

تحلیل و تفسیر ساختارهای زیرسطحی با استفاده از تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، مغناطیس‌سنجی و دورسنجی در محدوده اکتشافی شرق نهبندان

امیرعباس محمودزاده^{۱*}، ارسلان مختاری^۲

۱- کارشناسی ارشد اکتشاف مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ amirabbas.mahmoudzadeh@mi.iut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد اکتشاف مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ a.mokhtari@mi.iut.ac.ir

خلاصه

در محدوده شرق نهبندان، به دلیل حضور ساختارهای زمین‌شناسی مؤثر در کانه‌زایی، انجام مطالعات جامع و یکپارچه اکتشافی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، با تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، مغناطیس‌سنجی و دورسنجی، به شناسایی و تفسیر ساختارهای زیرسطحی و بررسی الگوی هندسی و تکتونیکی منطقه پرداخته شده است. داده‌های مغناطیسی به منظور آشکارسازی بی‌هنجاری‌ها و ساختارهای پنهان زیرسطحی پردازش و تفسیر گردید و هم‌زمان، داده‌های دورسنجی برای استخراج خطواره‌ها، واحدهای لیتولوژیکی و زون‌های دگرسانی سطحی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های زمین‌شناسی نیز به عنوان مبنای کنترل و انطباق نتایج حاصل از روش‌های ژئوفیزیکی و دورسنجی به کار رفتند.

نتایج تلفیق داده‌ها و مدل‌سازی اهداف اکتشافی نشان می‌دهد که محدوده شرق نهبندان از پتانسیل قابل توجهی برای کانه‌زایی اپی‌ترمال مس-طلا برخوردار است. چندین زون امیدبخش کانه‌زایی در منطقه شناسایی شد که هم‌پوشانی مناسبی با آنومالی‌های مغناطیسی دارند. تمرکز این آنومالی‌ها عمدتاً در امتداد و یا مجاورت گسل‌های اصلی منطقه مشاهده می‌شود که بیانگر نقش کنترل‌کننده ساختارهای تکتونیکی در هدایت سیالات و تمرکز کانه‌زایی است. همچنین نتایج پردازش و وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی، هندسه و موقعیت توده‌های زیرسطحی با خودپذیری مغناطیسی را مشخص نموده و تداوم پتانسیل کانه‌زایی در اعماق را تأیید می‌کند. مجموعه نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای اولویت‌بندی اهداف برنامه‌ریزی مراحل بعدی اکتشاف معدنی در محدوده شرق نهبندان فراهم آورد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، مغناطیس‌سنجی، دورسنجی، زمین‌شناسی، شرق نهبندان

۱. مقدمه

مس و طلا به عنوان دو عنصر فلزی راهبردی، نقش مهمی در توسعه صنعتی، اقتصادی و فناوری کشورها ایفا می‌کنند. رشد روزافزون صنایع برق و الکترونیک، خودروسازی و ساخت‌وساز از یک‌سو، و جایگاه ویژه طلا به عنوان فلزی گران‌بها و ذخیره اقتصادی از سوی دیگر، موجب افزایش تقاضا برای ذخایر مس و طلا شده و در نتیجه ضرورت شناسایی و اکتشاف ذخایر جدید در پهنه‌های مستعد معدنی را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این راستا، بهره‌گیری از روش‌های نوین اکتشافی از جمله دورسنجی و ژئوفیزیک، نقش مؤثری در کاهش ریسک اکتشاف و افزایش دقت در تعیین محل، گستره و هندسه توده‌های معدنی ایفا می‌کند. دورسنجی با فراهم‌سازی اطلاعات طیفی و مکانی گسترده، امکان شناسایی واحدهای سنگی، ساختارهای زمین‌شناسی و پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی مس و طلا را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌سازد و به عنوان ابزاری کارآمد در مرحله شناسایی اولیه مناطق امیدبخش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کنار آن، در میان روش‌های

ژئوفیزیکی، مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های متداول و مؤثر در اکتشاف کانسارهای فلزی مانند مس و طلا، به‌شمار می‌رود. حضور کانی‌های مغناطیسی مانند مگنتیت و نیز تغییرات مغناطیسی ناشی از فرایندهای دگرسانی گرمایی، سبب ایجاد ناهنجاری‌های مغناطیسی قابل توجه در داده‌های برداشت‌شده می‌شود که امکان بررسی و تفسیر ویژگی‌هایی نظیر گستره جانبی، ژرفا، هندسه و الگوی ساختاری توده‌های کانه‌دار مس و طلا را فراهم می‌سازد [۱] [۲].

سرعت بالا و هزینه کمتر این روش نسبت به برخی روش‌های دیگر، از عوامل اصلی گسترش استفاده از روش‌های دورسنجی و مغناطیس‌سنجی در مطالعات اکتشافی است. با پیشرفت روش‌های پردازش سیگنال و توسعه الگوریتم‌های اینورژن و مدل‌سازی سه‌بعدی، تفسیر داده‌های مغناطیسی از سطح توصیف کیفی آنومالی‌ها فراتر رفته و امکان بازسازی مدل‌های سه‌بعدی واقع‌بینانه‌تری از زیرسطح فراهم شده است. این مدل‌ها می‌توانند تصویر نسبتاً دقیقی از موقعیت، شکل، ابعاد و ژرفای توده‌های مغناطیسی ارائه دهند و در نتیجه، برنامه‌ریزی عملیات اکتشافی تکمیلی، از جمله حفاری‌های اکتشافی، را هدفمندتر و اقتصادی‌تر سازند [۳] [۴]. از این روش پژوهشگران متعددی استفاده کرده‌اند، به عنوان مثال مجرد و همکاران (۱۳۹۸) با تلفیق داده‌های دورسنجی ETM^+ ، ASTER و هایپریون EO-1 و داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد، پتانسیل‌یابی منابع معدنی و پهنه‌بندی نواحی دگرسانی را در محدوده‌ای از شمال‌شرقی مشکین‌شهر تا شمال‌غربی سراب انجام دادند. در این پژوهش، با پردازش داده‌های مغناطیسی و استخراج فیلترهای مختلف و همچنین به‌کارگیری روش‌های طیفی و آماری دورسنجی، زون‌های دگرسانی و بخش‌های پنهان کانی‌زایی شناسایی شد. نتایج نشان داد دگرسانی‌های سیلیسی و کائولینیتی مهم‌ترین آنومالی‌های معدنی منطقه هستند که با معادن فعال سیلیس، کائولن، سرب و مس همخوانی کامل دارند و اعتبار نتایج با نمونه‌برداری و آنالیز XRD تأیید گردید [۵].

رضایی و همکاران (۱۴۰۲) با تلفیق داده‌های سنجش از دور استر و مغناطیس‌سنجی، پتانسیل کانه‌زایی آهن را در محدوده معدن دوزخ‌دره واقع در استان کرمان بررسی کردند. در این پژوهش، پهنه‌های دگرسانی مرتبط با آهن‌زایی با استفاده از روش Spectral Angle Mapper استخراج و سپس داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده پردازش و تفسیر شدند. نتایج حاصل از فیلترهای مغناطیسی و مدل‌سازی وارون دوبعدی نشان‌دهنده وجود حداقل چهار زون بی‌هنجاری مغناطیسی است که زون‌های ۱ و ۲ با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی، از نظر کانه‌زایی آهن اولویت بالاتری دارند. بر اساس نتایج روش اوپلر، عمق منبع آنومالی‌ها کم و حداکثر حدود ۱۰ متر برآورد شده و احتمال وجود آهن اسکارنی کم‌عمق در منطقه مطرح گردیده است [۶].

هم‌چنین عابدی و همکاران (۲۰۱۵) با به‌کارگیری روش وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی مبتنی بر قیود تنک‌سازی و استفاده هم‌زمان از پایه موجک و عملگرهای هار/تفاضل محدود برای بازسازی نواحی هموار و مرزهای تیز خودپذیری مغناطیسی، پس از آزمون موفق روش بر داده‌های مصنوعی، آن را روی داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی کانسار پورفیری مس در استان کرمان اعمال کرد که در آن ناحیه کم‌خودپذیر مدل با محل شناخته‌شده کانه‌زایی مس منطبق شده است [۷].

عالی و همکاران (۲۰۲۲) با تلفیق داده‌های دورسنجی، داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد و اطلاعات زمین‌شناسی، زون‌های با پتانسیل کانه‌زایی پلی‌متال را در منطقه چک‌چک استان یزد شناسایی کردند. در این پژوهش، زون‌های دگرسانی هیدروترمال، توده‌های نفوذی سطحی و عمقی، گسل‌ها و خطواره‌های پنهان استخراج و با استفاده از منطق فازی و روش هم‌پوشانی شاخص چندکلاسه تلفیق شدند. نتایج به تهیه نقشه پتانسیل معدنی منجر شد که صحت آن‌ها با مطالعات میدانی و حفاری تأیید گردید و کارایی این روش کم‌هزینه را در اکتشاف مناطق مشابه نشان داد [۸].

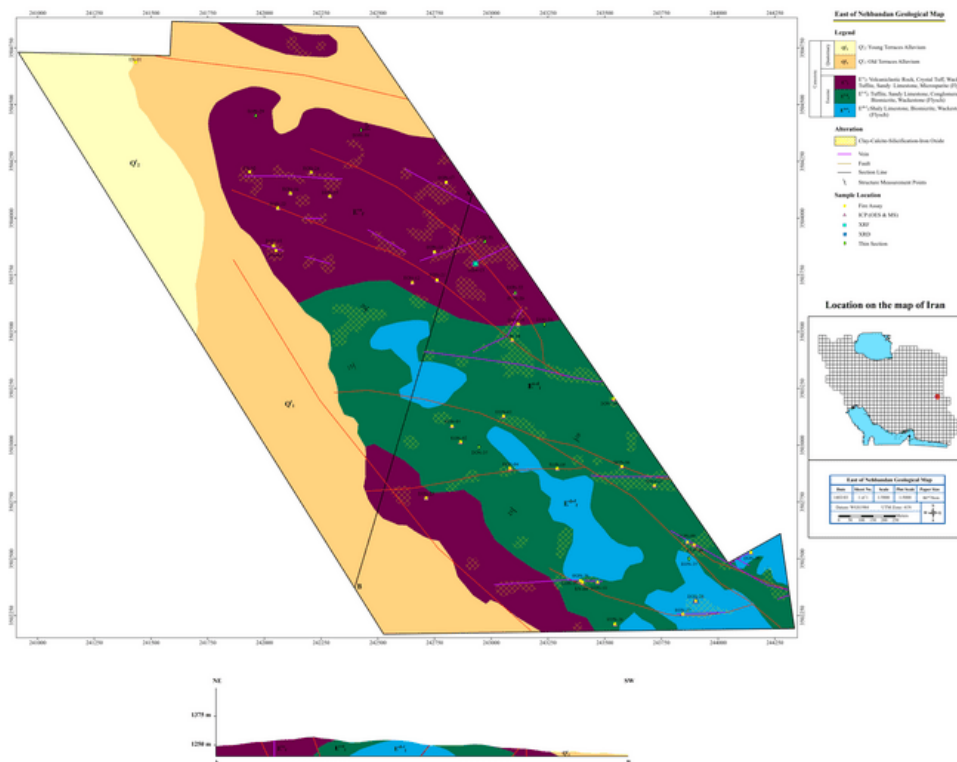
عبدالرادی (۲۰۲۵) با تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد و تحلیل بافت تصاویر راداری ALOS PALSAR، ساختارهای زمین‌شناسی منطقه ال‌برامیه-دونگاش در صحرای شرقی مرکزی مصر را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه، به‌منظور شناسایی ساختارهای پنهان زیرسطحی، از روش‌های مختلف آشکارسازی لبه مانند EHGA، FS، TAHG و

BHG بر روی داده‌های مغناطیسی استفاده شد که نتایج با تفکیک‌پذیری بالا و حداقل ایجاد لبه‌های کاذب همراه بود. تحلیل آماری خطواره‌ها چهار روند اصلی تکتونیکی را مشخص کرد و نتایج وارون‌سازی اوایلر عمق ساختارهای مغناطیسی را بین حدود ۱۲۳ تا ۸۵۰ متر برآورد نمود. همچنین تحلیل بافت تصاویر راداری توانست واحدهای لیتولوژیکی و روندهای ساختاری را همسو با داده‌های مغناطیسی تفکیک کند. نتایج این پژوهش کارایی بالای تلفیق داده‌های مغناطیسی و راداری را در درک ساختارهای زمین‌شناسی و هدایت اکتشافات معدنی آینده نشان می‌دهد [۹].

محدوده شرق نهبندان به‌عنوان یکی از نواحی مستعد از نظر حضور ساختارهای زمین‌شناسی مؤثر در کانه‌زایی و تمرکز ذخایر معدنی، نیازمند انجام بررسی‌های جامع و یکپارچه اکتشافی است. در این پژوهش، با بهره‌گیری همزمان از داده‌های زمین‌شناسی، مغناطیس‌سنجی و سنجش از دور، تلاش شده است تا با انجام پردازش‌ها و تحلیل‌های لازم، ساختارهای زیرسطحی منطقه شناسایی و الگوی هندسی و تکتونیکی آن‌ها تفسیر شود. در این راستا، داده‌های مغناطیسی به‌منظور آشکارسازی بی‌هنجاری‌ها و ساختارهای پنهان زیرسطحی پردازش و تفسیر شده و هم‌زمان، اطلاعات حاصل از داده‌های دورسنجی برای استخراج خطواره‌ها، واحدهای لیتولوژیکی و زون‌های دگرسانی سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین داده‌های زمین‌شناسی به‌عنوان مبنای کنترل و انطباق نتایج حاصل از روش‌های ژئوفیزیکی و دورسنجی به کار رفته‌اند. نتایج حاصل از تلفیق این داده‌ها می‌تواند به بهبود درک ساختاری منطقه، شناسایی نواحی مستعد کانه‌زایی و هدایت هدفمند مراحل بعدی اکتشاف معدنی در محدوده شرق نهبندان کمک شایانی نماید.

۲. موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و شبکه برداشت مغناطیس‌سنجی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در شمال‌شرق روستای خوانشرف، در حدود ۳۵ کیلومتری شرق شهرستان نهبندان، واقع در جنوب استان خراسان جنوبی قرار دارد. این منطقه در زون ۴۱ سیستم مختصات UTM قرار گرفته است. محدوده مطالعه بخشی از نوار فلیشی-افیولیتی شرق ایران است و دارای ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده و ناهمگن می‌باشد. این منطقه در محل برخورد دو گسل فعال کواترنری، شامل گسل چپ‌بر بندان و گسل راست‌بر نهبندان (شاخه شرقی) قرار دارد. نهشته‌های کهن ماستریشیتین، آمیزه‌های افیولیتی بندان و تمامه را می‌پوشانند و رسوبات فلیشی کرتاسه پسین تا حدود ۳۰۰۰ متر ضخامت دارند. سازندهای پالئوسن شامل سازند پلنگ، دوکوهانه و چاه چوچو هستند که با مارن، توربیدایت و سنگ‌های آهکی همراهند و بر روی آن‌ها سازند زیبرو رخمون دارد. در بخش‌های شرقی، سازندهای دبیل و باران و نهشته‌های آتشفشانی پس از ائوسن میانی دیده می‌شوند. منطقه همچنین دارای کانسارهای منیزیت، آمیزه‌های سرپانتینی و توده‌های الترامافیکیتی بوده و چندین نشانه مس نیز در دیاباز و گابرو گزارش شده است.



شکل ۱- نقشه ۱:۵۰۰۰ زمین‌شناسی محدوده اکتشافی شرق نهبندان به همراه نمایش موقعیت محدوده بر روی نقشه ایران

در محدوده مورد مطالعه، عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی با طراحی شبکه برداشت 50×50 متر به صورت شرقی-غربی و در مساحت حدود ۴ کیلومتر مربع انجام شد. در مجموع، ۱۷۷۸ نقطه برداشت اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری میدان مغناطیسی با استفاده از دو دستگاه مغناطیس‌سنج پروتون (T-19GSM، ساخت GEM کانادا) با دقت 0.01 نانوتسلا انجام شد که یک دستگاه به صورت Base و دستگاه دیگر به صورت Rover فعالیت می‌کرد.

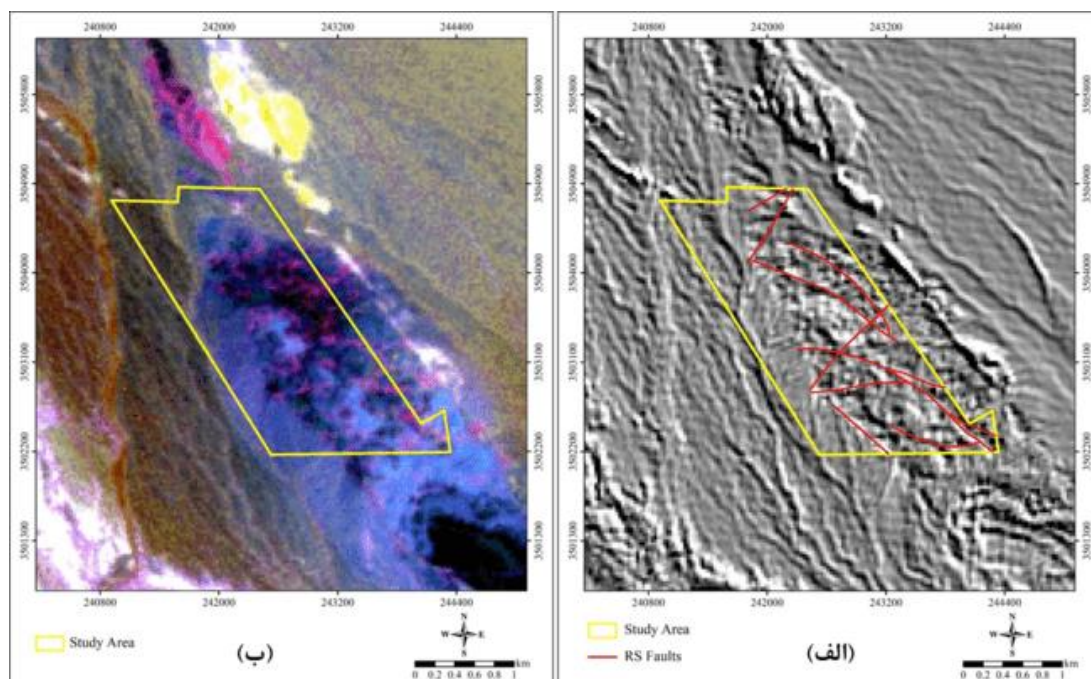
۳. مطالعات دورسنجی و مغناطیس‌سنجی محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش، محدوده شرق نهبندان با استفاده از روش‌های دورسنجی ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنجی مورد مطالعه قرار گرفت تا ساختارهای زمین‌شناسی و ویژگی‌های زیرسطحی منطقه به دقت شناسایی شوند، که در ادامه هر یک از این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۳ دورسنجی محدوده مورد مطالعه

آنالیز ساختاری منطقه و شناسایی گسل‌ها، شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها بخش مهمی از مطالعات اکتشافی را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای Aster، Landsat 8 و Sentinel2 با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور مورد ارزیابی قرار گرفتند. نقشه حاصل از گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه بر اساس این تصاویر در شکل ۲-الف ارائه شده است. شناسایی و برجسته‌سازی دگرسانی‌های مختلف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای امروزه در مطالعات اکتشافی از اهمیت بالایی برخوردار است. مبنای شناسایی دگرسانی‌ها در تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند متفاوت باشد؛ برخی روش‌ها بر اساس

ترکیبات باندی کاذب (FCC) و تفسیر بصری انجام می‌شوند و برخی دیگر از نسبت‌های باندی^۱ یا الگوریتم‌های پیشرفته مانند SAM^۲ برای تشخیص دقیق دگرسانی‌ها استفاده می‌کنند. در این پژوهش، برای تفکیک مناطق دگرسانی، از ترکیب باندی کاذب، روش نسبت باندی و الگوریتم SAM بهره گرفته شده است. به طور خاص، بر روی تصاویر ASTER از ترکیب باندی کاذب (R:G:B=4:6:8) برای تفکیک دگرسانی‌ها استفاده شده است. این ترکیب باندی، امکان تفسیر بصری دگرسانی‌ها را فراهم می‌کند، به طوری که مطابق شکل ۲-ب رنگ‌های صورتی و قرمز نمایانگر دگرسانی‌های آرژیلیک پیشرفته و سریسیتی، رنگ سبز نمایانگر دگرسانی پروپلیتیک و رنگ قهوه‌ای نمایانگر پوشش گیاهی هستند.



شکل ۲- (الف) نقشه شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های محدوده شرق نهبندان با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8، ASTER و Sentinel2 (ب) تصویر ASTER با ترکیب باندی کاذب (R:G:B=4:6:8) و بارزسازی دگرسانی‌ها در محدوده شرق نهبندان

نتایج نشان داد که ترکیبات باندی مختلف توانایی متفاوتی در بارزسازی واحدهای زمین‌شناسی دارند. با بهره‌گیری از ماتریس همبستگی و شاخص OIF^۳، ترکیبات FCC بهینه برای محدوده مورد مطالعه تعیین شد (جدول ۱). این روش امکان تفکیک دقیق‌تر دگرسانی‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی را فراهم می‌کند [۱۰].

^۱ Band Ratio

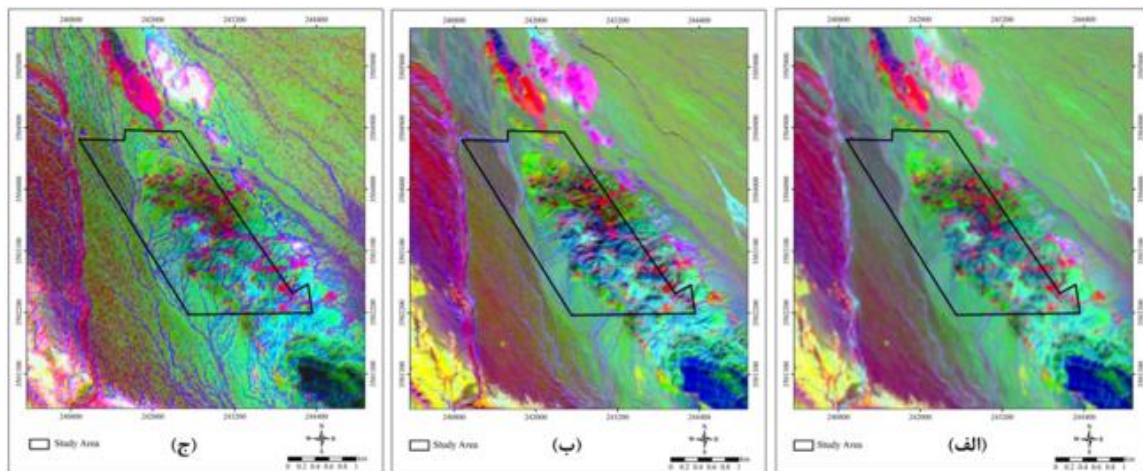
^۲ Spectral Angle Mapper

^۳ Optimum Index Factor

جدول ۱- رتبه‌بندی ترکیبات باندی FCC تصاویر ASTER محدوده شرق نهبندان بر اساس شاخص OIF

OIF Index Highest Ranking (ASTER)		
OIF Value	Bands	Rank
1	b1, b4, b9	73.48
2	b2, b4, b9	72.3
3	b1, b4, b6	72.24
4	b1, b4, b7	71.86
5	b3, b4, b9	71.76
6	b1, b4, b5	71.66

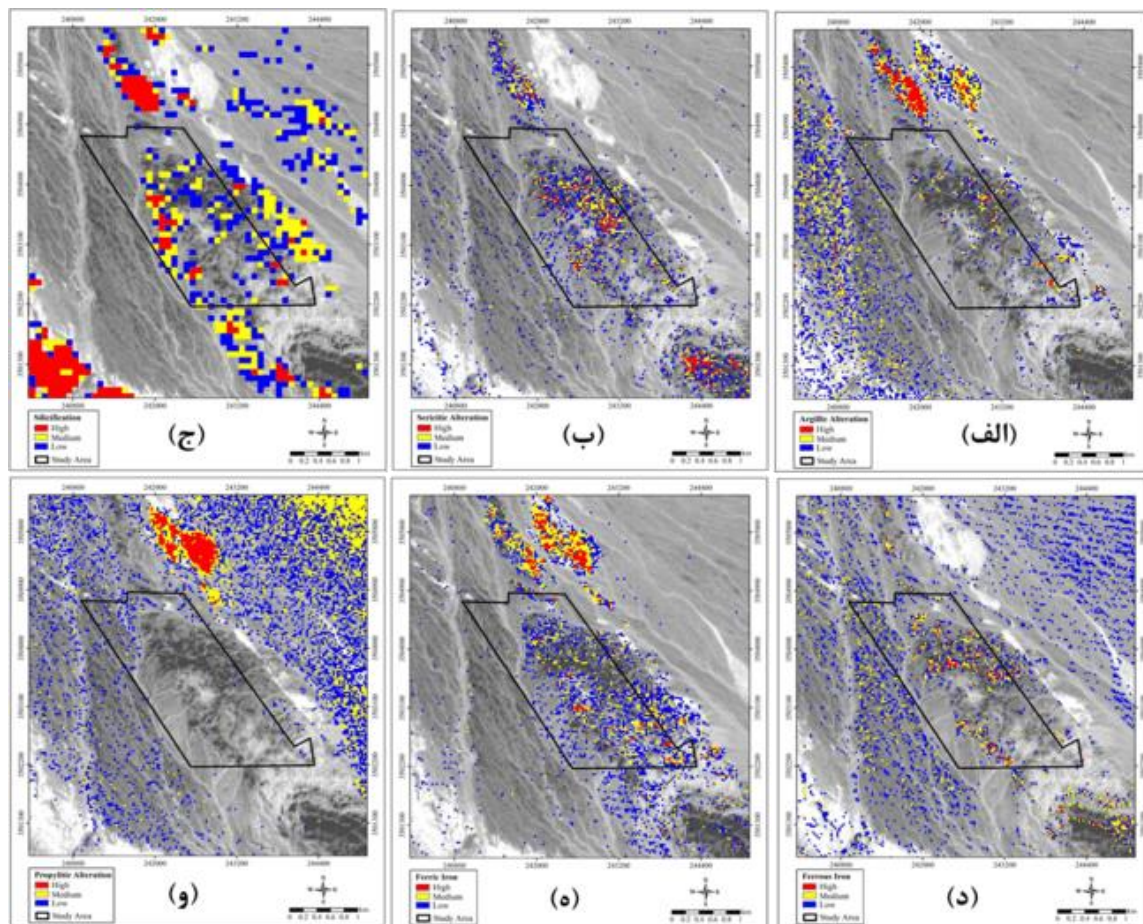
جهت وضوح و تفکیک بهتر تصاویر FCC حاصل از ترکیب باندی با شاخص OIF، از تکنیک Image Stretching استفاده شد (شکل ۳-ج). در این تصویر، رنگ‌های قرمز تا صورتی نمایانگر دگرسانی آرژلیک پیشرفته و سربستی و رنگ سبز نمایانگر دگرسانی پروپلیتیک هستند. پردازش‌های مشابه بر روی تصاویر ASTER، برای تصاویر Landsat 8 نیز به منظور بارزسازی بصری دگرسانی‌ها انجام شد. با وجود اینکه تصاویر Landsat 8 تنها دارای دو باند SWIR هستند و نسبت به تصاویر ASTER از توان طیفی کمتری برخوردارند، با توجه به آرایش باندی و پهنای باندها و همچنین بهره‌گیری از باندهای VNIR، می‌توان با استفاده از شاخص آماری OIF ترکیب باندی مناسب را تعیین کرد. در شکل ۳-ب، تصویر FCC حاصل از ترکیب باندی با شاخص OIF و اعمال تکنیک Image Stretching نمایش داده شده است؛ رنگ سبز معرف دگرسانی پروپلیتیک و رنگ صورتی معرف دگرسانی آرژلیک و سربستی می‌باشد. با الگوبرداری از این روش، تصاویر Sentinel2 با رزولوشن ۱۰ متر نیز پردازش شد. این تصاویر نسبت به تصاویر ۳۰ متری ASTER و Landsat 8 دارای توان تفکیک بالاتری هستند و در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود که دگرسانی پروپلیتیک با رنگ سبز و دگرسانی آرژلیک و سربستی با رنگ صورتی، با وضوح بیشتری قابل تشخیص هستند.



شکل ۳- (الف) تصویر Sentinel2 FCC با رزولوشن ۱۰ متر که با الگوبرداری از روش OIF و اعمال تکنیک Image Stretching برای بارسازی بصری دگرسانی‌ها (ب) تصویر Landsat 8 FCC حاصل از ترکیب باندی با شاخص OIF و اعمال تکنیک مشابه (ج) تصویر ASTER FCC حاصل از ترکیب باندی با شاخص فاکتور بهینه پس از اعمال تکنیک مشابه.

یکی از روش‌های رایج در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، روش نسبت باندی است. در این روش، برای تشخیص هر پدیده، باندی که میزان بازتاب در آن بالا است در صورت و باندی که بیشترین جذب را دارد در مخرج قرار می‌گیرد. این روش کاربرد گسترده‌ای در تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، تفکیک واحدهای سنگی، شناسایی دگرسانی‌ها و تعیین شاخص پوشش گیاهی دارد [۹].

در این مطالعه، برای شناسایی انواع دگرسانی‌ها، نسبت باندی مناسب بر روی تصاویر ASTER اعمال شد. با توجه به اینکه کانی‌های دگرسانی آرژلیک در محدوده باندهای ۴، ۶ و ۷ بیشترین بازتاب و در باند ۵ بیشترین جذب را دارند، نسبت باندی (۴، ۵، ۶ و ۷) جهت شناسایی این دگرسانی‌ها استفاده شد (شکل ۴-الف). کانی‌های دگرسانی سریستی در باندهای ۵ و ۷ تصویر ASTER بیشترین بازتاب و در باند ۶ بیشترین جذب را از خود نشان می‌دهند. بنابراین، برای شناسایی این دگرسانی، نسبت باندی بین باندهای ۶، ۵ و ۷ مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴-ب). به منظور بارسازی دگرسانی سیلیسی، نسبت باندی ۱۳ به ۱۰ به کار گرفته شد (شکل ۴-ج). کانی‌های دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت، اپیدوت و کلسیت) در باندهای ۷ و ۹ تصاویر ASTER بیشترین بازتاب و در باند ۸ بیشترین جذب را دارند. بنابراین، برای شناسایی این دگرسانی، نسبت باندی بین باندهای ۸، ۷ و ۹ مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴-د).



شکل ۴- (الف) تصویر ASTER با استفاده از نسبت بانندی برای شناسایی دگرسانی‌های آرژیلیک پیشرفته در محدوده مورد مطالعه؛ (ب) تصویر ASTER با نسبت بانندی برای شناسایی دگرسانی‌های سریستی؛ (ج) تصویر ASTER با نسبت بانندی برای بارزسازی دگرسانی‌های سیلیسی؛ (د) تصویر ASTER با نسبت بانندی برای شناسایی دگرسانی‌های پروپیلیتیک؛ (ه) پراکندگی آهن فریک در محدوده مورد مطالعه با استفاده از نسبت بانندی مناسب در تصویر ASTER (و) پراکندگی آهن فرو در محدوده مورد مطالعه با استفاده از نسبت بانندی مناسب در تصویر ASTER.

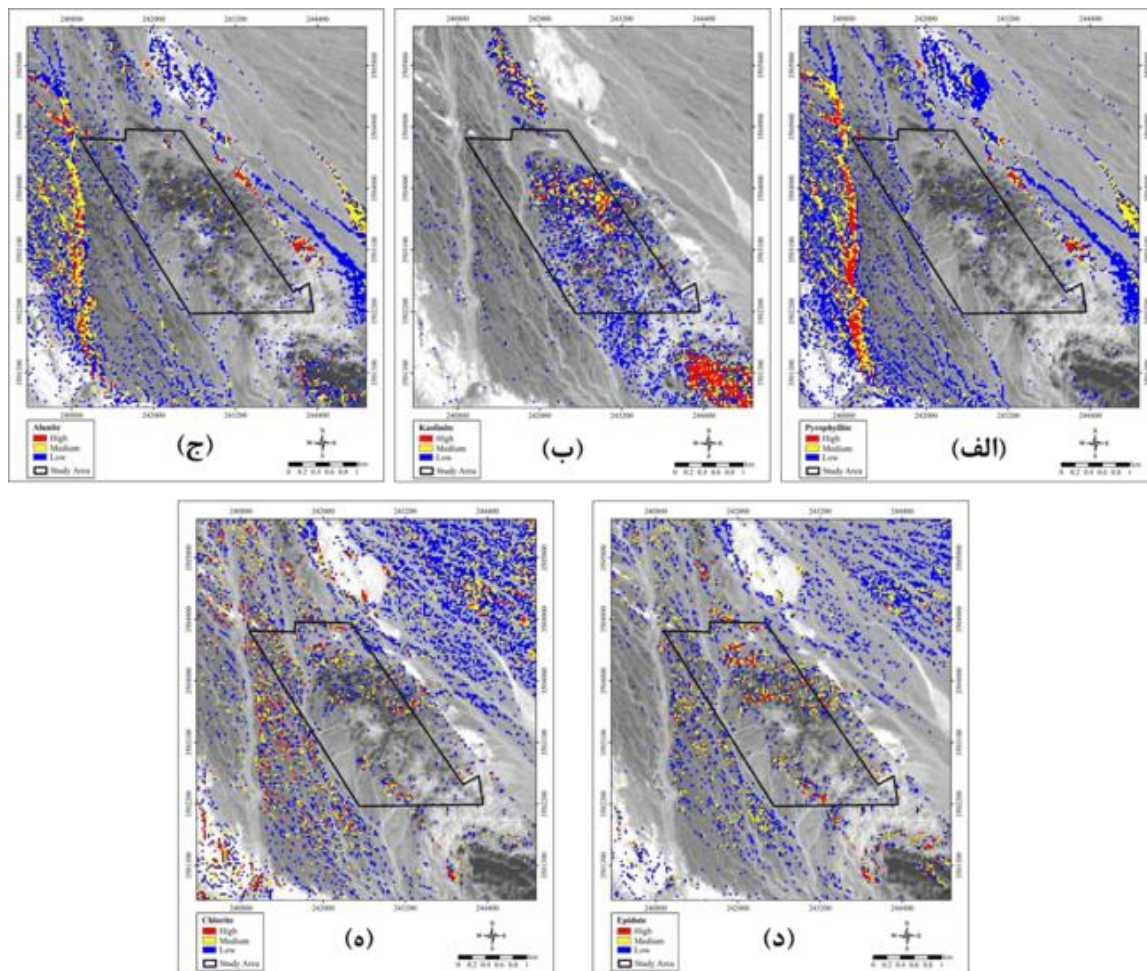
برای شناسایی آهن فریک، باند ۲ تصویر ASTER بیشترین بازتاب و باند ۱ بیشترین جذب را نشان می‌دهد، در حالی که آهن فرو بیشترین بازتاب را در باندهای ۱ و ۵ و بیشترین جذب را در باندهای ۲ و ۳ دارد. پراکندگی آهن فریک و آهن فرو در شکل‌های ۴-ه و ۴-و نشان داده شده است.

روش نقشه‌بردار زاویه طیفی^۱ (SAM) یکی از روش‌های متداول طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور است که بر مبنای اندازه‌گیری میزان تشابه طیفی بین طیف هر پیکسل تصویر و یک طیف مرجع (مانند طیف‌های موجود در کتابخانه‌های

^۱ Spectral Angle Mapper

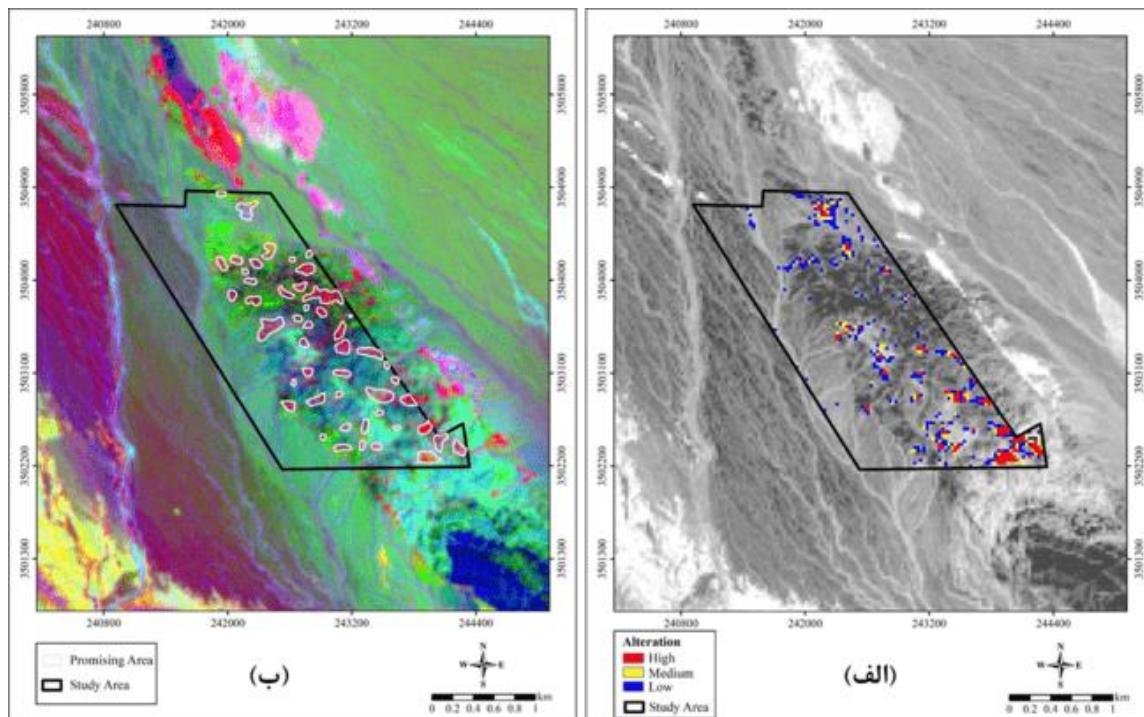
طیفی) عمل می‌کند. در این روش، طیف‌ها به صورت بردارهایی در فضایی با ابعاد برابر تعداد باندهای طیفی در نظر گرفته می‌شوند و میزان شباهت آن‌ها از طریق محاسبه زاویه بین این بردارها تعیین می‌گردد. الگوریتم SAM تنها به جهت بردارهای طیفی توجه دارد و مستقل از طول آن‌ها عمل می‌کند؛ از این رو تأثیر عوامل نوری، سایه و تغییرات شدت روشنایی در نتایج آن کاهش می‌یابد. هرچه زاویه طیفی بین بردار طیف پیکسل و طیف مرجع کوچک‌تر باشد، میزان شباهت و دقت شناسایی پدیده مورد نظر بیشتر خواهد بود. در این روش، زاویه طیفی مقداری بین صفر تا $\pi/2$ (یا به صورت نرمال شده بین صفر تا یک) دارد و مقدار کمتر زاویه نشان‌دهنده تطابق بالاتر است. محاسبه زاویه طیفی معمولاً با استفاده از حاصل ضرب داخلی بردارها در فضای n بعدی انجام می‌شود [۱۶]. در این پژوهش، به منظور شناسایی کانی‌ها، الگوریتم SAM و روش نسبت بانندی بر روی تصویر ASTER اعمال شد. نتایج حاصل از اجرای این روش‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

در این مطالعه، شناسایی کانی‌های شاخص منطقه با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER انجام شد. به طوری که کانی آلونیت با بهره‌گیری از الگوریتم SAM کانی کائولینیت با روش نسبت بانندی، و کانی‌های پیروفیلیت، کلریت و اپیدوت با استفاده از الگوریتم SAM شناسایی شدند. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم SAM توانایی بالایی در تفکیک کانی‌های آلونیت، پیروفیلیت، کلریت و اپیدوت دارد، در حالی که روش نسبت بانندی برای شناسایی کائولینیت مورد استفاده قرار گرفته است. در نقشه‌های حاصل، رنگ‌های آبی، زرد و قرمز به ترتیب بیانگر احتمال رخداد بیش از ۸۰، ۷۰ و ۹۰ درصد برای هر یک از کانی‌ها هستند، که امکان تحلیل کمی و کیفی پخش کانی‌ها در سطح منطقه را فراهم می‌کند.



شکل ۵- (الف) شناسایی کانی آلونیت با استفاده از الگوریتم SAM بر روی تصویر ASTER؛ (ب) شناسایی کانی کائولینیت با استفاده از روش نسبت بانندی بر روی تصویر ASTER؛ (ج) شناسایی کانی پیروفیلیت با استفاده از الگوریتم SAM بر روی تصویر ASTER؛ (د) شناسایی کانی کلریت با استفاده از الگوریتم SAM بر روی تصویر ASTER؛ و (ه) شناسایی کانی اپیدوت با استفاده از الگوریتم SAM بر روی تصویر ASTER در تمامی نقشه‌ها، رنگ‌های آبی، زرد و قرمز به ترتیب بیانگر احتمال رخداد بیش از ۸۰، ۷۰ و ۹۰ درصد هستند.

بر اساس تلفیق نتایج حاصل از مطالعات دورسنجی، مدل‌سازی اهداف اکتشافی اپی‌ترمال طلا-مس در محدوده مورد مطالعه انجام شد (شکل ۶-الف). نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که این منطقه دارای پتانسیل اکتشافی قابل توجهی بوده و مستعد رخداد کانه‌زایی اپی‌ترمال مس-طلا می‌باشد. به طور کلی، چندین منطقه امیدبخش برای کانه‌زایی مس-طلا در این محدوده شناسایی شد که موقعیت تقریبی آن‌ها در شکل ۶-ب نشان داده شده است.



شکل ۶- (الف) نقشه مدل‌سازی اهداف اکتشافی اپی‌ترمال مس-طلا در محدوده مورد مطالعه. در این نقشه، رنگ‌های آبی، زرد و قرمز به ترتیب بیانگر احتمال رخداد دگرسانی‌های رسی، فلیک و سیلیسی بیش از ۸۰، ۷۰ و ۹۰ درصد هستند؛ (ب) مناطق امید بخش در محدوده مورد مطالعه

۲.۳ مغناطیس‌سنجی محدوده مورد مطالعه

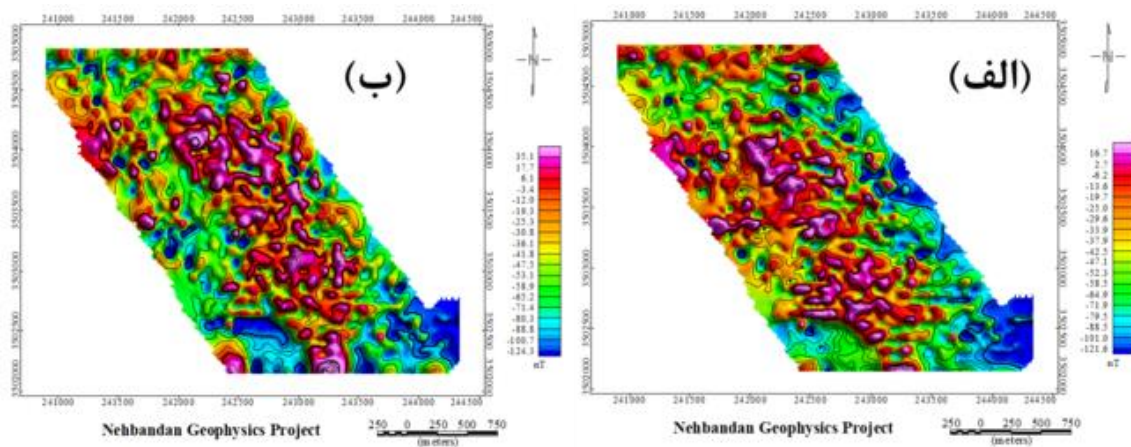
در این پژوهش، به منظور پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه، از نرم‌افزار Oasis Montaj استفاده شد. داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده از محدوده اکتشافی، پس از حذف اثر میدان مرجع ژئومغناطیسی بین‌المللی^۱ و پالایش داده‌های پرت^۲، تصحیح و ترسیم شدند. شکل ۷-الف نقشه آنومالی شدت میدان کل مغناطیسی حاصل از این تصحیحات در محدوده اکتشافی را نشان می‌دهد.

داده‌های مغناطیسی ذاتاً ماهیتی دوقطبی دارند و تأثیر عرض جغرافیایی موجب می‌شود بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دقیقاً بر روی منبع ایجادکننده خود متمرکز نشوند. به منظور تعیین دقیق‌تر موقعیت ناهنجاری‌ها، لازم است داده‌ها به حالت تک‌قطبی تبدیل شوند. بدین منظور، از فیلتر برگردان به قطب^۳ استفاده شد تا پاسخ‌های مغناطیسی به صورت متقارن و متمرکز بر روی منبع درآیند. شکل ۷-ب نقشه مغناطیسی آنومالی میدان کل را بعد از اعمال تبدیل برگردان به قطب برای محدوده اکتشافی مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۱۱].

¹ International Geomagnetic Reference Field

² Outliers

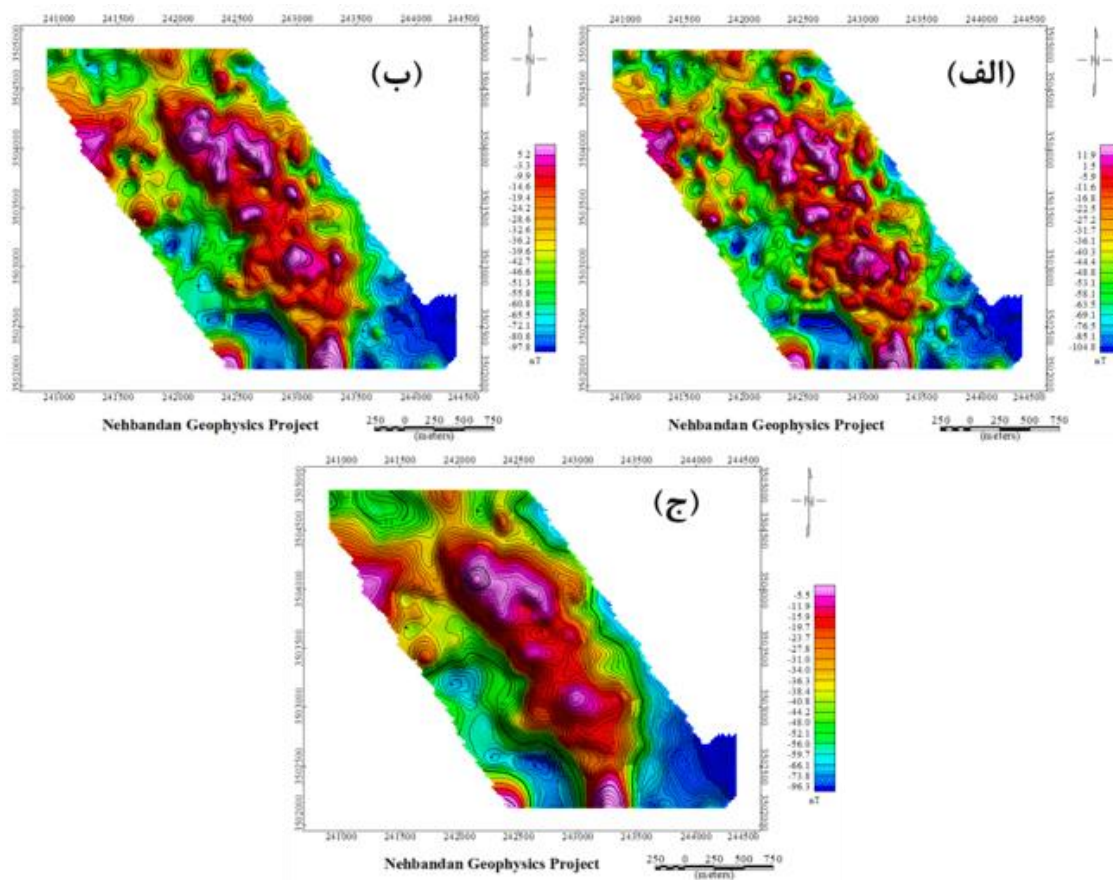
³ Reduction to the Pole



شکل ۷- (الف) نقشه شدت آنومالی کل میدان مغناطیسی محدوده مورد مطالعه پس از حذف اثر میدان مرجع بین‌المللی زمین؛ (ب) نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی به منظور متمرکزسازی آنومالی‌ها بر روی منبع مولد

فیلتر ادامه فراسو^۱ با حذف مؤلفه‌های فرکانس بالا یا طول‌موج‌های کوتاه، موجب تضعیف اثر پدیده‌های سطحی و تقویت نسبی پاسخ توده‌های عمیق‌تر می‌شود. این پردازش میدان مغناطیسی را در ارتفاع‌های مختلف نسبت به سطح برداشت شبیه‌سازی کرده و از این رو ابزاری کارآمد برای حذف اثرات ناحیه‌ای و کاهش نوفه‌های موجود در داده‌ها به شمار می‌رود. در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار آنومالی‌های مغناطیسی در اعماق مختلف، فیلتر ادامه فراسو بر روی نقشه آنومالی کل میدان مغناطیسی در ارتفاع‌های متفاوت اعمال شد. شکل ۸ نتایج حاصل از ادامه فراسو در ارتفاع‌های ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متر نسبت به سطح برداشت را نشان می‌دهد [۱۲].

^۱ Upward Continuation



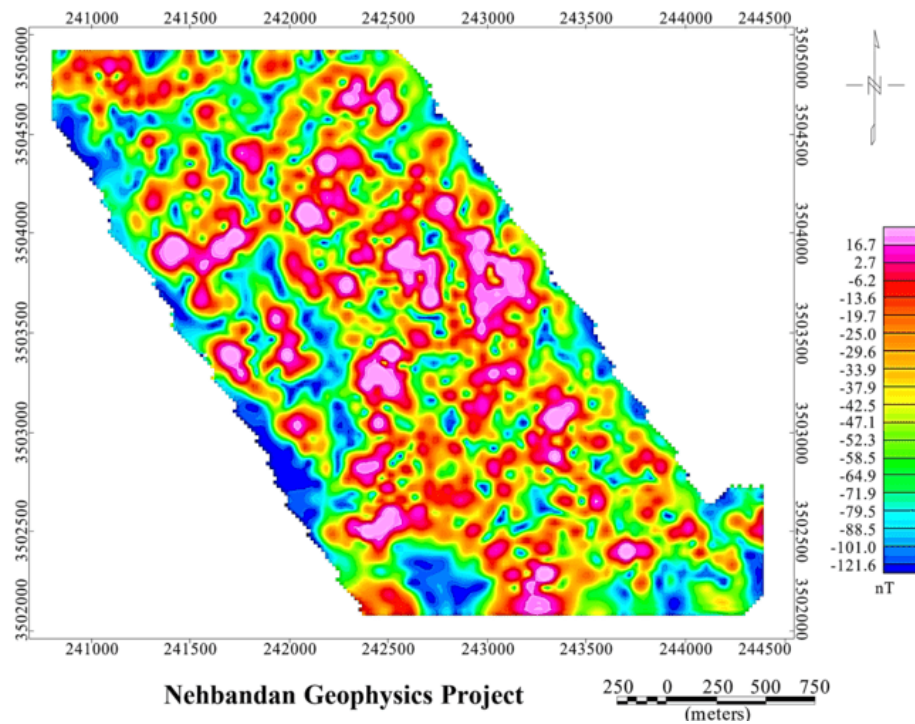
شکل ۸- نتایج اعمال فیلتر ادامه فراسو بر نقشه آنومالی کل میدان مغناطیسی محدوده مورد مطالعه در ارتفاع‌های مختلف نسبت به سطح برداشت: (الف) ادامه فراسو در ارتفاع ۳۰ متر؛ (ب) ادامه فراسو در ارتفاع ۵۰ متر؛ (ج) ادامه فراسو در ارتفاع ۱۰۰ متر

یکی از پردازش‌های مهم در تحلیل داده‌های مغناطیسی، سیگنال تحلیلی^۱ است که برای مشخص کردن مرکز منابع مغناطیسی کاربرد دارد. این فیلتر با ترکیب گرادیان‌های افقی در جهات X و Y و گرادیان قائم در جهت Z به دست می‌آید و دامنه آن مستقل از شدت و جهت میدان مغناطیسی القایی است. استفاده از سیگنال تحلیلی باعث می‌شود که آنومالی‌های سطحی برجسته‌تر از منابع عمیق‌تر نمایش داده شوند و مکان‌یابی دقیق منابع امکان‌پذیر گردد. همچنین با اعمال مشتق‌گیری در سه جهت، اثر روندهای منطقه‌ای و آنومالی‌های غیرمرتبط با کانسار کاهش می‌یابد. یکی از محدودیت‌های این روش، تضعیف یا حذف پاسخ منابع عمیق است. در رابطه (۱)، فرمول این فیلتر نشان داده شده که در آن T میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۳].

$$|AS| = \sqrt{\left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta y}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{\delta z}\right)^2} \quad (1)$$

در شکل ۹، نقشه سیگنال تحلیلی محدوده مورد مطالعه ارائه شده است و لبه‌های کانسار با رنگ‌های قرمز و صورتی مشخص شده‌اند.

^۱ Analytical Signal



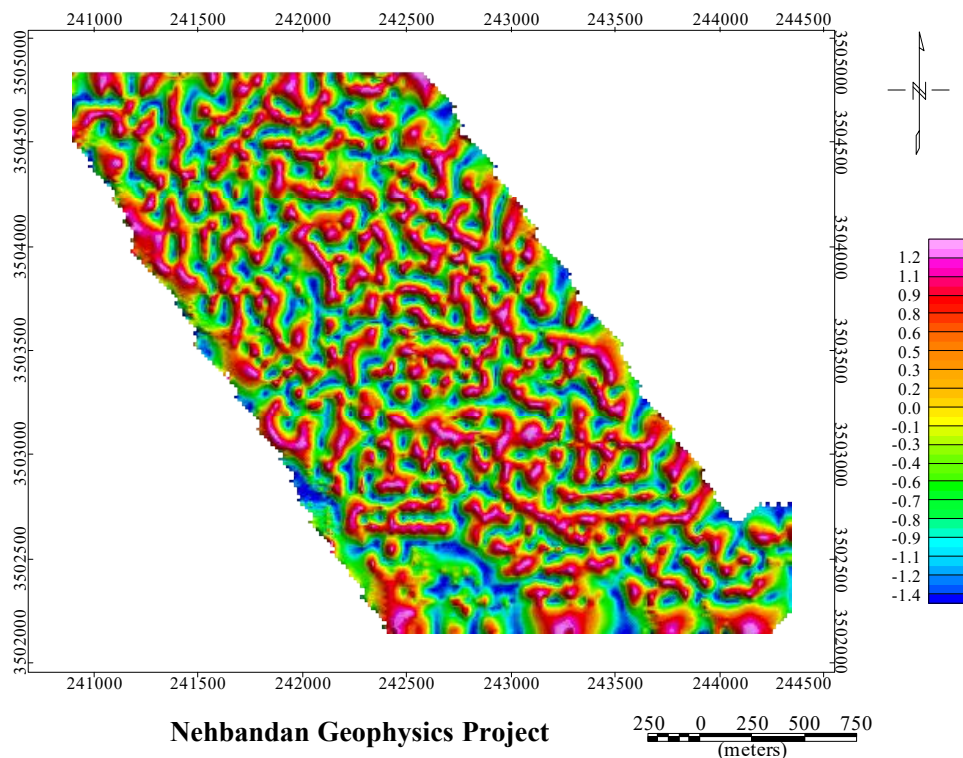
شکل ۹- نقشه سیگنال تحلیلی محدوده مورد مطالعه

فیلتر زاویه شیب^۱ برای تشخیص ساختارهای مغناطیسی از جمله خطواره‌ها و مرز منابع مغناطیسی به کار می‌رود. فرمول محاسبه این فیلتر به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$TDR = \tan^{-1} \left(\frac{\partial T / \partial z}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2}} \right) \quad (2)$$

که در آن T شدت میدان مغناطیسی و ∂z و ∂x و ∂y مشتقات میدان مغناطیسی در سه جهت X, Y و Z است. نقشه زاویه شیب مطابق شکل ۱۰ می‌باشد [۱۴].

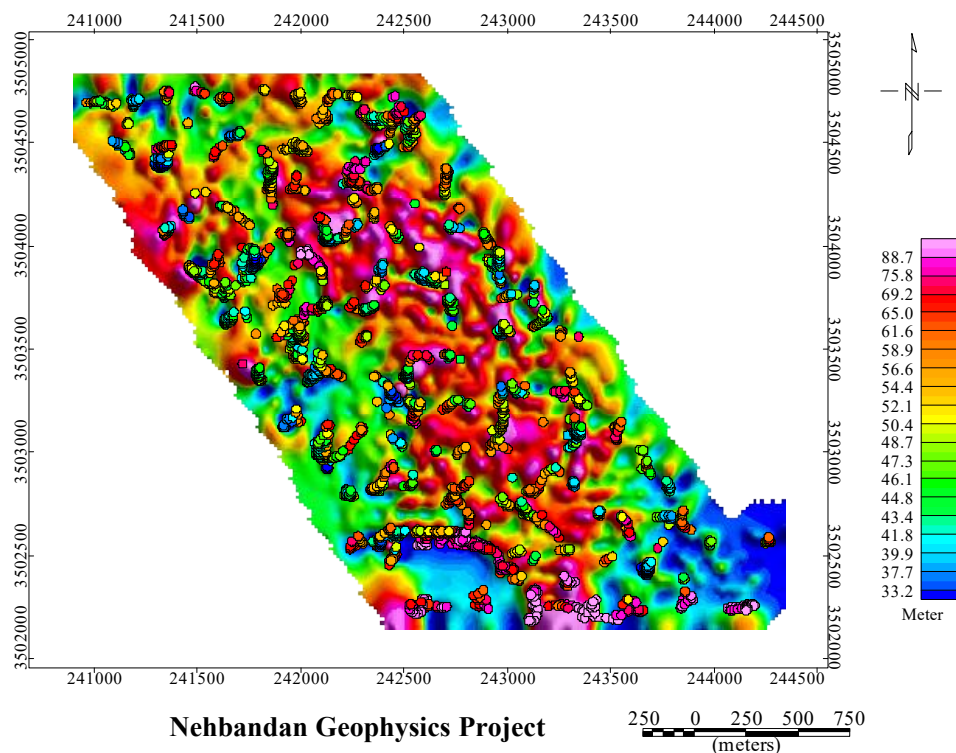
^۱ Tilt Angle



شکل ۱۰- نقشه زاویه شیب محدوده مورد مطالعه، نشان دهنده خطواره‌ها و مرزهای منابع مغناطیسی زیر سطحی

یکی از مراحل اساسی در تفسیر داده‌های مغناطیسی، تخمین ژرفای منبع آنومالی‌ها است. روش‌های متعددی برای برآورد عمق توده‌های مغناطیسی وجود دارد که در این پژوهش از روش تخمین عمق اویلر دکانولوشن^۱ استفاده شده است. این روش بر پایه تغییرات مکانی میدان مغناطیسی و مشتقات آن بنا شده و با استفاده از رابطه همگن اویلر، امکان برآورد موقعیت و ژرفای منابع مغناطیسی را فراهم می‌سازد. در این روش فرض می‌شود که میدان مغناطیسی همگن است، زیرا روابط اویلر بر اساس این فرض استوار شده‌اند [۱۵]. در شکل ۱۱ نتیجه تخمین عمق اویلر دکانولوشن با ضریب ساختار ۱ ارائه شده است.

¹ Euler Deconvolution



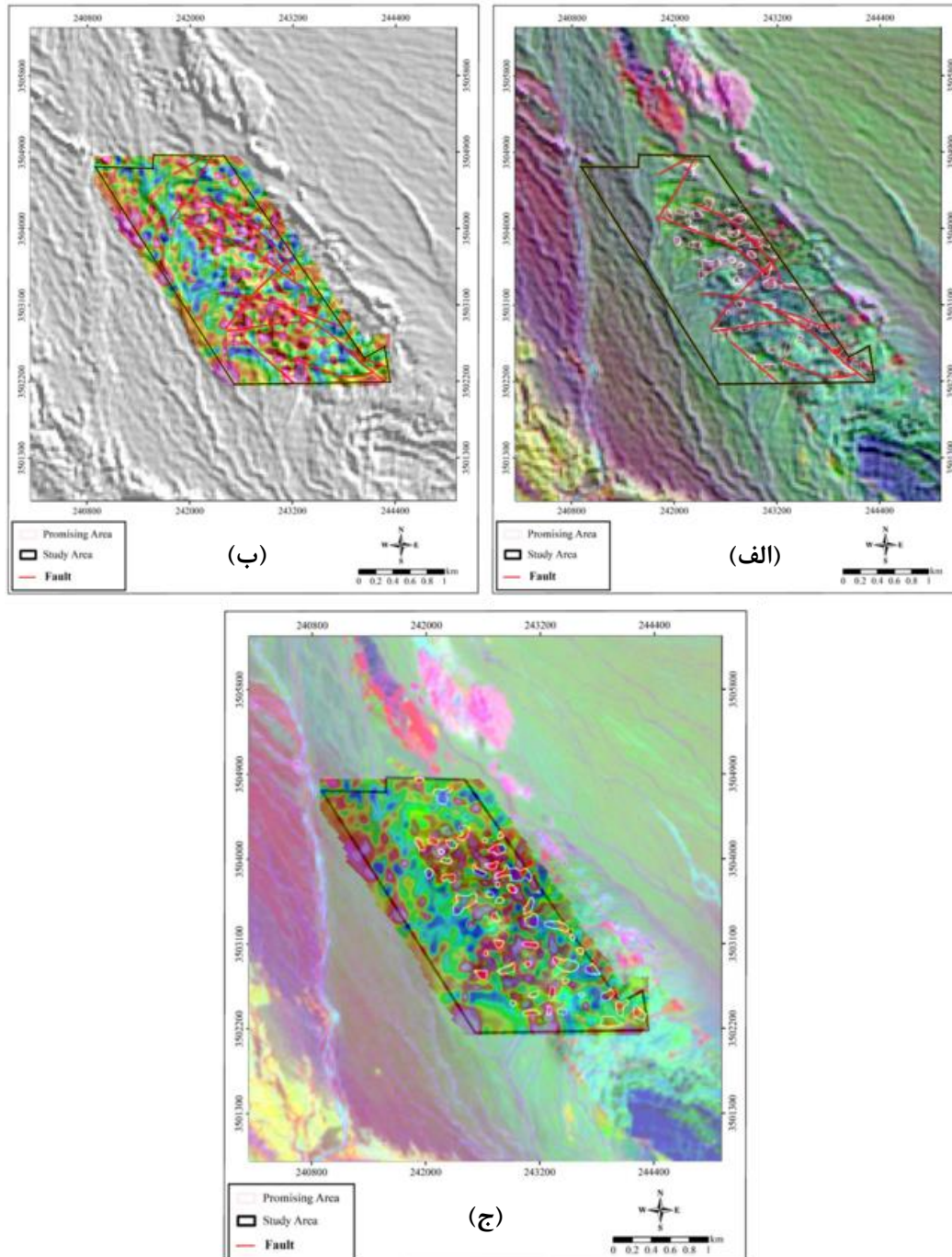
Nehbandan Geophysics Project

شکل ۱۱- نقشه تخمین عمق منابع مغناطیسی محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش اویلر دکانولوشن

۴. نتیجه‌گیری

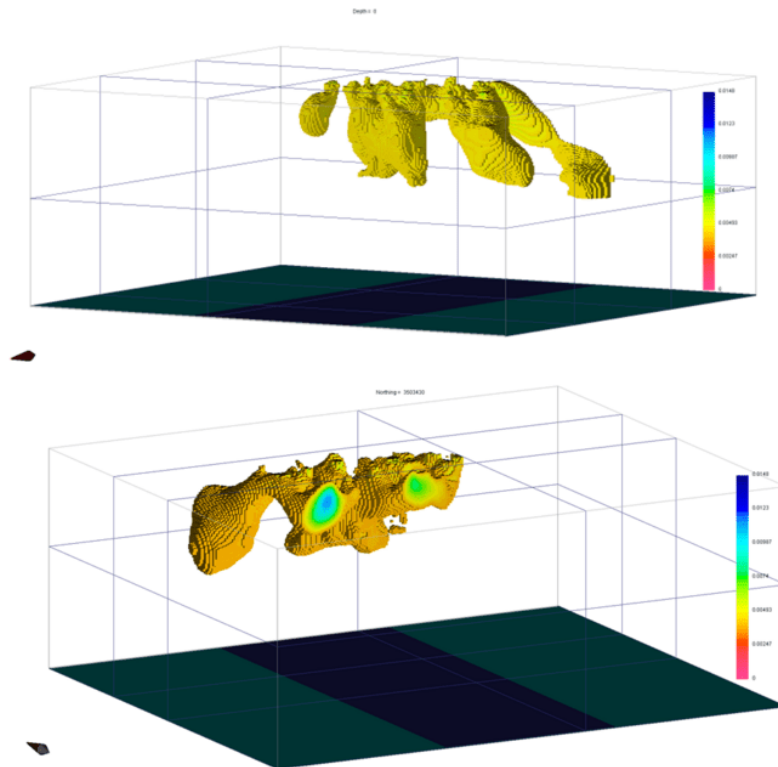
به‌منظور بررسی پتانسیل کانه‌زایی در محدوده مطالعاتی شرق نه‌بندان، داده‌های حاصل از مطالعات دورسنجی با یکدیگر تلفیق شده و فرآیند مدل‌سازی اهداف اکتشافی سامانه‌های اپی‌ترمال مس-طلا در محدوده مورد بررسی انجام شد (شکل ۶-الف). نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که این محدوده دارای پتانسیل اکتشافی قابل ملاحظه‌ای بوده و از نظر شرایط زمین‌شناسی، بستر مناسبی برای شکل‌گیری کانه‌زایی اپی‌ترمال مس-طلا فراهم می‌کند. در نتیجه این تحلیل‌ها، چندین زون امیدبخش برای کانه‌زایی مس-طلا در منطقه شناسایی گردید که موقعیت تقریبی آن‌ها در شکل ۶-ب نمایش داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از مطالعات دورسنجی با نتایج پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که بین زون‌های امیدبخش شناسایی‌شده و آنومالی‌های مغناطیسی هم‌پوشانی و تطابق قابل قبولی وجود دارد. این آنومالی‌ها عمدتاً در امتداد و یا در مجاورت گسل‌های اصلی منطقه تمرکز یافته‌اند که بیانگر نقش ساختارهای تکتونیکی در کنترل کانه‌زایی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب مشاهده می‌شود، گسل‌های موجود در محدوده مورد مطالعه با فراهم‌سازی مسیرهای مناسب برای صعود و جابه‌جایی سیالات و ماگما، نقش مؤثری در ایجاد کانه‌زایی اپی‌ترمال ایفا کرده‌اند و در نهایت منجر به تمرکز کانه‌زایی مس-طلا در منطقه شده‌اند. همچنین بر اساس شکل ۱۲-ج، نواحی امیدبخش و پرپتانسیل شناسایی‌شده از طریق دورسنجی، نشان‌دهنده کانه‌زایی سطحی هستند که نتایج پردازش‌های داده‌های مغناطیسی این پتانسیل را در اعماق بیشتر نیز تأیید می‌کند. در نهایت، نتایج حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی (شکل ۱۳) هندسه و شکل توده‌های زیرسطحی را به همراه مقادیر خودپذیری مغناطیسی آن‌ها به‌منظور شناسایی

توده‌های کانه‌دار مس به خوبی نمایش می‌دهد که می‌تواند به عنوان مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی مراحل تکمیلی اکتشاف مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲- (الف و ب) نقش گسل‌های اصلی محدوده مورد مطالعه در کنترل صعود سیالات و ماگما و ایجاد کانه‌زایی اپی ترمال مس-طلا؛ (ج) هم‌پوشانی نواحی امیدبخش حاصل از مطالعات دورسنجی با نتایج پردازش داده‌های مغناطیسی که تداوم پتانسیل کانه‌زایی را از سطح تا اعماق بیشتر نشان می‌دهد.

به منظور شناسایی ساختار و شکل توده‌های زیرسطحی، از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی بر روی محدوده مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم لی و الدنبرگ استفاده شد [۱۶].



شکل ۱۳- مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی محدوده مورد مطالعه، نشان‌دهنده توزیع خودپذیری مغناطیسی تا مقدار ۰/۰۱۵ که هندسه و گسترش توده‌های زیرسطحی مستعد کانه‌زایی را نمایش می‌دهد.

۵. قدردانی

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب قدردانی و سپاس خود را از همکاری و مساعدت‌های صمیمانه شرکت گروه توسعه صنایع و معادن سیلک در فراهم‌سازی داده‌های مورد استفاده در این پژوهش اعلام می‌دارند.

۶. مراجع

1. Robinson, E. S. (1988). Basic exploration geophysics.
2. Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
3. Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2), 394-408.
4. Blakely, R. J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge university press.

۵. مجرد، سعید، نجاتی کلاته، علی و آقاجانی، حمید (۱۳۹۸). پتانسیل‌یابی معدنی و تلفیق اطلاعات داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی هوابرد و داده‌های ماهواره‌ای سنجنده ابرطیفی EO-1، استر و لندست ۷ (ETM⁺) ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکین‌شهر (شهریه سنجش/از دور و GIS/ایران 11.3.113. doi: 10.52547/gisj.11.3.113, 113-142.

۶. رضایی، داود و میثاقی، علی و رئیسی، مصطفی و فرهادی شاهقریه، سجاد (۱۴۰۲)، تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به منظور اکتشاف کانسار آهن دوزخ دره و تعیین نقاط حفاری در جنوب کرمان، ایران، اولین کنفرانس ژئوفیزیک کاربردی در معادن، تهران، 139/1992. <https://civilica.com/doc/1992139>

7. Abedi, M., SIAHKOOHI, H. R., Gholami, A., & NOROUZI, G. H. (2015). 3D inversion of magnetic data through wavelet based regularization method.
8. Aali, A. A., Shirazy, A., Shirazi, A., Pour, A. B., Hezarkhani, A., Maghsoudi, A., ... & Khakmardan, S. (2022). Fusion of remote sensing, magnetometric, and geological data to identify polymetallic mineral potential zones in Chakchak Region, Yazd, Iran. *Remote Sensing*, 14(23), 6018.
9. Abdelrady, M., Pham, L. T., Molnar, F., & Shebl, A. (2025). Integrated Aeromagnetic and Remote Sensing Analysis for Structural Mapping in the El-Barramiya-Dungash Region, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101716.
10. Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford press.
11. Ervin, C. P. (1976). Reduction to the magnetic pole using a fast fourier series algorithm. *Computers & Geosciences*, 2(2), 211-217.
12. Fedi, M., Rapolla, A., & Russo, G. (1999). Upward continuation of scattered potential field data. *Geophysics*, 64(2), 443-451.
13. Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., & Ushijima, K. (2002). Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 49(4), 231-244.
14. Abera, F., Dander, K., Mengste, A., Burusa, G., & Beyene, T. (2014, October). Magnetic and gravity survey of gedemsa geothermal prospect area-Main Ethiopian Rift. In *5th African Rift Geothermal Conference Proceedings (Arusha, Tanzania, 2014)*.
15. Jazayeri Jouneghani, S. S., & Oskooi, B. Depth Estimation of Ground Magnetic Anomalies using Standard Euler Deconvolution in the Reshm area, Semnan.
16. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
17. Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2), 394-408.