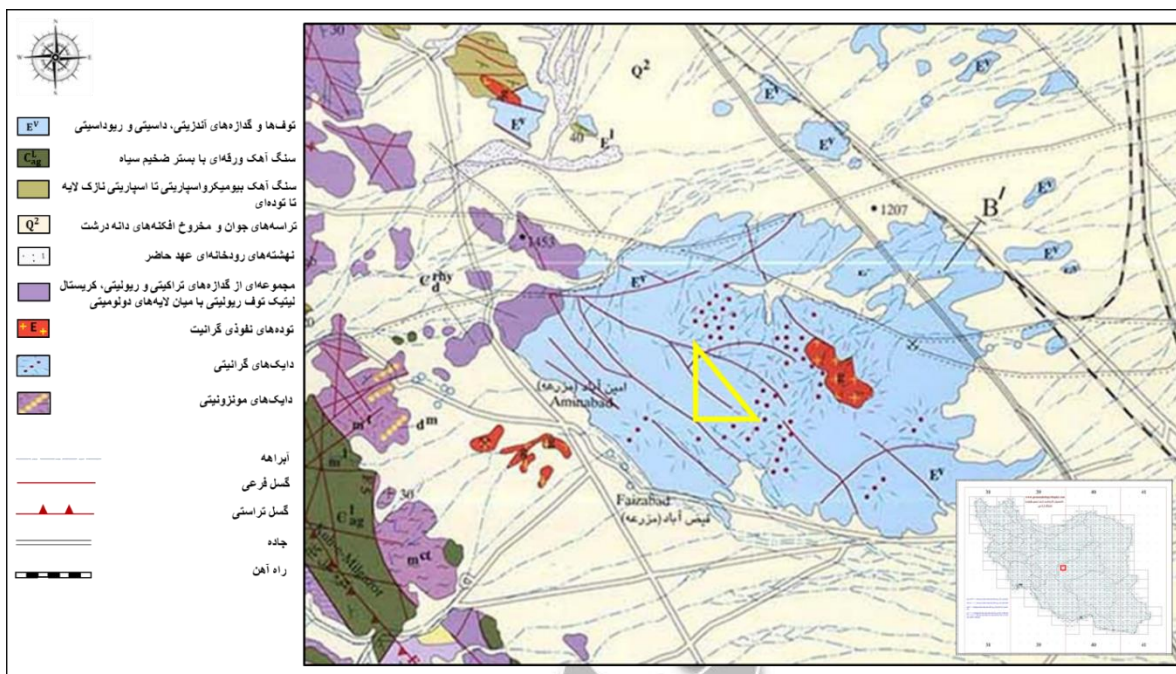
اکسیدهای آهن را شناسایی کردند. سپس با انجام مطالعات مغناطیس سنجی در محدوده نظیر روش برگردان به قطب و سیگنال تحلیلی محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تحت تاثیر از رگه‌های اکسید آهن را مشخص کردند. مقایسه مدل خودپذیری مغناطیسی به دست آمده از وارون سازی داده‌های مغناطیسی با محل‌های حضور کانه مگنتیت در گمانه‌ها، تطابق معنا داری بین این دو نشان داد. لی و همکاران (۲۰۱۸) در منطقه گالیناس نیومکزیکو، آمریکا، از نسبت‌های بانندی ۴:۲ و ۶:۵ در تصاویر لندست ۸ استفاده کردند و دگرسانی هیدروترمال مرتبط با اکسیدهای آهن بر روی نفوذهای تراکیت را مشخص کردند. سپس با مدل‌سازی وارون دو بعدی در راستای دو پروفیل از نقشه برگردان به قطب محدوده که هم امتداد با دو گسل اصلی منطقه بودند مدلی برای نحوه گسترش کانی سازی آهن در عمق ارائه کردند. محمد و همکاران (۲۰۱۸) نیز در بخش شرقی صحرای مرکزی مصر به هدف شناسایی کانی‌سازی طلا از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای دورسنجی محدوده استفاده کردند و مناطق دگرسان شده محدوده را بارزسازی کردند. سپس نشان دادند مدل سه بعدی بدست آمده از مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی محدوده ارتباط معناداری با دگرسانی‌ها و ساختار زمین شناسی محدوده دارد که احتمال وجود کانی سازی طلا را در منطقه تایید می‌کند. احمدی و بیات (۲۰۲۱) نیز با استفاده از دورسنجی تصاویر استر ابتدا نواحی امید بخش برای کانی سازی آهن در منطقه مرق بندر چارک را مشخص نموده و پس از پردازش داده‌های مغناطیسی محدوده‌های امید بخش برای اکتشاف آهن را مشخص کردند. همچنین با انجام مدل‌سازی وارون سه بعدی، مدل خودپذیری مغناطیسی زمین زیر سطحی در محدوده مورد مطالعه را تخمین زده و مکان‌هایی را برای حفاری اکتشافی پیشنهاد نمودند. فاروا و همکاران (۲۰۲۱) نیز مطالعاتی را به منظور شناسایی ساختارهای زیرسطحی مرتبط با کانی سازی آهن در جنوب غربی نیجریه انجام دادند. آن‌ها به کمک دورسنجی سه ناحیه سنگ‌شناسی شامل کمپلکس‌های رسوبی دگرگون شده نظیر کمپلکس‌های گنیس-کوارتزیت و سنگ‌های شیبست و متاولکانیک تمایز نیافته را مشخص کردند و با استفاده از مشتقات افقی و عمودی و سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی ساختارهای سطحی و مناطق با پتانسیل بالای کانی سازی آهن را مشخص نمودند. البته استفاده توام اکتشافی از داده‌های دورسنجی و مدل‌سازی مغناطیسی منحصر به کانسارهای آهن نبوده است. الگالادی و همکاران (۲۰۲۲) در منطقه وادی علاقی، در بخش جنوبی صحرای شرقی مصر، برای پی‌جویی کانی سازی طلا ابتدا تصاویر ماهواره‌ای لندست محدوده را با تکنیک‌های نسبت‌های بانندی، کروستا و ترکیب رنگی کاذب بررسی و مناطق مستعد را شناسایی کردند و واحدهای زمین شناسی محدوده را مشخص کردند. سپس نقشه‌های مغناطیسی محدوده مانند نقشه شدت کل مغناطیسی و نقشه برگردان به قطب محدوده را با استفاده از داده‌های هوامغناطیس محدوده بدست آوردند. در نهایت با استفاده از روش‌های تخمین عمق اویلر و طیف توان، عمق توده‌های مغناطیسی شده دارای کانی سازی طلا را بدست آوردند. آن‌ها با نتایج بدست آمده نشان دادند که پهنه‌های بالقوه کانی‌سازی با بر روی سنگ‌های افیولیتی، متاولکانیک و گرانیتی منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرند. عبدالهی و همکاران (۲۰۲۲) نیز از داده‌های سنجش از دور برای ردیابی مناطق دگرسانی دارای کانی سازی در محدوده ای در شمال صحرای مصر، برای تعیین شکستگی‌ها و سیستم‌های ساختاری و شناسایی واحدهای مختلف زمین‌شناسی استفاده کردند. آن‌ها کانی‌های دگرسانی مختلف از جمله هیدروکسیل کربنات‌ها، اکسیدهای آهن فروس و فریک بر روی واحدهای سنگی مختلف را با استفاده از تکنیک‌های نسبت بانندی (BR) و کروستا شناسایی کردند. هم‌نظور واحدهای زمین شناسی مختلف را با استفاده از تصاویر ترکیب رنگی کاذب (FCC) مشخص کردند. سپس با پردازش

داده‌های مغناطیسی محدوده و بکارگیری فیلترهای برگردان به قطب (RTP) و مشتق شیب (TDR) نقشه منابع مغناطیسی توده‌های مدفون را شناسایی کردند، سپس با کمک روش‌های خطوط صفر تکنیک‌های TDR، واهمامیخت اوپلر، سیگنال تحلیلی و تصویربرداری پارامتر منبع (SPI) ساختارهای مدفون را ردیابی کردند و عمق آن‌ها را تخمین زدند. در نهایت تمامی نتایج را در فضای نرم افزار GIS تلفیق و مورد نمایش قرار دادند.

مطالعه حاضر به بررسی مراحل شناسایی به روش دورسنجی و پی جویی مغناطیسی کانسار آهن مگنتیتی در منطقه مرور واقع در شهرستان میبد پرداخته است. این مقاله ابتدا با استفاده از دورسنجی، هاله‌های مربوط به اکسیدهای آهن فرس و فریک را تفکیک می‌نماید. سپس ارتباط هاله‌های اکسید آهن با پی هنجاری‌های مغناطیسی را مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین با تجزیه و تحلیل داده‌های میدان مغناطیسی منطقه و مدل سازی معکوس سه بعدی آن داده‌ها، تخمین‌هایی از محل و عمق و شکل کانسار احتمالی ارائه می‌دهد. در نهایت، مدل خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده با عیار آهن به دست آمده از آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌های مغزه‌های حفاری اکتشافی مقایسه می‌شود.

۲. زمین شناسی محدوده مرور

محدوده مورد بررسی در این تحقیق با مساحتی نزدیک به ۷۲۰ مترمربع در منطقه مرور شهرستان میبد در استان یزد واقع شده است. این محدوده در فاصله ۲۰ کیلومتری شهرستان میبد قرار دارد. راه دسترسی به منطقه از میبد، جاده ندوشن و سپس جاده درین است. این محدوده در برگه یکصد هزارم زمین شناسی عقدا قرار دارد و با توجه به اطلاعات زمین شناسی این محدوده که از نقشه زمین شناسی شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد واحدهای سنگی تشکیل دهنده محدوده اکتشافی مرکب از گدازه‌ها و توف‌های آندزیتی، داسیتی و ریوداسیتی ائوسن به رنگ‌های خاکستری تا سبز می‌باشد و دایک‌های گرانیتی نیز در محدوده پراکنده شده اند (علائی و فودازی، ۱۳۸۵-الف). همچنین در این محدوده رخنمون‌های پراکنده‌ای از سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و در بعضی قسمت‌ها هماتیتی دیده می‌شود. شواهد زمین شناسی موجود در محدوده نشان می‌دهد که ذخیره آهن مگنتیتی در این محدوده در سنگ میزبان ولکانیک ائوسن (اندزیت و توف) جای گرفته است.



شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه. محدوده مورد مطالعه با مثلث زرد در نقشه مشخص شده است (علائی و فودازی، ۱۳۸۵-ب).

۳. دورسنجی محدوده مرور

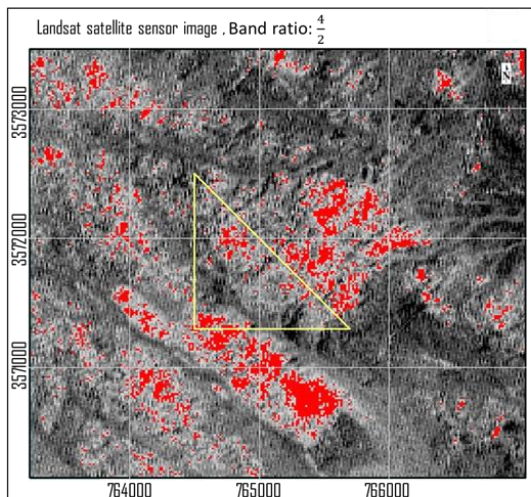
مطالعات دورسنجی در محدوده مرور با استفاده از تصویر به دست آمده از سنجنده Aster در ماهواره Terra و تصویر ماهواره OLI-Landsat8 هر دو با درصد ابر صفر استفاده شد (USGS، ۲۰۰۲ و USGS، ۲۰۱۸). پردازش‌های لازم در نرم افزار ENVI5.3 صورت گرفت که در ادامه به اختصار مورد اشاره قرار می‌گیرد.

به دلیل وجود انحنای مسیر ماهواره و چرخش زمین، ناهمواری‌های موجود روی سطح زمین، ارتفاع سنجنده، اثر اتمسفر و ... تصاویر ماهواره‌ای دارای خط‌هایی می‌باشند که سبب جا به جایی مختصات صحیح پدیده‌ها سطحی بر روی تصاویر می‌گردند. بنابراین باید قبل از پردازش داده‌ها تصحیحات لازم به منظور رفع این خطا انجام شود (آقاجانی و همکاران، ۱۳۸۵). بر روی هر دو تصویر استر و لندست محدوده، تصحیح هندسی با روش نقاط کنترل زمینی GCP با هدف رفع اثر پدیده‌هایی نظیر ارتفاع تصویر برداری و زاویه دید ماهواره انجام گرفت. هم‌بنابراین تصحیح رادیومتریک با هدف حذف تفاوت تغییر دامنه امواج الکترومغناطیسی دریافت شده در اثر اتمسفر و توپوگرافی زمین و همانندسازی ارزش طیفی پیکسل‌های تصاویر با یکدیگر، انجام شد. برای حذف اثر اتمسفر، تصحیح اتمسفری با الگوریتم Flaash (یوان و نیو، ۲۰۰۸) و با در نظر گرفتن پیکسل‌های ۱۵ و ۳۰ متری به ترتیب برای تصاویر استر و لندست ۸ انجام شد.

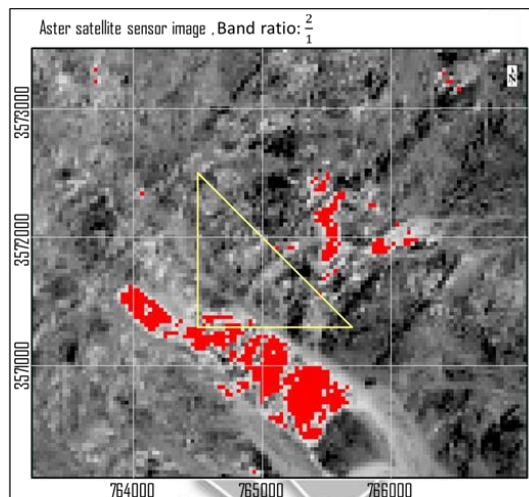
پس از انجام پیش پردازش‌های لازم، از روش نسبت بانندی برای بارزسازی مناطق غنی از اکسیدهای آهن فرو (Fe^{2+}) و فریک (Fe^{3+}) استفاده شد. ون در ورف و ون در مر (۲۰۱۶) نشان دادند که کانی هماتیت دارای بیشترین بازتاب در محدوده فرکانسی ۰/۷ میکرومتر تا ۱/۵ میکرومتر یعنی باند ۲ استر و ۴ لندست و بیشترین جذب در ۰/۵ میکرومتر یعنی باند ۱ استر و ۲ لندست است. بنابراین، در نتیجه از نسبت بانندی ۲:۱ برای بارزسازی اکسید آهن فریک مرتبط با کانی هماتیت در تصویر استر و ۴:۲ در تصویر لندست ۸ استفاده شد

(شکل های ۲-الف و ۲-ب). همچنین با توجه به اینکه مگنتیت اصلی ترین کانی مرتبط با کانی سازی آهن در محدوده مورد بررسی بوده است، شناسایی مناطق غنی از اکسید آهن فرو نیز انجام شد. الفریشی و همکاران (۲۰۲۰) نسبت بانندی مرکب $۵:۳+۱:۲$ تصاویر استر و ون در ورف و ون در مر (۲۰۱۶) نسبت $۷:۵$ تصاویر لندست را را برای استخراج مناطق دارای اکسید آهن فرو پیشنهاد کردند. در مطالعه حاضر نیز از همین نسبت ها برای نشان دادن زون های دارای اکسید آهن فرو در تصاویر استر و لندست به ترتیب در شکل های ۲-ج و ۲-د استفاده شده است. مثلث زرد رنگ، محدوده اکتشافی کانسار مرور را در شکل های ۲-الف تا ۲-د نشان داده است. بر اساس شکل های ۲-الف و ۲-ب، هیچ یک از تصاویر استر و لندست وجود آهن هماتیته چندانی در محدوده را نشان نداده اند. در حالی که اثر اکسید آهن مگنتیتی در محدوده مثلثی شکل مربوط به شکل های ۲-ج و ۲-د به طور واضح مشخص است. همچنین، شکل ۲-ج، تقریباً روندی شمال غربی-جنوبی شرقی را در مورد حضور اکسید آهن فرو نشان می دهد که این روند به دلیل رزلوشن فضایی کمتر داده های لندست، در شکل ۲-د به وضوح مشخص نیست.

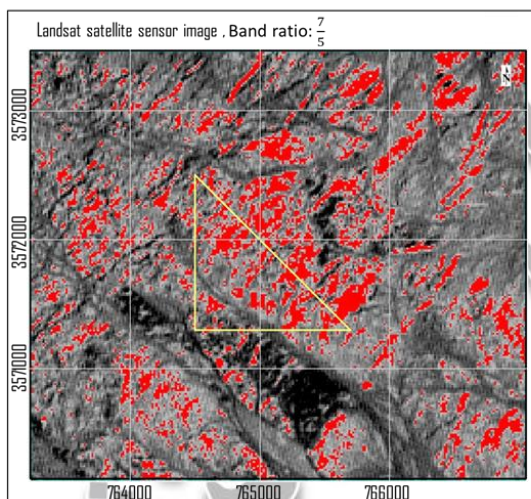
همچنین برای بارزسازی دگرسانی های آرژیلیک و پروپلیتیک و مطالعه ارتباط آن ها با نوع اکسیدهای آهن موجود در محدوده، بر اساس الگوی علیمحمدی و همکاران (۲۰۱۵)، از ترکیب رنگی کاذب $B=۸$ ، $G=۶$ ، $R=۴$ استفاده شد. مطابق شکل ۳ در این ترکیب رنگی کانی های کلریت و اپیدوت که کانی های شاخص دگرسانی پروپلیتیک هستند به رنگ سبز در آمده اند. رنگ گلبهی در شکل ۳ نیز مربوط به کانی کائولینیت می باشد که مشخص کننده زون دگرسانی آرژیلیک در محدوده است. مقایسه شکل ۳ با شکل ۲، بیانگر ارتباط فضایی حضور دگرسانی آرژیلیک و کانی هماتیت می باشد. همچنین ارتباط مشابه ای بین دگرسانی پروپلیتیک و وجود کانی مگنتیت در محدوده مورد مطالعه و اطراف آن دیده می شود.



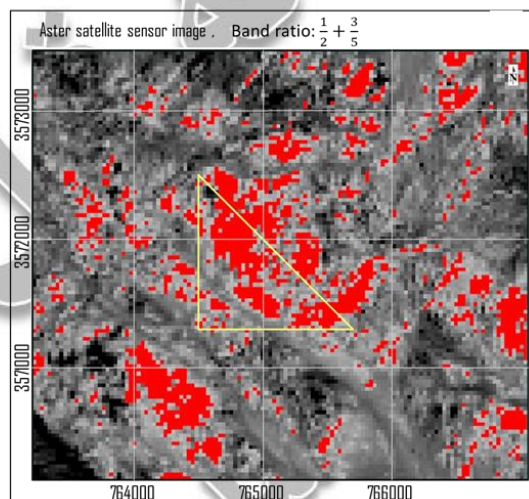
(ب)



(الف)

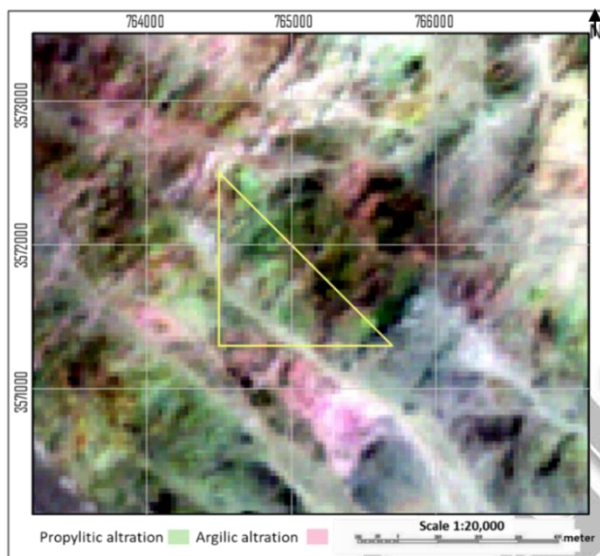


(د)



(ج)

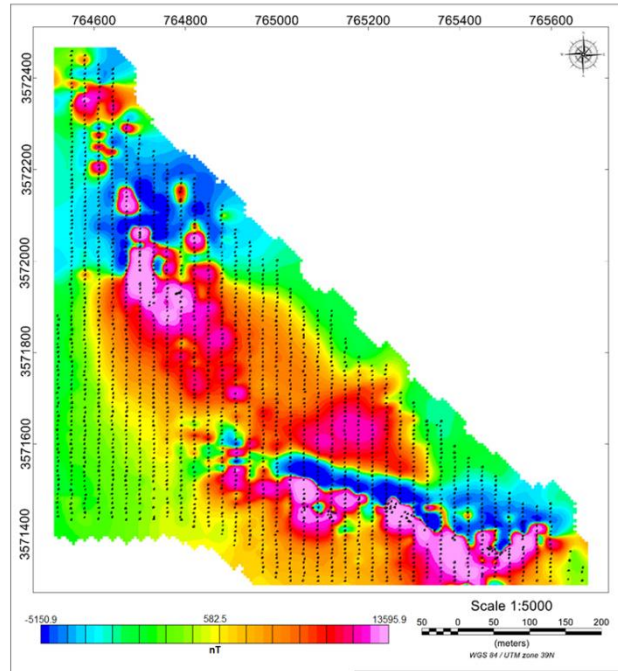
شکل ۲. نتایج حاصل از روش نسبت‌های باندی الف-باند ۲ به ۱، تصاویر استر؛ ب-باند ۴ به ۲، تصاویر لندست ۸. مناطق قرمز رنگ نشان دهنده آهن فریک مرتبط با کانی هماتیت هستند. ج-نسبت باندی مرکب باند ۳/۵ + ۱/۲ استر و د-نسبت باند ۷ به ۵ تصویر لندست. مناطق قرمز رنگ نشان دهنده آهن فرو مرتبط با کانی مگنتیت می باشند. مثلث زرد رنگ در همه شکل‌ها نشان دهنده محدوده اکتشافی کانسار مرور می‌باشد.



شکل ۳. تصویر حاصل از ترکیب رنگی کاذب ۴۶۸ استر. دگرسانی پروپلیتیک رنگ سبز و آرژیلیک به رنگ گلبهی (صورتی) مشخص شده است.

۴. مغناطیس سنجی محدوده مرور

عملیات مغناطیس سنجی برای تعیین مکان بی‌هنجاری آهن توسط شرکت افرا سنگ در سال ۱۳۹۸ و با استفاده از دستگاه GEM 19-T صورت گرفت. این برداشت در قالب ۳۹ پروفیل انجام شد که فاصله نمونه‌ها در هر پروفیل ۱۰ متر و فاصله پروفیل‌ها از یکدیگر ۳۰ متر می‌باشد. داده‌های مغناطیسی یاد شده پس انجام تصحیح شبانه روزی در اختیار این پژوهش قرار گرفته است. شکل ۴ نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی کل برداشت شده در محدوده که به روش درون یابی حداقل انحنای توسط نرم افزار Geosoft Oasis Montaj در یک شبکه ۶×۶ متر مربع تهیه شده است را بعد از حذف مقدار IGRF از داده‌ها نشان می‌دهد. مقدار میدان مغناطیسی بین المللی مرجع زمین (IGRF)، در زمان برداشت ۴۶۴۰۳ نانوتسلا بوده است. مقدار IGRF، میدان مغناطیسی ناشی از هسته خارجی زمین است که لازم است مقدار آن از داده‌های مغناطیسی برداشت شده کاسته شود تا تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از پوسته زمین مشاهده شود (رگان و کین، ۱۹۷۵ و کلاگری، ۱۳۸۹ و فینلی و همکاران، ۲۰۱۰). نقاط سیاه‌رنگ روی شکل، محل نقاط برداشت داده را نشان داده‌اند.

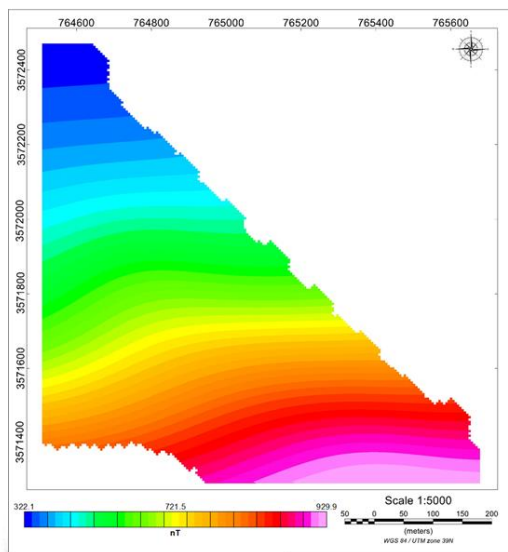


شکل ۴. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی اندازه گیری شده بعد از کم کردن مقدار IGRF از داده ها. موقعیت نقاط برداشت با نقاط سیاه رنگ نمایش داده شده اند.

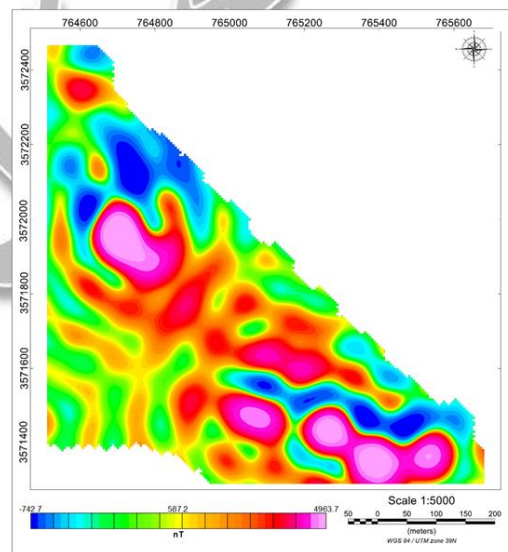
با توجه به شکل ۴، وجود پدیده‌های ریز و سطحی که عموماً ابعادی کمتر از دو برابر فاصله بین پروفیلی دارند، در محدوده برداشت تایید می‌شود. همچنین در شکل یاد شده بازه تغییرات میدان مغناطیسی باقیمانده پس از حذف IGRF دامنه‌ای بین 5150.9 تا 13595.9 نانوتسلا را نشان می‌دهد. این مقادیر پیشینه و کمینه تنها در پدیده‌های کوچک که پهنایی کمتر از دو برابر فاصله بین پروفیلی دارند مشاهده شده‌اند. چنین پدیده‌هایی ابعادی کوچکتر از حد نایکیست برای اعتبار داده‌ها بوده و لازم است حذف شوند (کیاری و بروکس، ۱۹۸۴ و منصوریان و همکاران، ۱۳۸۷). برای حذف اثر این پدیده‌ها، از یک فیلتر پایین گذر (Low Pass Filter) (لوتوانیو و همکاران، ۲۰۲۰) با طول موج ۱۰۰ متری به میزان بیش از دو برابر فاصله بین پروفیلی استفاده شد. شکل ۵-الف، نقشه مغناطیسی شکل ۴ را بعد از انجام این فیلتر پایین گذر نشان داده است. در این شکل به وضوح پدیده‌های کوچک سطحی حذف شده و دامنه تغییرات شدت میدان مغناطیسی بین 742.7 تا 4963.7 نانوتسلا محدود شده است. محاسبه ادامه فراسو (Upward continuation) 300 متری داده‌های شکل ۵-الف، وجود یک روند افزایشی کلی در داده‌های مغناطیسی از شمال غرب به جنوب شرق محدوده را نشان داد. این روند نشانگر وجود آثار پدیده‌های بزرگ ناحیه‌ای باقیمانده در داده‌ها پس از حذف IGRF است. برای تقویت اثر بی‌هنجاری‌های ناشی از پدیده‌های محلی، لازم است که اثر ناحیه‌ای یاد شده از داده‌ها کاسته شود (هندرسون و زیتز، ۱۹۴۹ و امیرپور و همکاران، ۱۳۹۵ و هاریمی، ۲۰۱۹). شکل ۵-ج، مقدار بی‌هنجاری مغناطیسی باقیمانده در شکل ۵-الف را پس از کاستن مقادیر ناحیه‌ای شکل ۵-ب نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مقدار پیشینه و کمینه میدان مغناطیسی باقیمانده در محدوده مورد مطالعه به ترتیب 1490.4 و 4364.7 نانوتسلا بوده است.

بی‌هنجاری‌های مغناطیسی محلی، عموماً منشاء القایی داشته و به دلیل مغناطیدگی توده‌های زیرسطحی توسط میدان ژئومغناطیسی در هر محل ایجاد می‌شوند. بنابراین، به دلیل تاثیر تغییرات زاویه میل و انحراف مغناطیسی، محل توده‌های منشاء بی‌هنجاری‌ها متقارن نبوده و

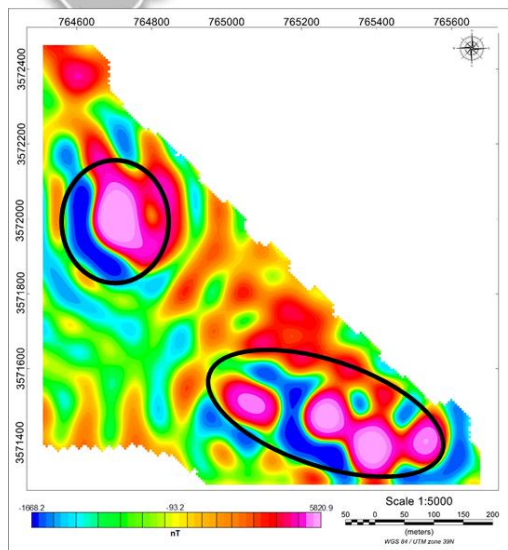
بیشینه بی هنجاری‌ها بر مرکز آن توده‌ها قرار نمی‌گیرد. برای رفع این مشکل، معمولاً از روش برگردان به قطب (Reduction to pole) که به طور مخفف RTP نامیده می‌شود استفاده می‌شود. در این روش، به صورت ذهنی محل توده‌های مغناطیسی به قطب مغناطیسی زمین که در آن زاویه میل مغناطیسی برابر ۹۰ درجه و زاویه انحراف مغناطیسی برابر صفر می‌باشد، انتقال یافته و مقدار میدان مغناطیسی ناشی از آن‌ها در شرایط جدید محاسبه می‌شود (بلیکلی و کوکس، ۱۹۷۲ و تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰ و رینولدز، ۲۰۱۱). با توجه به اینکه زاویه‌های انحراف و میل مغناطیسی در زمان برداشت داده‌ها در محدوده مورد مطالعه به ترتیب برابر ۲/۷۹ و ۴۹/۲۹ درجه بوده است، نقشه بی هنجاری مغناطیسی باقیمانده در شکل ۵-ج پس از انجام RTP محاسبه شده و در شکل ۵-د نمایش داده شده است. پس از این فیلتر، دو محدوده اصلی وجود بی هنجاری بزرگ مغناطیسی مثبت را در محدوده نشان داده است که یکی از آن‌ها روند شرقی-غربی با یک بیضی سیاه‌رنگ در جنوب محدوده و بی هنجاری بزرگ دوم با دایره سیاه‌رنگ در شمال محدوده، نشان داده شده‌اند. بیشینه شدت میدان مغناطیسی در بی هنجاری‌های جنوبی و شمالی به ترتیب برابر ۴۲۹۹ و ۵۸۲۰/۹ نانوتسلا می‌باشد.



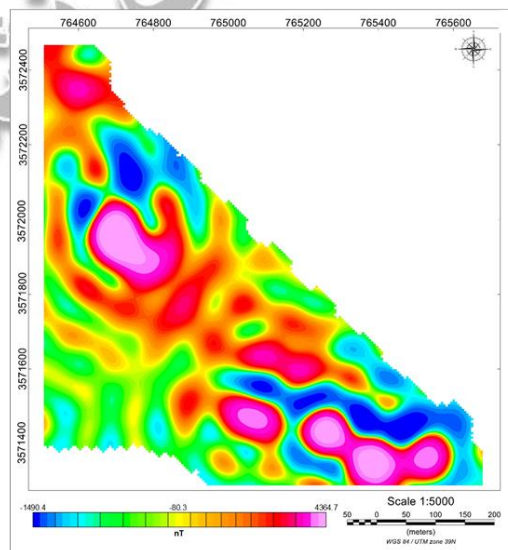
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

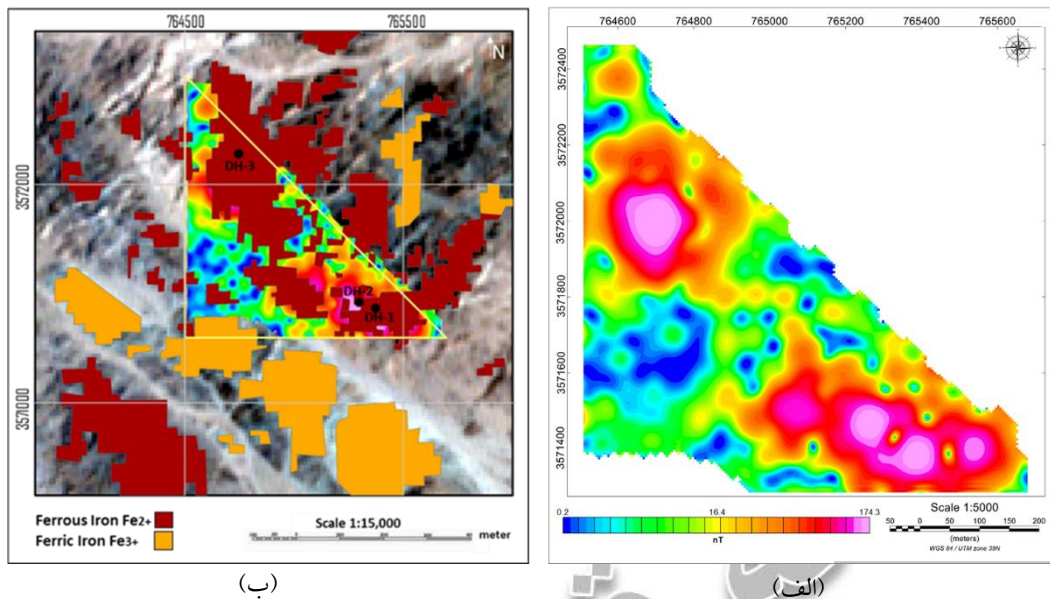
شکل ۵. الف - نقشه میدان مغناطیسی شکل ۴ پس از انجام فیلتر پایین گذر ۱۰۰ متری ب- نقشه اثر ناحیه‌ای محاسبه شده موجود در شکل الف با ادامه فراسوی ۲۵۰ متری ج- نقشه باقی مانده مقادیر مغناطیسی محدوده پس از کاستن مقادیر شکل ب از شکل الف ، د- نقشه برگردان به قطب بی هنجاری‌های شکل ج. بیضی و دایره سیاه‌رنگ به ترتیب بی هنجاری‌های اصلی جنوبی و شمالی موجود در محدوده را نشان می دهند.

انجام RTP هر چند محل مرکز منابع مغناطیسی زیر سطحی را نشان می‌دهد، اما به دلیل ماهیت دو قطبی میدان مغناطیسی، همچنان دارای دو بخش مثبت و منفی می‌باشد که همین امر تعیین مرزهای توده‌های مدفون را مشکل می‌سازد. یکی از راه حل‌های ارائه شده برای مشاهده مرز آن توده‌ها استفاده از مقدار سیگنال تحلیلی داده‌ها می‌باشد. سیگنال تحلیلی پس از محاسبه مشتق میدان مغناطیسی در سه جهت X، Y و Z، با استفاده از معادله

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

محاسبه می‌شود (نیقیان، ۱۹۷۲). در معادله ۱، مقدار میدان مغناطیسی و A سیگنال تحلیلی داده‌ها می‌باشد که معمولاً مقدار قدر مطلق آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۶- الف نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های باقیمانده را با استفاده از داده‌های نقشه شکل ۵- ج نشان می‌دهد. از مزایای سیگنال تحلیلی این است که تأثیری از تغییرات زاویه میل و انحراف مغناطیسی نمی‌پذیرد و بنابراین انجام یا عدم انجام RTP قبل از سیگنال تحلیلی، تفاوتی در مقدار سیگنال تحلیلی نخواهد داشت (کیاتینگ و پیلکینگتون، ۲۰۰۴).

در شکل ۶- ب، تلفیقی از نقشه مناطق دارای رخنمون‌های اکسید آهن برگرفته از پردازش‌های دورسنجی تصاویر لندست ۸ محدوده (شکل ۲- ب و ۲- د) و نقشه سیگنال تحلیلی داده‌ها در شکل ۶- الف را نشان می‌دهد. مناطق دارای مگنتیت (آهن فرو) به رنگ قرمز تیره و مناطق دارای هماتیت (آهن فریک) به رنگ نارنجی مشخص شده‌اند. در این شکل ارتباط فضایی معناداری بین حضور مگنتیت در سطح زمین و محل بی هنجاری‌های مغناطیسی در نقشه سیگنال تحلیلی دیده می‌شود و این دو پدیده تقریباً به طور کامل بر هم انطباق دارند. با توجه به این انطباق، احتمالاً محدوده مستعد کانی سازی آهن بوده و احتمال وجود کانسار آهن مگنتیتی در عمق تأیید می‌شود. همچنین محل گمانه‌های اکتشافی حفر شده در محدوده توسط نقاط مشکی در شکل ۶- ب مشخص شده است.



شکل ۶. الف- نقشه سیگنال تحلیلی محدوده، ب- انطباق نتایج دورسنجی تصاویر استر و نقشه سیگنال تحلیلی شکل الف. نقاط سیاه رنگ محل حفر گمانه‌های اکتشافی موجود در محدوده را نشان می‌دهند.

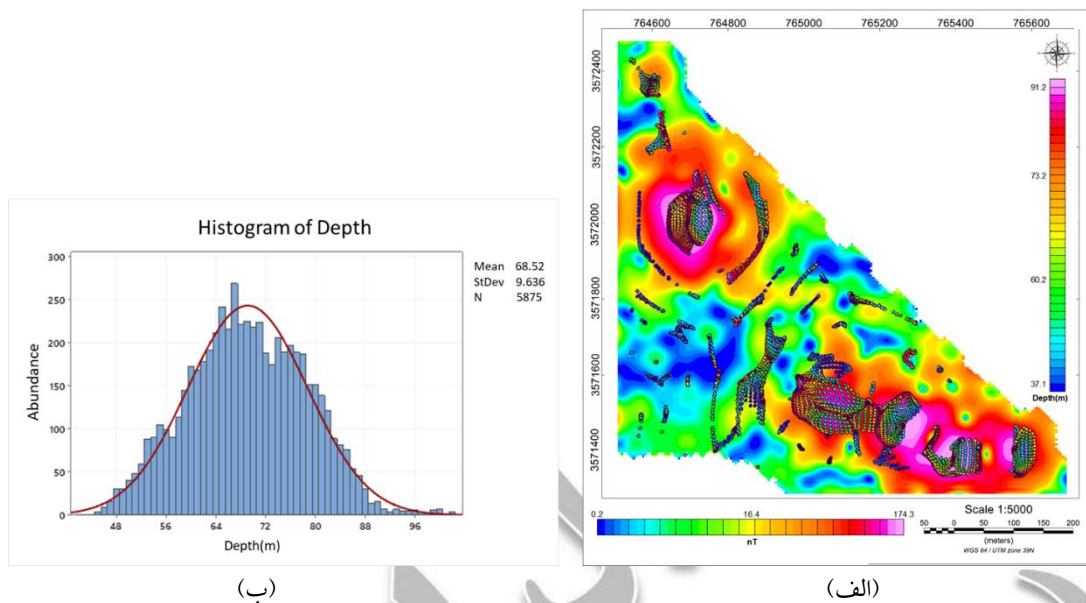
۴-۱. تخمین عمق منابع مغناطیسی

سیگنال تحلیلی به طور تقریبی محدوده مرزهای توده‌های مدفون را نشان می‌دهد، اما قادر به تخمین عمق توده‌ها نمی‌باشد. روش‌های متعددی برای تخمین عمق توده‌های زیر سطحی پیشنهاد شده است که از میان آن‌ها روش واهمامیخت اوایلر یکی از رایجترین این روش‌ها می‌باشد (رید و همکاران، ۱۹۹۰). در این روش طبق معادله‌ی

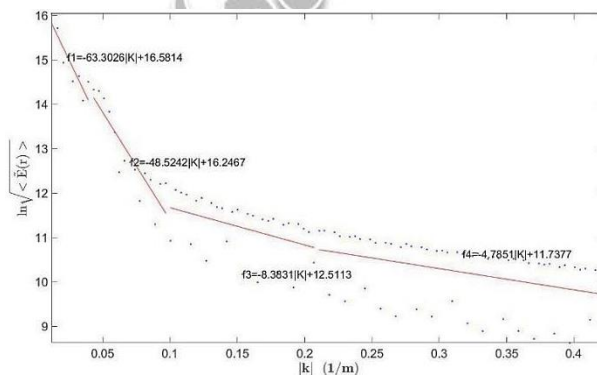
$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad \text{معادله-۲}$$

که توسط تامپسون (۱۹۸۲) بیان شد؛ بین مشتقات جهتی بی‌هنجاری مغناطیسی و شکل هندسی توده منبع، ارتباط وجود دارد. در معادله-۲، x ، y و z مختصات نقاط برداشت، x_0 ، y_0 و z_0 مختصات منبع و T میدان کل، B میدان محلی و N اندیس ساختاری می‌باشند. اندیس ساختاری، برای شکل‌های هندسی متفاوت تغییر کرده و مقدار آن از صفر برای یک مرز تماس دو واحد سنگی تا ۳ برای منابع کروی شکل متفاوت است. در عمل، مقدار N با در نظر گرفتن اطلاعات و فرضیات در مورد شکل کلی توده‌ها و زمین‌شناسی محدود و شکل پدیده‌های مورد انتظار انتخاب می‌شود (سیف و همکاران، ۱۳۹۷). در مطالعه حاضر، به دلیل شکل دایره‌ای و متحدالمرکز بودن بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در سطح می‌توان دریافت که شکل هندسی احتمالی توده‌ها در عمق استوانه‌ای یا کروی است که به دلیل فشردگی مقادیر بی‌هنجاری در حاشیه و پهن شدگی آن در مرکز، واهمامیخت اوایلر با فرض استوانه قائم بودن منابع مغناطیسی انجام شد. بنابراین اندیس ساختاری در معادله-۲ برابر با ۲ فرض شد (رید و تورستون، ۲۰۱۴). برای حل معادله-۲ باید یک اندازه مناسب برای پنجره متحرک انتخاب کرد. پنجره متحرک ابعاد محدوده‌ای را مشخص می‌کند که تمامی نقاط در آن برای حل معادله اوایلر و تعیین عمق منابع به کار گرفته می‌شوند. در این پردازش از پنجره متحرک ۱۵ در ۱۵ نقطه برای محاسبه واهمامیخت اوایلر استفاده شد و حد تلورانس تغییرات نیز برابر ۲ درصد در نظر گرفته شد. شکل ۷-الف نقشه محل و عمق منبع مغناطیسی تخمین زده شده

با واهمامیخت اوپلر را در زمینه‌ای از سیگنال تحلیلی برای محدوده مورد مطالعه، نشان می‌دهد. مراکز تجمع منابع مغناطیسی عمدتاً انطباق مناسبی با مناطق با سیگنال تحلیلی بالا نشان می‌دهند. شکل ۷-ب نیز هیستوگرام عمق منابع مغناطیسی تخمین زده شده را نشان می‌دهد. بر این اساس، میانه عمق منابع مغناطیسی در حدود ۶۸ متر از سطح زمین به دست آمده است.



شکل ۷. الف - نقشه محل و عمق منابع مغناطیسی کروی تخمین زده شده با استفاده از واهمامیخت اوپلر اندیس ۲ ب- هیستوگرام عمق منابع مغناطیسی در الف. استفاده از طیف توان داده‌های مغناطیسی، یکی دیگر از روش‌های تخمین عمق منابع مغناطیسی زیر سطحی می‌باشد. از آنجا که سیگنال‌های بدست آمده از توده‌های عمیق و کم عمق دارای تفاوت قابل توجهی در طول موج و دامنه خود هستند، می‌توان با استفاده از تغییرات دامنه طیف توان داده‌های مغناطیسی نسبت به عدد موج‌های موجود در داده‌ها، عمق توده‌های منشأ ناهنجاری را تخمین زد (اسپکتور و گرانت، ۱۹۷۰ و ماووس و دیمیری، ۱۹۹۶ و استامپولیدیس و همکاران، ۲۰۰۵ و سالم و همکاران، ۲۰۱۴). در این روش لگاریتم طیف توان حاصل از سیگنال‌ها در مقابل عدد موج آن‌ها رسم می‌شود. سپس، این نمودار به چند قسمت که هر قسمت با شیب تغییرات تقریباً ثابت هستند، تقسیم بندی می‌شود. از محاسبه نصف شیب خطوط، عمق توده‌های مورد نظر بدست می‌آید (اسپکتور و گرانت، ۱۹۷۰). به این ترتیب، عمیق‌ترین منابع مغناطیسی، به بیشینه شیب مشاهده شده در آن نمودار مرتبط خواهند بود. در مطالعه حاضر، طیف توان داده‌های مغناطیسی که در شکل ۵-د نمایش داده شده‌اند، ۶۳ متر محاسبه شد.



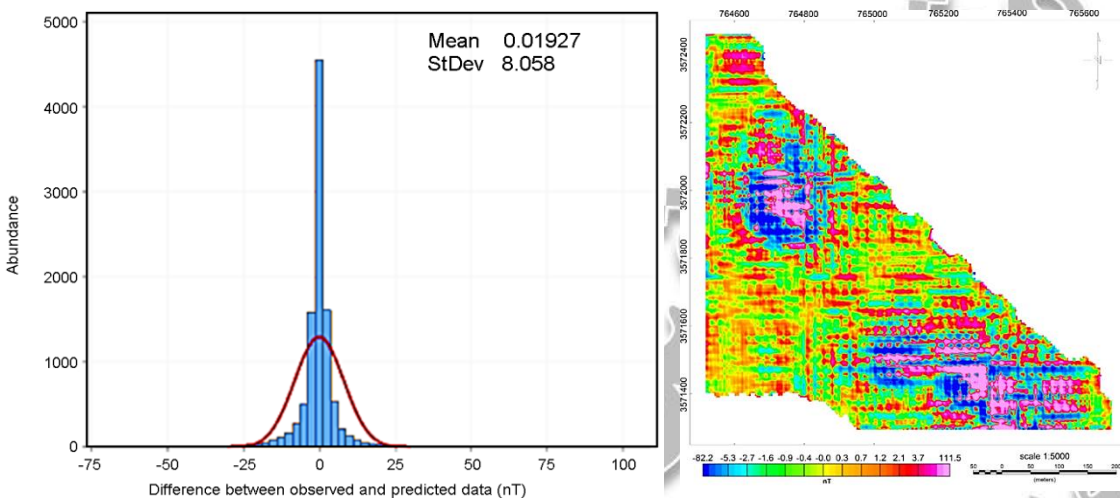
شکل ۸. تخمین عمق با برازش خط راست به اولین بخش از بلندترین قسمت طول موج طیف مشاهده به روش طیف توان

۴-۲ مدل‌سازی وارون

هرچند استفاده توام از سیگنال تحلیلی و روش‌های تخمین عمق مثل واهمامیخت اوپلر و طیف توان، تصویر کلی در مورد عمق و محل منابع مغناطیسی می‌دهد، اما برای تعیین شکل و گسترش عمقی توده‌ها ناگزیر از انجام وارون سازی سه بعدی داده‌های ناهنجاری باقیمانده مغناطیسی هستیم. وارون سازی داده‌های ژئوفیزیکی برای تعیین مقدار پارامترهای فیزیکی ساختارهای زیرسطحی به کار می‌رود و با استفاده از آن امکان تفسیر دقیق‌تر زمین شناسی فراهم می‌شود (دوترا و مارانگونی، ۲۰۰۹ و سالم و همکاران، ۲۰۱۳ و یانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در وارون‌سازی به دنبال یافتن مدلی از توزیع پارامتر یا پارامترهای فیزیکی توده‌های زیر سطحی هستیم، به گونه‌ای که سیگنال تولید شده توسط مدل بیشترین انطباق را با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده داشته باشد (لی و همکاران، ۲۰۱۰). وارون‌سازی داده‌های میدان‌های پتانسیلی نظیر داده‌های مغناطیسی، همواره با مشکل عدم یکتایی مدل مواجه هستند. در نتیجه، امکان دارد بیش از یک مدل بتوانند سیگنال‌هایی مشابه داده اندازه‌گیری شده ایجاد کنند. مثلاً ممکن است که پاسخ مدلی با خودپذیری بالا در قسمت‌های عمیق‌تر زمین با پاسخ مدلی با خودپذیری کم‌تر که در عمق کمتر واقع شده است، مشابه باشد (لیویر و اولدنبرگ، ۲۰۰۶). همین مساله اهمیت داشتن حدسی از عمق تقریبی مدل با استفاده از اطلاعات زمین شناسی، سایر روش‌های ژئوفیزیکی و یا عمق‌های تخمین زده شده با استفاده از روش‌هایی نظیر واهمامیخت اوپلر و طیف توان را دو چندان می‌کند.

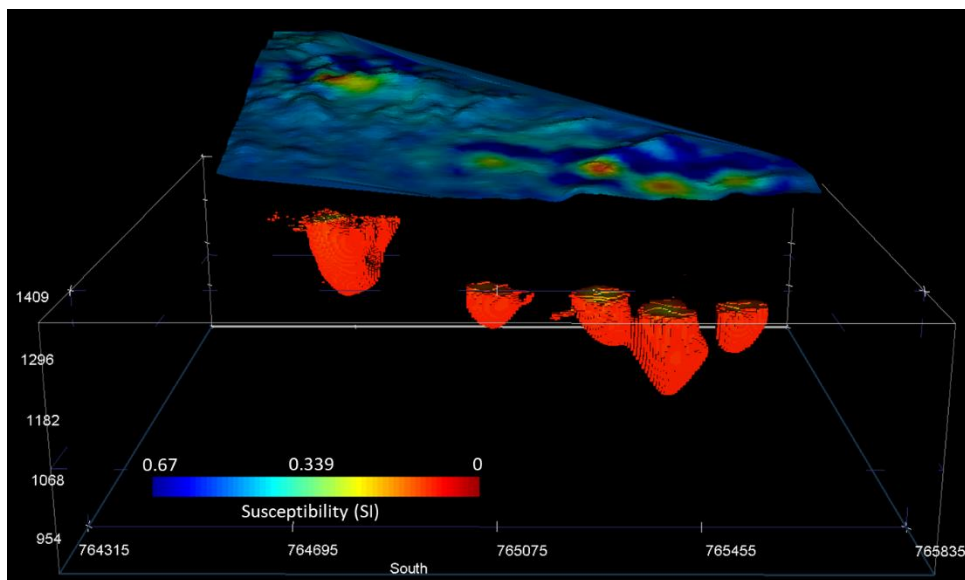
برای انجام مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی، معمولاً از روش‌های وارون‌سازی داده هموار (Occam data inversion) استفاده می‌شود. در این روش‌ها، زمین به بلوک‌هایی مکعب مستطیلی با عمق و ابعاد مشخص تقسیم بندی می‌شود. این بلوک بندی اصطلاحاً مش نامیده می‌شود. تنها مقدار مجهول در مورد بلوک‌ها پارامتر فیزیکی هدف است که در مطالعه حاضر مقدار خود پذیری مغناطیسی می‌باشد (کانستبل و همکاران، ۱۹۸۷ و قناتی و همکاران، ۲۰۱۵). تعیین این مقادیر مجهول با روش‌های مختلفی انجام می‌شود که یکی از رایجترین این روش‌ها استفاده از الگوریتم لی و الدنبرگ (۱۹۹۶) است که در این مطالعه نیز برای وارون‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی شکل ۵-ج مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار UBC Mag3D اجرا شد. در این مدل‌سازی، از $250 \times 250 \times 107$ بلوک در جهات شمالی، شرقی و عمق استفاده شده است. ابعاد بلوک‌ها از مکعب‌های با اضلاع ۵ متری در مرکز بلوک شروع شده و به تدریج با نزدیک شدن به مرزهای جانبی و کف مدل افزایش می‌یابد. محدوده تغییرات خودپذیری مغناطیسی بین صفر تا ۱ در دستگاه یکاهای SI در نظر گرفته شد. همچنین مدل اولیه به صورت یک نیم فضا با خودپذیری ۰/۰۱ در دستگاه یکاهای SI تعریف شد. در الگوریتم لی و الدنبرگ، برای جلوگیری از تمرکز منابع مغناطیسی در سطح زمین از یک تابع وزن تحت عنوان وزن دهی به عمق (Depth weighting) استفاده می‌شود. در این تابع لازم است عمق تقریبی مورد انتظار برای منابع مغناطیسی لحاظ شود. با توجه به عمق تقریبی به دست آمده از روش‌های واهمامیخت اوپلر و طیف توان، عمق مورد انتظار در تابع وزن دهی به عمق برابر ۶۵ متر در نظر گرفته شد. با فرض خطای نمونه برداری ۲ نانوتسلا، مدل نهایی پس از طی ۴۹ تکرار و زمان ۳ ساعت و ۴۹ دقیقه در کامپیوتری با دو هسته با فرکانس ۲/۷۰ گیگا هرتز و حافظه دسترسی تصادفی (RAM) ۸ گیگابایتی، با خطای عدم انطباق با داده‌های اندازه‌گیری شده (RMS)، برابر ۱/۱۴ به دست آمد. شکل ۹-الف، اختلاف بین داده‌های پیش‌بینی شده به دست از وارون‌سازی و

داده های مشاهده شده در شکل ۵-ج را نمایش می دهد. دامنه تغییرات این اختلاف بین $-۸۲/۲$ تا $۱۱۱/۵$ نانوتسلا محدود شده است. هیستوگرام اختلاف این داده ها در شکل ۹-ب نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، رفتار اختلاف یاد شده نزدیک به توزیع نرمال با میانگین نزدیک صفر بوده است. مقدار میانگین یاد شده از $۰/۰۱۹۲۷$ نانوتسلا فراتر نمی رود و انحراف معیار این اختلاف نیز $۸/۰۵۸$ نانوتسلا بوده است. به این ترتیب می توان استنباط نمود که داده پیش بینی شده از مدل تخمین زده شده برای خودپذیری مغناطیسی با داده اندازه گیری شده مطابقت کافی داشته و اختلاف آنها نیز دارای رفتار تصادفی و توزیع نرمال بوده است.

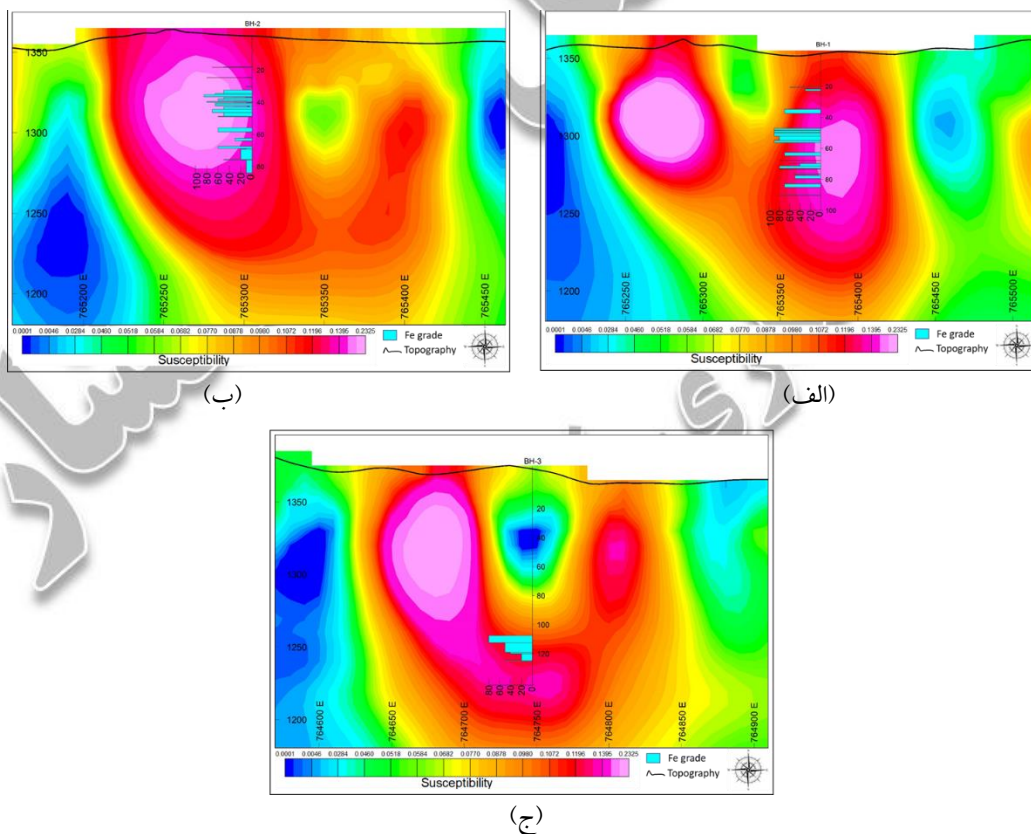


شکل ۹. اختلاف بین داده های پیش بینی شده به دست از وارون سازی و داده های مشاهده شده در شکل ۵-ج (الف) و هیستوگرام داده های الف (ب)

شکل ۱۰، مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده در محدوده را در مناطق با مقادیر بالاتر از $۰/۰۹$ در یکای SI نشان می دهد. در شکل یاد شده، داده های مغناطیسی باقی مانده در شکل ۵ ج نیز بر روی توپوگرافی محدوده نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، محل توده های با خودپذیری بالا، انطباق معناداری با محل افزایش شدت بی هنجاری مغناطیسی دارد. همچنین تغییرات عیار آهن در طول چاه های اکتشافی که محل آنها در شکل ۶-ب نمایش داده شده است، با مقاطع قائم در راستای شرقی-غربی مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی در محل چاه ها مقایسه شده است. شکل های ۱۱-الف، ۱۱-ب، ۱۱-ج، انطباق خوبی بین محل حداکثر تمرکز عیار آهن با مناطق دارای بیشینه خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده را نشان داده اند.



شکل ۱۰. مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی برای مقادیر بالاتر از ۰/۰۹۵ در دستگاهای یکاهای SI. نقشه رنگی نمایش داده شده بر فراز مدل، نقشه داده‌های مغناطیسی باقی مانده در شکل ۵ چ می‌باشد که بر توپوگرافی محدوده نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. به ترتیب، مقایسه نمودار عیار آهن بدست آمده از گمانه‌های الف- DH-01، ب- DH-02، و ج- DH-03 با مقاطع قائم در راستای شرقی-غربی، از مدل تخمین زده شده سه بعدی خودپذیری مغناطیسی

۵. بحث و نتیجه گیری

با توجه به شکل ۶-ب محل قرارگیری بیشینه سیگنال تحلیلی انطباق مناسبی با زون‌های مگنتیتی در سطح که از نتایج دورسنجی محدوده مشاهده می‌شوند (شکل ۲)، دارد و با توجه به شکل توده‌های دارای خودپذیری مغناطیسی بالا در شکل‌های ۱۱، به نظر می‌رسد آنچه به عنوان سنگ‌های حاوی مگنتیت در سطح قابل مشاهده است، در عمق زمین ادامه دارند. شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب نشان می‌دهد گمانه اکتشافی از محل بیشینه کانی سازی مگنتیت عبور نکرده‌اند اما بیشینه عیار آهن در گمانه‌ها به ترتیب در عمق‌های ۵۰ تا ۷۰ متر در شکل ۱۱-الف و ۳۰ تا ۵۰ متری در شکل ۱۱-ب از سطح زمین قرار گرفته است که منطبق بر بیشینه خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده با مدل‌ها در همان عمق‌ها است. در شکل ۱۱-ج نیز خودپذیری مغناطیسی در عمق ۱۱۰ متر افزایش یافته است که وجود یک ریشه مشترک بین دو توده مغناطیسی را نشان می‌دهد که بالا رفتن عیار آهن در گمانه در همان عمق آن را تایید می‌کند. این نتایج تایید می‌کند بیشینه کانی سازی محدوده از نوع آهن مگنتیتی است اما امکان وجود امتداد هماتیته برای توده‌های یاد شده نیز در مناطق دارای خودپذیری مغناطیسی پایین رد نمی‌شود.

منابع

- آقاجانی، حمید، تاجیک، مهدی، و احمدی، جواد. (۱۳۸۵). شناسایی مناطق امید بخش معدنی منطقه جبال بارز (محدوده شهرهای جیرفت - بم) با استفاده از داده‌های ماهواره ای. دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، اصفهان، ایران.
- امیرپور اصل میاندوآب، امیر، سهرابی، قهرمان، و نصیری گنجینه کتاب، محمد. (۱۳۹۵). کاربرد روش مغناطیس سنجی برای اکتشاف کانه زایی مس و طلا در محدوده اکتشافی پلی متال باشماق هشترو. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۰(۲)، ۳۹-۴۸.
- سیف، محمدرضا، محمدرضا، محمد، و میرزایی، سعید. (۱۳۹۷). شناسایی و مکان یابی اهداف و تأسیسات زیرزمینی بر پایه داده های مغناطیس سنجی با استفاده از روش های سیگنال تحلیلی، اوپلر و وارون سازی سه بعدی. *مجله علوم و فناوری های پدافند نوین*، ۹(۳)، ۳۶۸-۳۵۹.
- صفایی، صیام، فرهنگیان، مهران، افشاری، سهراب، و کیانپوریان، صادق. (۱۳۹۴). اکتشاف کانسار آهن سنقر با استفاده از داده های ماهواره ای و مغناطیس سنجی. سی و چهارمین کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین.
- علائی، سلیمان، و فودازی مهابادی، محمد. (۱۳۸۵). نقشه زمین شناسی چهارگوش عقدا. سازمان تحقیقات زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- علائی، سلیمان، و فودازی مهابادی، محمد. (۱۳۸۵). گزارش زمین شناسی نقشه چهارگوش عقدا. سازمان تحقیقات زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کلاگری، علی اصغر. (۱۳۸۹). اصول اکتشافات ژئوفیزیکی. جلد ۲، انتشارات مؤلف.

منصوریان، احسان، جانجانی آورزمان، حسین، و نوروزی، غلامحسین. (۱۳۸۷). بررسی اثر آلیازینگ در بهینه سازی شبکه برداشت مغناطیس و تعیین مرز با استفاده از سیگنال تحلیلی. دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران.

Abd-ElHai, M. M., Araffa, S. A. S., Mekkawi, M. M., & ElGalladi, A. A. M. (2023). A reconnaissance study for tracing and ordering new mineralisation zones using integrated remote sensing, GIS, and aeromagnetic techniques, west Allaqi-Heiani-Suture, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 12(1), 19-44.

Abedi, M., Gholami, A., & Norouzi, G. H. (2014). 3D inversion of magnetic data seeking sharp boundaries: a case study for a porphyry copper deposit from Now Chun in central Iran. *Near Surface Geophysics*, 12(5), 657-666.

Ahmadi, R., & Gharah Sheikh Bayat, A. (2021). Integration of remote sensing and magnetometry methods for exploration of iron deposit in the Maragh district of Bandar e Charak. *Iranian Journal of Geology*, 63(63), 1.

Alimohammadi, M., Alirezaei, S., & Kontak, D. J. (2015). Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo–Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews*, 70, 290-304.

Bastani, M., Sadeghi, M., Malehmir, A., Luth, S., & Marsden, P. (2019). 3D magnetic susceptibility model of a deep iron-oxide apatite-bearing orebody incorporating borehole data in Blötberget, Sweden. In *SAGA Biennial Conference & Exhibition, Durban, 6-9 October, 2019*.

Blakely, R., & Cox, A. (1972). Identification of short polarity events by transforming marine magnetic profiles to the pole. *Journal of Geophysical Research*, 77(23), 4339-4349.

Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Del Ventisette, C., & Moretti, S. (2013). Potential use of remote sensing techniques for exploration of iron deposits in Western Sahara and Southwest of Algeria. *Natural resources research*, 22, 179-190.

Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300.

Dutra, A. C., & Marangoni, Y. R. (2009). Gravity and magnetic 3D inversion of Morro do Engenho complex, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 28(2), 193-203.

ElGalladi, A., Araffa, S., Mekkawi, M., & Abd-ElHai, M. (2022). Exploring mineralization zones using remote sensing and aeromagnetic data, West Allaqi Area, Eastern-Desert, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(2), 417-433.

Fadhil Al-Quraishi, A.M., Singh, A.K., & Singh, P.K., (2020). Mapping of ferric (and ferrous iron oxides distribution using band ratio techniques with ASTER data and geochemistry of Kanjamalai and

- Godumalai, Tamil Nadu, south India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, p.100306.
- Faruwa, A. R., Qian, W., Akinsunmade, A., Akingboye, A. S., & Dusabemariya, C. (2021). Aeromagnetic and remote sensing characterization of structural elements influencing iron ore deposits and other mineralization in Kabba, southwestern Nigeria. *Advances in Space Research*, 68(8), 3302-3313.
- Finlay, C. C., Maus, S., Beggan, C. D., Bondar, T. N., Chambodut, A., Chernova, T. A., ... & Zvereva, T. I. (2010). International geomagnetic reference field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1216-1230.
- Ghanati, R., Ghari, H. A., Mirzaei, M., & Hafizi, M. K. (2015). Nonlinear inverse modeling of magnetic anomalies due to thin sheets and cylinders using Occam's method. In *8th Congress of the Balkan Geophysical Society* (Vol. 2015, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Gupta, H. K., & Roy, S. (2006). *Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century*. Elsevier.
- Harimeh, B. (2019). Analysis of Regional Anomaly on Magnetic Data Using the Upward Continuation Method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 279, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.
- Henderson, R. G., & Zietz, I. (1949). The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields. *Geophysics*, 14(4), 517-534.
- Holden, E. J., Fu, S. C., Kovesi, P., Dentith, M., Bourne, B., & Hope, M. (2011). Automatic identification of responses from porphyry intrusive systems within magnetic data using image analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 74(4), 255-262.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (Vol. 4). John Wiley & Sons.
- Keating, P., & Pilkington, M. (2004). Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. *Geophysical prospecting*, 52(3), 165-182.
- Lelievre, P. G., & Oldenburg, D. W. (2006). Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility. *Geophysical Journal International*, 166(1), 76-90.
- Li, M., Zhou, X., Gammons, C. H., Khalil, M., & Speece, M. (2018). Aeromagnetic and spectral expressions of rare earth element deposits in Gallinas Mountains area, Central New Mexico, USA. *Interpretation*, 6(4), T937-T949.
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2), 394-408.
- Li, Y., Shearer, S. E., Haney, M. M., & Dannemiller, N. (2010). Comprehensive approaches to 3D inversion of magnetic data affected by remanent magnetization. *Geophysics*, 75(1), L1-L11.

- Loto'aniu, P. T., Califf, S., Redmon, R. J., & Singer, H. J. (2020). Magnetic field observations from the GOES-R series. In *The goes-r series* (pp. 251-259). Elsevier.
- Maus, S., & Dimri, V. (1996). Depth estimation from the scaling power spectrum of potential fields?. *Geophysical Journal International*, *124*(1), 113-120.
- Mohamed, H., Saibi, H., Bersi, M., Abdelnabi, S., Geith, B., Ismaeil, H., ... & Mizunaga, H. (2018). 3-D magnetic inversion and satellite imagery for the Um Salatit gold occurrence, Central Eastern Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, *11*, 1-18.
- Moradpour, H., Rostami Paydar, G., Pour, A. B., Valizadeh Kamran, K., Feizizadeh, B., Muslim, A. M., & Hossain, M. S. (2022). Landsat-7 and ASTER remote sensing satellite imagery for identification of iron skarn mineralization in metamorphic regions. *Geocarto International*, *37*(7), 1971-1998.
- 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*, *37*(3), 507-517.
- Regan, R. D., & Cain, J. C. (1975). The use of geomagnetic field models in magnetic surveys. *Geophysics*, *40*(4), 621-629.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. T., & Somerton, I. W. (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, *55*(1), 80-91.
- Reid, A. B., & Thurston, J. B. (2014). The structural index in gravity and magnetic interpretation: Errors, uses, and abuses. *Geophysics*, *79*(4), J61-J66.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews*, *14*(3-4), 157-183.
- Salem, S. M., Arafa, S. A., Ramadan, T. M., & El Gammal, E. S. A. (2013). Exploration of copper deposits in Wadi El Regeita area, Southern Sinai, Egypt, with contribution of remote sensing and geophysical data. *Arabian Journal of Geosciences*, *6*, 321-335.
- Salem, A., Green, C., Ravat, D., Singh, K. H., East, P., Fairhead, J. D., ... & Biegert, E. (2014). Depth to Curie temperature across the central Red Sea from magnetic data using the de-fractal method. *Tectonophysics*, *624*, 75-86.
- Shirazi, A., Hezarkhani, A., Shirazy, A., & Shahrood, I. R. A. N. (2018). Remote sensing studies for mapping of iron oxide regions, South of Kerman, Iran. *International Journal of Science and Engineering Applications*, *7*(4), 45-51.
- Spector, A., & Grant, F. S. (1970). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, *35*(2), 293-302.
- Stampolidis, A., Kane, I., Tsokas, G. N., & Tsourlos, P. (2005). Curie point depths of Albania inferred from ground total field magnetic data. *Surveys in Geophysics*, *26*, 461-480.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Thompson, D. T. (1982). EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47(1), 31-37.

Van der Werff, H., & Van der Meer, F. (2016). Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. *Remote sensing*, 8(11), 883.

Yang, J., Liu, S., & Hu, X. (2020). Inversion of high-amplitude magnetic total field anomaly: An application to the Mengku iron-ore deposit, northwest China. *Scientific Reports*, 10(1), 11949.

Yuan, J., & Niu, Z. (2008, June). Evaluation of atmospheric correction using FLAASH. In *2008 International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications* (pp. 1-6). IEEE.

مقاله
فیل
از
استاد
وید استادی نشده

Exploration for iron ore in Marvar deposit using satellite image analysis and magnetic data inversion

Abstract

The ever-increasing demands of the steel industry for iron ore and the reduction in the grade and tonnage of existing large active mines raise the motivation for exploring small-scale or hidden iron deposits. The current research deals with prospecting a case of these deposits in Yazd province. The area is close to Marvar village in Meybod county, with an area of circa 720 m². The rock type in the study area comprises andesite, dacite, and riodacite volcanic rocks with Eocene age. The hematite and magnetite outcrops also mainly occur within the andesites and andesitic tuffs. Therefore, the first step was remote sensing for reconnaissance of the iron oxide zones, and ENVI 5.3 software created false color composites and the band ratios of Aster and Landsat 8 satellite images. The band ratio of 2/1 and 4/2 revealed the ferric iron oxides in the Aster and Landsat 8 images, respectively. In contrast, calculated band ratios of 1/2+5/3 for Aster and 7/5 in Landsat images illustrated the ferrous iron oxide zones. Besides, a false-color composite consisting of R=4, G=6, and B=8 showed the propylitic and argillic alteration zones via green and yellowish-pink colors, respectively. Comparing iron oxides and alteration zones revealed a spatial correlation between propylitic alteration and magnetite mineralization and another correlation between argillic alteration and hematite mineralization. Meanwhile, the magnetic data were processed via subtraction of the IGRF from the magnetic data and removing small and noisy features with a low pass filter of 100 m. Then, an upward continuation to 250 m exposed the regional effects in data. The subtraction of the regional effect from the filtered data gave the residual magnetic anomaly. In addition, the reduction-to-pole filter was also implemented and revealed the actual location of magnetic anomalies. In the next step, calculating the analytical signal of magnetic data in the area illustrated the boundaries of magnetic anomalies. Comparing the analytical signal and iron oxide zone from the remote sensing studies illustrated a significant spatial correlation between the ferrous-iron oxide zones and the magnetic analytical signal. Furthermore, the results of Euler deconvolution and power spectrum techniques indicate that most magnetic sources have a depth of circa 65 meters. Later, the estimated depth was used to define depth weighting in a 3D inversion of the magnetic data. Using Li and Oldenburg's algorithm via UBC Mag3D software, this inversion gave a three-dimensional shape of the magnetic susceptibility distribution in depth. According to the estimated model, the zones with high magnetic susceptibilities commonly occur at 50 to 100 meters depths, and their locations coincide well with the reduced-to-pole magnetic anomalies. Besides, comparing the iron grade of the geochemical analyses along three exploratory core samples confirmed that the zones with the biggest estimated magnetic susceptibilities within the model match the position of high grades of iron along the exploratory wells. Therefore, the area's main type of iron ore is magnetite, not hematite.

Keywords: Remote sensing, Magnetometry, 3D Inversion, Susceptibility, Iron Deposit.