

اکتشاف آهن در محدوده دوشاخ با انجام دورسنجی و مگنتومتري

امیرحسین همتی^۱، سیدمحمد ابطحي فروشانی^۲، حمزه صادقی سرخني^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان a.hemati@iut.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان smabtahi@iut.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان hamzeh.sadeghi@iut.ac.ir

چکیده

در دهه‌های اخیر، کاهش منابع آهنی کم‌عمق و پرعیار، همراه با افزایش تقاضای صنعتی، توجه را به ذخایر کوچک‌تر و عمیق‌تر معطوف کرده است. یکی از این ذخایر در محدوده اکتشافی دوشاخ، واقع در مرز استان‌های اصفهان و یزد، قرار دارد. بررسی‌های میدانی وجود کانی‌سازی آهن از نوع مگنتیت را تأیید کرده‌اند که این یافته‌ها با نتایج مطالعات مغناطیس‌سنجی نیز سازگار است. در این پژوهش، تحلیل داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای ASTER به‌منظور شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی آهن، از طریق تفکیک اکسیدهای آهن فرو و فریک، مورد استفاده قرار گرفت. مرزهای این منابع کانی‌سازی شده با بهره‌گیری از داده‌های مغناطیسی و روش‌های پردازش استاندارد تعیین شدند که وجود آنومالی‌هایی را نشان دادند که به‌صورت موازی با دایک‌های دیابازی گسترش دارند. با انجام وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی، به روش لی و اولدنبرگ، سه توده عمودی با روند شمال شرق-جنوب غرب شناسایی شدند که دارای خودپذیری مغناطیسی بیش از ۰/۰۲۷ در واحدهای SI بوده و ارتباط قابل توجهی با مناطق حاوی اکسیدهای آهن در مطالعات سنجش از دور نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: دورسنجی، مغناطیس‌سنجی، وارون‌سازی سه‌بعدی، اکتشاف آهن.

Iron exploration in Doshakh area via remote sensing and magnetometry

Amirhosein Hemati ¹, Sayyed Mohammad Abtahi Forooshani ², Hamzeh Sadeghi Sorkhani ³

¹ Master's student, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, a.hemati@mi.iut.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, smabtahi@iut.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, hamzeh.sadeghi@iut.ac.ir

ABSTRACT

In recent decades, the reduction of shallow and high-grade iron resources and increasing industrial demand have shifted focus to smaller, deeper deposits. One such deposit is in the Doshakh exploratory area, located on the border of Isfahan and Yazd provinces. Field surveys confirm the presence of magnetite-type iron mineralization, supported by a magnetic survey. This study utilized remote sensing analysis of ASTER data to identify potential zones of iron mineralization by detecting ferrous and ferric iron oxides. The boundaries of these mineralized sources were established using magnetic data and standard processing techniques, revealing anomalies that extend parallel to diabase dikes. A three-dimensional inversion of the magnetic data, using the Lee and Oldenburg method, identified three vertical bodies oriented northeast-southwest, with magnetic susceptibilities exceeding 0.027 SI units, which correlate significantly with iron oxide locations in the remote sensing surveys.

Keywords: Remote sensing, Magnetometry, 3D Inversion, Iron Exploration.

۱- مقدمه

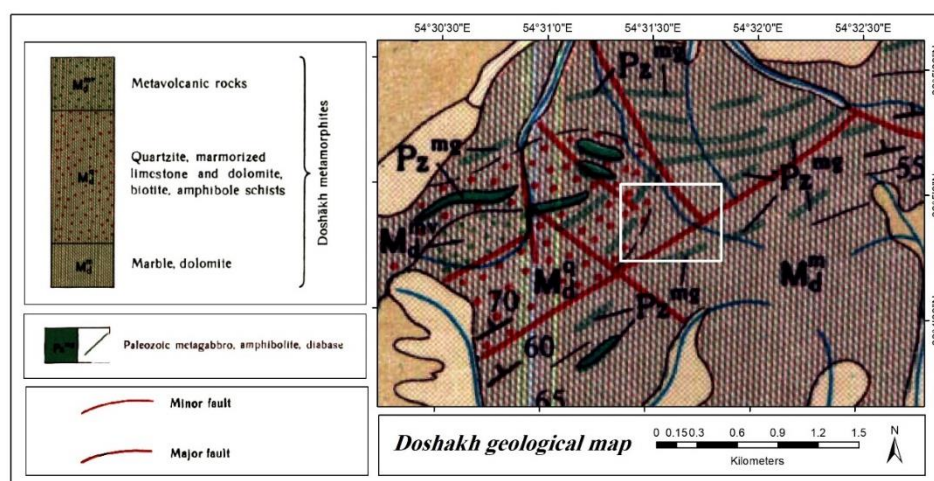
استفاده از داده‌های مغناطیسی در اکتشافات کانسارهای آهن، بیش از یک قرن سابقه دارد [۱]. اما با توجه به عدم یکتایی مدل‌های مغناطیسی، همواره احتمال دارد که تفسیر مدل‌های مغناطیسی به ارائه مدل‌های غیر منطبق با زمین شناسی منجر شود [۲]. برای رفع این مشکل، لازم است از تفسیر سایر داده‌های اکتشافی موجود نظیر تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های دورسنجی برای ارائه تفسیر صحیح و دقیق مدل‌های خودپذیری مغناطیسی استفاده شود. همگام با این رویکرد اکتشافی در سطح جهانی، در ایران نیز محققان در دهه اخیر به طور جدی به استفاده از روش یاد شده روی آورده‌اند. به عنوان مثال، صفایی و همکاران با پردازش تصاویر استر در محدوده کانسار آهن سنقر، موقعیت اکسیدهای آهن را مشخص کرده و با انجام روش مغناطیس‌سنجی و پردازش‌های رایج آن محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را شناسایی کردند. بر اساس پژوهش یاد شده، نتیجه مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی انطباق قابل توجهی با نتایج حفاری نشان داد [۳]. احمدی و قره شیخ بیات نیز با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای استر مناطق با پتانسیل کانی‌سازی آهن در منطقه مرق بندر چارک در استان هرمزگان را شناسایی کردند. آنها در ادامه با استفاده از داده‌های مغناطیسی برداشت شده جهت مدل کردن خودپذیری مغناطیسی محدوده مورد مطالعه اقدام به وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی نموده و بر اساس آن نقاطی را جهت حفاری پیشنهاد دادند [۴]. در همین راستا، فاتحی و همکاران با استفاده از این روش اقدام به تفسیر و مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی منطقه مروارید زنجان کرده‌اند و هم چنین اعتبار نتایج را با داده‌های حاصل از حفاری اکتشافی سنجیده‌اند [۵]. سخائیان و همکاران با استفاده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی در کانسار مگنتیتی مرور در استان یزد توانستند محدوده و عمق کانی‌سازی را مشخص کنند آنها توانستند با انجام حفاری اکتشافی بر اساس مدل سه‌بعدی نتایج مدل‌سازی وارون را با عیارهای بالا آهن در طول چاه‌های اکتشافی مقایسه کنند و نشان دهند بیشینه خودپذیری مغناطیسی در مدل به دست آمده انطباق معناداری با با کانی‌سازی مگنتیت مشاهده شده در گمانه‌ها دارد [۶]. به این ترتیب به نظر می‌رسد که استفاده از تفسیر توام داده‌های دورسنجی و مغناطیسی براساس پژوهش‌های یاد شده برای اکتشافات کانسارهای آهن مگنتیتی مفید است .

در پژوهش حاضر نیز با استفاده از تفسیر توام داده‌های دورسنجی و مغناطیسی، به اکتشاف کانسار آهن مگنتیتی در محدوده دوشاخ، واقع در مرز شهرستان اردکان و شهرستان نایین پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای استر زون‌های مرتبط با اکسیدهای آهن فریک، فروس و زون‌های دگرسانی در محدوده مشخص شدند. سپس پردازش داده‌های مغناطیسی موجود در محدوده انجام شد و مرزهای بی‌هنجاری مغناطیسی تعیین گردید. همچنین شکل و گسترش عمقی منابع مغناطیسی با وارون‌سازی داده‌های پردازش شده تخمین زده شد. در ادامه مراحل یاد شده به ترتیب شرح داده می‌شوند.

۲- زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

منطقه اکتشافی دوشاخ از نظر ساختاری در زون ایران مرکزی واقع شده است. مجموعه سنگی این محدوده عمدتاً شامل سنگ‌هایی است که تحت دگرگونی رخساره شیست سبز قرار گرفته‌اند و به سه واحد اصلی قابل تفکیک هستند.

شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی محدوده دوشاخ را نمایش می‌دهد. بر اساس این نقشه، سنگ‌های دگرگونی بخش عمده‌ای از سطح منطقه را پوشانده‌اند و سنگ‌های رسوبی دگرگون‌شده، از جمله مرمر و کوارتزیت، واحدهای غالب را تشکیل می‌دهند. همچنین، آثار متنوعی از شیست‌های مختلف، از جمله بیوتیت شیست تا آمفیبولیت شیست، در منطقه مشاهده می‌شود. علاوه بر این، حضور سنگ‌های آتشفشانی دگرگون‌شده در منطقه قابل توجه است. رخنمون‌های پراکنده سنگ‌های مافیک، با امتداد غالب شمال‌شرق-جنوب‌غرب، در سطح منطقه چشمگیر هستند. این دایک‌ها عمدتاً از متاگابرو، آمفیبولیت و دیاباز پالئوزوئیک تشکیل شده‌اند که تحت دگرگونی رخساره شیست سبز قرار گرفته‌اند. در بخش‌های جنوب‌غربی تا شمال‌شرقی منطقه، یک گسل اصلی و سیستم گسل‌های منشعب از آن به سمت شمال‌غربی توسعه یافته‌اند. این گسل‌ها میزبان توده‌های کوچک سرپانتینی با سن نامشخص هستند.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه. محدوده مورد مطالعه با مستطیل سفید مشخص شده است.

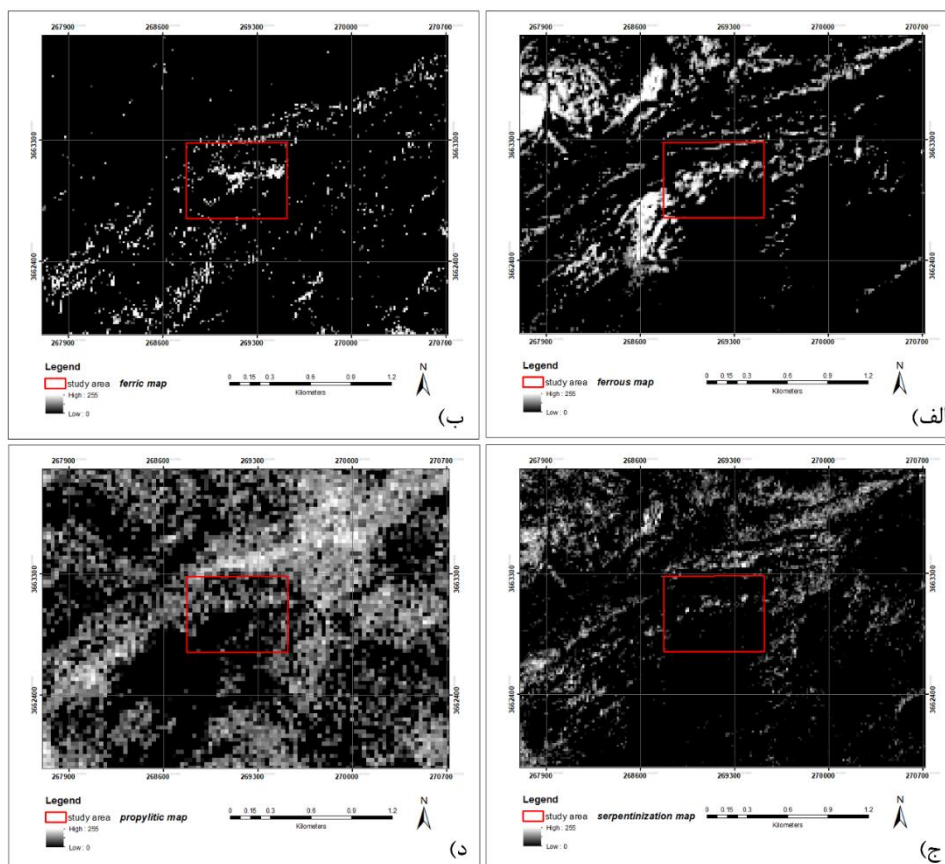
۳- دورسنجی

طیف الکترومغناطیسی نور خورشید هنگام برخورد با مواد سطح زمین می‌تواند سه رفتار انعکاس، جذب یا عبور از ماده را نشان دهد. هر کانی در مواجهه با طیف الکترومغناطیسی، پاسخ منحصر به فردی ارائه داده و منحنی طیفی خاص خود را تولید می‌کند [۷]. این تفاوت‌های طیفی امکان تفکیک کانی‌ها را فراهم می‌آورد. در فرآیند تشکیل برخی کانسارهای آهن، محلول‌های گرمایی حاصل از کانی‌سازی می‌توانند تا فواصل قابل توجهی در سنگ میزبان نفوذ کرده و دگرسانی‌هایی در اطراف کانسار ایجاد کنند. بنابراین، با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان این مناطق دگرسانی را شناسایی کرد [۸].

در مطالعات دورسنجی محدوده دوشاخ، از تصاویر سنجنده ASTER استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای پس از جمع‌آوری و ارسال به زمین، به دلیل عوامل مختلفی همچون تأثیر اتمسفر (ابرها، پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی)، توپوگرافی سطح زمین و تولید انرژی گرمایی توسط سنجنده، دارای خطاهای رادیومتریک هستند که منجر به ثبت مقادیر طیفی غیرواقعی می‌شود. در مرحله پیش‌پردازش، جهت حذف این خطاها از فیلتر log residuals استفاده شد [۹].

یکی از روش‌های متداول در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، نسبت‌بندی باندی است. در این روش، با شناخت ویژگی‌های طیفی کانی‌ها، باند دارای بیشترین میزان انعکاس بر باند دارای بیشترین میزان جذب آن کانی تقسیم می‌شود. این تکنیک به‌ویژه برای تفکیک مناطق دگرسانی و شناسایی اکسیدهای آهن کارآمد است [۱۰]. آهن فرو (Fe^{2+}) و آهن فریک (Fe^{3+}) در کانی‌های حاوی اکسید آهن، در محدوده طیفی VNIR و نزدیک طول موج ۱ میکرومتر، ویژگی‌های طیفی خاصی از خود نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، گوئیت و هماتیت در حدود طول موج ۰/۷ میکرومتر دارای بازتاب بوده، درحالی‌که گوئیت در ۰/۵، ۰/۵۵ و ۰/۹ میکرومتر ویژگی جذب دارد [۱۱]. همچنین، کانی‌های دگرسانی پروپلیتیک نظیر کلریت، اپیدوت و کلسیت، که حاوی بنیان‌های Fe-OH و Mg-OH هستند، در حدود ۲/۳۵ میکرومتر جذب و در حدود ۲/۲۳ و ۲/۴۳ میکرومتر بازتاب نشان می‌دهند [۱۲].

شکل ۲ نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای را نمایش می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بالای آهن فریک و آهن فرو در محدوده مورد مطالعه، امتدادی در راستای جنوب‌غرب-شمال‌شرق دارند. همچنین، دگرسانی سرپانتینی با نواحی دارای آهن فرو هم‌پوشانی داشته و از همان روند پیروی می‌کند. در اطراف مناطق دارای اکسید آهن، زون دگرسانی پروپلیتیک با گستره وسیع مشاهده می‌شود که در بسیاری از ذخایر ماگمایی و گرمابی قابل شناسایی است.

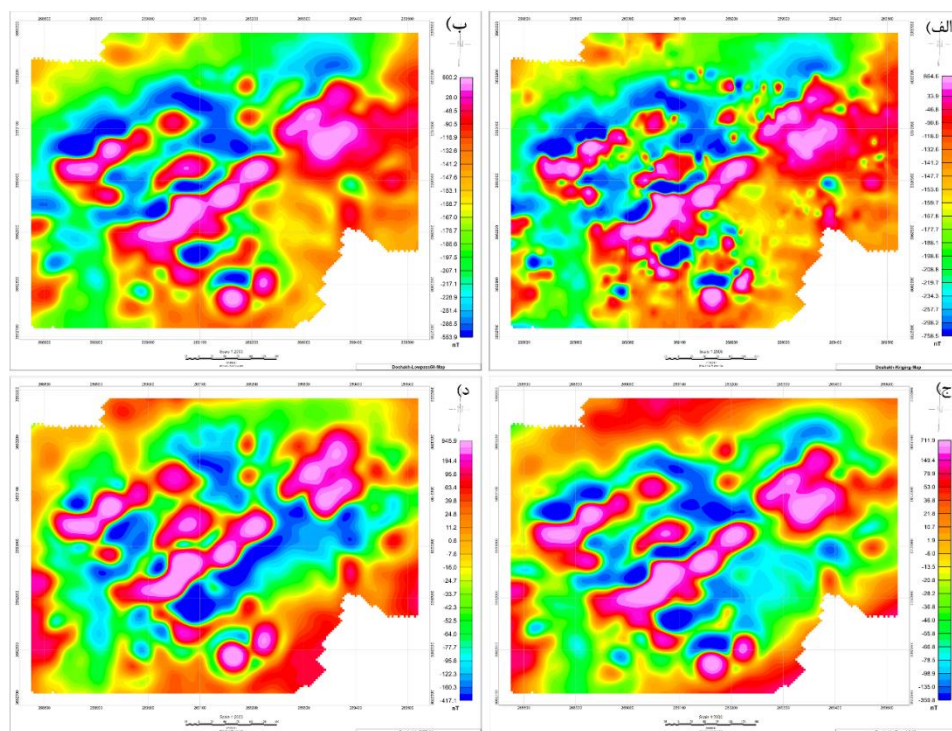


شکل ۲: الف) آهن فرو با نسبت باندی ۱/۲+۵/۳ ب) آهن فریک با نسبت باندی ۱/۲ ج) سرپانتین با نسبت باندی ۴/۶ د) دگرسانی پروپلیتیک با نسبت باندی ۷+۹/۸



۴- مغناطیس‌سنجی

در محدوده دوشاخ، برداشت مغناطیس‌سنجی به صورت زمینی، در پروفیل‌های عمود بر ساختار زمین‌شناسی منطقه با شبکه برداشت مستطیلی 10×20 متر برداشت شده است. در این برداشت از دستگاه مگنتومتر پروتون استفاده شده است. با توجه به تغییرات شدت میدان مغناطیسی ناشی از خورشید و رانه دستگاه، میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در اثر عواملی غیر از منابع مغناطیسی زمین تغییر می‌کند که این تغییرات باید از داده‌ها حذف شوند. برای اینکار عموماً از یک ایستگاه مبنا استفاده می‌شود [۱۳]. در برداشت داده‌های مغناطیسی دوشاخ نیز از وجود یک دستگاه گیرنده مغناطیسی دیگر از همان برند در یک ایستگاه مبنا به منظور تصحیح اثر شبانه روزی استفاده شده است. همچنین داده‌های پرت نیز حذف شد. برای تعیین بی‌هنجاری ناشی از سنگ‌های پوسته زمین، باید شدت میدان مغناطیسی مرجع زمین (IGRF) که عمدتاً ناشی از همرفت در هسته خارجی مایع زمین است، حذف گردد [۱۴]. به این منظور، مقدار یاد شده مکان و زمان برداشت داده‌ها در محدوده دوشاخ 48054 nT بود که از همه داده‌های تصحیح شده در مراحل قبل کاسته شد. شکل ۳ الف داده‌های باقی مانده را نشان می‌دهد. بر اساس شکل یاد شده، تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقی مانده پس از حذف IGRF بازه‌ای بین $+864$ تا -758 نانوتسلا می‌باشد. جهت‌گیری روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، جهت تقریبی شمال شرقی به جنوب غربی را نشان می‌دهد که کاملاً مشابه امتداد کلی دایک‌های نمایش داده شده در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱ می‌باشد. در ادامه، با هدف حذف پدیده‌های کوچک سطحی، توده‌هایی با ابعاد کوچک‌تر از 50 متر با استفاده از فیلتر پایین‌گذر حذف شده (شکل ۳ ب) که به این ترتیب شدت میدان مغناطیسی داده‌های پردازش شده به $+711$ تا -359 نانوتسلا رسیده است. علاوه بر این، لازم است که اثر ناحیه‌ای موجود در محدوده که مرتبط به منابع مغناطیسی حاضر در آن نیست نیز حذف شود [۱۵]. برای مثال در شکل ۳ ب، یک روند کلی کاهش میدان مغناطیسی از جنوب شرق به شمال غرب قابل مشاهده است. برای حذف این اثر، از برازش چندجمله‌ای درجه سوم استفاده گردیده است و روند یاد شده از داده‌ها حذف شده است (شکل ۳ ج).



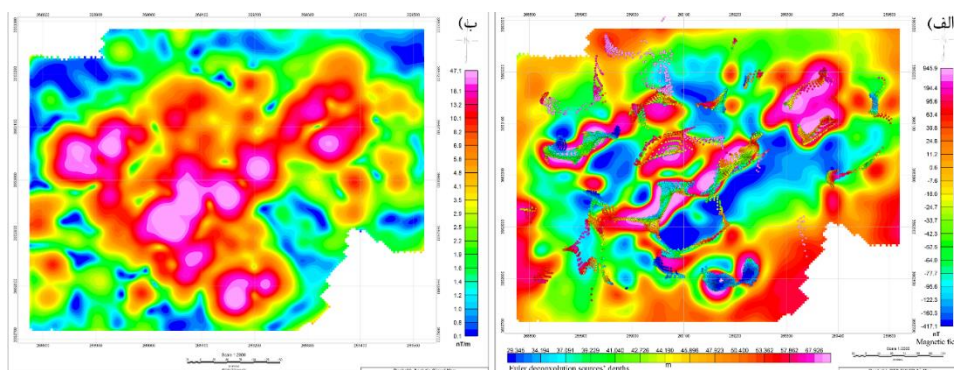
شکل ۳: الف) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی بعد از کم کردن مقدار IGRF (ب) نقشه میدان مغناطیسی پس از فیلتر پایین‌گذر ۵۰ متری (ج) نقشه میدان مغناطیسی بعد از حذف اثر ناحیه‌ای (د) نقشه برگردان به قطب

به دلیل وجود زاویه میل و انحراف مغناطیسی و تغییرات آنها با طول و عرض جغرافیایی، آنومالی‌های مغناطیسی به صورت متقارن بر محل منابع مغناطیسی زیر سطحی واقع نمی‌شوند و این امر تفسیر داده‌های مغناطیسی را دشوار می‌نماید. برای حل این مشکل از پردازش برگردان به قطب (RTP) استفاده می‌شود. در این پردازش، عملاً فرض می‌شود که منابع مغناطیسی در قطب شمال مغناطیسی زمین قرار دارند و با توجه به زاویه میل ۹۰ درجه‌ای میدان مغناطیسی در قطب، بی‌هنجاری‌های به دست آمده از این پردازش نسبت به محل منابع مغناطیسی متقارن خواهند شد [۱۶]. در محدوده اکتشافی دوشاخ نیز میزان زاویه میل و انحراف مغناطیسی در زمان برداشت داده‌ها به ترتیب ۴/۰۸ درجه و ۵۱/۷۱ درجه بودند که با انجام پردازش RTP اثر آنها حذف شده و بی‌هنجاری مغناطیسی به صورت متقارن بر محل منابع مغناطیسی زیر سطحی قرار گرفت (شکل ۳د). با این پردازش شدت بی‌هنجاری‌ها تغییر کرد و بین ۹۴۵+ تا ۴۱۷- نانوتسلا قرار گرفت.

برای تخمین عمق توده‌های مغناطیسی شناسایی شده از واهمامیخت سه‌بعدی اوپلر استفاده شد. این روش بر مبنای محاسبات مشتقات میدان در جهات سه‌گانه مختصاتی انجام می‌شود. در این روش، منبع مغناطیسی یک شکل هندسی فرض می‌شود و برای شکل‌های مختلف نظیر کره، صفحه نازک و استوانه قائم، یک اندیس ساختاری تعریف می‌شود [۱۷]. با توجه به شکل آنومالی‌های موجود در محدوده می‌توان فرض کرد که شکل هندسی توده‌ها بصورت عدسی با کشیدگی در راستای گسل اصلی محدوده می‌باشد که چیزی بین استوانه افقی و کره خواهد بود. با توجه به اینکه در روش واهمامیخت اوپلر برای داده‌های مغناطیسی اندیس ساختاری استوانه برابر ۲ و اندیس ساختاری کره برابر ۳ است [۱۸].

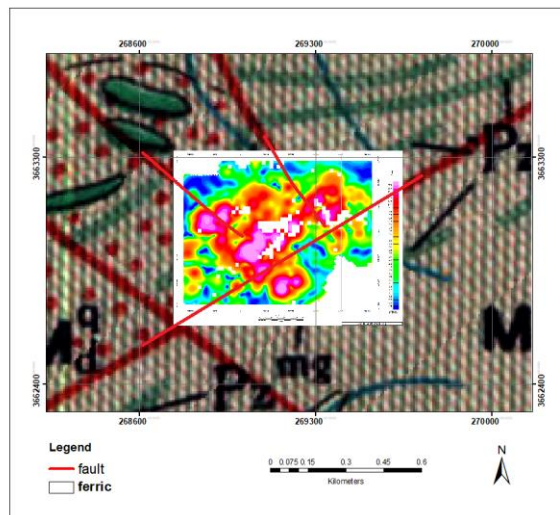
از اندیس ساختاری ۲/۵ جهت تخمین عمق توده‌های مغناطیسی محدوده با پنجره های ۵×۵ برای تخمین اعماق منابع استفاده شد. شکل ۴ الف نقشه برگردان به قطب شکل ۳ ج را به همراه محل و عمق منابع مغناطیسی تخمین زده شده را نشان می‌دهد. بر اساس شکل یاد شده، منابع مغناطیسی تخمین زده شده موجود در محدوده دارای بیشینه و متوسط عمق به ترتیب برابر ۶۰ و ۴۰ متر می‌باشند.

سیگنال تحلیلی از دیگر نشانگرهایی است که برابر ریشه حاصل جمع مربعات مشتقات افقی و عمودی میدان مغناطیسی می‌باشد. این نشانگر مستقل از جهت زاویه میل و انحراف مغناطیسی بوده و محل توده‌ها بی‌هنجار را فارغ از اینکه نسبت به زمینه دارای خودپذیری مغناطیسی بیشتر یا کمتری باشند مشخص می‌کند [۱۹]. سیگنال تحلیلی، با توجه به اینکه مقادیر حداکثری را مستقیماً بر روی لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تولید کرده، شناسایی مرزها و حدود بی‌هنجاری‌ها را آسان تر کرده است (شکل ۴ ب). محاسبه سیگنال تحلیلی وجود چندین روند موازی بی‌هنجاری را تایید کرده که همگی به موازات جهت‌گیری دایک‌های دیابازی در نقشه زمین شناسی شکل ۱ می‌باشند.



شکل ۴: مقایسه نقشه زمین شناسی شکل ۱ با نقشه مغناطیسی سیگنال تحلیلی شکل ۴ ب و نتایج دورسنجی آهن فریک در شکل ۲ الف

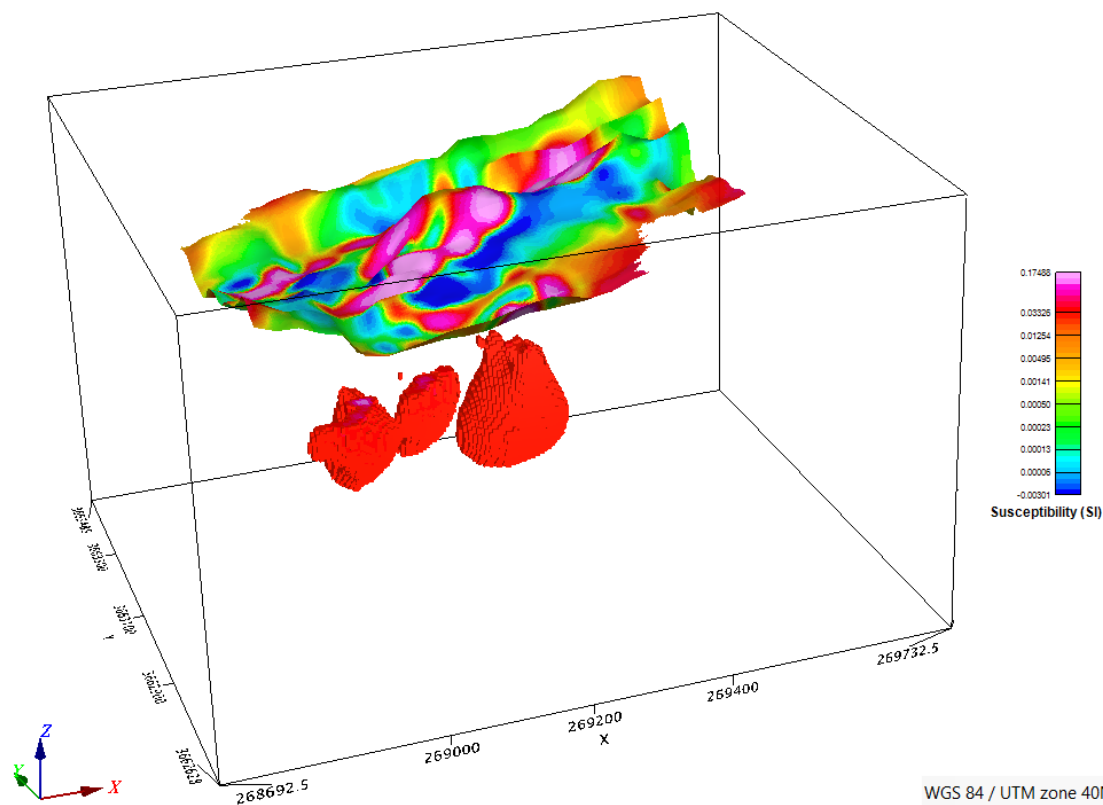
با هدف بررسی انطباق نتایج دورسنجی و مغناطیس سنجی، نقشه سیگنال تحلیلی در شکل ۴ ب با نقشه گسترش توزیع آهن فریک در شکل ۲ الف مقایسه شد. نتایج حاصل از مقایسه لایه‌های دورسنجی و مغناطیس همبستگی فضایی معناداری بین اکسید آهن و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را نشان می‌دهد (شکل ۵). گسل‌های موجود در نقشه زمین شناسی با مقدار کمی جابجایی منطبق بر گسل‌های استخراج شده از داده‌های مغناطیس می‌باشند. این جا به جایی ناچیز نیز احتمالاً به دلیل مقیاس کوچک نقشه زمین شناسی است که دقت آن را کاهش داده است و یا گسل‌ها به صورت شیب دار هستند که در نتیجه محل آنها در سطح زمین و اعماق مغناطیسی مقداری متفاوت خواهد بود.



شکل ۵: نقشه زمین شناسی شکل ۱ با نقشه مغناطیسی سیگنال تحلیلی شکل ۴ ب و نتایج دورسنجی اکسید آهن فریک در شکل ۲ الف

۵- وارون سازی معکوس سه بعدی

پس از پردازش داده و مشخص شدن موقعیت مکانی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، برای تعیین شکل و گسترش عمقی بی‌هنجاری‌های مشاهده شده اقدام به وارون سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی شد. به دلیل ماهیت عدم یکتایی منبع داده‌های مغناطیسی، در وارون سازی سه بعدی چندین مدل آزمایشی ساخته می‌شود و در نهایت مدلی با خطای کم که بیشترین انطباق را با انتظارات زمین شناسی و داده‌های اکتشافی موجود دارد به عنوان مدل نهایی انتخاب می‌شود [۲۰]. برای انجام وارون سازی داده‌های مغناطیسی باقی‌مانده شکل ۳ ج، از نرم افزار UBC Mag 3D که بر اساس الگوریتم غیر خطی لی و اولدنبرگ وارون سازی را انجام می‌دهد، استفاده شد [۲۱]. در این مدل سازی زمین به بلوک‌های مکعب مستطیلی با عمق و ابعاد مشخص که مش نامیده می‌شوند تقسیم می‌شود. عمق و مکان هر بلوک از پیش مشخص بوده و وارون سازی، مقدار خودپذیری در هر بلوک تخمین زده می‌شود. در این پژوهش، از $175 \times 148 \times 122$ بلوک برای ساخت مش استفاده شد که ابعاد بلوک‌ها در محدوده برداشت داده‌ها $5 \times 5 \times 2/5$ متر می‌باشد. علاوه بر محدوده داده برداری، برای در نظر گرفتن تاثیر توده‌های خارج از محدوده برداشت داده‌ها، تعداد ۱۰ لایه بلوک در جهت جانبی اضافه شد. این لایه‌ها به تدریج با نزدیک شدن به مرزهای جانبی و کف مش ابعاد آنها افزایش پیدا می‌کند. تغییرات خودپذیری مغناطیسی مدل بین صفر تا ۱ در واحد SI محدود شد و مدل اولیه و مدل مرجع به صورت یک نیم فضا به ترتیب با خودپذیری‌های ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ در واحد SI تعریف شدند. با انجام وارون سازی، مدل نهایی پس از ۴۲ تکرار با خطای ریشه میانگین مربعات عدم انطباق با داده‌های اندازه‌گیری شده (RMS misfit) برابر ۱/۲۴ به دست آمد. شکل ۶ مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده را برای مقادیر بالاتر از ۰/۲۷ در واحد SI را نشان می‌دهد.



شکل ۶: مدل سه‌بعدی خودپذیری مغناطیسی برای مقادیر بالاتر از ۰/۰۲۷ در واحد SI

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، دورسنجی و ژئوفیزیک منجر به شناسایی زون‌های آهن شد. این نتیجه بعد از انجام تصحیحات و پردازش‌های صورت گرفته بر روی داده‌های دورسنجی، مغناطیس‌سنجی و تعیین ویژگی‌های مختلف کانسار و تصمیم‌گیری درباره آنها بدست آمده است. با توجه به مشاهدات نقشه زمین‌شناسی، دوره تشکیل آهن لحاظ سنی در بازه پروتروزوئیک بالایی - پالئوزوئیک پایینی بوده است. به طور کلی، احتمال می‌رود که گسل اصلی جنوب‌غربی-شمال‌شرقی و دایک‌های دیابازی که به موازات آن گسل هستند عامل اصلی کنترل‌کننده کانی‌سازی در محدوده دوشاخ باشند. روند آهن فرو، فریک و سرپانتین زایی در تصاویر ماهواره‌ای کاملاً منطبق بر بی‌هنجاری‌های داده‌های مغناطیسی برداشت شده است. همچنین در داده‌های ماهواره‌ای با پردازش‌های صورت گرفته گستره زون دگرسانی پروپیلیتیک دیده می‌شود که این دگرسانی‌ها ناشی از نفوذ محلول‌های گرمابی در سنگ‌های اطراف محدوده در زمان کانی‌سازی هستند. نکات یاد شده به همراه در نظر گرفتن توده‌های با خودپذیری بالاتر که تا عمق ۶۰ متری گسترش یافته‌اند احتمالاً نشانگر وجود یک توده آذرین نفوذی عمیق‌تر است که دایک‌های یاد شده آن توده را قطع کرده‌اند. احتمالاً همان توده سبب اصلی وقوع دگرگونی شدید در سنگ‌های کربناته و آشفشانی سطحی بوده است. با توجه به کاهش خودپذیری مغناطیسی در عمق، احتمال وجود اسکارن آهن قابل بررسی است. بنابراین انجام برداشت‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی برای مشخص شدن نوع و گسترش این کانی‌سازی

احتمالی پیشنهاد می‌شود. همچنین حفر گمانه‌های اکتشافی قائم با عمق بیش از صد متر در محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی برای بررسی وجود کانه زایی فلزی در عمق پیشنهاد می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Hanna, W. F.; "Geologic Applications of Modern Aeromagnetic Surveys: Proceedings of the US Geological Survey Workshop on Geologic Applications of Modern Aeromagnetic Surveys, Held January 6-8, 1987, in Lakewood, Colorado (no.1918-1924)", US Government Printing Office, 1990.
- [2] Lelievre, P. G.; Oldenburg, D. W.; "Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility", *Geophysical Journal International*, vol. 166, no. 1, pp. 76-90, 2006.
- [۳] صفایی، صیام؛ فرهنگیان، مهران؛ افشاری، سهراب؛ کیانپوریان، صادق؛ "اکتشاف کانسار آهن سنقر با استفاده از داده‌های ماهواره ای و مغناطیس سنجی"، *کنگره بین‌المللی تخصصی علوم و زمین*. ۱۳۹۴.
- [۴] احمدی، رضا؛ قره‌شیخ بیات، عبدالرضا؛ "تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس سنجی به منظور اکتشاف کانسار آهن در گستره مراغ بندرچارک"، *زمین‌شناسی ایران*، ش ۵۹، ص ۴۹ تا ۶۷، ۱۴۰۰.
- [۵] فاتحی، مسلم؛ نوروزی، غلامحسین؛ اصغری، امید؛ حاجی‌ئی، فاطمه؛ "مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی معدن مروارید زنجان و اعتبارسنجی آن با داده‌های حفاری اکتشافی"، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ش ۲، ص ۵۶ تا ۶۹، ۱۳۹۳.
- [۶] سخائیان، فراز؛ ابطحی فروشانی، سید محمد؛ صادقی سرخنی، حمزه؛ قاسمی پور، یونس؛ "اکتشاف کانه آهن مگنتیتی در کانسار مَرور با استفاده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی"، *فیزیک زمین و فضا*، ش ۲، ص ۳۰۵ تا ۳۲۱، ۱۴۰۳.
- [7] Di Tommaso, I.; Rubinstein, N.; "Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiermillo porphyry deposit, Argentina", *Ore Geology Reviews*, vol. 32, no. 1-2, pp. 275-290, 2007.
- [8] Gupta, R. P.; "Remote Sensing Geology", Springer, 2017.
- [9] Richards, J. A.; "Remote Sensing Digital Image Analysis", 6th ed., Springer, 2022.
- [۱۰] دایی جواد، حجت‌اله؛ اسدی هارونی، هوشنگ؛ طباطبایی، سیدحسن؛ "تلفیق داده‌های اکتشافی در محدوده اندیس مس - طلا پورفیری دالی با استفاده از منطق فازی جهت تعیین نقاط حفاری"، *کنفرانس مهندسی معدن ایران*، ۱۳۸۷.
- [11] Bedini, E.; "Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data", *Advances in Space Research*, vol. 47, no. 1, pp. 60-73, 2011.
- [12] Pour, A. B.; Hashim, M.; "Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran", *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 42, no. 6, pp. 1309-1323, 2011.
- [13] Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I.; "An Introduction to Geophysical Exploration", 3rd ed., Wiley-Blackwell, 2002.
- [14] Maus, S.; Macmillan, S.; Lowes, F.; Bondar, T.; "Evaluation of candidate geomagnetic field models for the 10th generation of IGRF", *Earth, Planets and Space*, vol. 57, no. 12, pp. 1173-1181, 2005.
- [15] Harime, B.; "Analysis of Regional Anomaly on Magnetic Data Using the Upward Continuation Method", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 279, no. 1, p. 012037, 2019.
- [16] Bilim, F.; Ates, A.; "Analytic Signal Inferred from Reduced to the Pole Data", *Journal of the Balkan Geophysical Society*, vol. 6, no. 2, pp. 66-74, 2003.
- [17] Reid, A. B.; Allsop, J. M.; Graner, H.; Millett, A. J.; Somerton, I. W.; "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution", *Geophysics*, vol. 55, no. 1, pp. 80-91, 1990.

[۱۸] سیف، محمدرضا؛ محمدزاده مقدم، محمد؛ میرزایی، سعید؛ "شناسایی و مکان یابی اهداف و تاسیسات زیرزمینی بر پایه داده های مغناطیس سنجی با استفاده از روش های سیگنال تحلیلی، اوپلر و وارون سازی سه بعدی"، علوم و فناوری پدافند نوین (علوم و فناوری های پدافند غیر عامل)، ش ۳، ص ۳۵۹ تا ۳۶۸، ۱۳۹۷.

[19] Trivedi, S.; Kumar, P.; Parija, M. P.; Biswas, A.; "Global Optimization of Model Parameters from the 2-D Analytic Signal of Gravity and Magnetic Anomalies Over Geo-Bodies with Idealized Structure", in Advances in Modeling and Interpretation in Near Surface Geophysics, pp. 189-221, 2020.

[20] Li, Y.; Oldenburg, D. W.; "3-D inversion of magnetic data", Geophysics, vol. 61, no. 2, pp. 394-408, 1996.

[21] Li, Y.; Oldenburg, D. W.; "Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method", Geophysical Journal International, vol. 152, no. 2, pp. 251-265, 2003.