

تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به منظور اکتشاف کانسار آهن در گستره مراغ

بندرچارک

رضا احمدی^{1*}، عبدالرضا قره شیخ بیات²

1. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک

2. دانش‌آموخته مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER و به کمک نرم‌افزار ENVI، مطالعات سنجش از دور به منظور شناسایی پتانسیل و حضور کانه‌سازی احتمالی آهن در گستره مراغ بندرچارک واقع در استان هرمزگان، انجام شد. سپس اکتشاف مقدماتی گستره‌های امیدبخش، با استفاده از روش ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی صورت گرفت. عملیات دورسنجی داده‌های گستره شامل مراحل پردازش همانند تصحیح هندسی به روش تصویر به تصویر و تصحیح اتمسفری و تکنیک‌های پردازش ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری بانندی، برازش کمترین مربع-ها، تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی و در نهایت طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی است. در نتیجه این فرآیند، نقشه پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌زایی آهن منطقه مورد مطالعه مشخص شد. عملیات برداشت مغناطیسی در گستره‌ای به وسعت تقریبی 11/2 کیلومتر مربع و در 1913 ایستگاه اندازه-گیری با استفاده از دستگاه مگنتومتر پروتون انجام شده است. برای انجام عملیات پردازش و تفسیر کیفی داده-های مغناطیسی نظیر اعمال تصحیحات و فیلترهای مختلف همانند برگردان به قطب، گسترش به سمت بالا تا ارتفاع‌های مختلف، فیلتر پایین‌گذر، فیلترهای مشتق شامل گرادیان افقی کل و سیگنال تحلیلی، از نرم‌افزار Geosoft Oasis montaj استفاده شد. در نهایت به منظور بررسی روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشاهده شده بر روی سطح، تعیین شکل تقریبی توده کانسار و تخمین عمق آن، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌ها انجام گرفت. نتایج پژوهش حاضر از طریق تلفیق دو روش سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی همراه با مدل‌سازی وارون سه-بعدی داده‌های مغناطیسی نشان می‌دهند که منطقه مراغ از نظر کانه‌سازی آهن دارای پتانسیل بالایی است. نتایج این پژوهش برای کلیه کاربران علوم زمین بویژه زمین‌شناسان و مهندسی اکتشافی قابل استفاده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، مراغ بندرچارک، مغناطیس‌سنجی، نرم‌افزار ENVI

مقدمه

کانی‌های آهن که ضمن هوازدگی در محیط‌های غنی از اکسیژن نزدیک سطح زمین دچار انحلال می‌شوند، تشکیل یک بیرون‌زدگی غنی از اکسیدها را در سطح می‌دهند که در گستره‌های بزرگ با استفاده از روش‌های سنجش از دور می‌توان مرزهای مناطق دارای اکسید آهن را با دقت قابل قبولی مشخص کرد. امروزه بررسی‌های

دورسنجی به دلیل داشتن داده‌هایی با دید وسیع، یکپارچه و محدوده طول موجی مختلف، از بهترین روش‌ها در پی‌جویی کانسارهای مغناطیسی شناخته می‌شوند. داده‌های ابرطیفی دربرگیرنده مجموعه اطلاعات غنی از بازتاب‌های الکترومغناطیسی سطحی زمین هستند. اجسام مختلف در محدوده طول موج‌های طیف الکترومغناطیسی، بسته به ویژگی‌های فیزیکی و ترکیبات کانی-شناسی و شیمی خود، امواج الکترومغناطیسی را در طول موج‌های مختلف با شدت‌های متفاوت بازتاب کرده یا جذب می‌کنند. وجود اطلاعاتی از رفتار طیفی اجسام گوناگون در طول موج‌های مختلف، بر اساس منحنی‌های شاخص بازتابندگی و جذب طیف در سنجش از دور بسیار بااهمیت است (Gupta and Roy, 2007). به‌طور کلی روش‌های پردازش تصویرهای ماهواره‌ای را می‌توان به دو گروه آمارپایه و طیف‌مبنا تقسیم‌بندی کرد. در روش اول (آمارپایه) اصول پردازش بر مبنای نحوه پراکندگی فراوانی‌نمای مقادیر پیکسلی هر باند، میانگین، میانه و مد پایه‌گذاری شده است. این در حالی است که در روش دوم (طیف‌مبنا) از ابتدای پردازش باید الگوی طیفی مرجع، مشخص باشد.

پس از شناسایی مناطق مستعد مغناطیسی با سنجش از دور، مغناطیس‌سنجی به‌عنوان یک روش ژئوفیزیکی سریع و ارزان قیمت برای اکتشاف کانسارهای آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش هدف به‌دست آوردن خودپذیری مغناطیسی و تعیین وضعیت کانسار در عمق از طریق اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در یک محدوده است (Cooper and Cowan, 2006). در سال‌های اخیر روش مغناطیس‌سنجی به‌طور موفقیت‌آمیزی برای اکتشاف کانی‌های مغناطیسی مگنتیت، ایلمنیت، هماتیت، سیدریت، لیمونیت و گوتیت در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی پیشر و وارون، ابزار تصویرسازی کانسنگ در روش مغناطیس‌سنجی هستند. بویژه روش وارون‌سازی برای بررسی و تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، به دفعات زیاد مورد استفاده قرار گرفته (به‌عنوان نمونه فاتحی و همکاران 1392؛ Parker and Huestis, 1974؛ Schoppa et al., 2000) و در موارد بکاررفته نتایج مطلوبی حاصل شده است.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

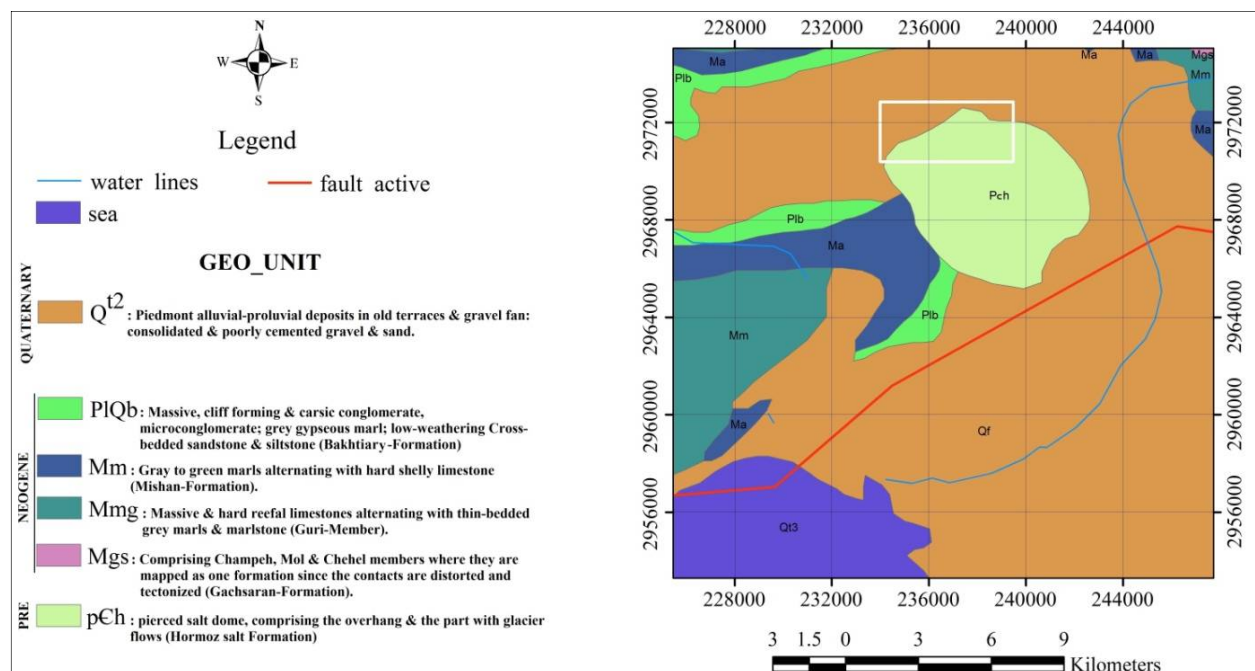
گستره مراغ مطابق شکل 1 در یک کیلومتری جنوب روستایی به همین نام از توابع بخش شیب‌کوه شهرستان بندرلنگه، 14/3 کیلومتری شمال شرقی بندرچارک استان هرمزگان در جنوب ایران قرار دارد. این گستره از شمال به روستای مراغ، از جنوب به باوردان، از غرب به سه کنار و از شرق به ارمک محدود می‌شود.

شکل 2 نیز نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. گستره اکتشافی براساس تقسیمات زمین‌شناسی - ساختاری ایران در بخش جنوب شرقی پهنه زاگرس قرار دارد (Alian and Bazamad, 2014). این گستره از واحدهای درهم سازند هرمز به‌عنوان قدیمی‌ترین سازند منطقه، شیل، مارن و خاک سرخ به سن پرکامبرین تشکیل شده است و در سازندهای میشان (مارن خاکستری و آهک‌های رسی)، آغاچاری (ماسه‌سنگ آهکی و مارن‌های سرخ‌رنگ) و بختیاری (کنگومرا و ماسه‌سنگ‌های آهکی چرتی) با سن سنوزوئیک برونزد یافته است.

سنگ‌های آذرین موجود در گستره مورد بررسی، شامل بازالت‌های حفره‌دار و دیاباز هستند که توزیع پراکنده و ناهماهنگی دارند. در بخش شرقی، ارتفاعات به نسبت بلند بازالتی قرار دارد. سنگ‌های دیابازی به صورت استوک و دایک برونزد دارند و اغلب درآمیخته با رسوبات هستند. کانسنگ آهن منطقه شامل کانی‌های هماتیت، اسپیکولاریت، مگنتیت، گوتیت و دیگر اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است (Alian and Bazamad, 2014).



شکل 1. موقعیت جغرافیایی گستره مورد مطالعه (مستطیل آبی‌رنگ) در نقشه Google Earth



شکل 2. نقشه زمین‌شناسی و واحدهای لیتولوژی گستره مورد مطالعه (مستطیل سفیدرنگ) (Haddadan, 2006)

روش مطالعه

در پژوهش حاضر ابتدا داده‌های سنجنده ASTER گستره مراغ بندرچارک واقع در استان هرمزگان با استفاده از نسخه 4/7 نرم‌افزار ENVI مورد پردازش، تحلیل‌های مشاهده‌ای و طیفی سنجش از دور قرار گرفتند. در این مطالعه از داده‌های ASTER یک برگه از نوع ASTER Level 1T با شماره 20150430144431_28971_T AST_L1T_00308232003070852_ مربوط به تاریخ 2003/08/23 استفاده شده است. امروزه داده‌های ASTER با توجه به قیمت پایین، دسترسی آسان و تفکیک‌پذیری به نسبت مطلوب، به ابزاری مفید برای مقاصد اکتشافی، تبدیل شده است. این سنجنده یکی از تصویربرداری‌های موجود بر روی ماهواره TERRA می‌باشد که در دسامبر سال 1999 به‌عنوان بخشی از سامانه مشاهده زمین¹ (ناسا) پرتاب شد (Torres, 2007). سنجنده ASTER سه محدوده طیفی مرئی و فرورسرخ نزدیک²، فرورسرخ طول موج کوتاه³ و فرورسرخ حرارتی⁴ را در قالب 14 باند و از طول موج 0/52 تا 11/65 میکرومتر پوشش می‌دهد (Yamaguchi et al., 2001). در این راستا پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی آهن مشخص شد. پس از شناسایی گستره و مشخص شدن حضور کانی‌سازی احتمالی آهن، اکتشاف مقدماتی کانسار با روش مغناطیس‌سنجی، پردازش داده‌های مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار Geosoft Oasis montaj و مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌ها انجام گرفت.

بحث

فرآیند سنجش از دور گستره مورد مطالعه

فرآیند سنجش از دور مشتمل بر دو مرحله است. مرحله اول، پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها قبل از ورود آنها به مرحله پردازش است. عملیات پیش‌پردازش داده‌های گستره مورد مطالعه شامل تصحیح هندسی به روش تصویر به تصویر⁵ و تصحیح اتمسفری⁶ است. مرحله دوم تعیین بهترین باندهای سنجنده ASTER و اعمال تکنیک‌های ترکیب رنگی کاذب⁷ (FCC)، نسبت‌گیری باندهای⁸ (BR)، برازش کمترین مربعات⁹ (LS-Fit)، روش انتخابی کروستا¹⁰ یا تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی¹¹ (DPCA) و در نهایت طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی¹² (SAM) و تهیه نقشه دگرسانی گستره مورد مطالعه است.

¹ Earth observing system

² Visible and near-infrared

³ Short-wave infrared

⁴ Thermal infrared

⁵ Image to image

⁶ Internal average relative reflectance

⁷ False Color Composite

⁸ Banding Ratio

⁹ Least Square-Fit

¹⁰ Crosta

¹¹ Directed Principal Component Analysis

¹² Spectral Angle Mapper

اعمال تکنیک ترکیب رنگی کاذب

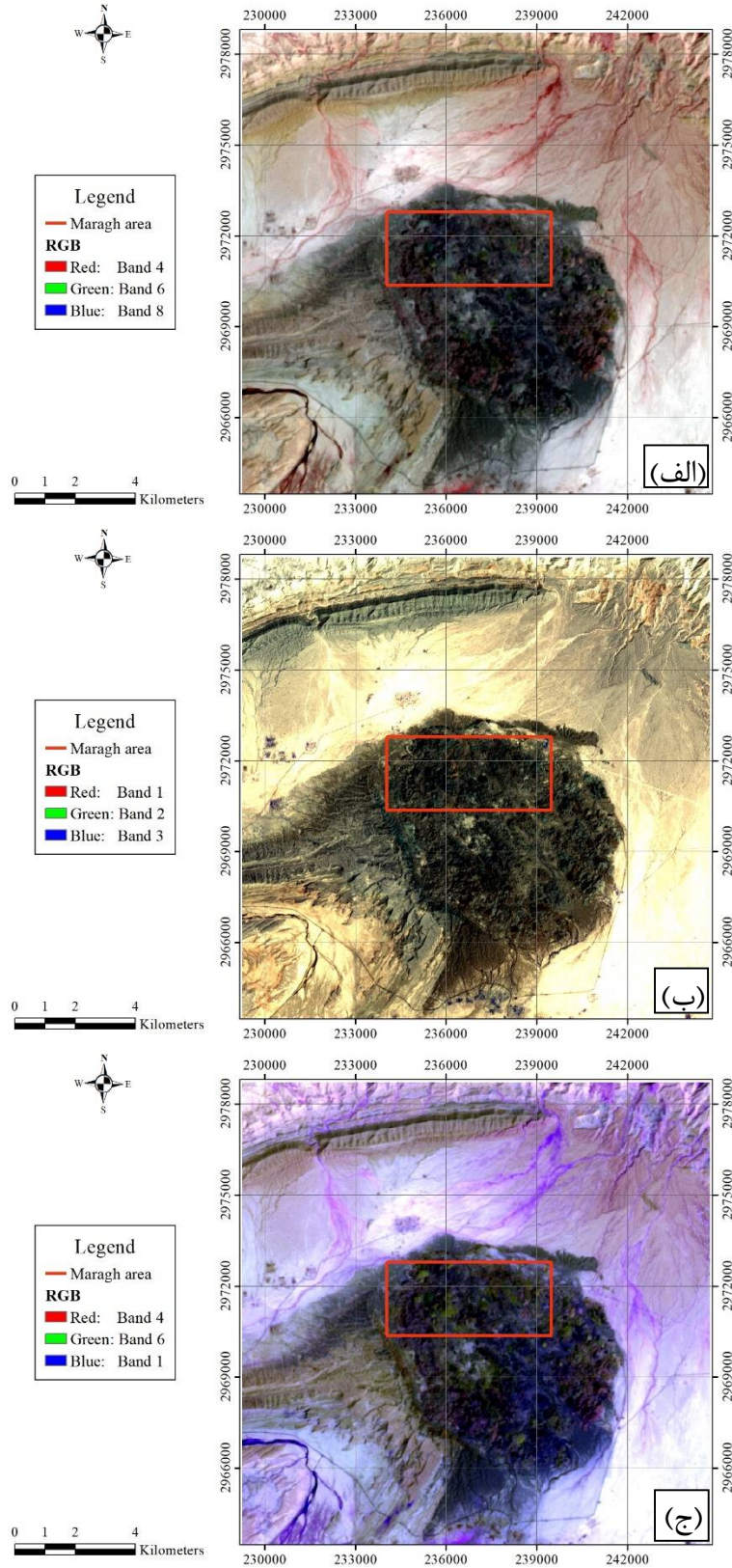
در این روش با قرار دادن باندهای مناسب تصویر در جعبه‌های قرمز، سبز و آبی، عوارض مورد نظر مفسر به رنگ-های دلخواه در تصویر، نمایان می‌شوند تا عوارض مطلوب به‌آسانی از تصویر بدست آمده استخراج شود. ترکیب رنگی کاذب باندهای $R(4)G(6)B(8)$ به‌دلیل جذب کانی‌های شاخص کمر بند فلیک- آرژیلیک (کائولینیت، ایلیت و مونت مورینیت) در باند شش مادون قرمز کوتاه (SWIR) و جذب کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت و اپیدوت) در باند هشت مادون قرمز کوتاه (SWIR) برای آشکارسازی دگرسانی‌ها در گستره کانسار مناسب هستند (Azizi et al., 2010; Boloki and Poormirzaee, 2009; Di Tommaso and Rubinstein, 2007).

در ترکیب رنگی $R(4)G(6)B(8)$ ، دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی تا قرمز و دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز نمایان می‌شود (شکل 3-الف). ترکیب رنگی کاذب باندهای $R(1)G(2)B(3)$ به‌منظور آشکارسازی اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت)، با توجه به ویژگی جذب طیفی در محدوده امواج مادون قرمز نزدیک و طیف مرئی (VNIR) (تاجیک و کاکائی، 1385) مورد استفاده قرار گرفته است (شکل 3-ب). در این ترکیب رنگی مناطق دارای اکسید آهن بین پیکسل‌های سفید و زرد متغیر هستند. به‌علاوه ترکیب رنگی $R(4)G(6)B(1)$ نیز برای بازسازی اکسیدهای آهن استفاده شده است (شکل 3-ج). در آن، مناطق دارای اکسید آهن به رنگ سبز، دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ آبی و دگرسانی آرژیلیک به رنگ‌های صورتی و زرد مایل به صورتی درآمده است.

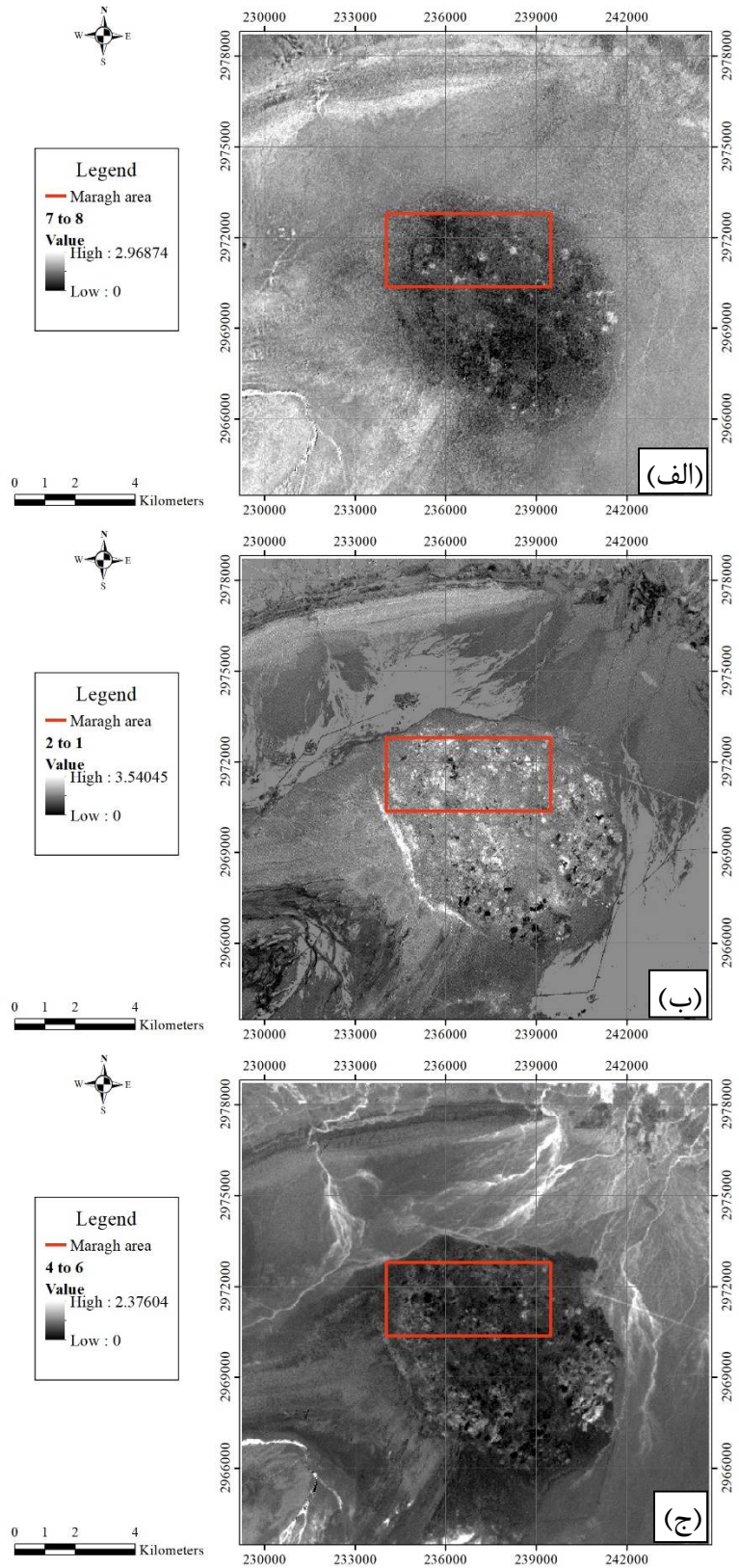
اعمال روش نسبت‌گیری باندی

نسبت‌گیری باندی در واقع یکی از روش‌های پردازش تصاویر چندطیفی است که شامل تقسیم پیکسل‌های یک تصویر یا یک باند طیفی به پیکسل‌های متناظر آن با تصویر یا باند دیگر است. روش نسبت‌گیری باندی می‌تواند برای بازسازی اختلاف طیفی بین باندها مورد استفاده قرار گیرد؛ همچنین اثرهای سایه و اختلاف روشنایی زمین را به‌دلیل شیب زمین کاهش دهد (Abera, 2005; Hewson et al., 2005; Rowan and Mars, 2003; Sabins, 1999).

برای بازسازی دگرسانی پروپیلیتیک، می‌توان از بازسازی کانی‌های شاخص این دگرسانی با استفاده از نمودارهای استاندارد آن بهره برد. مطابق طیف بازتابی استاندارد کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک، این دگرسانی در باندهای هفت و نه دارای تابش و در باند هشت به‌دلیل وجود پیوند $Mg-OH$ دارای بیشترین جذب می‌باشد. بر همین اساس نسبت باندی $7/8$ معادله باندی مناسبی برای آشکارسازی مناطق دارای دگرسانی پروپیلیتیک بوده و مناطق دارای این دگرسانی با اثر مثبت (پیکسل‌های سفیدرنگ) آشکار شده‌اند (شکل 4-الف).



شکل 3. الف) ترکیب رنگی کاذب (R(4)G(6)B(8), ب) ترکیب رنگی کاذب (R(1)G(2)B(3), ج) ترکیب رنگی کاذب R(4)G(6)B(1)



شکل 4. نسبت‌های باندی، الف) 7/8 برای آشکارسازی دگرسانی پروپیلیتیک به صورت پیکسل‌های روشن، ب) 2/1 برای بازسازی اکسیدهای آهن، ج) 4/6 برای آشکارسازی دگرسانی آرژیلیک به صورت پیکسل‌های روشن

برای شناسایی مناطق دارای اکسیدهای آهن (گوتیت، لیمونیت و هماتیت) به سبب جذب در ناحیه باند یک و تابش بیشینه در باند دو (Zamyad et al., 2019, Soe et al., 2005)، از نسبت گیری باندهی 2/1 برای بازسازی اکسیدهای آهن بهره گرفته شده است. به همین دلیل در تصویر استخراج شده (شکل 4-ب)، این مناطق با پیکسل‌های سفیدرنگ نمایان شده‌اند. بدین ترتیب مطابق نمودار طیف بازتابی کانی‌های شاخص دگرسانی فیلیک- آرژیلیک، این سری از کانی‌ها در باند شش و باند چهار به ترتیب بیشترین جذب و تابش را دارا بوده (Ninomiya, 2003)، به همین دلیل برای شناسایی مناطق دارای دگرسانی، از نسبت‌های باندهی 4/6 استفاده شده است (شکل 4-ج).

روش برازش کمترین مربع‌ها

در این روش فرض بر آن است که باندهای به کار رفته به عنوان مقادیر ورودی می‌توانند رفتار سایر باندها را به صورت یک عبارت خطی بیان کنند. این مقدار در واقع باند پیش‌بینی شونده نامیده شده و به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته می‌شود. بعضی از کانی‌های شاخص، اثرات بازتابی خود را تنها در یک باند خاص نمایش می‌دهند. بنابراین میان مقادیر محاسبه شده آنها توسط روش کمترین مربعات و مقدار واقعی، اختلافی وجود خواهد داشت که باقی مانده نام دارد. روش LS-Fit بر اساس مقادیر باقی مانده، اقدام به استخراج مناطق شامل کانی‌های مورد نظر می‌کند (Fakhari et al., 2019).

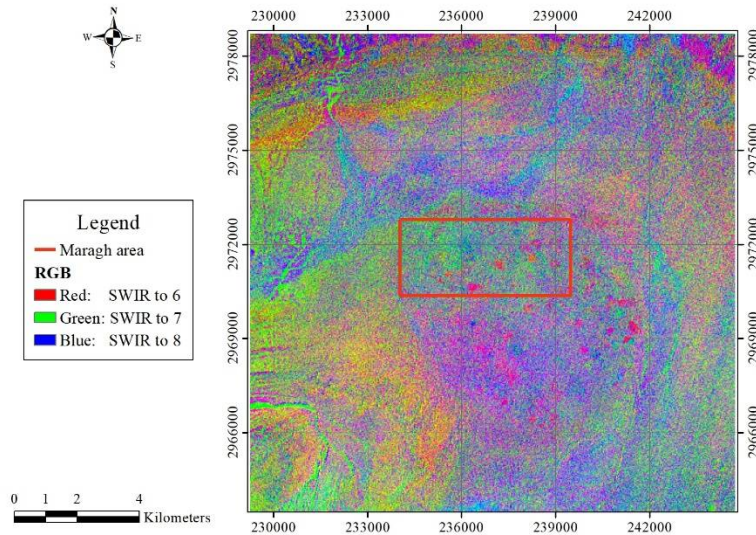
در گستره مورد مطالعه برای آشکارسازی دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک با استفاده از این روش، به ترتیب باندهای شش، چهار و هشت در مقابل پنج باند باقیمانده SWIR به عنوان باندهای پیش‌بینی کننده انتخاب شدند. برای مشخص کردن هرچه بهتر دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک، در شکل 5 ترکیب رنگی RGB نشان داده شده است.

اعمال روش انتخابی کروستا

تحلیل مولفه‌های اصلی هدایت شده (PCA^1)، تکنیکی قدرتمند است که می‌تواند برای فشرده سازی تصاویر و از بین بردن اثرات ناخواسته مورد استفاده قرار گیرد (علوی پناه، 1382). به واسطه این روش، می‌توان شکل‌های ویژه زمین‌شناسی از جمله کمربندهای دگرسانی را تشخیص داد. Crosta و Moore (1989) تکنیکی مبتنی بر PCA را برای نقشه برداری اکسیدهای آهن و گروه‌های هیدروکسیدی با استفاده از داده‌های سنجنده لندست TM معرفی کردند. همچنین آنها از تکنیک مبتنی بر تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی هدایت شده برای نقشه برداری انواع اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی بهره بردند (Ranjbar et al., 2004; Crosta et al., 2003). در اینجا برای شناسایی کمربندهای دگرسانی آرژیلیک از باندهای چهار، پنج و هفت، دگرسانی فیلیک از باندهای چهار، شش و هفت و برای دگرسانی پروپیلیتیک از باندهای هفت، هشت و نه به عنوان ورودی روش تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده شده است (Khaleghi and Ranjbar, 2011). پس از بررسی پروفیل طیفی هر یک از

¹ Principal Component Analysis

دگرسانی‌های بیان شده، فرآیند تحلیل مولفه‌های اصلی بر روی هر گروه به‌طور جداگانه انجام گرفته و نتایج در جدول‌های 1، 2 و 3 آورده شده است.



شکل 5. نقشه دگرسانی‌های گسترده مورد مطالعه به کمک ترکیب رنگی با روش LS-Fit، (R(Phyllic), G(Argillic), B(Propylitic))

جدول 1. ماتریس مقادیر ویژه کمر بند فیلیک

	PC1	PC2	PC3
Band 4	-0.57367	-0.57626	-0.58209
Band 6	-0.77407	0.14905	0.61531
Band 7	0.26781	-0.80356	0.53157

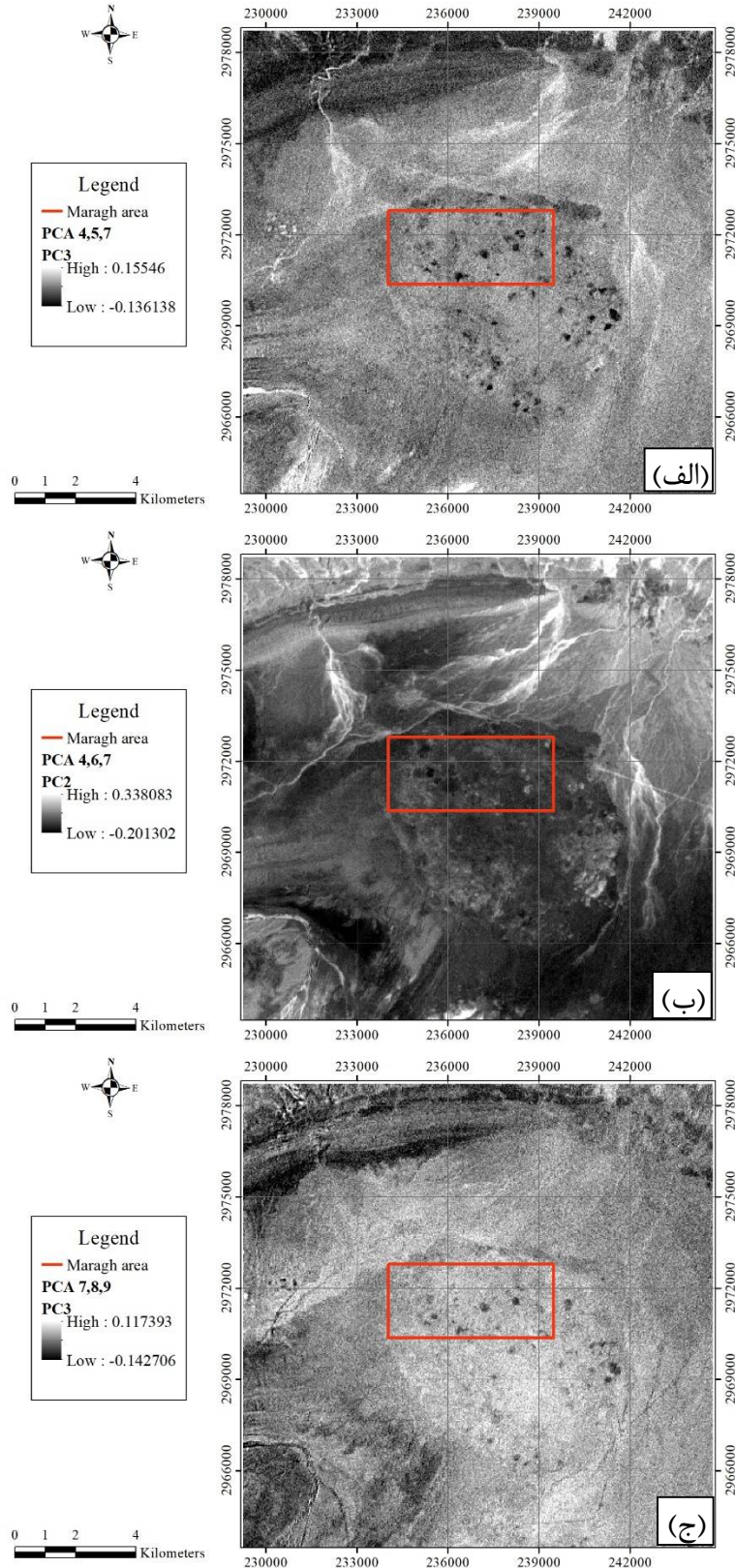
جدول 2. ماتریس مقادیر ویژه کمر بند آرژیلیک

	PC1	PC2	PC3
Band 4	0.553542	0.569312	0.607845
Band 5	0.808419	-0.191926	-0.556438
Band 7	0.200125	-0.799405	0.566482

جدول 3. ماتریس مقادیر ویژه کمر بند پروپیلیتیک

	PC1	PC2	PC3
Band 7	-0.619895	-0.576496	-0.53233
Band 8	-0.495399	-0.238585	0.835259
Band 9	-0.608531	0.781492	-0.13769

در بررسی ماتریس مقادیر ویژه کمر بند فیلیک، بیشترین اختلاف بین باندهای چهار و شش در PC3 مشاهده می‌شود (جدول 1)، بنابراین PC3 برای کمر بند فیلیک مناسب تشخیص داده شد. همچنین با توجه به منفی بودن باند چهار و مثبت بودن باند شش، می‌توان نتیجه گرفت که پیکسل‌های تیره در PC3 نمایانگر مناطق



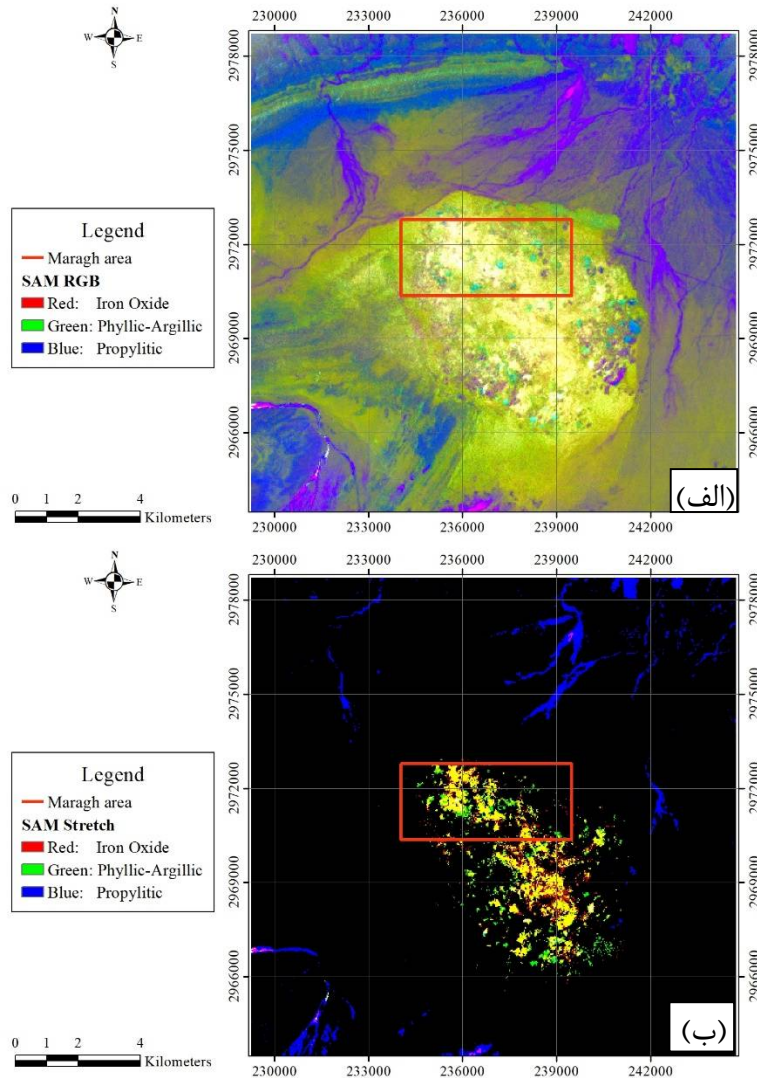
شکل 6. آشکارسازی کمرندهای الف) فیلیک، ب) آرژیلیک، ج) پروپیلیتیک به روش PCA

دگرسان شده فیلک هستند (شکل 6-الف). همین‌طور برای شناسایی محدوده‌های دارای دگرسانی آرژلیک، اختلاف میان باندهای چهار و هفت در PC2 (جدول 2) نمایش‌دهنده مناطق دارای دگرسانی آرژلیک است (شکل 6-ب). در روشی مشابه برای شناسایی محدوده‌های دگرسانی پروپیلیتیک که با استفاده از باندهای هفت، هشت و نه حاصل شده است (جدول 3)، اختلاف میان باندهای هفت و هشت در PC3 بیشترین مقدار بوده و می‌توان پراکندگی دگرسانی پروپیلیتیک را در PC3 آن مشاهده کرد (شکل 6-ج).

طبقه‌بندی نظارت شده به‌روش الگوریتم نقشه‌برداری زاویه طیفی

فرآیند طبقه‌بندی نظارت شده به‌روش نقشه‌برداری زاویه طیفی، بدین‌صورت است که نقشه‌برداری سریع پدیده‌ها را از طریق محاسبه شباهت طیفی بین بردار تصویر با داده‌های طیفی مرجع ممکن می‌سازد (Yuhas et al., 1992). الگوریتم این روش، شباهت بین دو طیف را به‌وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند. در این روش هرچه مقدار زاویه (بین صفر تا 10) کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر خواهد بود. نتایج حاصل از اعمال تکنیک نقشه‌برداری زاویه طیفی در شکل 7-الف ارائه شده است که پراکندگی دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلک-آرژلیک و اکسید آهن را در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین در شکل 7-ب به‌منظور بهبود کیفیت تصویر از فراوانی‌نمای کششی¹ (کشیدن و محدود کردن طیف رنگ‌ها به‌منظور باقی‌ماندن محدوده‌های بالا) استفاده شده که می‌توان با بررسی فراوانی‌نما، از اطلاعات آماری یک بخش و یا کل تصویر استفاده کرد. با توجه به شکل 7، می‌توان نتیجه گرفت که پیکسل‌های سبز رنگ آلتراسیون فیلک و پیکسل‌های زرد رنگ آرژلیک را مشخص می‌کنند. همچنین پیکسل‌های قرمز رنگ بیانگر اکسید آهن موجود در منطقه می‌باشد. نتایج به دست آمده از دورسنجی گستره مورد مطالعه و بازدید صحرایی از گستره در حین برداشت مغناطیس‌سنجی و مشاهده رخنمون‌های هماتی و مگنتیتی در منطقه، می‌توان به صحت و درستی دورسنجی انجام شده و نتایج به دست آمده پی برد.

¹ Stretching Histogram

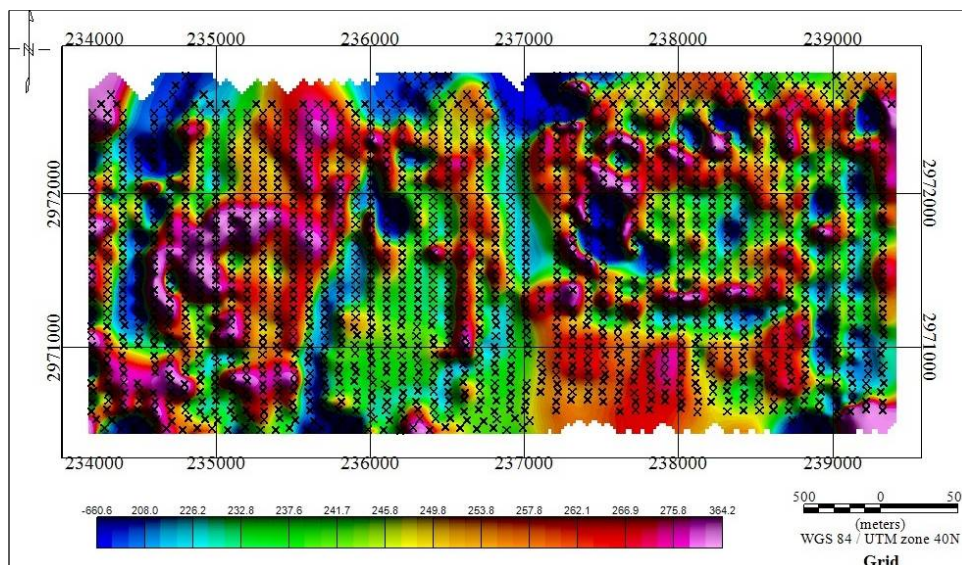


شکل 7. استخراج دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلیک - آرژیلیک و اکسیدهای آهن با استفاده از الگوریتم SAM، الف) R(Iron-Oxide), G(Phyllic-Argillic), B(Propylitic) Stretch

مغناطیس‌سنجی گستره مورد مطالعه

برداشت مغناطیسی در این گستره بر روی پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌زایی آهن حاصل از روش دورسنجی، در گستره‌ای به ابعاد تقریبی 5/2 در 2/15 کیلومتر و در 1913 ایستگاه اندازه‌گیری با استفاده از یک دستگاه مگنتومتر پروتون صورت گرفته است. برای انجام عملیات پردازش و تفسیر کیفی داده‌های مغناطیسی، از نرم‌افزار Geosoft Oasis montaj نسخه 8/4 بهره برده شد. با لحاظ کردن مقادیر 42/2 درجه برای زاویه میل مغناطیسی، 2/4 درجه برای زاویه انحراف مغناطیسی و تصحیح IGRF، داده‌های مغناطیس باقی‌مانده بدست آمد.

در شکل 8 نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقی مانده منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. این نقشه با کم کردن مقدار IGRF گستره مطالعاتی از داده‌های ثبت شده در منطقه به دست آمده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نیمه غربی گستره دارای بیشترین تغییرات شدت میدان مغناطیسی است. در نیمه شرقی نیز گستره‌های با شدت مغناطیسی بالا به صورت مجزا از یکدیگر دیده می‌شوند.

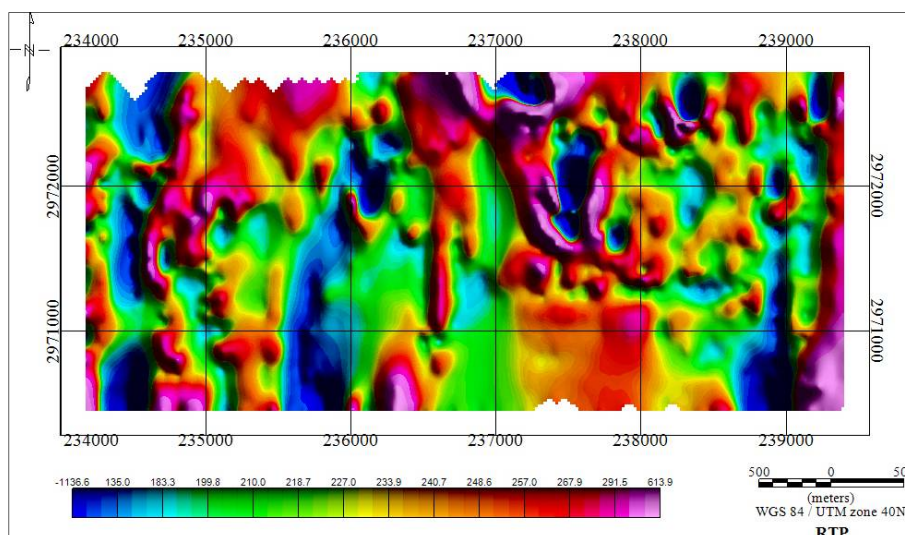


شکل 8. نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقی مانده گستره مورد مطالعه (موقعیت نقاط برداشت با علامت × مشخص شده‌اند)

از آنجایی که میدان مغناطیسی خاصیت برداری دارد، اثر زاویه میل و انحراف مغناطیسی زمین باعث خواهد شد تا مقادیر بیشینه شدت میدان مغناطیسی کل به طور دقیق بر روی توده مغناطیسی منطبق نباشد. برای تصحیح این پارامترها از فیلتر برگردان به قطب¹ (RTP) استفاده می‌شود؛ به گونه‌ای که در چنین نقشه‌ای بیشترین مقدار بی‌هنجاری به طور دقیق بر روی منشا آنها قرار خواهد گرفت. این روش توسط Baranov (1957) و Baranov و Naudy (1964) توسعه داده شد (Azizi et al., 2010). در شکل 9 نقشه حاصل از این پردازش آورده شده است که در آن چندین کمر بند بی‌هنجاری را می‌توان مشاهده کرد. این نقشه کم‌وبیش شبیه نقشه شکل 8 است با این تفاوت که در این نقشه اندکی پیچش و جابه‌جایی مشاهده می‌شود. از آنجایی که اثر توده‌های مغناطیسی عمیق بسیار کم‌تر از توده‌های نزدیک به سطح زمین می‌باشد، برای تفسیر هرچه بهتر توده‌های عمیق لازم است که فیلتر ادامه فراسو² یا گسترش به سمت بالا اعمال شود. اساس این روش آن است که داده‌ها به ارتفاع بالاتری نسبت به سطح اصلی برداشت شده خود منتقل می‌شوند و هدف آن حذف بی‌هنجاری‌های با طول موج کوتاه، برجسته‌سازی بی‌هنجاری‌های عمیق و کم کردن اثر عوامل خطا است (Lelievre and Oldenburg, 2006).

¹ Reduce to pole

² Upward continuation



شکل 9. نقشه برگردان به قطب مغناطیسی گستره مورد مطالعه

مطابق شکل 10 این پردازش در ارتفاعهای 1800، 1500، 1250، 1000، 750، 500، 250 متر بر روی نقشه برگردان به قطب اعمال شده و در ارتفاع 1800 متر اثر ناحیه‌ای به‌طور کامل از بین رفته که با کسر آن از نقشه اولیه، اثر بی‌هنجاری‌های سطحی محو شده و گسترش عمقی قابل توجه بی‌هنجاری‌ها مشخص شده است. از آنجایی که اجزای سیگنال¹ و نوفه² یک موج دارای ویژگی‌های فرکانسی متفاوتی هستند، برای تفکیک آنها از یکدیگر فیلترهای فرکانسی به‌کار می‌روند. یکی از فیلترهای فرکانسی، فیلتر پایین‌گذر است. با اعمال فیلتر پایین‌گذر، اثر بی‌هنجاری‌های سطحی با طول موج کوتاه، حذف و اثر بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر با طول موج بلندتر، آشکار می‌گردد. بدین ترتیب اثر مغناطیس‌های ناحیه‌ای کوچک، حذف می‌شوند.

مطابق شکل 11 این پردازش بر روی نقشه به‌دست آمده در شکل 10-ی به‌منظور رفع اثرات سطحی جزئی‌تر اعمال شد که به‌مراتب اثرات بی‌هنجاری‌های اصلی را بهتر نمایان می‌سازد. این پردازش برای ارتفاع 400 متر (مناسب‌ترین ارتفاع که براساس تجربه، سعی و خطا و نیز فاصله پروفیل‌های برداشت انتخاب شده است)، اعمال شده که وجود اثرات بی‌هنجاری، نشانگر عمیق بودن آنهاست.

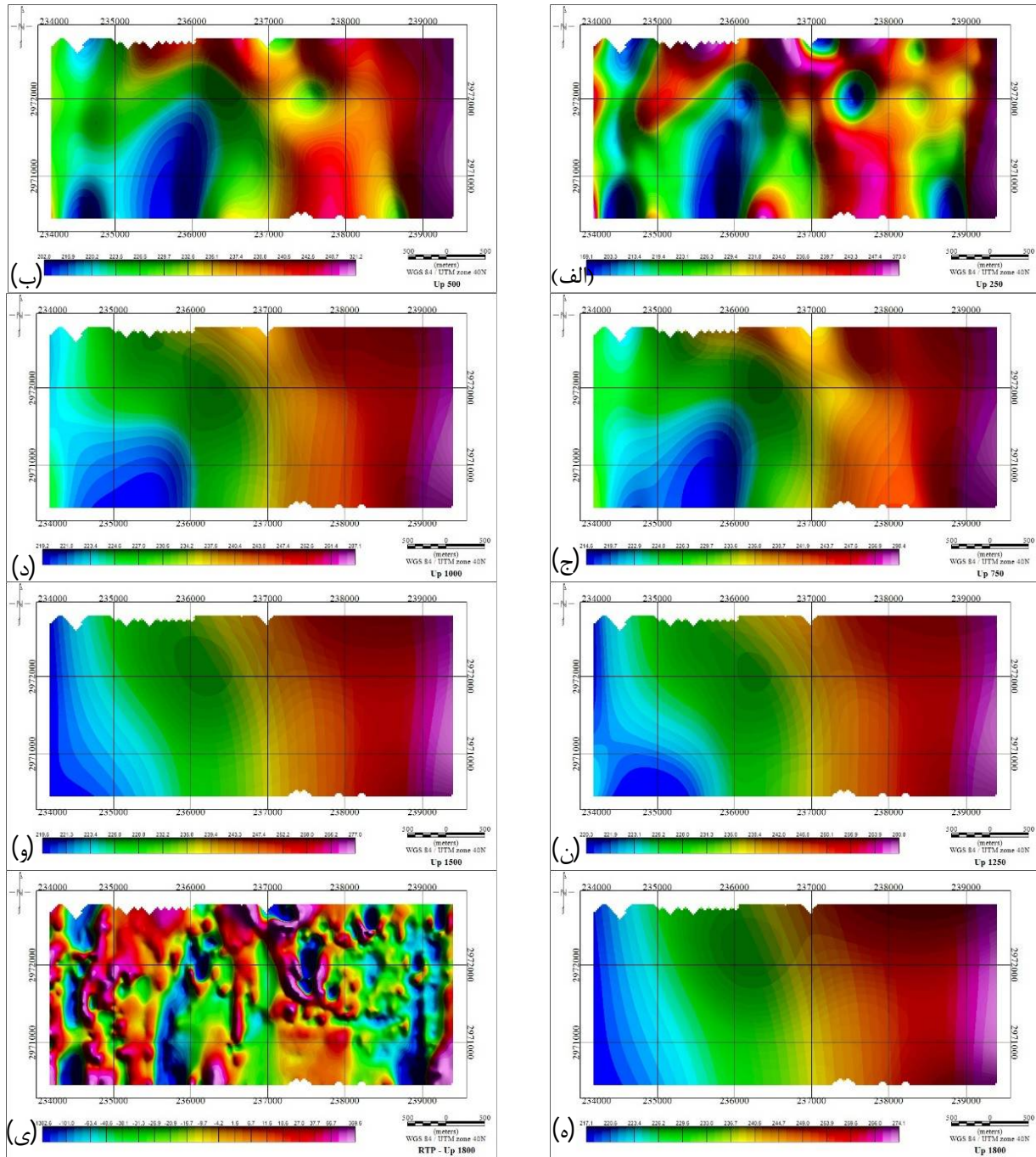
یکی از مهم‌ترین مباحث در تفسیرهای مغناطیسی، تعیین دقیق مرز بی‌هنجاری‌هاست. برای این مهم، فیلترهای متعددی استفاده می‌شوند که می‌توان از فیلترهای مشتق قائم، مشتق افقی، گرادیان افقی کل³ (THD)، سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت نام برد. تمامی فیلترهای اشاره‌شده، فیلترهای بالاگذر هستند که هدفشان برجسته‌سازی تغییرات مرتبط با توده سرچشمه بی‌هنجاری است. علاوه بر کاربرد این فیلترها در تخمین مرز، اساس بیشتر روش‌های تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل مانند روش‌های تخمین عمق، کمیت مشتق خواهد بود.

¹ Signal

² Noise

³ Total Horizontal Derivative

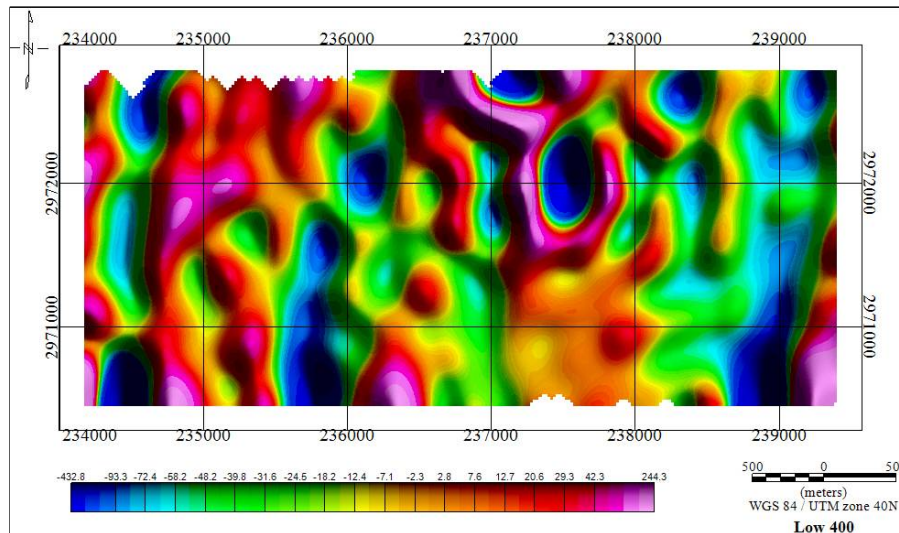
متداول ترین فیلتر در برآورد مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل، فیلتر گرادیان افقی کل است. کارایی این فیلتر در تشخیص و تعیین لبه منابع عمیق و مدفون است که از طریق رابطه 1 محاسبه می‌شود:



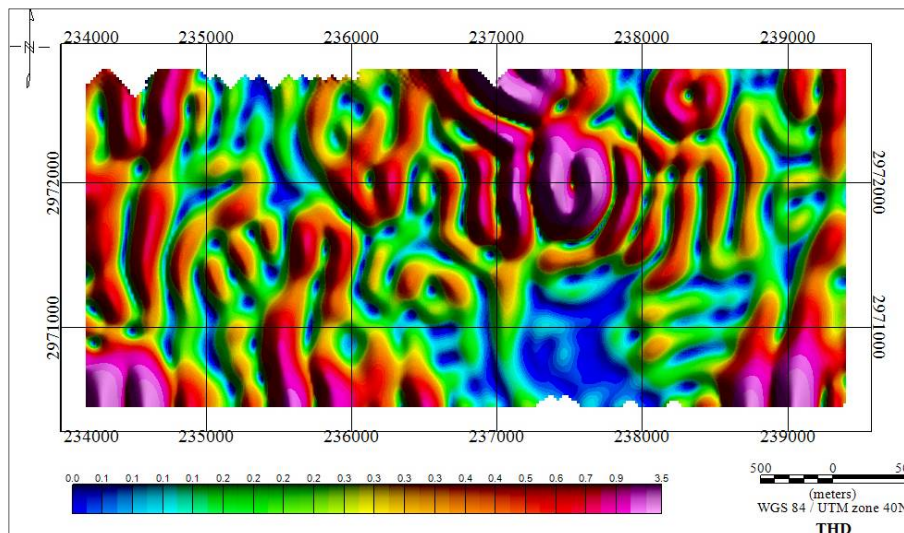
شکل 10. الف تا ه) نقشه میدان مغناطیسی بعد از اعمال فیلتر گسترش به سمت بالا تا ارتفاع‌های 1000، 750، 500، 250 متر، ی) نقشه میدان مغناطیسی بعد از کسر اثر ناحیه‌ای (ادامه فراسو برای ارتفاع 1800 متر)

$$THD = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

شکل 12 نتیجه اعمال فیلتر گرادیان افقی کل بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. در این شکل بیشینه مقدار گرادیان، بیانگر مرزهای توده مورد نظر است. مطابق شکل بی‌هنجاری مغناطیسی در چند گستره به‌طور مجزا مشاهده می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که کانی‌سازی دارای راستای شمالی - جنوبی است.



شکل 11. خروجی فیلتر پایین‌گذر به ازای ارتفاع 400 متر اعمال شده بر نقشه مغناطیس باقی‌مانده بدون اثر ناحیه‌ای



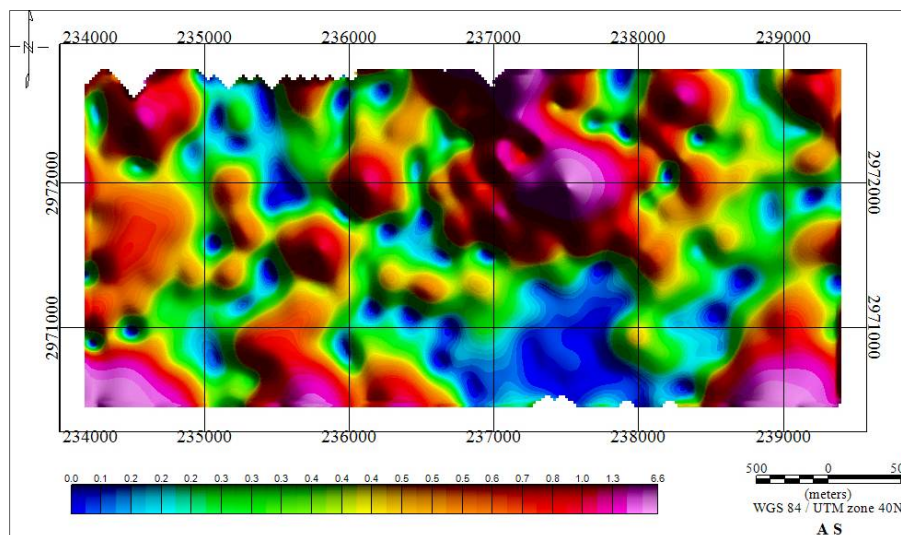
شکل 12. نقشه گرادیان افقی کل (THD)

به‌منظور تعیین موقعیت تصویر سطحی ماده معدنی و امتداد آن، از نقشه سیگنال تحلیلی استفاده می‌شود. بی‌هنجاری‌های مشخص شده در این فیلتر، درست در مرکز ثقل توده قرار دارند و تصویری واقعی از کانسار مدفون را در اختیار قرار می‌دهند. این فیلتر از رابطه 2 به‌دست می‌آید:

$$AAS(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

می‌توان دامنه سیگنال تحلیلی سه‌بعدی در هر موقعیت را از گرادیان‌های عمود بر هم میدان مغناطیسی کل دامنه سیگنال به دست آورد. برای محاسبه سیگنال تحلیلی ابتدا گرادیان افقی تعیین می‌شود و سپس تبدیل هیلبرت برای تعیین گرادیان قائم مورد استفاده قرار می‌گیرد. تبدیل هیلبرت بدون تغییر در مقدار تابع، روی طیف فاز، تغییر 90 درجه‌ای ایجاد می‌کند؛ به عبارت دیگر گرادیان افقی به قائم تبدیل شده و لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تعیین می‌شود.

در شکل 13 نتیجه اعمال این پردازش بر روی شکل 10-ی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به کمک این پردازش منبع بی‌هنجاری، برجسته‌تر شده و چند توده کروی شکل نمایان شده است. با توجه به نقشه‌های مغناطیس‌سنجی به دست آمده و مقایسه آنها با نتایج دورسنجی، همپوشانی مناسب بین این دو پردازش را می‌توان نتیجه گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود مناطق با پتانسیل بالا چه در دورسنجی و چه در مغناطیس‌سنجی، بیشتر در مرکز محدوده قرار دارند.



شکل 13. نقشه سیگنال تحلیلی گستره مورد مطالعه

مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌ها

روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشاهده شده بر روی سطح را می‌توان با استفاده از داده‌های مغناطیسی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی کرد. برای دست‌یابی به این هدف، منطقه مورد مطالعه به مکعب مستطیل‌های با خودپذیری مغناطیسی ثابت تقسیم‌بندی شد. همچنین مغناطیس بازمانده صفر و مغناطیدگی ناچیز در نظر گرفته شد. به این ترتیب تنها مغناطیس القایی محاسبه شد که این مقدار برای هر سلول ثابت است. برای وارون‌سازی داده‌ها، باید ترکیبی از تابع هدف مدل و تابع هدف برازش بهینه‌سازی شود (Li and Oldenburg, 1996). بیشتر وارون‌سازی مسائل ژئوفیزیکی، از نوع مسائل بیش تعیین شده است (Lelievre and Oldenburg, 2006). بنابراین بی‌نهایت مدل تولید می‌شود که از میان آنها، جواب مطلوب مدلی خواهد بود که با ساختارها و

خصوصیات زمین‌شناسی مطابقت بیشتری داشته باشد. در الگوریتم لی - اولدنبرگ¹، تابع هدف مدل به صورت رابطه 3 تعریف شده است (Williams, 2008).

$$\phi_m = a_s \int_V w_s [w_r(z)(m - m_{ref})]^2 dV + a_x \int_V w_x \left[\frac{\partial}{\partial x} w_r(z)(m - m_{ref}) \right]^2 dV + \quad (3)$$

$$a_y \int_V w_y \left[\frac{\partial}{\partial y} w_r(z)(m - m_{ref}) \right]^2 dV + a_z \int_V w_z \left[\frac{\partial}{\partial z} w_r(z)(m - m_{ref}) \right]^2 dV$$

قسمت اول معادله، معیار نزدیکی مدل به مدل مرجع (m_{ref}) بوده و دیگر عبارات، میزان همواری مدل در جهت‌های x ، y و z را کنترل می‌کنند. ضریب‌های a_s, a_x, a_y, a_z برای وزن‌دهی قسمت‌های مختلف معادله بوده که تابع هدف مدل را قادر می‌سازد تا با تغییر یک یا دو پارامتر، موفق به بازسازی مدل‌هایی نزدیک یا برحسب اولویت در یک راستای خاص هموارتر باشد. توابع وزنی وابسته فضایی w_s, w_x, w_y, w_z برای وزن‌دهی اهمیت یک پارامتر مدل نسبت به دیگری کاربرد دارند (Phillips, 2002).

ϕ_m تابع هدف مدل و تابع w_r ماتریس وزنی عمقی بوده که هدف آن خنثی‌سازی میرایی هندسی حساسیت با استفاده از پارامتر فاصله می‌باشد. بنابراین تمامی سلول‌ها دارای احتمال یکسان برخوردار می‌باشند و از تمرکز مدل در سطح جلوگیری به عمل خواهد آمد (Williams, 2008).

برازش کامل داده‌های اندازه‌گیری شده بر داده‌های محاسبه شده باعث ایجاد خطا در مدل خواهد شد؛ بنابراین تابع هدف برازش نیز با رابطه 4 محاسبه می‌شود:

$$\phi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\vec{d}^{obs} - \vec{d}^{cal}}{\sigma_i} \right)^2 = W_d \|\vec{d}^{obs} - \vec{d}^{cal}\|_2^2 \quad (4)$$

که در آن \vec{d}^{obs} داده‌های برداشت‌شده²، \vec{d}^{cal} داده‌های محاسبه‌شده و σ_i انحراف معیار داده نام هستند. این انحراف معیار بر روی قطر اصلی ماتریس W_d قرار خواهد گرفت.

پس از اعمال تمامی قیدها به داده‌ها و پارامترهای مدل، تابع هدف زیر حاصل خواهد شد:

$$\phi = \phi_d + \mu \phi_m \quad (5)$$

و به شکل زیر عمومیت پیدا می‌کند:

$$\phi(\lambda) = \phi_d + \mu \phi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^m \ln m_j \quad (6)$$

$$\phi = \|\vec{d}^{obs} - \vec{d}^{cal}\|_2^2 + \mu \|W_m(\vec{k} - \vec{k}_o)\|_2^2 - 2\lambda \sum_{j=1}^m \ln m_j$$

که در آن عبارت $2\lambda \sum_{j=1}^m \ln m_j$ تابع مرزی، λ ضریب مرزبندی و μ ضریب منظم‌سازی است که بین میزان نزدیکی نمودار مدل نهایی به داده‌های اصلی و عدم مدل‌سازی نوفه‌ها تعادل ایجاد می‌کند.

تفسیرهای صورت گرفته بر روی داده‌های میدان مغناطیسی کیفی و یا در نهایت نیمه کمی بوده و در تعیین پارامترهای کمی و هندسی کانی‌سازی قابل استفاده نیستند. یکی از بهترین روش‌ها برای تفسیر کمی داده‌های

¹ Li- Oldenburg

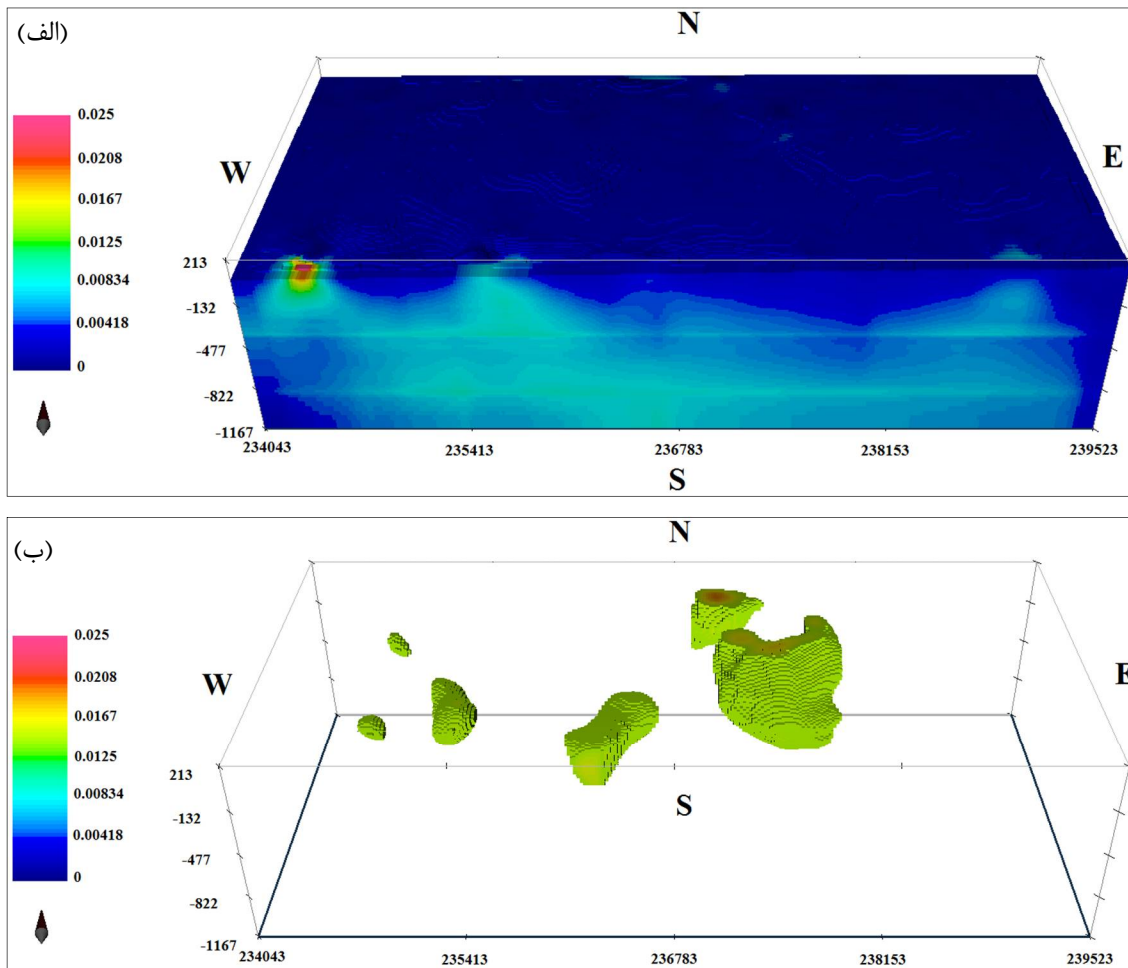
² Data Miss-Fit

مغناطیسی مدل‌سازی وارون سه‌بعدی است که در آن مدل توزیع خودپذیری ذاتی سنگ‌ها را در سه بعد به تصویر می‌کشد. مطابق شکل 14 گستره کانسار مراغ با بلوک‌هایی به ابعاد $20 \times 20 \times 10$ متر (20 متر در راستاهای شمالی - جنوبی و شرقی - غربی و 10 متر در راستای قائم) به صورت سه‌بعدی، مدل‌سازی شده است. وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های این محدوده پس از اعمال پردازش‌های ادامه فراسوی ارتفاع 1800 متر و فیلتر پایین‌گذر ارتفاع 400 متر، با استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ توسط نرم‌افزار UBC Mag3D 4.0 انجام شد. در این مدل‌سازی پارامتر وزن‌دهی عمق 1000 متر و خودپذیری مغناطیسی اولیه¹ برابر با 0/001 منظور شد که مطابق آن تمامی منطقه به صورتی همگن، شامل این مقدار خودپذیری مغناطیسی می‌باشند. همچنین در بخش مدل مرجع²، مقدار 0/01 در نظر گرفته شد که با استفاده از الگوریتم مورد استفاده، میزان خودپذیری اولیه به میزان خودپذیری مرجع افزایش می‌یابد. در ادامه مقدار خودپذیری مغناطیسی منطقه مثبت و بین صفر تا 0/3 محدود شد. در انجام این فرایند، تعداد داده‌های مغناطیسی مورد استفاده 5118 عدد بوده و تعداد کل سلول‌های مدل‌سازی نیز 2953132 ($266 \times 122 \times 91$) عدد می‌باشد. در نتیجه این فرآیند تعداد شش توده کانسار بزرگ و کوچک به صورت مجزا از هم شناسایی شده که عمیق‌ترین آنها در عمق 507 متری قرار دارد و عمق دفن متوسط سایر توده‌ها نیز بین 200 تا 300 متر است.

مطابق شکل 14-الف در بخش سطحی جنوب غربی گستره مورد مطالعه، بی‌هنجاری قابل توجهی مشاهده می‌شود که به دلیل بسته نشدن دوقطبی بی‌هنجاری و فقدان اطلاعات کافی در مرز در مدل‌سازی سه‌بعدی، مورد پردازش قرار نگرفته و در نتیجه در شکل 14-ب آثاری از آن دیده نمی‌شود. به منظور دستیابی به اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر در مورد بی‌هنجاری این بخش، بایستی ایستگاه‌های مغناطیسی متراکم برداشت شوند. با توجه به کمربند گستره مورد مطالعه (زاگروس) برای صحت‌سنجی از مدل به دست آمده، می‌توان موقعیت نقاط حفاری را پیشنهاد کرد.

¹ Initial model

² Reference model



شکل 14. الف) مدل سازی سه بعدی کانسار مورد مطالعه، ب) نمایش بلوک های بی هنجاری کانسار

نتیجه گیری

با توجه به مطالعات دورسنجی انجام گرفته روی گستره اکتشافی مراغ، به یاری تصویرها و داده های سنجنده ASTER اکسیدهای آهن گستره آشکار شده و کمربندهای دگرسانی فیلک، آرژیلیک و پروپیلیتیک به کمک نرم افزار ENVI با دقتی بسیار بالا، توسط روش های مختلف پردازشی همانند ترکیب رنگی کاذب، نسبت گیری باندی، تحلیل مولفه های اصلی و برازش کمترین مربعات، آشکارسازی شدند که حضور کمربندهای دگرسانی و نیز اکسید آهن، مستعد بودن گستره مورد مطالعه را برای مطالعات بیشتر پتانسیل های معدنی نشان می دهد. براساس نتایج، مرحله شناسایی و پی جویی توسط روش دورسنجی و احتمال وجود اکسید آهن در گستره، مطالعات ژئوفیزیک اکتشافی، به روش مغناطیس سنجی انجام گرفت که پس از انجام تصحیحات مورد نیاز و اعمال پردازش های مختلف، کمربندهای بی هنجاری منطقه شناسایی شدند. با استفاده از مدل سازی وارون سه بعدی انجام شده نیز شکل تقریبی توده کانسار تعیین شده و عمق دفن آن نیز محاسبه شد.

نتایج پژوهش حاضر از طریق تلفیق دو روش سریع و به نسبت ارزان سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی همراه با مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی نشان می‌دهند که منطقه مراغ از نظر کانه‌سازی آهن دارای پتانسیل بالایی است. شناسایی چنین پتانسیل مطلوبی می‌تواند منجر به ایجاد یک معدن سنگ آهن در منطقه شده که علاوه بر ارزش اقتصادی بالای این ماده معدنی و سودآوری آن، منجر به اشتغال‌زایی مستقیم و غیرمستقیم تعداد زیادی نیروی کار در منطقه شود.

منابع

- تاجیک، م. و کاکائی، ر.، 1385. کاربرد تصاویر سنجنده ASTER در تفکیک زون‌های دگرسانی مس پرفیری (برگه 1:100000 جبال بارز). بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- علوی پناه، ک.، 1382. کاربرد سنجش از دور در علوم زمین. انتشارات دانشگاه تهران، 496.
- فاتحی، م.، نوروزی، غ.ح. و حاجی‌ئی، ف.، 1392. برآورد عمق توده‌های مغناطیسی با استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی. مجله ژئوفیزیک ایران. 7، 4، 52-63.
- Abera, B.G., 2005. Application of Remote Sensing and Spatial Data Integration Modeling to Predictive Mapping of Apatite-mineralized Zones in the Bikalal Layered Gabbro Complex, Western Ethiopia ITC. MSc. Thesis, 63.
- Alian, F. and Bazamad, M., 2014. Petrography of Zendan salt dome (Hara), Bandar Lengeh. In 6th Symposium of Iranian society of Economic Geology, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran.
- Azizi, H., Tarverdi, M.A. and Akbarpour, A., 2010. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. *Advances in Space Research*, 46, 1, 99-109.
- Boloki, N. and Poormirzaee, R., 2009. Using ASTER image processing for hydrothermal alteration and key alteration minerals mapping in Siyahrud, Iran. *International Journal of Geology*, 2, 3, 38-43.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers and Geosciences*, 32, 10, 1585-1591.
- Crosta, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F. and Brodie, C., 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 21, 4233-4240.
- Di Tommaso, I. and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32, 1-2, 275-290.
- Fakhari, S., Jafarirad, A., Afzal, P. and Lotfi, M., 2019. Delineation of hydrothermal alteration zones for porphyry systems utilizing ASTER data in Jebal barez area, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11, 80-92.
- Gupta, H.K. and Roy, S., 2007. Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century. Elsevier, 279.
- Haddadan, M., 2006. Geological map of Iran, Garmsar sheet, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Lar.
- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Mizuhiko, S., Ueda, K. and Mauger, A.J., 2005. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, 99, 1-2, 159-172.

- Khaleghi, M. and Ranjbar, H., 2011. Alteration mapping for exploration of porphyry copper mineralization in the Sarduiyeh area, Kerman province, Iran, using ASTER SWIR data. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5, 8, 61-69.
- Lelievre, P.G. and Oldenburg, D.W., 2006. Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility. *Geophysical Journal International*, 166, 1, 76-90.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1996. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61, 2, 394-408.
- Ninomiya, Y., 2003. A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. In IGARSS. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE No. 03CH37477)* (3, 1552-1554).
- Parker, R.L. and Huestis, S.P., 1974. The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography. *Journal of Geophysical Research*, 79, 11, 1587-1593.
- Phillips, N.D., 2002. Geophysical inversion in an integrated exploration program: Examples from the San Nicolas deposit. Doctoral dissertation, University of British Columbia, 263.
- Ranjbar, H., Honarmand, M. and Moezifar, Z., 2004. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 2, 237-243.
- Rowan, L.C. and Mars, J.C., 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using advanced space-borne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 3, 350-366.
- Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14, 3-4, 157-183.
- Schoppa, A., Schneider, J. and Wuppermann, C.D., 2000. Influence of the manufacturing process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215, 74-78.
- Soe, M., Kyaw, T.A. and Takashima, I., 2005. Application of remote sensing techniques on iron oxide detection from ASTER and Landsat images of Tanintharyi coastal area, Myanmar. *Scientific and Technical Reports of Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University*, 26, 21-28.
- Torres, C.A., 2007. Mineral Exploration Using GIS and Processed Aster Images. *Advance GIS EES 6513 (Spring)*, University of Texas at San Antonio.
- Williams, N.C., 2008. Geologically-constrained UBC-GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew-Wiluna greenstone belt, Western Australia. Doctoral dissertation, University of British Columbia, 509.
- Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Tsu, H., Sato, I., Watanabe, H., Kato, M., Kudoh, M., Kahle, A.B. and Pniel, M., 2001. ASTER early image evaluation. *Advances in Space Research*, 28, 1, 69-76.
- Yuhas, R.H., Goetz, A.F. and Boardman, J.W., 1992. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm. *Geoscience Workshop, 1, AVIRIS Workshop*, 147-149.
- Zamyad, M., Afzal, P., Pourkermani, M., Nouri, R. and Jafari, M.R., 2019. Determination of hydrothermal alteration zones by remote sensing methods in Tirka area, Toroud, NE Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47, 1817-1830.

Integration of remote sensing and magnetometry methods for exploration of iron deposit in the Maragh district of Bandar e Charak

Ahmadi, R.¹, Gharah-Sheikh Bayat, A.R.²

1. Assistant professor, Mining Engineering Departmen, Earth Sciences Engineering College, Arak University of Technology

2. Alumnus of Mining Engineering, Mining Engineering Departmen, Arak University of Technology

Abstract

In the present research, to identify potential and existence of possible iron ore-bearing in the Maragh district of Bandar e Charak in Hormozgan province, first, remote sensing studies using Aster sensor data through ENVI were conducted. Afterward the preliminary exploration of promised regions was performed by magnetometry method. Remote sensing operation of the region data comprises preprocessing sequences of geometric correction by image-to-image method and atmospheric correction as well as processing techniques containing false color composite, banding ratio, least square-fit, directed principal component analysis and finally supervised classification through spectral angle mapper method. Because of this process, alteration-zoning map associated with iron mineralization in the studied region was produced. Magnetic data was acquired in an area of approximately 11.2 km² in 1913 measuring stations using a proton magnetometer. Geosoft Oasis montaj software was employed for processing operation and qualitative interpretation of magnetic data via applying various corrections and filters including reduce to pole, upward continuation up to the variety of elevations, low-pass filter, derivative filters containing total horizontal derivative and analytical signal. At the end, to investigate the trend of magnetic anomalies observed on the surface, determination of approximate shape of the deposit and estimation of its depth, 3-D inverse modeling of the data was carried out. The results of the research through integrating two methods of remote sensing and magnetometry with 3-D inverse modeling of magnetic data, reveal that Maragh district has a high potential from viewpoint of iron ore-bearing. The results of this research will be applied for all of the geosciences practitioner especially geologists and exploration engineers.

Keywords: 3-D inverse modeling, ENVI software, Magnetometry, Maragh of Bandar e Charak, Remote sensing.