

تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به‌منظور اکتشاف کانسار آهن در گستره مراغ بندرچارک

رضا احمدی^(۱) و عبدالرضا قره شیخ بیات^(۲)

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

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹

چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER و به کمک نرم‌افزار ENVI، مطالعات سنجش از دور به‌منظور 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 پیش‌پردازش همانند تصحیح هندسی به روش تصویر به تصویر و تصحیح اتمسفری و تکنیک‌های پردازش ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری بانندی، برازش کمترین مربع‌ها، 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 ۱۱/۲ کیلومتر مربع و در ۱۹۱۳ ایستگاه اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه مگنتومتر پروتون انجام شده است. برای انجام عملیات پردازش و تفسیر کیفی داده‌های 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 به‌منظور 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 سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی نشان می‌دهند که منطقه مراغ از نظر کانه‌سازی آهن دارای پتانسیل بالایی است. نتایج این پژوهش برای کلیه کاربران علوم زمین به‌ویژه زمین‌شناسان و مهندسی اکتشافی قابل استفاده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: سنجش‌ازدور، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، مراغ بندرچارک، مغناطیس‌سنجی، نرم‌افزار ENVI.

مقدمه

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 به‌دلیل داشتن داده‌هایی با دید وسیع، یکپارچه و محدوده طول

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

* نویسنده مرتبط: Rezahmadi@gmail.com

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی گستره مورد مطالعه

گستره مراغ مطابق شکل ۱ در یک کیلومتری جنوب روستایی به همین نام از توابع بخش شیب کوه شهرستان بندرلنگه، ۱۴/۳ 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 می شود.

شکل ۲ نیز نقشه زمین شناسی گستره مورد مطالعه را نمایش می دهد. گستره اکتشافی براساس تقسیمات زمین شناسی-ساختاری ایران در بخش جنوب شرقی پهنه زاگرس قرار دارد (Alian and Bazamad, 2014). این گستره از واحدهای درهم سازند هرمز به عنوان قدیمی ترین سازند منطقه، شیل، مارن و خاک سرخ به سن پرمکبرین تشکیل شده است و در سازندهای میشان (مارن خاکستری و آهک های رسی)، آجاجاری (ماسه سنگ آهکی و مارن های سرخ رنگ) و بختیاری (کنگولومرا و ماسه سنگ های آهکی چرتی) با سن سنوزوئیک برونزد یافته است.

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

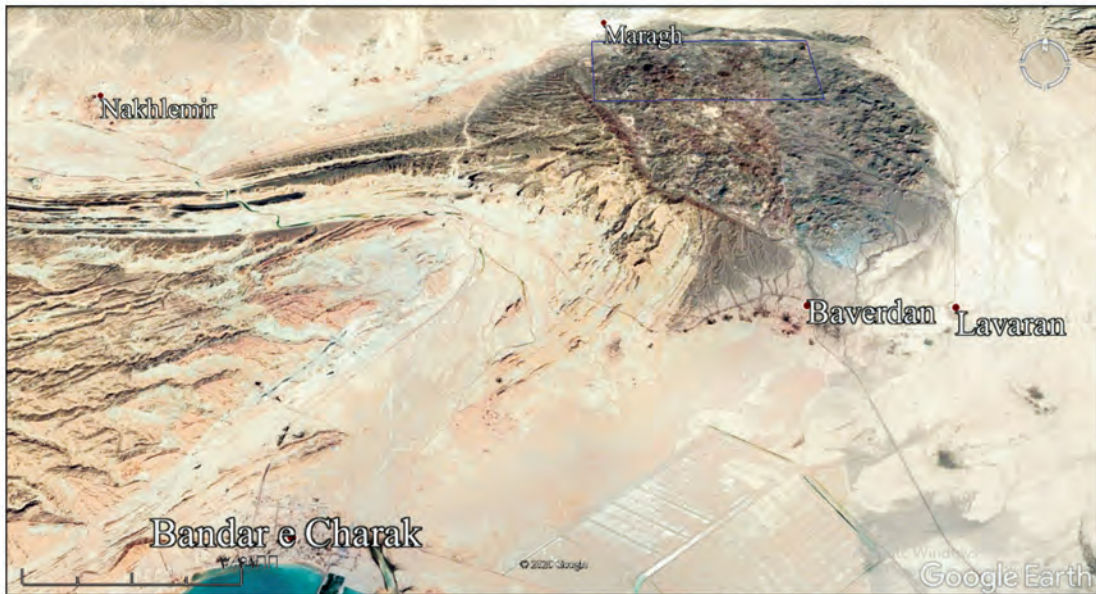
روش مطالعه

در پژوهش حاضر ابتدا داده های سنجنده ASTER گستره مراغ بندرچارک واقع در استان هرمزگان با استفاده از نسخه ۴/۷ نرم افزار ENVI مورد پردازش، تحلیل های مشاهده ای و طیفی سنجش از دور قرار گرفتند. در این مطالعه از داده های ASTER یک برگه از نوع ASTER Level 1T با شماره AST_L1T_00308232003070852_28971_T مربوط به تاریخ

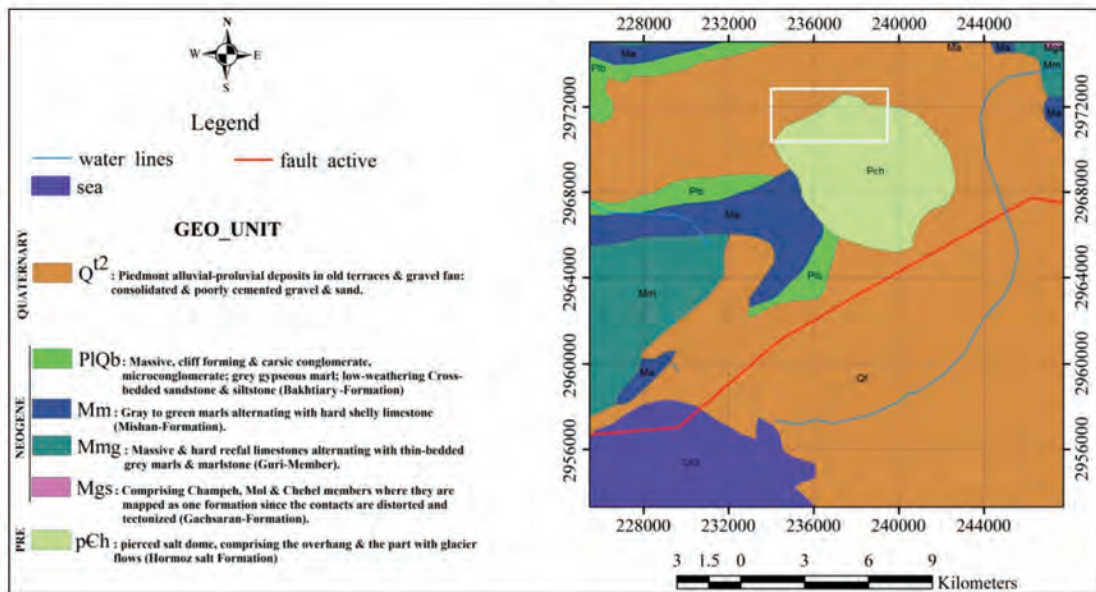
موجی مختلف، از بهترین روش ها در پی جویی کانسارهای مغناطیسی شناخته می شوند.

داده های ابرطیفی دربرگیرنده مجموعه اطلاعات غنی از بازتاب های الکترومغناطیسی سطحی زمین هستند. اجسام مختلف در محدوده طول موج های طیف الکترومغناطیسی، بسته به ویژگی های فیزیکی و ترکیبات کانی شناسی و شیمی خود، امواج الکترومغناطیسی را در طول موج های مختلف با شدت های متفاوت بازتاب کرده یا جذب می کنند. وجود اطلاعاتی از رفتار طیفی اجسام گوناگون در طول موج های مختلف، بر اساس منحنی های شاخص بازتابندگی و جذب طیف در سنجش از دور بسیار با اهمیت است (Gupta and Roy, 2007). به طور کلی روش های پردازش تصویرهای ماهواره ای را می توان به دو گروه آمارپایه و طیف مبنا تقسیم بندی کرد. در روش اول (آمارپایه) اصول پردازش بر مبنای نحوه پراکندگی فراوانی نمای مقادیر پیکسلی هر باند، میانگین، میانه و مد پایه گذاری شده است. این در حالی است که در روش دوم (طیف مبنا) از ابتدای پردازش باید الگوی طیفی مرجع، مشخص باشد.

پس از شناسایی مناطق مستعد مغناطیسی با سنجش از دور، مغناطیس سنجی به عنوان یک روش ژئوفیزیکی سریع و ارزان قیمت برای اکتشاف کانسارهای آهن مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش هدف به دست آوردن خودپذیری مغناطیسی و تعیین وضعیت کانسار در عمق از طریق اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی در یک محدوده است (Cooper and Cowan, 2006). در سال های اخیر روش مغناطیس سنجی به طور موفقیت آمیزی برای اکتشاف کانی های مغناطیسی مگنتیت، ایلمنیت، هماتیت، سیدریت، لیمونیت و گوتیت در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است. مدل سازی پیشرو و وارون، ابزار تصویرسازی کانسنگ در روش مغناطیس سنجی هستند. به ویژه روش وارون سازی برای بررسی و تفسیر بی هنجاری های مغناطیسی، به دفعات زیاد مورد استفاده قرار گرفته (به عنوان نمونه فاتحی و همکاران ۱۳۹۲؛ Parker Schoppa et al., 2000; and Huestis, 1974) و در موارد بکاررفته نتایج مطلوبی حاصل شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی گستره مورد مطالعه (مستطیل آبی‌رنگ) در نقشه Google Earth



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی و واحدهای لیتولوژی گستره مورد مطالعه (مستطیل سفیدرنگ) (Haddadan, 2006)

طیفی مرئی و فروسرخ نزدیک^۱، فروسرخ طول موج کوتاه^۲ و فروسرخ حرارتی^۳ را در قالب ۱۴ باند و از طول موج ۰/۵۲ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر پوشش می‌دهد (Yamaguchi et al., 2001). در این راستا پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی

۲۰۰۳/۰۸/۲۳ 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 ۱۹۹۹ به‌عنوان بخشی از سامانه مشاهده زمین^۱ (ناسا) پرتاب شد (Torres, 2007). سنجنده ASTER سه محدوده

1. Earth observing system
2. Visible and near-infrared
3. Short-wave infrared
4. Thermal infrared

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 Oasis montaj Geosoft 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 تصویر^۱ و تصحیح اتمسفری^۲ است. مرحله دوم تعیین بهترین باندهای سنجنده ASTER و اعمال تکنیک‌های ترکیب رنگی کاذب^۳ (FCC)، نسبت‌گیری باندی^۴ (BR)، برازش کمترین مربعات^۵ (LS-Fit)، روش انتخابی کروسا^۶ یا تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی^۷ (DPCA) و در نهایت طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی^۸ (SAM) و تهیه نقشه دگرسانی گستره مورد مطالعه است.

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 رنگ‌های 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) به دلیل جذب کانی‌های شاخص کمربند فیلک-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).

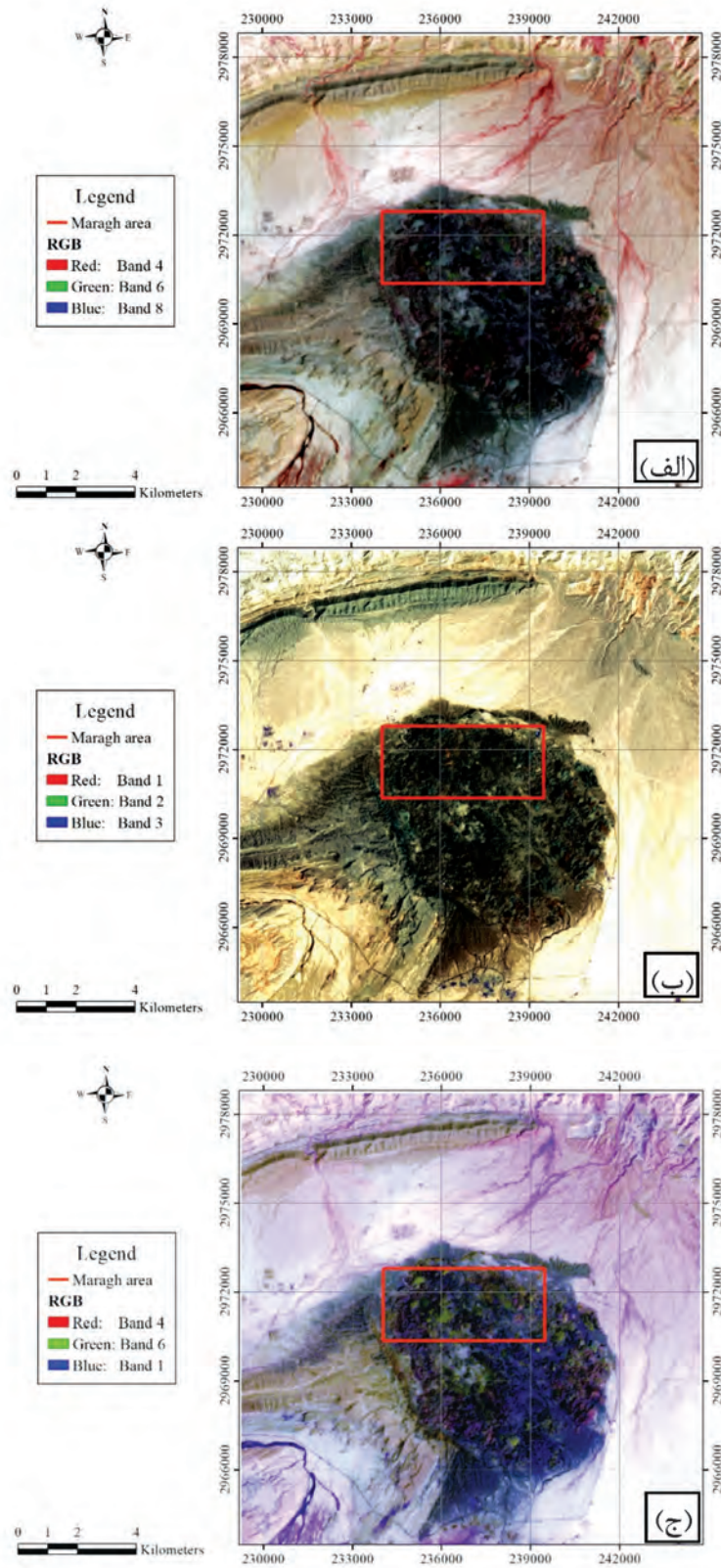
در ترکیب رنگی R(4)G(6)B(8)، دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی تا قرمز و دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز نمایان می‌شود (شکل ۳-الف). ترکیب رنگی کاذب باندهای R(1)

اعمال روش نسبت‌گیری باندی

نسبت‌گیری باندی در واقع یکی از روش‌های پردازش تصاویر چندطیفی است که شامل تقسیم بیکسل‌های یک تصویر یا یک باند طیفی به بیکسل‌های 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 به دلیل شیب زمین کاهش دهد (Abera, 2005; Hewson et al., 2005; Rowan and Mars, 2003; Sabins, 1999).

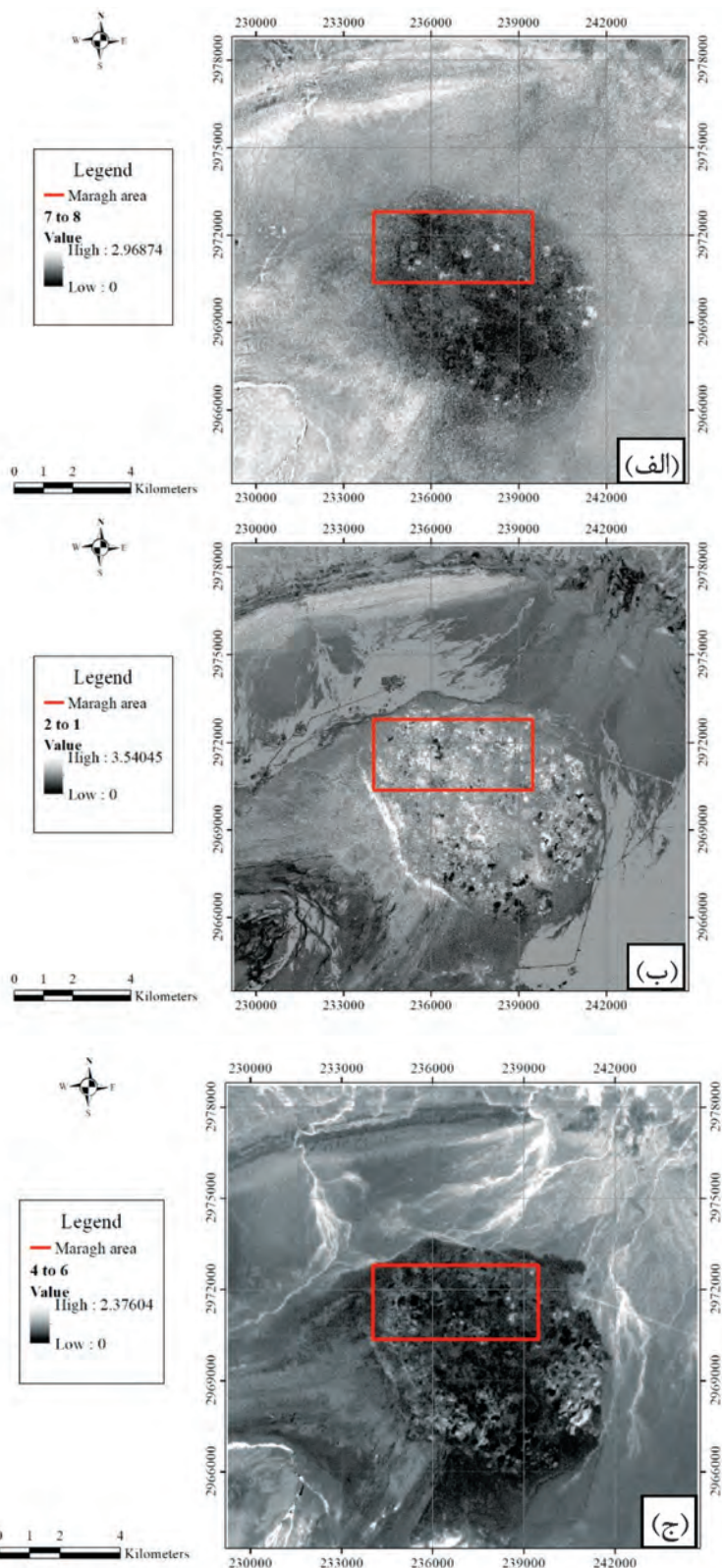
برای بازسازی دگرسانی پروپیلیتیک، می‌توان از بازسازی کانی‌های شاخص این دگرسانی با استفاده از نمودارهای استاندارد آن بهره برد. مطابق طیف بازتابی استاندارد کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک، این دگرسانی در باندهای هفت و نه دارای تابش و در باند هشت به دلیل وجود پیوند Mg-OH دارای بیشترین جذب می‌باشد. بر همین اساس نسبت باندی ۷/۸ معادله باندی مناسبی برای آشکارسازی مناطق دارای دگرسانی پروپیلیتیک بوده و مناطق دارای این دگرسانی با اثر مثبت (بیکسل‌های سفیدرنگ) آشکار شده‌اند (شکل ۴-الف).

1. Image to image
2. Internal average relative reflectance
3. False Color Composite
4. Banding Ratio
5. Least Square-Fit
6. Crosta
7. Directed Principal Component Analysis
8. Spectral Angle Mapper



شکل ۳. 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)

تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به منظور اکتشاف ...



شکل ۴. نسبت‌های بانندی، الف) ۷/۸ برای آشکارسازی دگرسانی پروپیلیتیک به صورت پیکسل‌های روشن، ب) ۲/۱ برای بازسازی اکسیدهای آهن، ج) ۴/۶ برای آشکارسازی دگرسانی آرتزلیک به صورت پیکسل‌های روشن

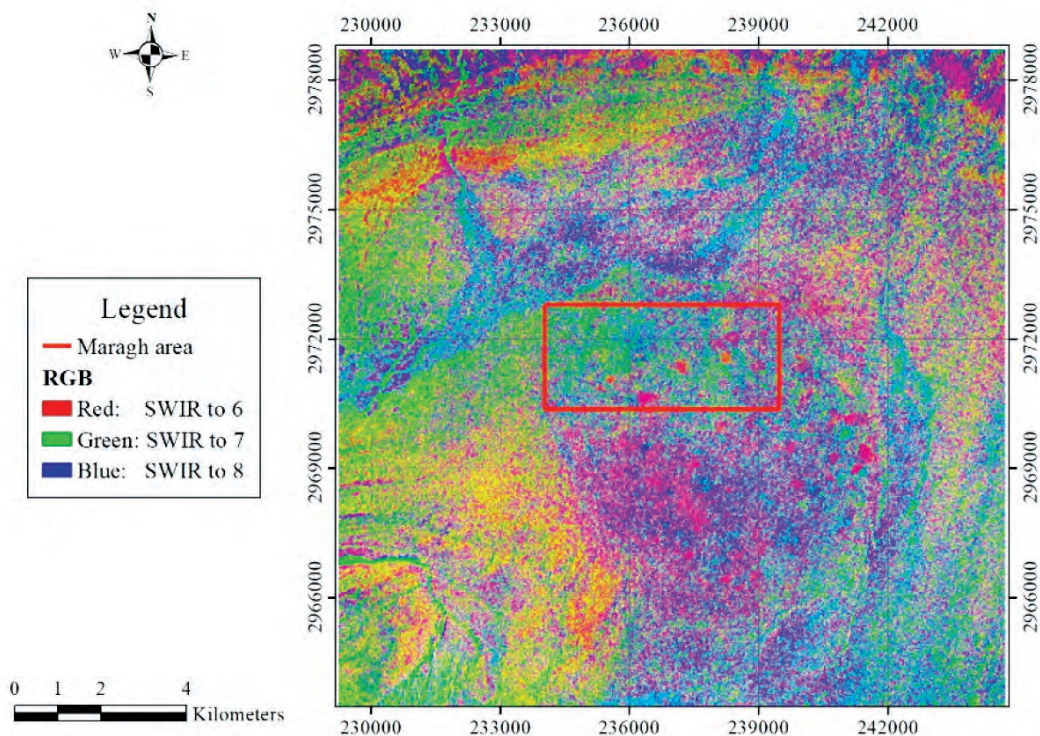
به صورت یک عبارت خطی بیان کنند. این مقدار در واقع باند پیش‌بینی شونده نامیده شده و به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته می‌شود. بعضی از کانی‌های شاخص، اثرات بازتابی خود را تنها در یک باند خاص نمایش می‌دهند. بنابراین میان مقادیر محاسبه شده آنها توسط روش کمترین مربعات و مقدار واقعی، اختلافی وجود خواهد داشت که باقی‌مانده نام دارد. روش LS-Fit بر اساس مقادیر باقی‌مانده، 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 ۵ ترکیب رنگی RGB نشان داده شده است.

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 نسبت‌گیری باندی ۲/۱ برای بازسازی اکسیدهای آهن بهره گرفته شده است. به همین دلیل در تصویر استخراج شده (شکل ۴-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 می‌باشند (Ninomiya, 2003)، به همین دلیل برای شناسایی مناطق دارای دگرسانی، از نسبت‌های باندی ۴/۶ استفاده شده است (شکل ۴-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



شکل ۵. نقشه دگرسانی‌های گستره مورد مطالعه به کمک ترکیب رنگی با روش LS-Fit، (R(Phyllic), G(Argillic), B(Propylitic))

اعمال روش انتخابی کروستا

تحلیل مولفه‌های اصلی هدایت شده (PCA)، تکنیکی قدرتمند است که می‌تواند برای فشرده‌سازی تصاویر و از بین بردن اثرات ناخواسته مورد استفاده قرار گیرد (علوی پناه، ۱۳۸۲). 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 نقشه‌برداری 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 نقشه‌برداری 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 به‌عنوان ورودی روش تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده شده است (Khaleghi and Ranjbar, 2011). پس از بررسی پروفیل طیفی هر یک از دگرسانی‌های بیان شده، فرآیند تحلیل مولفه‌های اصلی بر روی هر گروه به‌طور جداگانه انجام گرفته و نتایج در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۱. ماتریس مقادیر ویژه کمربند فیلیک

	PC1	PC2	PC3
Band 4	-۰/۵۷۳۶۷	-۰/۵۷۶۲۶	-۰/۵۸۲۰۹
Band 6	-۰/۷۷۴۰۷	۰/۱۴۹۰۵	۰/۶۱۵۳۱
Band 7	۰/۲۶۷۸۱	-۰/۸۰۳۵۶	۰/۵۳۱۵۷

جدول ۲. ماتریس مقادیر ویژه کمربند آرژیلیک

	PC1	PC2	PC3
Band 4	۰/۵۵۳۵۴۲	۰/۵۶۹۳۱۲	۰/۶۰۷۸۴۵
Band 5	۰/۸۰۸۴۱۹	-۰/۱۹۱۹۲۶	-۰/۵۵۶۴۳۸
Band 7	۰/۲۰۰۱۲۵	-۰/۷۹۹۴۰۵	۰/۵۶۶۴۸۲

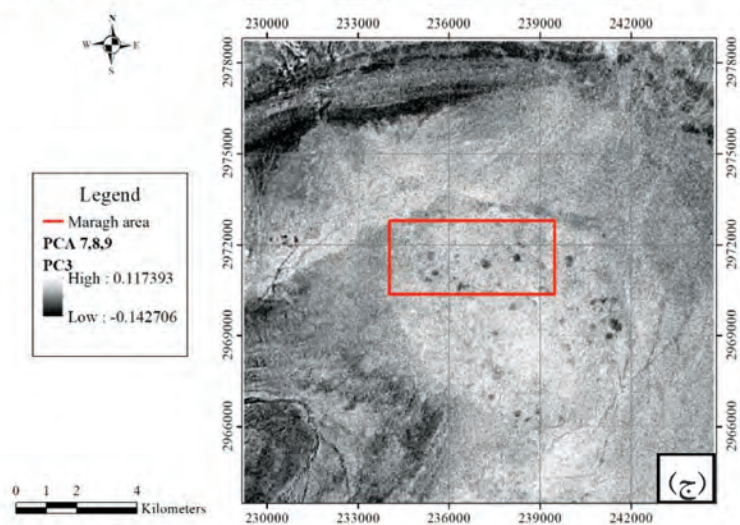
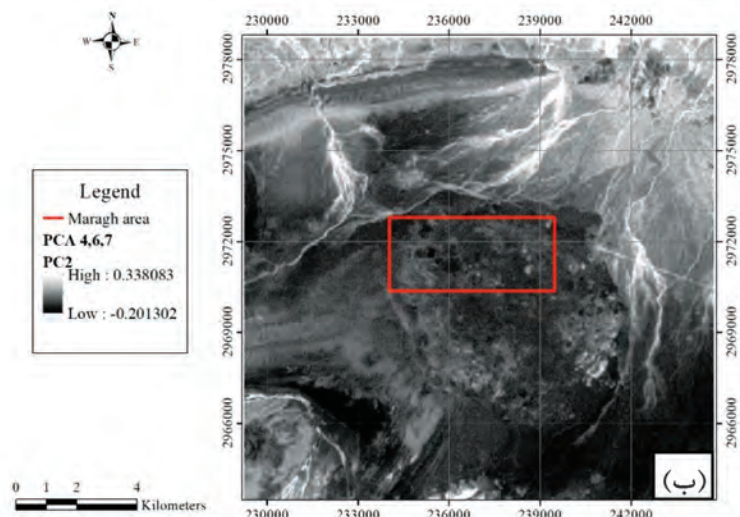
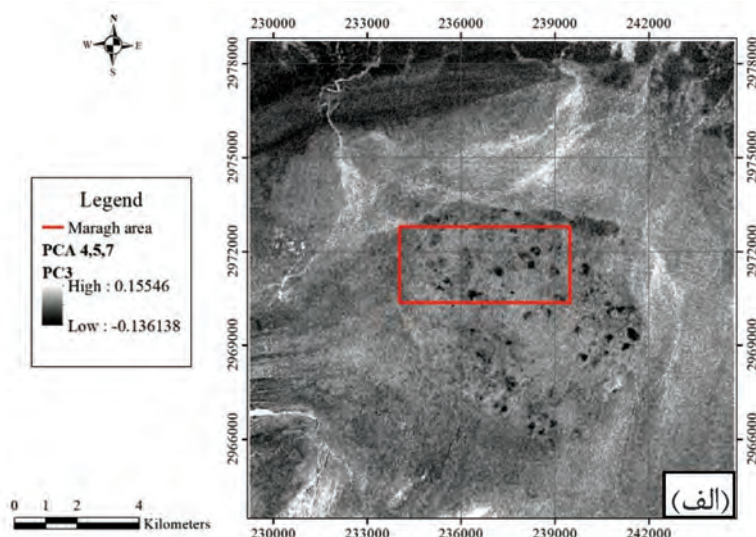
جدول ۳. ماتریس مقادیر ویژه کمربند پروپیلیتیک

	PC1	PC2	PC3
Band 7	-۰/۶۱۹۸۹۵	-۰/۵۷۶۴۹۶	-۰/۵۳۲۳۳
Band 8	-۰/۴۹۵۳۹۹	-۰/۲۳۸۵۸۵	۰/۸۳۵۲۵۹
Band 9	-۰/۶۰۸۵۳۱	۰/۷۸۱۴۹۲	-۰/۱۳۷۶۹

در بررسی ماتریس مقادیر ویژه کمربند فیلیک، بیشترین اختلاف بین باندهای چهار و شش در PC3 مشاهده می‌شود (جدول ۱)، بنابراین PC3 برای کمربند 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 دگرسان شده فیلیک هستند (شکل ۶-الف). همین‌طور برای شناسایی محدوده‌های دارای دگرسانی آرژیلیک، اختلاف میان باندهای چهار و هفت در PC2 (جدول ۲) نمایش دهنده مناطق دارای دگرسانی آرژیلیک است (شکل ۶-ب). در روشی مشابه برای شناسایی محدوده‌های دگرسانی پروپیلیتیک که با استفاده از باندهای هفت، هشت و نه حاصل شده است (جدول ۳)، اختلاف میان باندهای هفت و هشت در PC3 بیشترین مقدار بوده و می‌توان پراکندگی دگرسانی پروپیلیتیک را در PC3 آن مشاهده کرد (شکل ۶-ج).

طبقه‌بندی نظارت شده به روش الگوریتم نقشه‌برداری زاویه طیفی

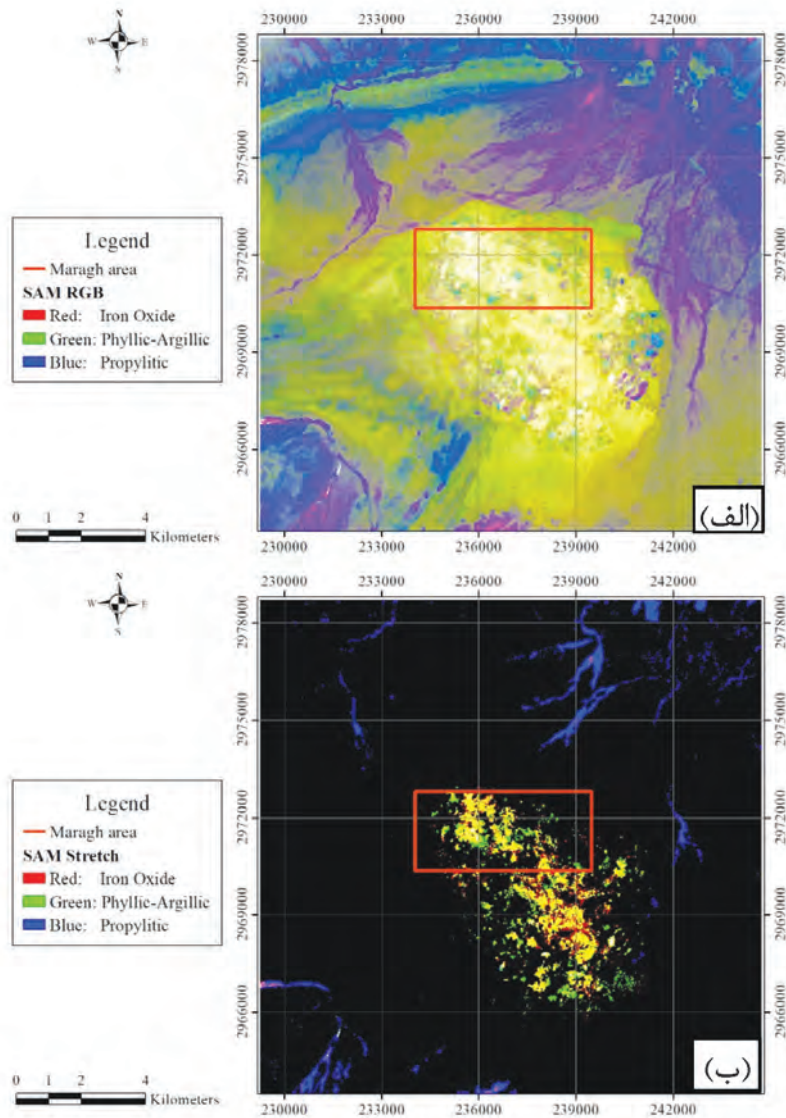
فرآیند طبقه‌بندی نظارت شده به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی، بدین صورت است که نقشه‌برداری سریع پدیده‌ها را از طریق محاسبه شباهت طیفی بین بردار تصویر با داده‌های طیفی مرجع ممکن می‌سازد (Yuhas et al., 1992). الگوریتم این روش، شباهت بین دو طیف را به‌وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند. در این روش هرچه مقدار زاویه (بین صفر تا ۱۰) کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر خواهد بود. نتایج حاصل از اعمال تکنیک نقشه‌برداری زاویه طیفی در شکل ۷-الف ارائه شده است که پراکندگی دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلیک-آرژیلیک و اکسید آهن را در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۷-ب به‌منظور بهبود کیفیت تصویر از فراوانی‌نمای



شکل ۶. آشکارسازی کمرندهای، الف) فیلک، ب) آرژلیک، ج) پروپیلتیک به روش PCA

تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به منظور اکتشاف ...

کشی^۱ (کشیدن و محدود کردن طیف رنگ‌ها به منظور باقی‌ماندن محدوده‌های بالا) استفاده شده که می‌توان با بررسی فراوانی‌ها، از اطلاعات آماری یک بخش و یا کل تصویر استفاده کرد. با توجه به شکل ۷، می‌توان نتیجه گرفت که پیکسل‌های سبز رنگ آلتراسیون فیلیک 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 هماتیتی و مگنتیتی در منطقه، می‌توان به صحت و درستی دورسنجی انجام شده و نتایج به دست آمده پی برد.

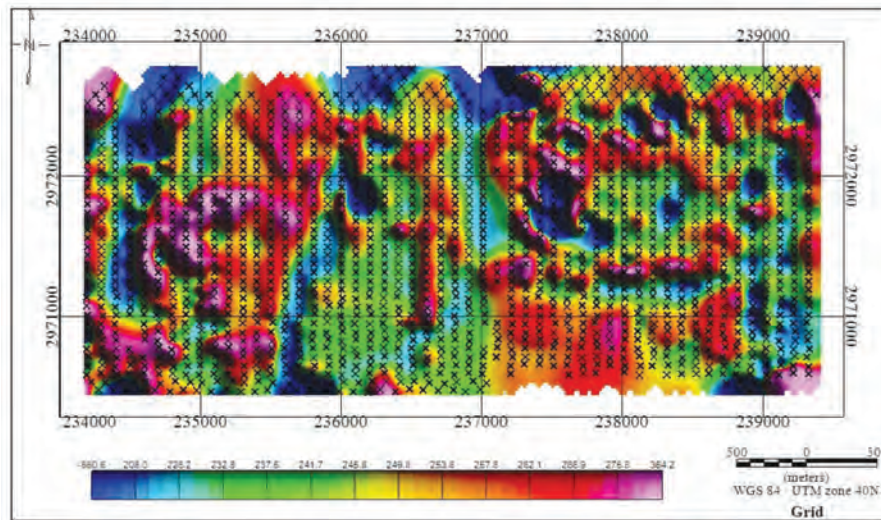


شکل ۷. استخراج دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلیک-آرژلیک و اکسیدهای آهن با استفاده از الگوریتم SAM، الف) R(Iron-Oxide)، G(Phyllic-Argillic)، B(Propylitic) Stretch، ب) R(Iron-Oxide)، G(Phyllic-Argillic)، B(Propylitic)

مغناطیس‌سنجی گستره مورد مطالعه

مغناطیس باقی‌مانده بدست آمد. در شکل ۸ نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده 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. همان‌گونه 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.

برداشت مغناطیسی در این گستره بر روی پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌زایی آهن حاصل از روش دورسنجی، در گستره‌ای به ابعاد تقریبی ۵/۲ در ۲/۱۵ کیلومتر و در ۱۹۱۳ ایستگاه اندازه‌گیری با استفاده از یک دستگاه مگنتومتر پروتون صورت گرفته است. برای انجام عملیات پردازش و تفسیر کیفی داده‌های مغناطیسی، از نرم‌افزار Oasis montaj Geosoft نسخه ۸/۴ بهره برده شد. با لحاظ کردن مقادیر ۴۲/۲ درجه برای زاویه میل مغناطیسی، ۲/۴ درجه برای زاویه انحراف مغناطیسی و تصحیح IGRF، داده‌های

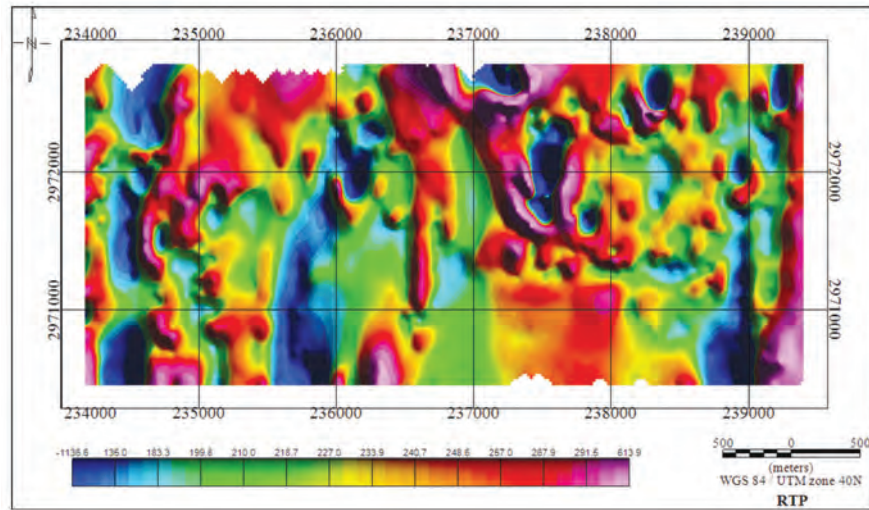


شکل ۸. نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده گستره مورد مطالعه (موقعیت نقاط برداشت با علامت × مشخص شده‌اند)

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 فراسو^۲ 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 (Lelievre and Oldenburg, 2006).

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 قطب (RTP) استفاده می‌شود؛ به‌گونه‌ای 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 ۹ نقشه حاصل از این پردازش آورده شده است که در آن چندین کمربند بی‌هنجاری را می‌توان مشاهده کرد. این نقشه کم‌وبیش شبیه نقشه شکل ۸ است با این تفاوت که

1. Reduce to pole
2. Upward continuation



شکل ۹. نقشه برگردان به قطب مغناطیسی گستره مورد مطالعه

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 کل^۳ (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. متداول‌ترین 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 ۱ محاسبه می‌شود:

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

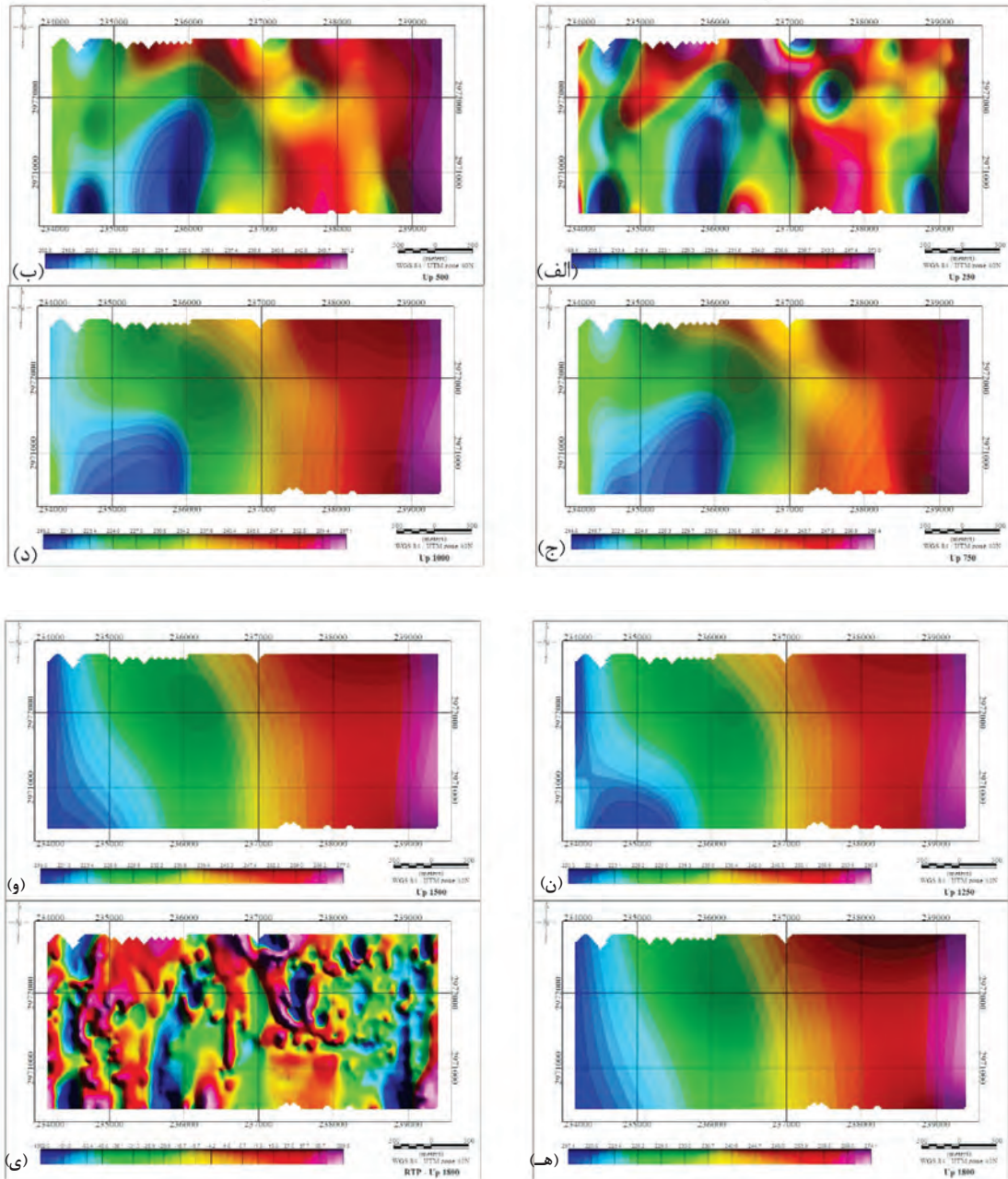
شکل ۱۲ نتیجه اعمال فیلتر گرادیان افقی کل بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. در این شکل بیشینه مقدار

مطابق شکل ۱۰ این پردازش در ارتفاع‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰، ۱۵۰۰ و ۱۸۰۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب اعمال شده و در ارتفاع ۱۸۰۰ 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 سیگنال^۱ و نوفه^۲ 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 می‌شود. بدین ترتیب اثر مغناطیس‌های ناحیه‌ای کوچک، حذف می‌شوند.

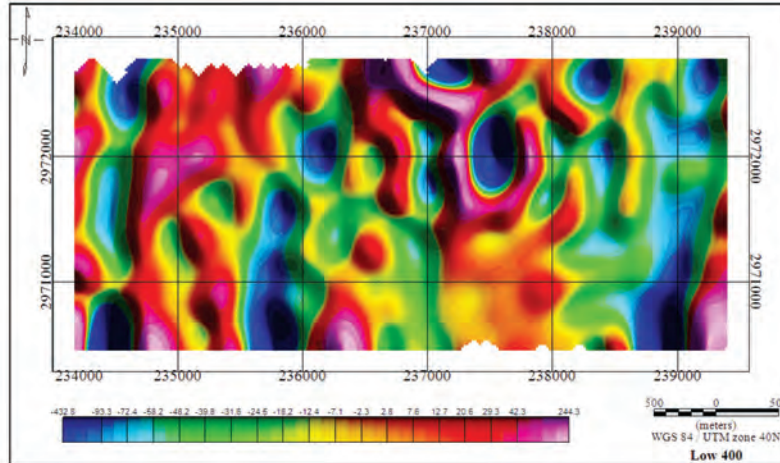
مطابق شکل ۱۱ این پردازش بر روی نقشه به‌دست آمده در شکل ۱۰-ی به‌منظور رفع اثرات سطحی جزئی‌تر اعمال شد که به‌مراتب اثرات بی‌هنجاری‌های اصلی را بهتر نمایان می‌سازد. این پردازش برای ارتفاع ۴۰۰ متر (مناسب‌ترین ارتفاع که براساس تجربه، سعی و خطا و نیز فاصله پروفیل‌های برداشت انتخاب شده است)، اعمال شده که وجود اثرات بی‌هنجاری، نشانگر عمیق بودن آنهاست.

1. Signal
2. Noise
3. Total Horizontal Derivative

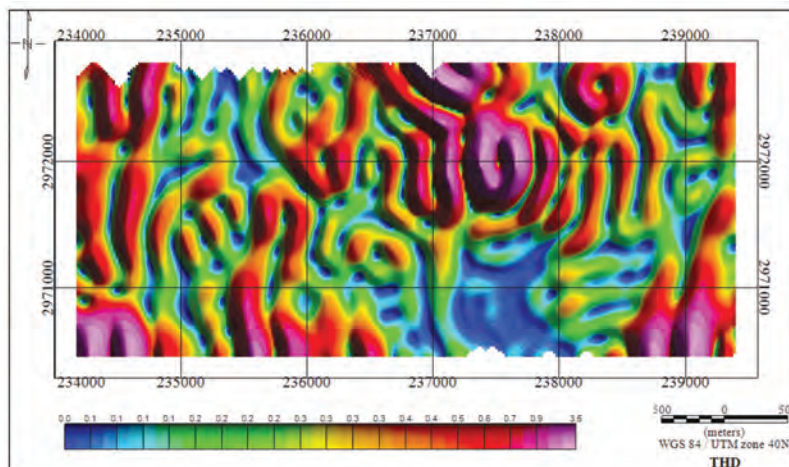


شکل ۱۰. الف تا ی) نقشه میدان مغناطیسی بعد از اعمال فیلتر گسترش به سمت بالا تا ارتفاع‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰، ۱۵۰۰ و ۱۸۰۰ متر، ی) نقشه میدان مغناطیسی بعد از کسر اثر ناحیه‌ای (ادامه فراسو برای ارتفاع ۱۸۰۰ متر)

گرادیان، بیانگر مرزهای توده مورد نظر است. مطابق شکل می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که کانی‌سازی دارای راستای بی‌هنجاری مغناطیسی در چند گستره به‌طور مجزا مشاهده شمالی-جنوبی است.



شکل ۱۱. خروجی فیلتر پایین‌گذر به ازای ارتفاع ۴۰۰ متر اعمال شده بر نقشه مغناطیس باقی‌مانده بدون اثر ناحیه‌ای



شکل ۱۲. نقشه گرادیان افقی کل (THD)

بدون تغییر در مقدار تابع، روی طیف فاز، تغییر ۹۰ درجه‌ای ایجاد می‌کند؛ به عبارت دیگر گرادیان افقی به قائم تبدیل شده و لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تعیین می‌شود.

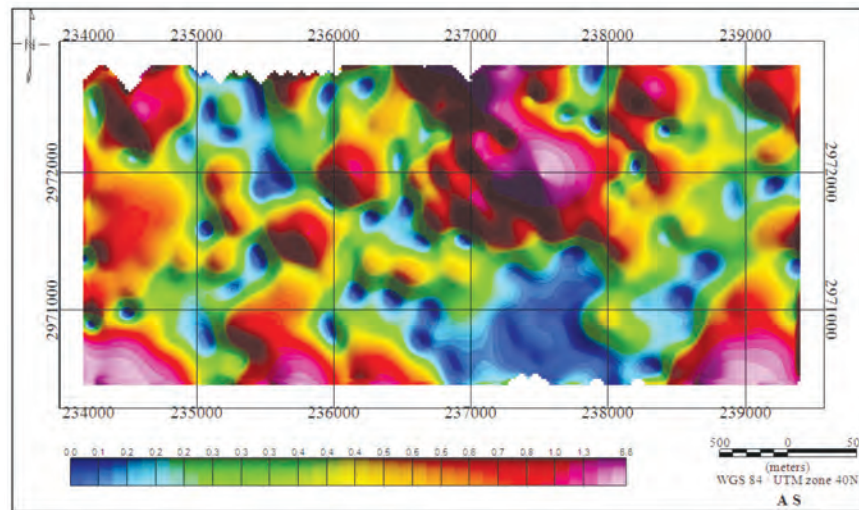
در شکل ۱۳ نتیجه اعمال این پردازش بر روی شکل ۱۰-ی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به کمک این پردازش منبع بی‌هنجاری، برجسته‌تر شده و چند توده کروی شکل نمایان شده است.

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.

به منظور 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 ۲ به دست 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



شکل ۱۳. نقشه سیگنال تحلیلی گستره مورد مطالعه

مدل سازی وارون سه بعدی 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 بازممانده 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 بیش‌تعیین 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-اولدنبرگ، تابع هدف مدل به صورت رابطه ۳ تعریف شده است (Williams, 2008).

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

$$a_z \int_V w_z \left[\frac{\partial}{\partial z} w_r(z)(m - m_{ref}) \right]^2 dV \quad (3)$$

بخش 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_z ، a_x ، a_y ، a_s 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 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 برخورداری اثر سرچشمه 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 ۴ محاسبه می‌شود:

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

تلفیق روش‌های سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی به منظور اکتشاف ...

نوفه‌ها تعادل ایجاد می‌کند.

تفسیرهای صورت گرفته بر روی داده‌های میدان مغناطیسی کیفی و یا در نهایت نیمه کمی است و در تعیین پارامترهای کمی و هندسی کانی‌سازی قابل استفاده نیستند. یکی از بهترین روش‌ها برای تفسیر کمی داده‌های مغناطیسی مدل‌سازی وارون سه‌بعدی است که در آن مدل توزیع خودپذیری ذاتی سنگ‌ها را در سه بعد به تصویر می‌کشد. مطابق شکل ۱۴ گستره کانسار مراغ با بلوک‌هایی به ابعاد ۱۰×۲۰×۲۰ متر (۲۰ متر در راستاهای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی و ۱۰ متر در راستای قائم) به صورت سه‌بعدی، مدل‌سازی شده است. وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های این محدوده پس از اعمال پردازش‌های ادامه فراسوی ارتفاع ۱۸۰۰ متر و فیلتر پایین‌گذر ارتفاع ۴۰۰ متر، با استفاده از الگوریتم لی-اولدنبرگ توسط نرم‌افزار UBC Mag3D 4.0 انجام شد. در این مدل‌سازی پارامتر وزن‌دهی عمق

که در آن داده‌های برداشت شده، \vec{d}^{obs} داده‌های محاسبه شده و σ_d انحراف معیار داده نام هستند. این انحراف معیار بر روی قطر اصلی ماتریس W_d قرار خواهد گرفت.

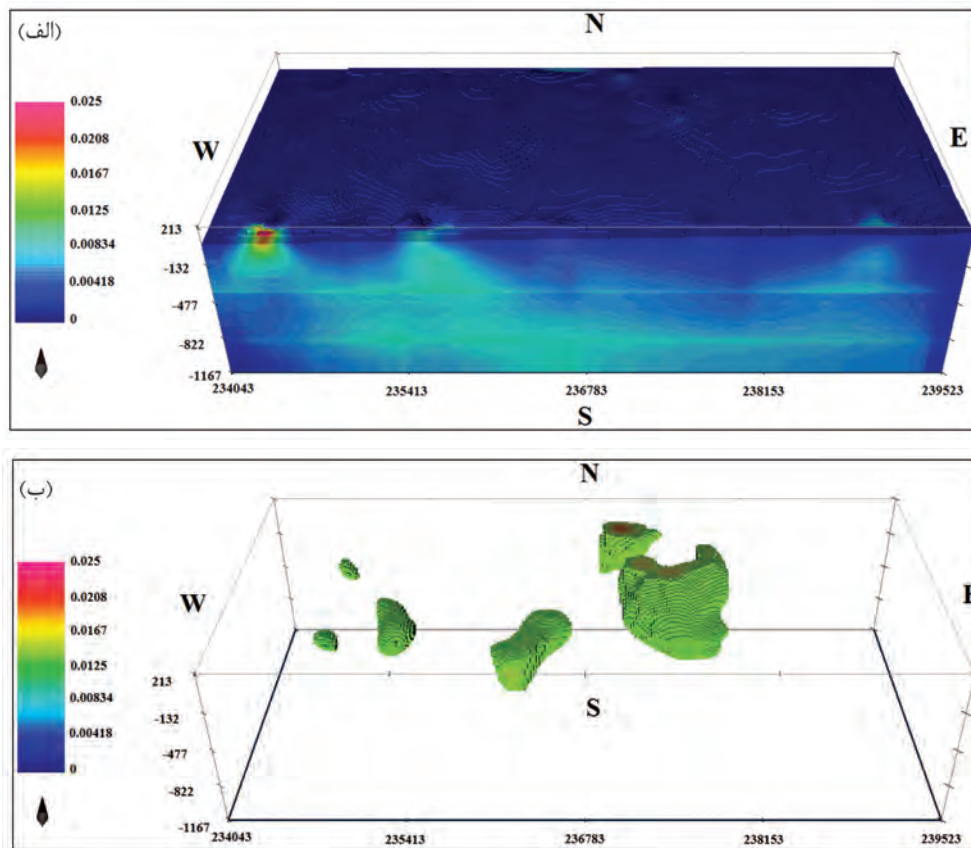
پس از اعمال تمامی قیدها به داده‌ها و پارامترهای مدل، تابع هدف زیر حاصل خواهد شد:

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

و به شکل زیر عمومیت پیدا می‌کند:

$$\begin{aligned} \phi(\lambda) &= \phi_d + \mu\phi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^m \ln m_j \\ \phi &= \|\vec{d}^{obs} - \vec{d}^{cal}\|_r^2 + \mu \|W_m(\vec{k} - \vec{k}_o)\|_r^2 \\ &\quad - 2\lambda \sum_{j=1}^m \ln m_j \end{aligned} \quad (6)$$

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



شکل ۱۴. الف) مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار مورد مطالعه، ب) نمایش بلوک‌های بی‌هنجاری کانسار

مورد مطالعه را برای مطالعات بیشتر پتانسیل‌های معدنی نشان می‌دهد.

براساس نتایج، مرحله شناسایی و پی‌جویی توسط روش دورسنجی و احتمال وجود اکسید آهن در گستره، مطالعات ژئوفیزیک اکتشافی، به روش مغناطیس‌سنجی انجام گرفت که پس از انجام تصحیحات مورد نیاز و اعمال پردازش‌های مختلف، کمرندهای بی‌هنجاری منطقه شناسایی شدند. با استفاده از مدل‌سازی وارون سه‌بعدی 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 به‌نسبت ارزان سنجش‌ازدور 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.، ۱۳۸۵. کاربرد تصاویر سنجنده ASTER در تفکیک زون‌های دگرسانی مس پرفیری (برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ جبال بارز). بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- علوی پناه، ک.، ۱۳۸۲. کاربرد سنجش از دور در علوم زمین. انتشارات دانشگاه تهران، ۴۹۶.
- فاتحی، م.، نوروزی، غ.ح. و حاجی‌ئی، ف.، ۱۳۹۲. برآورد عمق توده‌های مغناطیسی با استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی. مجله ژئوفیزیک ایران. ۷، ۴، ۶۳-۵۲.
- 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.

۱۰۰۰ متر و خودپذیری مغناطیسی اولیه^۱ برابر با ۰/۰۰۱ منظور شد که مطابق آن تمامی منطقه به‌صورتی همگن، شامل این مقدار خودپذیری مغناطیسی می‌باشند. همچنین در بخش مدل مرجع^۲، مقدار ۰/۰۱ 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 ۰/۳ محدود شد. در انجام این فرایند، تعداد داده‌های مغناطیسی مورد استفاده ۵۱۱۸ عدد بوده و تعداد کل سلول‌های مدل‌سازی نیز ۲۹۵۳۱۳۲ (۹۱×۱۲۲×۲۶۶) عدد می‌باشد. در نتیجه این فرایند تعداد شش توده کانسار بزرگ و کوچک به‌صورت مجزا از هم شناسایی شده که عمیق‌ترین آنها در عمق ۵۰۷ متری قرار دارد و عمق دفن متوسط سایر توده‌ها نیز بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر است.

مطابق شکل ۱۴-الف در بخش سطحی جنوب غربی گستره مورد مطالعه، بی‌هنجاری قابل توجهی مشاهده می‌شود که به‌دلیل بسته نشدن دوقطبی بی‌هنجاری و فقدان اطلاعات کافی در مرز در مدل‌سازی سه‌بعدی، مورد پردازش قرار نگرفته و در نتیجه در شکل ۱۴-ب آثاری از آن دیده نمی‌شود. به‌منظور دستیابی به اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر در مورد بی‌هنجاری این بخش، بایستی ایستگاه‌های مغناطیسی متراکم برداشت شوند.

با توجه به کمر بند گستره مورد مطالعه (زاگروس) برای صحت‌سنجی از مدل به دست آمده، می‌توان موقعیت نقاط حفاری را پیشنهاد کرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات دورسنجی انجام گرفته روی گستره اکتشافی مراغ، به یاری تصویرها و داده‌های سنجنده ASTER اکسیدهای آهن گستره آشکار شده و کمرندهای دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک به‌کمک نرم‌افزار ENVI با دقتی بسیار بالا، توسط روش‌های مختلف پردازشی همانند ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری بانندی، تحلیل مولفه‌های اصلی و برازش کمترین مربعات، آشکارسازی شدند که حضور کمرندهای دگرسانی و نیز اکسید آهن، مستعد بودن گستره

1. Initial model
2. Reference model

- 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.