



Research Article

Application of remote sensing to determine promising areas of Iron mineralization (Case study: Kashan district)

Reza Ahmadi^{1*} , Abdolreza Gharah-Sheikh Bayat¹, Sead Naser Naeb-pour²

1-Department of Mining Engineering, Faculty of Geo-Engineering Sciences, Arak University of Technology, Arak, Iran

2-Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 04 Feb 2022 Accepted: 15 Jun 2022

Extended Abstract

Introduction

The studied area, a part of the central Iran zone and the magmatic belt of the Urmia-Dokhtar zone is located in Isfahan province, Kashan district. Due to the volcanic and plutonic evolutions of the Urmia-Dokhtar zone, various types of iron mineralization can be found in this zone in the form of hydrothermal, skarn, and volcanic. Since the ASTER and EO-1 sensors are robust in the short-wave infrared (SWIR) and visible-near-infrared (VNIR) spectrum bands, respectively, therefore, in this research, the combination of these two bands from these two different sensors was used to increase the precision and accuracy of iron prospecting through remote sensing in the Kashan district.

Materials and Methods

The remote sensing process of the studied region comprises two stages. The first stage is pre-processing and data preparation before entering the processing stage. The second step is determining the best bands of ASTER and EO-1 ALI sensors and applying processing techniques containing false color composite (FCC), banding ratio (BR), Crosta selection method or principal directed component analysis (DPCA), supervised classification through spectral angle mapper (SAM) method and classification by the land surface temperature (LST) method which finally alteration-zoning map associated with iron mineralization in the studied region was produced. Aeromagnetic data were acquired in an area of approximately 852.5 km² in 754 stations with flight lines interspacing 7.5 km on the alteration zones related to iron mineralization obtained by the remote sensing method. Geosoft Oasis montaj software was employed for processing operation and qualitative interpretation of magnetic data via applying various corrections and filters, including reduction to pole, upward continuation up to the variety of elevations, low-pass filter, derivative filters containing total horizontal derivative, and analytical signal. To simulate and model the magnetic data, the studied area was divided into three-dimensional blocks with dimensions of 125*250*250 meters.

Citation: Ahmadi, R., Gharah-Sheikh Bayat, A.R. and Naeb-pour, S.N., 2022. Application of remote sensing to determine promising areas of iron mineralization, *Res. Earth. Sci.* 13(2), (108-128) DOI: 10.48308/esrj.2022.102002

* Corresponding author E-mail address: R_ahmadi@Arakut.ac.ir





Ultimately, to investigate the trend of magnetic anomalies observed on the surface, determination of the approximate shape of the deposit, and estimation of its depth, 3-D inverse modeling of the data was carried out using the Lee and Oldenberg algorithm by UBC Mag3D 4.0 software.

Results and Discussion

This study identifies phyllic alteration zones, bands 4, 6, and 7, argillic alteration zones, bands 4, 5, and 7, and propylitic alteration zones, bands 7, 8, and 9 from ASTER sensor were used as input to the component analysis method. The spectral angle mapping algorithm was applied with the data of both ASTER and EO-1 sensors. According to the results, the ASTER sensor was better than the EO-1 at detecting iron-related alterations. To calculate LST, radiometric and atmospheric temperature corrections were made on the band 10 ETM8 sensors, whereas geometric and radiometric corrections were made on multispectral bands. The magnetometric studies of the region showed that the most significant changes in the intensity of the magnetic field are in the center of the study area. The continuation of these changes is towards the southeast of the area.

Conclusion

Based on the results of the recognition and prospecting phases by remote sensing method and the possibility of iron oxide in the area using airborne magnetometry, making the necessary corrections, and applying various processes to the data, the anomaly zones of the area were identified. As a result of the three-dimensional modeling and inversion process of the magnetic data, two large masses located in the center and southeast of the region were identified. The research results through integrating two fast and relatively inexpensive methods of remote sensing and airborne magnetometry with 3-D inverse modeling of magnetic data reveal that the Kashan district has a high potential from the viewpoint of iron ore-bearing.

Keywords: Land surface temperature method, ASTER sensor, EO-1 sensor, Kashan district, 3-D magnetic data inversion.



شناسایی محدوده‌های امیدبخش کانی‌سازی آهن با استفاده از دورسنجی در محدوده کاشان

رضا احمدی*^۱، عبدالرضا قره شیخ بیات^۱، سید نادر نائب پور^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۵

چکیده

در پژوهش حاضر به منظور شناسایی پتانسیل و حضور کانه‌سازی احتمالی آهن در محدوده کاشان استان اصفهان، ابتدا به کمک تلفیق داده‌های سنجنده‌های EO-1، ASTER و ETM8 مطالعات سنجش از دور انجام شد. سپس اکتشاف مقدماتی محدوده‌های امیدبخش با استفاده از روش ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی هوایی صورت گرفت. عملیات دورسنجی داده‌های محدوده شامل مراحل پیش‌پردازش همانند تصحیح هندسی به روش تصویر به تصویر، تصحیح اتمسفری و تکنیک‌های پردازش ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری باندهای، تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی، طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی و در نهایت طبقه‌بندی به روش دمای سطح زمین است. در نتیجه این فرآیند، نقشه پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌زایی آهن منطقه مورد مطالعه مشخص شد. عملیات برداشت مغناطیسی هوابرد با فاصله خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر از یکدیگر در محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۸۵۲/۵ کیلومتر مربع صورت گرفته است. برای انجام عملیات پردازش و تفسیر کیفی داده‌های مغناطیسی همانند اعمال تصحیحات و فیلترهای مختلف نظیر 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 سریع و نسبتاً ارزان سنجش از دور و مغناطیس-سنجی هوابرد همراه با مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی، نشان می‌دهند که محدوده کاشان از نظر کانه‌سازی آهن دارای پتانسیل بالایی است.

واژه‌های کلیدی: روش دمای سطح زمین، سنجنده ASTER، سنجنده EO-1، محدوده کاشان، مدلسازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی.

مقدمه

دانش سنجش از دور در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارد که کاربری آن در علوم زمین به دلیل کاهش هزینه‌های اکتشاف و سرعت عمل بالا در پوشش مناطق وسیع، بسیار مورد توجه است (اسدی هارونی و همکاران، ۱۳۸۹). 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 کانی‌شناسی 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، براساس منحنی‌های شاخص بازتابندگی و جذب طیف در سنجش از دور بسیار بااهمیت است (Gupta and Roy, 2006). به طور کلی روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای را هم می‌توان به دو گروه آمارپایه و طیف‌مبنا تقسیم‌بندی نمود. در روش اول (آمارپایه) اصول پردازش بر مبنای نحوه پراکندگی فراوانی‌نمای مقادیر پیکسلی هر باند، میانگین، میانه و مد، پایه‌گذاری شده است؛ درحالی که در روش دوم (طیف‌مبنا) از ابتدای پردازش باید الگوی طیفی مرجع، مشخص باشد. وضوح مکانی باندهای حرارتی معمولاً پایین‌تر از باندهای بصری یا مادون قرمز است؛ به دلیل نیاز به میدان دید پی‌درپی (IFOV)^۱ برای سنجنده‌های حرارتی باید این اطمینان حاصل شود که انرژی کافی به آشکارساز می‌رسد تا یک اندازه‌گیری قابل اطمینان انجام دهد.

به عنوان مثال، باندهای حرارتی در لندست ۴ تا ۶، ۷ و ۸ دارای وضوح فضایی به ترتیب ۱۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ متر بوده، درحالی که باندهای دیگر ۳۰ متر یا کمتر هستند (Voogt and Oke, 2003). انرژی در

سیستم زمین- جو به‌وسیله جذب طیف نور در قسمت طول موج کوتاه تابش فرودی خورشید و انتشار امواج مادون قرمز (طول موج بلند) و جریان- های افت گرما به تعادل می‌رسد. این فرآیندها باعث گرمی و سردی سطح زمین شده و اصلی‌ترین چرخه تعدیل‌کننده دمای روزانه سطح زمین را ممکن می‌سازند (Armson et al, 2012). در نتیجه هر کانی با توجه به جذب و دفع متفاوت انرژی خورشید می‌تواند نسبت به دیگر کانی‌ها متفاوت باشد. بدیهی است تلفیق داده‌های مختلف و همچنین ویژگی مذکور می‌تواند در شناسایی مناطق امیدبخش سودمند 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 به دست آوردن خودپذیری مغناطیسی و تعیین وضعیت کانسار در عمق از طریق اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در یک محدوده است (Cooper and Cowan, 2006). روش مغناطیس‌سنجی به سه شیوه هوایی، زمینی و دریایی انجام می‌شود که روش هوایرد در اکتشاف عناصر فلزی مانند سنگ آهن در مقیاس ناحیه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (ضیاء‌ظریفی، ۱۳۸۹). مدل‌سازی پیشرو و وارون، ابزار تصویرسازی کانسنگ در روش مغناطیس‌سنجی هستند. به ویژه روش وارون‌سازی برای بررسی و تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، به کرات مورد استفاده قرار گرفته (Rosid et al, 2020; Behnam and Ramazi, 2019; Liu et al, 2018; Mohammadzadeh Moghaddam et al, 2014; Alilou et al, 2016) و در موارد به کار رفته نتایج مطلوبی حاصل نموده است. در پژوهش حاضر ابتدا داده‌های سنجنده‌های ASTER، EO-1 و ETM8 مربوط به محدوده کاشان با استفاده از نسخه ۵/۳ نرم‌افزار ENVI مورد پردازش، تجزیه و

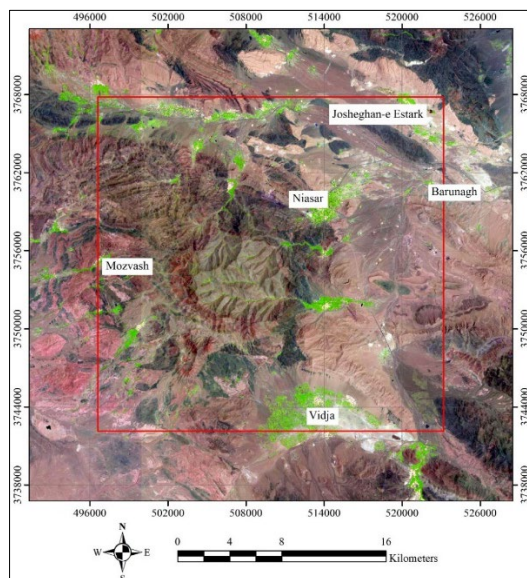
تا $۸/۷۵^{\circ}$ ۴۹° ۳۳° شمالی قرار دارد. این منطقه بخشی از زون ایران مرکزی و کمربند ماگمایی زون ارومیه- دختر است که ارتفاعات آن از روند شمال غربی- جنوب شرقی تبعیت می کند و شامل کوههای مارفیون و اردهان بوده و مطابق شکل ۱ از سمت شمال به شهر جوشقان استرک، از جنوب به ویدجا، از شرق به بارونق و از غرب به موزوش محدود شده است. به دلیل تحولات ولکانیکی و پلوتونیسمی زون ارومیه- دختر می توان انواع کانی سازی های آهن را به شکل هیدروترمال، اسکارنی و ولکانیکی در این زون یافت. انواع کانی های آهن شامل مگنتیت، هماتیت، لیمونیت، گوتیت و اولیژیست می توانند در رخدادهای کانی زایی در این زون خاص از کشور تشکیل شوند. گفتنی است که آهن های گوتیتی و لیمونیتی در باگ های رسوبی این منطقه نیز تشکیل ذخایر مطلوبی را می دهند.

تحلیل مشاهده ای و طیفی سنجش از دور و تفسیر قرار گرفتند. براساس نقشه های پایه زمین شناسی و شواهد و قرائن موجود در تصاویر ماهواره ای، در این محدوده کانی زائی کانی های آهن و در نتیجه وجود کانسارهای آهن محتمل است. بنابراین برای دست یابی به هدف پهنه های مرتبط با کانی سازی آهن مشخص شد. پس از شناسایی محدوده و مشخص شدن حضور کانی سازی احتمالی آهن، اعتبارسنجی عملیات با پردازش و تفسیر داده های مغناطیس-سنجی هوابرد صورت گرفت.

منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در استان اصفهان، شهرستان کاشان بین طول جغرافیایی ۴۹° $۵۷'$ $۵۰''$ تا $۴۲/۲۵^{\circ}$ $۱۵'$ $۵۱''$ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴° $۳'$ $۰''$



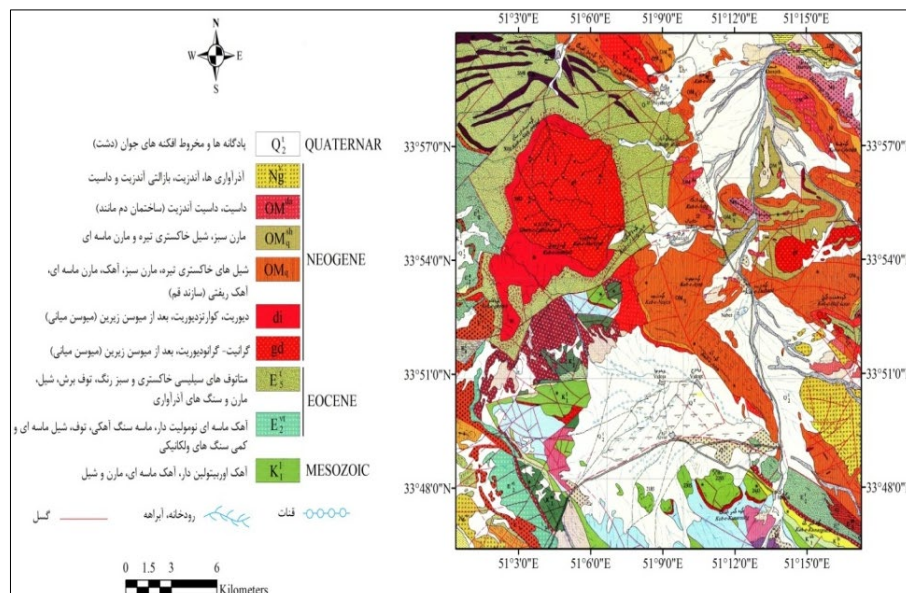
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (مربع قرمز رنگ) در نقشه Google Earth.

در آن یافت می شود. کهن ترین این نهشته ها در مقیاس ناحیه ای نهشته های ماسه سنگی (به رنگ قرمز و خاکستری) و دولومیتی متعلق به زمان سیلورین تا دونین است که در شرق منطقه مورد

شکل ۲ نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد. از نظر سنگ شناختی ناحیه مورد مطالعه از تنوع سنگ شناسی بالایی برخوردار است به گونه ای که انواع سنگ های آذرین و رسوبی

بررسی و با فاصله کمینه ۵ کیلومتری از قهرود رخنمون دارد. سازند آهکی و آهک دولومیتی بهرام (دونین میانی) با هم‌شیبی بر روی این نهشته‌ها قرار می‌گیرد و رسوبات پرمین شامل نهشته‌های دولومیتی و آهک دولومیتی سازند جمال (پرمین میانی-بالایی) با دگرشیبی فرسایشی بر روی سازند اخیر می‌نشیند. کل این مجموعه که به صورت تاقدیسی با محور تقریبی شرقی-غربی است، بر روی بخش زیرین سازند نایبند (تریاس بالایی) با لیتولوژی شیل و ماسه سنگ و آهک آمونیت دار رانده شده است. این راندگی در دو محور تقریباً هم راستا رخ داده و در راندگی جنوبی رخنمون دولومیت‌های زرد سازند شتری (تریاس میانی-بالایی) نیز مشاهده می‌شود. شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک (ژوراسیک زیرین) نیز جابه‌جا در نواحی جنوب شرقی ناحیه (خارج از کادر) برون‌زد دارند و عموماً کف دشت را می‌پوشانند (شکل ۲). نهشته‌های میانه‌زیستی زیرین-میانی به‌طور پیوسته یا مجزا در صورت عدم

قرارگیری گسله، با دگرشیبی زاویه‌ای بر روی سری‌های قدیمی‌تر قرار می‌گیرد، درحالی‌که نهشته‌های میانه‌زیستی بالایی (کرتاسه میانی-بالایی) نیز با دگرشیبی زاویه‌ای بر روی سری‌های قدیمی‌تر قرار دارد. شروع این نهشته‌ها ماسه سنگ و کنگلومرای قرمز آپسین است که با ضخامت بیشینه ۴۰۰ متر رخنمون یافته است. آهک اریبتولین‌دار کرتاسه زیرین (آپسین) در مناطق شرقی و جنوب شرقی و به مقدار کم در مناطق مرکزی محدوده نقشه، رخنمون دارد و بر روی این سری‌های رسوبی، نهشته‌های آذرآواری ائوسن (نوزیستی آغازی-زیرین) قرار می‌گیرد که با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان تقسیم بندی‌های متعددی دارد. از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری، فعالیت‌های تکتونیکی زیادی در محدوده حاکم بوده به گونه‌ای که شکستگی‌ها و گسل‌های اصلی، فرعی و احتمالی متعددی در منطقه رخ داده و راستای عمومی اغلب گسل‌ها، شرقی-غربی و شمال غربی-جنوب شرقی است.



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی و واحدهای سنگی محدوده مورد مطالعه (برشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان) (رادفر و علایی مهابادی، ۱۳۷۲).

مواد و روش‌ها

فرآیند سنجش از دور محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش از داده‌های ASTER یک برگه از نوع ASTER Level 1T با شماره AST_L1T_00308232003070852_20150430_144431_28971_T مربوط به تاریخ ۲۰۰۳/۰۸/۲۳ و همچنین داده‌های EO-1 ALI با شماره EO1A1610412003283110PZ مربوط به تاریخ ۲۰۱۰/۱۰/۰۳ استفاده شد. سنجنده ASTER یکی از تصویربرداری‌های موجود بر روی ماهواره TERRA است که در دسامبر سال ۱۹۹۹ به‌عنوان بخشی از سامانه مشاهده زمین (ناسا)^۲ پرتاب شد (Cooper and Cowan, 2006). این سنجنده سه محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک^۳، مادون قرمز طول موج کوتاه^۴ و مادون قرمز حرارتی^۵ را در قالب ۱۴ باند و از طول موج ۰/۵۲ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر پوشش می‌دهد (Armson et al, 2012). بر روی ماهواره EO-1 نیز سه سنجنده شامل اولین سنجنده فراطیفی فضایی به نام هایپریون، سنجنده چندطیفی ALI و سنجنده فراطیفی LAC نصب شده است (Cooper and Cowan, 2006). فرآیند سنجش‌از‌دور محدوده مورد مطالعه شامل دو مرحله است. مرحله اول، پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها قبل از ورود به مرحله پردازش است. عملیات پیش-پردازش داده‌ها شامل تصحیح هندسی به روش تصویر به تصویر^۶ و تصحیح اتمسفری^۷ است. مرحله دوم تعیین بهترین باندهای سنجنده‌های ASTER و EO-1 ALI و اعمال تکنیک‌های ترکیب رنگی کاذب^۸ (FCC)، نسبت‌گیری باندی^۹ (BR)، روش انتخابی کروسا^{۱۰} یا تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی^{۱۱} (DPCA)، طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی^{۱۲} (SAM)، طبقه‌بندی به روش دمای سطح زمین و در نهایت تهیه نقشه دگرسانی منطقه مورد مطالعه است.

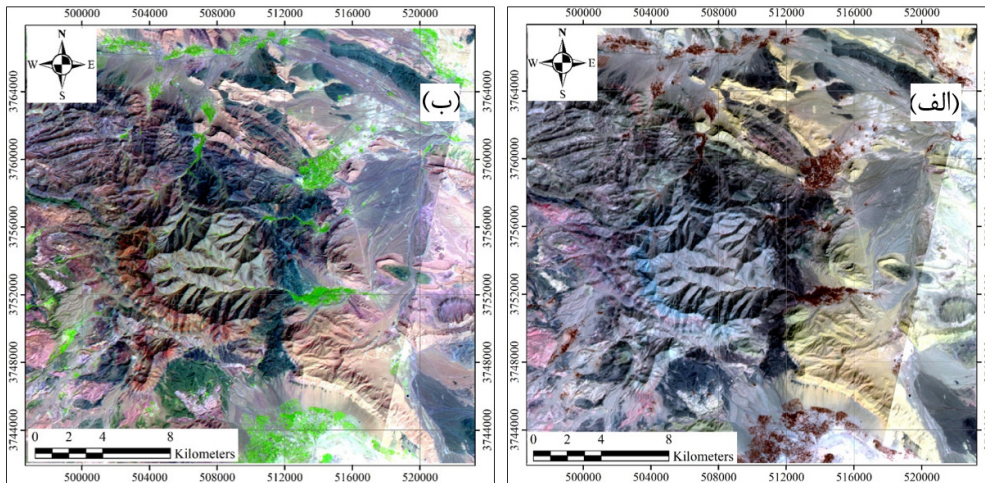
اعمال تکنیک ترکیب رنگی کاذب

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 به آسانی از تصویر به دست آمده استخراج شود. ترکیب رنگی کاذب باندهای R(4)G(6)B(8) به دلیل جذب کانی‌های شاخص زون فیلیک-آرژیلیک (کائولینیت، ایلیت و مونت مورونیت) در باند ۶ مادون قرمز کوتاه (SWIR) و جذب کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت و اپیدوت) در باند ۸ مادون قرمز کوتاه (SWIR) برای آشکارسازی دگرسانی‌ها در محدوده کانسار مناسب هستند (Azizi et al, 2010; Boloki and Poormirzaee, 2009; Di Tommaso and Rubinstein, 2007). در سنجنده ASTER با 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(4)G(3)B(1) به منظور آشکارسازی اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت)، با توجه به ویژگی جذب طیفی در محدوده امواج مادون قرمز نزدیک و طیف مرئی (VNIR) (Taghavi et al, 2019; Aliani et al, 2013) مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳ ب). در این ترکیب رنگی مناطق دارای اکسید آهن بین پیکسل‌های سفید و زرد متغیر هستند. در سنجنده EO-1 ALI، از ترکیب رنگی کاذب R(7)G(4)B(2) (شکل ۴ الف) به منظور شناسایی اکسید آهن (تیره رنگ)، زون‌های پروپیلیتیک (آبی رنگ) و آرژیلیک (طلایی رنگ) استفاده شده است. همچنین از ترکیب رنگی R(1)G(2)B(3) (شکل ۴ ب) برای جداسازی مقادیر سطحی اکسید آهن و خاک رس آهن‌دار بهره برده شده است. در این ترکیب، اکسید آهن به رنگ قهوه‌ای مایل به سیاه مشخص می‌شود (اسدی هارونی و همکاران، ۱۳۸۹).

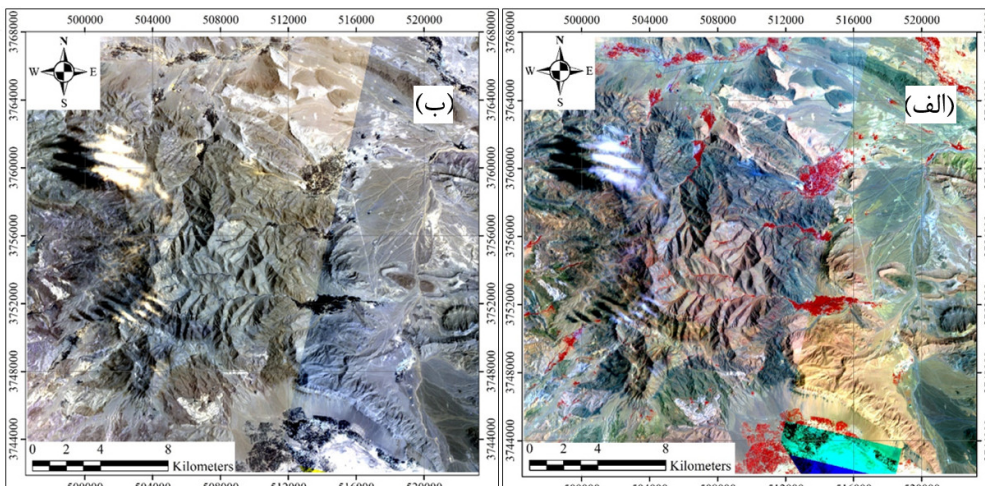
اعمال روش نسبت‌گیری باندى

نسبت‌گیری باندى در واقع یکی از روش‌های پردازش تصاویر چندطیفی است که شامل تقسیم پیکسل‌های یک تصویر یا یک باند طیفی به پیکسل‌های مناظر آن با تصویر یا باند دیگر است. روش نسبت‌گیری باندى می‌تواند برای بارزسازی

اختلاف طیفی بین باندها مورد استفاده قرار گیرد؛ همچنین اثرات سایه و اختلاف روشنایی زمین را به دلیل شیب زمین کاهش دهد (Abera, 2005; Hewson et al, 2005; Rowan and Mars, 2003; Sabins, 1999).



شکل ۳: ترکیب رنگی کاذب با سنجنده ASTER: (الف) (R(4)G(6)B(8), (ب) (R(4)G(3)B(1).



شکل ۴: ترکیب رنگی کاذب با سنجنده EO-1 ALI: (الف) (R(7)G(4)B(2), (ب) (R(1)G(2)B(3).

استفاده شده است. در تصاویر مربوط به این شکل‌ها محدوده‌های مربوط به کانی‌های هدف، با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. همچنین در این پژوهش از سنجنده ASTER برای شناسایی مناطق دارای آهن سه‌ظرفیتی به سبب جذب در ناحیه باند ۱ و تابش بیشینه در باند ۲ (Soe et al, 2005; Prost,)

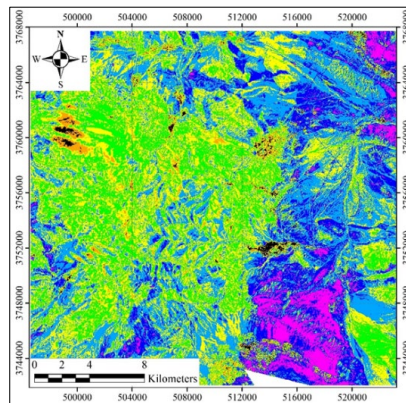
برای شناسایی مناطق دارای کانی‌های آهن (گوتیت، لیمونیت و هماتیت) با سنجنده EO-1 ALI، به سبب جذب در باند ۲ و تابش بیشینه در باند ۳، از نسبت‌گیری باندى Band3/Band2 (شکل ۵) و برای بارزسازی هرچه بیشتر اکسیدهای آهن منطقه، از نسبت باندى Band5/Band4 (شکل ۶)

استفاده قرار گیرد (Maanijou et al, 2015). به-کمک این روش، می‌توان شکل‌های ویژه زمین-شناسی از جمله زون‌های دگرسانی را تشخیص داد. کروستا و مور (Crosta and Moore, 1989) تکنیکی مبتنی بر PCA را برای نقشه‌برداری اکسیدهای آهن و گروه‌های هیدروکسیدی با استفاده از داده‌های سنجنده لندست TM معرفی کردند. آنها همچنین از تکنیک مبتنی بر تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی هدایت شده برای نقشه‌برداری انواع اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی بهره بردند (Crosta et al, 2003).

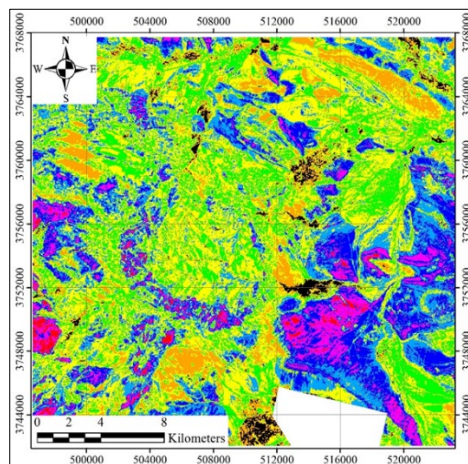
از نسبت‌گیری باندهای Band2/Band1 و برای بارسازی هرچه بیشتر اکسیدهای آهن از نسبت باندهای Band4/Band3 بهره گرفته شد که به دلیل کیفیت بیشتر تصاویر سنجنده EO-1 در باندهای VNIR و در نتیجه نمایش بهتر نتایج، از آوردن تصاویر سنجنده ASTER خودداری شده است.

اعمال روش انتخابی کروستا

تحلیل مولفه‌های اصلی هدایت شده (PCA)، تکنیکی قدرتمند است که می‌تواند برای فشرده-سازی تصاویر و از بین بردن اثرات ناخواسته مورد



شکل ۵: نسبت‌گیری باندهای Band3/Band2 سنجنده EO-1 ALI برای بارسازی آهن‌های سه‌طرفیتی با رنگ قرمز.



شکل ۶: نسبت‌گیری باندهای Band5/Band4 سنجنده EO-1 ALI برای اکسیدهای آهن با رنگ قرمز.

دگرسانی آرژبلیک از باندهای ۴، ۵ و ۷ و برای دگرسانی پروپیلیتیک از باندهای ۷، ۸ و ۹ به عنوان

در این مطالعه، با سنجنده ASTER جهت شناسایی زون‌های دگرسانی فیلیک از باندهای ۴، ۶ و ۷،

شده، فرآیند تحلیل مولفه‌های اصلی بر روی هر گروه به‌طور جداگانه انجام گرفته و نتایج آن در جدول‌های ۱ تا ۳ آورده شده است.

ورودی روش تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده شده است (Khaleghi and Ranjbar, 2011). پس از بررسی پروفیل طیفی هر یک از دگرسانی‌های بیان

جدول ۱: ماتریس مقادیر ویژه باندهای ۴، ۶ و ۷ سنجنده ASTER زون فیلیک.

	Band 4	Band 5	Band 7
PC1	0.569490	0.592624	0.569630
PC2	0.807379	-0.273158	-0.522996
PC3	0.154341	-0.757747	0.634033

جدول ۲: ماتریس مقادیر ویژه باندهای ۴، ۵ و ۷ سنجنده ASTER زون آرژلیک.

	Band 4	Band 6	Band 7
PC1	-0.568461	-0.595591	-0.567559
PC2	-0.792901	0.212603	0.571058
PC3	0.219452	-0.774643	0.593102

جدول ۳: ماتریس مقادیر ویژه باندهای ۷، ۸ و ۹ سنجنده ASTER زون پروپلیتیک.

	Band 7	Band 8	Band 9
PC1	-0.565519	-0.551040	-0.613632
PC2	-0.451726	-0.415550	0.789470
PC3	-0.690023	0.723653	-0.013918

درخصوص آشکارسازی زون‌های فیلیک، آرژلیک و پروپلیتیک، از آوردن آنها خودداری شد.

بحث و نتایج

طبقه‌بندی نظارت شده به روش الگوریتم نقشه-

برداری 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 به وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند. در این روش هرچه مقدار

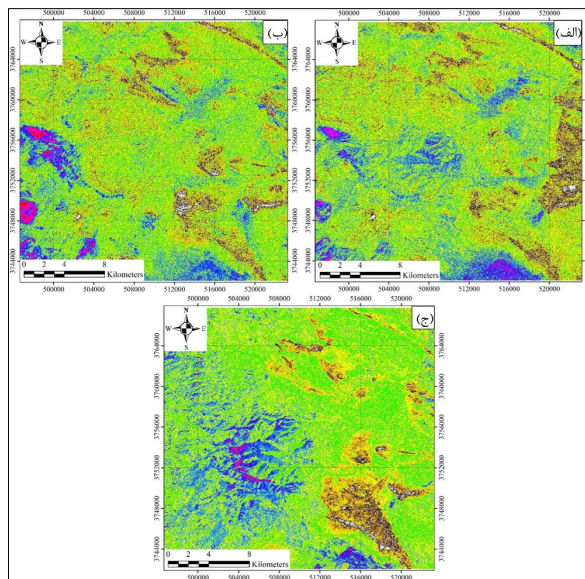
در بررسی ماتریس مقادیر ویژه زون فیلیک، بیشترین اختلاف در PC3 مشاهده می‌شود (شکل ۷ الف)، همچنین با توجه به منفی بودن باند ۴ و مثبت بودن باند ۶، (شکل ۷ ب) PC3 برای زون فیلیک مناسب تشخیص داده شد. در روشی مشابه برای شناسایی محدوده‌های دگرسانی پروپلیتیک که با استفاده از باندهای ۷، ۸ و ۹ حاصل شد، PC3 مناسب‌ترین مقدار بوده و می‌توان پراکندگی دگرسانی پروپلیتیک را در شکل ۷ ج مشاهده نمود. داده‌های باندهای VNIR سنجنده EO-1 نیز برای به دست آوردن مولفه‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفتند که با توجه به نتایج بهتر سنجنده ASTER نسبت به سنجنده EO-1

مشخص شده است. در این تصاویر در هر مورد، کانی هدف با رنگ قرمز مشخص شده است.

طبقه‌بندی به روش دمای سطح زمین

علاوه بر روش‌های گفته شده، می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد دمای سطح زمین^{۱۳} (LST)، محرک اصلی دمای هوا و نقشه‌برداری توزیع مکانی LST استفاده نمود (Kustas et al, 2004). دمای هوا بسته به عوامل مختلفی از جمله وجود و جهت باد، انرژی خورشیدی دریافتی و خصوصیات سطح می‌تواند بالاتر یا پایین‌تر از دمای سطح باشد. با این وجود، LST می‌تواند تخمینی از الگوی مکانی دما در مناطق بزرگ ارائه دهد (Jin and Dickinson, 2010).

زاویه (بین ۰ تا ۱۰) کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر خواهد بود. اعمال الگوریتم نقشه‌برداری زاویه طیفی با داده‌های هر دو سنجنده ASTER و EO-1 صورت گرفت و با توجه به نتایج حاصل شده، سنجنده ASTER توانست نتیجه بهتری را ثبت کند و بهتر از سنجنده EO-1 دگرسانی‌های مرتبط با آهن را تشخیص دهد (شکل ۸). در تصاویر شکل ۸، با استفاده از کتابخانه طیفی موجود در نرم‌افزار ENVI 5.3، پراکندگی دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلیک-آرژیلیک (کلریت-اپیدوت، ایلیت-مونت-موریونیت-مگنتیت-هماتیت-گوتیت) و اکسیدهای آهن (گوتیت-هماتیت-مگنتیت)



شکل ۷: آشکارسازی زون‌های (الف) دگرسانی فیلیک و آرژیلیک به رنگ قرمز، (ب) اکسیدهای آهن به رنگ قرمز، (ج) دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ قرمز، با روش DPCA در سنجنده ASTER.

مادون قرمز گرمایی قدرتمند است. در ادامه با محاسبه ضریب پوشش گیاهی به‌هنجار شده^{۱۴} (NDVI)، شرایط پوشش گیاهی در محدوده محاسبه شد (Rouse et al, 1974):

رابطه (۱)

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

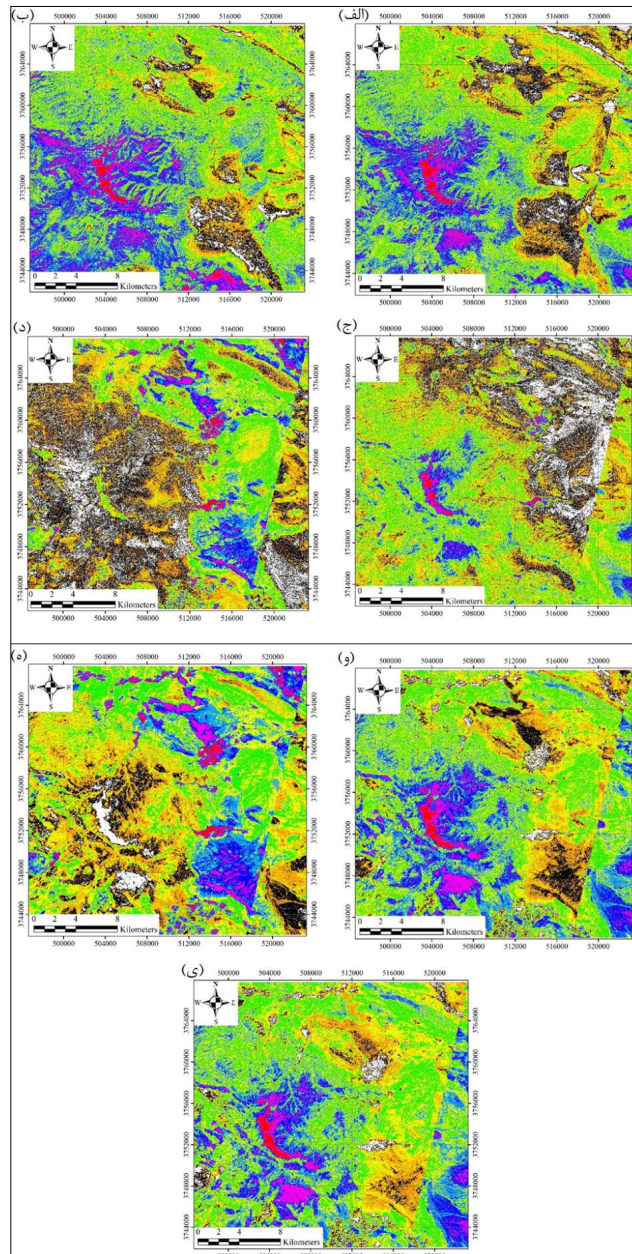
برای محاسبه LST، تصحیحات رادیومتریک و گرمای اتمسفر بر روی باند ۱۰ سنجنده ETM8 و تصحیحات هندسی و رادیومتریک روی باندهای چندطیفی صورت گرفت. همچنین پیکسل‌های سیاه به عنوان اثر نامطلوب، با انجام تصحیحات حذف شد. علت استفاده از سنجنده ETM8 برای پردازش LST، مجهز بودن این سنجنده به دو باند

که در آن $NDVI_s$ و $NDVI_v$ به ترتیب ضرایب محدوده بدون پوشش گیاهی و دارای پوشش گیاهی هستند. همچنین ضرایب انتشار برای $NDVI$ کوچک‌تر از صفر، بین صفر تا 0.2 و بزرگ‌تر از 0.5 به ترتیب 0.991 ، 0.996 و 0.973 تخمین زده شد.

پس از آن نسبت پوشش گیاهی (P_v) که یکی از مولفه‌های اصلی انتشار می‌باشد، به صورت زیر محاسبه می‌شود (Wang et al, 2015):

رابطه (۲)

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2$$



شکل ۸: استخراج دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فلیک-آرژلیک و اکسیدهای آهن سنجنده ASTER با استفاده از الگوریتم SAM. در شکل‌های مختلف رنگ قرمز معرف کانی‌های زیر است: (الف) کلریت، (ب) اپیدوت، (ج) گوتیت، (د) هماتیت، (و) ایلیت، (ه) مگنتیت، (ی) مونت مورینیت.

برای باند ۱۰، h ثابت پلانک ($6.626 \times 10^{-34} J s$)، c سرعت نور ($2.998 \times 10^8 \frac{m}{s}$) و ثابت بولتزمن ($1.38 \times 10^{-38} J/K$) می‌باشد (Weng et al, 2004). با توجه به تصویر بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بازه دمایی محدوده مورد مطالعه از ۲۵/۴ تا ۵۸/۸ درجه سانتی‌گراد بوده و با توجه به ضریب انتشار اکسید آهن (۰/۸۵ تا ۰/۸۹) میزان جذب این کانسار را می‌توان بین ۴۳ تا ۴۷ درجه سانتی‌گراد تخمین زد. در نتیجه انتظار می‌رود که در نواحی با میانگین دمایی ۴۵ درجه، بیشترین تمرکز اکسید آهن صورت گرفته باشد. بدیهی است که با توجه به وجود ناخالصی و باطله در نواحی خاص، روندی معنادار وجود نداشته باشد. شکل ۹ نقشه خروجی اعمال پردازش LST بر روی داده‌های سنجنده ETM8 را نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی بین نقشه شکل ۹ و دیگر نقشه‌های به دست آمده از سنجنده‌ها وجود دارد.

ضریب انتشار^{۱۵} سطح برای $0.5 < NDVI < 0.7$ نیز با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید (Avdan and Jovanovska, 2016):

رابطه ۳)

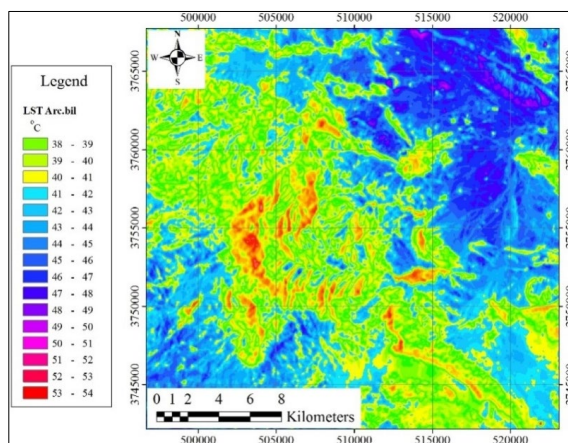
$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{v\lambda} P_V + \varepsilon_{s\lambda} (1 - P_V) + C_{\lambda}$$

جایی که $\varepsilon_{v\lambda}$ و $\varepsilon_{s\lambda}$ به ترتیب ضرایب انتشار پوشش گیاهی و منطقه بدون پوشش گیاهی بوده و C_{λ} میزان زبری سطح را نشان می‌دهد که مقدار ثابت آن ۰/۰۰۵ است (Sobrino et al, 2004). واحد درجه حرارت با کم کردن ۲۷۳/۱۵ درجه، از کلین به سانتی‌گراد تبدیل می‌شود. در انتها LST به صورت رابطه ۴ محاسبه خواهد شد (Sobrino and Raissouni, 2000):

رابطه ۴)

$$LST = \frac{BT}{\{1 + [\left(\frac{\lambda BT}{hc}\right) \ln \varepsilon_{\lambda}]\}}$$

که در آن BT دمای روشنایی (درجه سانتی‌گراد)، λ طول موج تابشی ساطع شده (مقدار ۱۰/۸۹۵



شکل ۹: نقشه خروجی پردازش LST بر روی داده‌های سنجنده ETM8 بر حسب سانتی‌گراد. محدوده‌های قرمز رنگ حرارت بالاتر و محدوده‌های آبی رنگ حرارت کمتر را نشان می‌دهند.

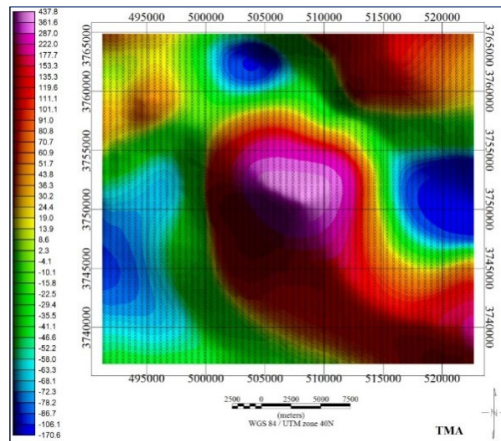
۲۷/۵ کیلومتر و در ۷۵۴ ایستگاه، توسط شرکت ابروسرویس تگزاس^{۱۶} بین سال‌های ۱۹۷۴ و ۱۹۷۷ میلادی، برای سازمان زمین‌شناسی کشور برداشت شده است. خطوط برداشت شده داده‌های

مغناطیس‌سنجی محدوده مورد مطالعه

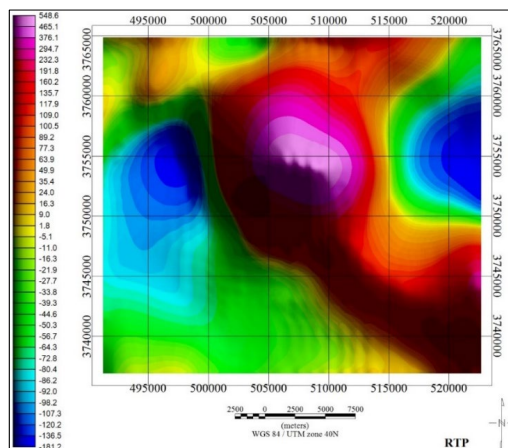
برداشت مغناطیسی در این منطقه بر روی پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌زایی آهن حاصل از روش دورسنجی، در محدوده‌ای به ابعاد تقریبی ۳۱ در

شکل مشخص است، مرکز محدوده مطالعاتی دارای بیشترین تغییرات شدت میدان مغناطیسی است. همچنین می‌توان ادامه این تغییرات را به سمت جنوب شرقی محدوده مشاهده نمود. از آنجایی که میدان مغناطیسی خاصیت برداری دارد، اثر زوایای میل و انحراف مغناطیسی زمین باعث خواهد شد تا مقادیر بیشینه شدت میدان مغناطیسی کل دقیقاً بر روی توده مغناطیسی منطبق نباشد. برای تصحیح این پارامترها از فیلتر برگردان به قطب^{۱۷} (RTP) استفاده می‌شود؛ به گونه‌ای که در چنین نقشه‌ای بیشترین مقدار بی‌هنجاری دقیقاً بر روی منشا آنها قرار خواهد گرفت.

مغناطیس هوابرد با فاصله خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر از یکدیگر و فاصله خطوط کنترلی ۴۰ کیلومتر است. هواپیمای استفاده شده، یک هدایت-گر هوایی دوموتوره است که یک مغناطیس‌سنج بخار سزیم با حساسیت ثبت ۰/۰۲ گاما را حمل می‌کرده است. برای پردازش و تفسیر کیفی داده‌های مغناطیس هوایی، از نسخه ۸/۴ نرم‌افزار Oasis Montaj استفاده شد که مقادیر زوایای میل و انحراف مغناطیسی محدوده نیز به ترتیب ۵۲/۲۳ و ۳/۵۲ درجه می‌باشد. در شکل ۱۰ نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقیمانده منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌گونه که در این



شکل ۱۰: نقشه تغییرات شدت میدان مغناطیسی باقیمانده مورد مطالعه برحسب nT (موقعیت نقاط برداشت با علامت × مشخص شده‌اند).



شکل ۱۱: نقشه برگردان به قطب مغناطیسی منطقه مورد مطالعه

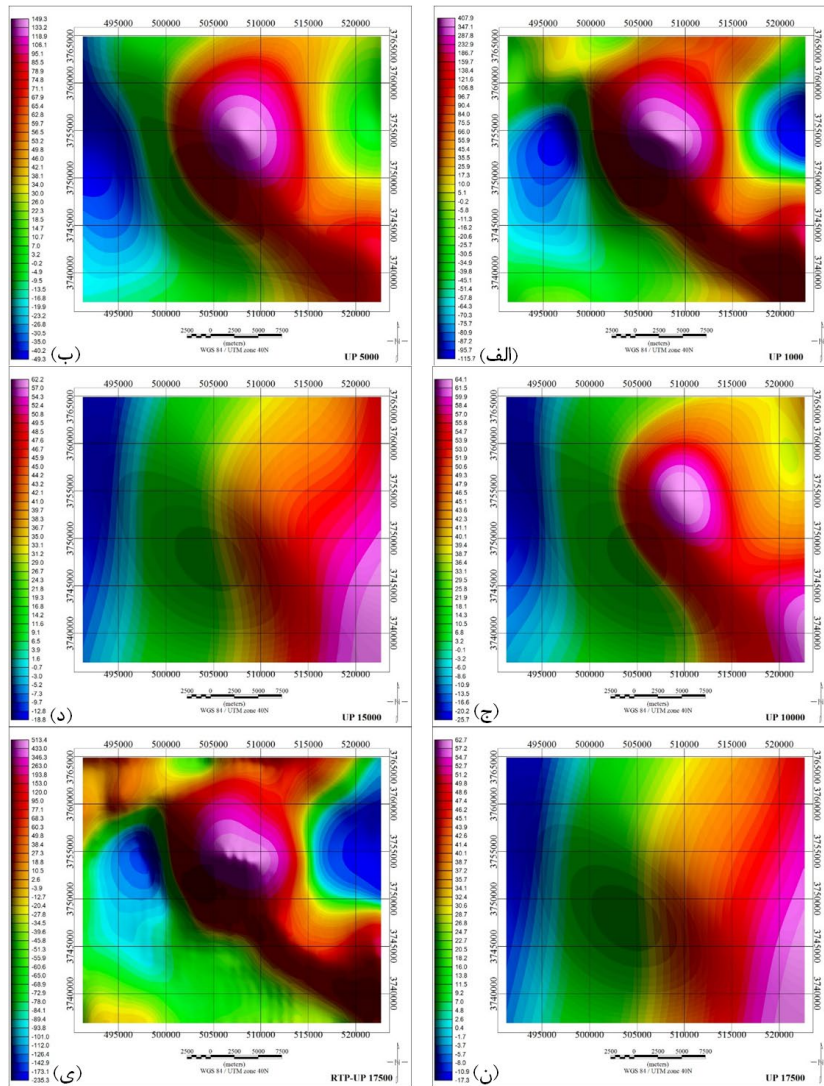
جزئی‌تر اعمال شد که به مراتب اثرات بی‌هنجاری-های اصلی را بهتر نمایان می‌سازد. این پردازش برای ارتفاع ۷۵۰۰ متر (مناسب‌ترین ارتفاع که براساس تجربه، سعی و خطا و نیز فاصله پروفیل‌های برداشت انتخاب شده است)، اعمال شده که وجود اثرات بی‌هنجاری، نشانگر عمیق بودن آنهاست. یکی از مهم‌ترین مباحث در تفسیرهای مغناطیسی، تعیین دقیق مرز بی‌هنجاری‌هاست. برای این مهم، فیلترهای متعددی استفاده می‌شوند که می‌توان از فیلترهای مشتق قائم، مشتق افقی، گرادیان افقی کل^{۲۰} (THD)، سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت نام برد. تمامی فیلترهای اشاره شده، فیلترهای بالاگذر هستند که هدفشان برجسته‌سازی تغییرات مرتبط با توده منشأ 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 ۵ محاسبه می‌شود:

رابطه ۵)

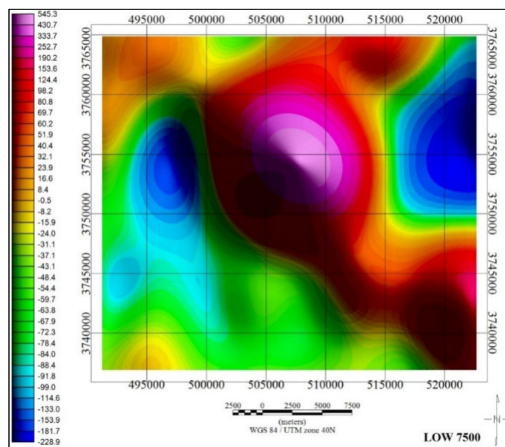
$$THD = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$$

شکل ۱۴ نتیجه اعمال فیلتر گرادیان افقی کل بی-هنجاری را نشان می‌دهد. در این شکل بیشینه مقدار گرادیان، بیانگر مرزهای توده مورد نظر است. مطابق شکل بی‌هنجاری مغناطیسی بیشتر در مرکز محدوده مشاهده می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که کانی‌سازی دارای راستای شمال غربی- جنوب شرقی است.

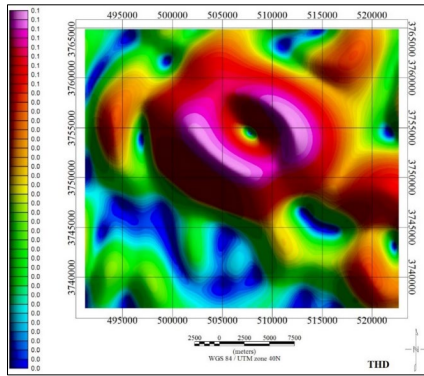
این روش توسط بارانوف (Baranov, 1957) و بارانوف و نادى (Baranov and Naudy, 1964) توسعه داده شد (Azizi et al, 2010). در شکل ۱۱ نقشه حاصل از این پردازش آورده شده است که در آن چندین زون بی‌هنجاری را می‌توان مشاهده نمود. این نقشه تقریباً شبیه نقشه شکل ۱۱ است با این تفاوت که در این نقشه اندکی پیچش و جابه‌جایی 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 فراسو^{۱۸} 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). مطابق شکل ۱۲ این پردازش در ارتفاع‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۱۷۵۰۰ متر بر روی نقشه برگردان به قطب اعمال شده و در ارتفاع ۱۷۵۰۰ متر اثر ناحیه‌ای کاملاً 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^{۱۹} و نوفه^{۲۰} یک موج دارای ویژگی‌های فرکانسی متفاوتی هستند، برای تفکیک آنها از یکدیگر فیلترهای فرکانسی به کار 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 ۱۳ این پردازش بر روی نقشه به دست آمده در شکل ۱۲ (ی) به منظور رفع اثرات سطحی



شکل ۱۲: الف تا ن) نقشه میدان مغناطیسی بعد از اعمال فیلتر گسترش به سمت بالا تا ارتفاع‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۱۷۵۰۰ متر؛ ی) نقشه میدان مغناطیسی بعد از کسر اثر ناحیه‌ای (ادامه فراسو برای ارتفاع ۱۷۵۰۰ متر).



شکل ۱۳: خروجی فیلتر پایین‌گذر به ازای ارتفاع ۱۷۵۰۰ متر اعمال شده بر نقشه مغناطیس باقیمانده بدون اثر ناحیه‌ای.



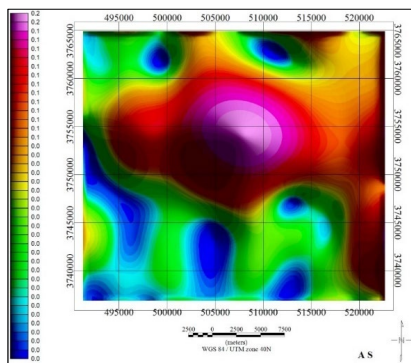
شکل ۱۴: نقشه گرادیان افقی کل (THD) داده‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه.

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 ۶ به دست می‌آید:

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

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 ۹۰ درجه‌ای ایجاد می‌کند؛ به عبارت دیگر گرادیان افقی به قائم تبدیل شده و لبه‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تعیین می‌شود. در شکل ۱۵ نتیجه اعمال این پردازش بر روی شکل ۱۴ (ی) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به کمک این پردازش منبع بی‌هنجاری برجسته‌تر شده و دو توده کروی شکل در مرکز و جنوب شرقی نمایان شده است.



شکل ۱۵: نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی محدوده مورد مطالعه.

مدلسازی وارون سه‌بعدی داده‌ها

روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشاهده شده بر روی سطح را می‌توان با استفاده از داده‌های مغناطیسی، شبیه‌سازی و مدلسازی نمود. 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

مدل در سطح جلوگیری به عمل خواهد آمد (Phillips, 2002). برازش کامل داده‌های اندازه-گیری شده بر داده‌های محاسبه شده باعث ایجاد خطا در مدل خواهد شد؛ بنابراین تابع هدف برازش نیز با رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

رابطه ۸)

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

که در آن \vec{d}^{obs} داده‌های برداشت‌شده^{۲۱}، \vec{d}^{cal} داده‌های محاسبه‌شده و σ_i انحراف معیار داده i ام 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:

رابطه ۹)

$$\phi = \phi_d + \mu \phi_m$$

و به شکل رابطه ۱۰ تعمیم می‌یابد:

رابطه ۱۰)

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

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. تفاسیر صورت گرفته بر روی داده‌های میدان مغناطیسی کیفی و یا نهایتاً نیمه‌کمی بوده و در تعیین پارامترهای کمی و هندسی کانی‌سازی قابل استفاده نیستند. یکی از بهترین روش‌ها جهت تفسیر کمی داده‌های مغناطیسی مدل‌سازی وارون سه‌بعدی است که در آن مدل توزیع خودپذیری ذاتی سنگ‌ها را در سه بعد به تصویر می‌کشد.

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 ۷ تعریف شده است (Williams, 2008).

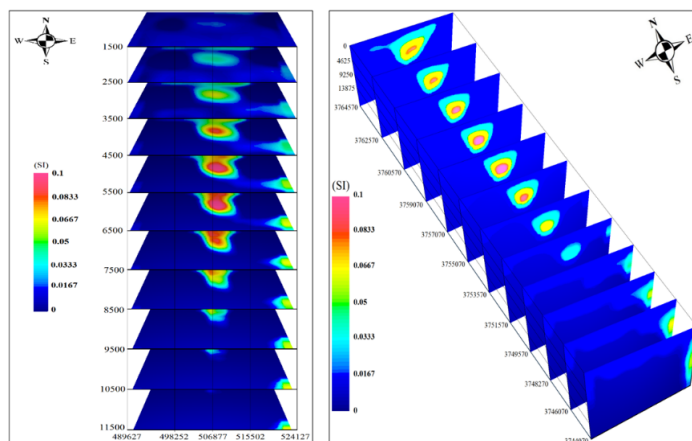
رابطه ۷)

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

قسمت اول معادله، معیار نزدیکی مدل به مدل مرجع (m_{ref}) بوده و دیگر عبارات، میزان همواری مدل در جهات x ، y و z را کنترل می‌کنند. ضرایب a_z, a_y, a_x, a_s برای وزن‌دهی قسمت‌های مختلف معادله بوده که تابع هدف مدل را قادر می‌سازد تا با تغییر یک یا دو پارامتر، موفق به بارزسازی مدل‌هایی نزدیک یا ترجیحاً در یک راستای خاص هموارتر باشد. توابع وزنی وابسته فضایی w_z, w_y, w_x, w_s جهت وزن‌دهی اهمیت یک پارامتر مدل نسبت به دیگری کاربرد دارند (Williams, 2008). 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 منشأ می‌باشند و از تمرکز

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 ۰ تا ۱ محدود شد. در انجام این فرایند، تعداد داده‌های مغناطیسی مورد استفاده ۶۱۹۵ عدد بوده و تعداد کل سلول‌های مدل‌سازی نیز ۱۳۸۴۱۱۰ (۹۱×۱۱۷×۱۳۰) عدد می‌باشد. در نتیجه این فرآیند، دو توده بزرگ شناسایی شد و همان‌گونه که در شکل پیداست، در مرکز و جنوب شرق محدود واقع شده‌اند. عمق توده میانی از سطح زمین معادل ۱۵۰۰ متر بوده و عمق توده جنوب شرقی ۲۵۰۰ متر تخمین زده شده است.

مطابق شکل ۱۶ محدوده کانسار آهن کاشان با بلوک‌هایی به ابعاد $125 \times 250 \times 250$ متر (۲۵۰ متر در راستاهای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی و ۱۲۵ متر در راستای قائم) به صورت سه‌بعدی، مدل‌سازی شده است. وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های این محدوده پس از اعمال پردازش‌های ادامه فراسوی ارتفاع ۱۷۵۰۰ متر و فیلتر پایین‌گذر ارتفاع ۷۵۰۰ متر، با استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ توسط نرم‌افزار UBC Mag3D 4.0 انجام شد. در این مدل‌سازی پارامتر وزن‌دهی عمق ۱۰۰۰ متر و خودپذیری مغناطیسی اولیه^{۲۲} برابر با ۰/۰۰۱ منظور شد که مطابق آن تمامی منطقه به صورتی همگن، شامل این مقدار خودپذیری مغناطیسی می‌باشند. همچنین در قسمت مدل مرجع^{۲۳}، مقدار



شکل ۱۶: مدل‌سازی سه‌بعدی کانسار مورد مطالعه از دو نمای مختلف

همانند ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری بانندی، تحلیل مولفه‌های اصلی و طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی به کمک نرم‌افزار ENVI، با استفاده از داده‌های سنجنده ETM8 فیلتر دمای سطح زمین (LST) نیز اعمال شد. با استفاده از مطالعات دورسنجی انجام گرفته بر روی محدوده اکتشافی کاشان، به یاری تصاویر و داده‌های سنجنده‌های ASTER، EO-1 و ETM8 اکسیدهای آهن محدود، آشکار شد و زون‌های

نتیجه‌گیری

از آنجایی که سنجنده ASTER در باندهای مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) و سنجنده EO-1 در باندهای طیف مرئی-مادون قرمز نزدیک (VNIR) سنجنده‌های توانمندی هستند، بنابراین در این پژوهش از ترکیب این دو باند از این دو سنجنده مختلف، برای بالا بردن دقت و صحت اکتشافات دورسنجی آهن در محدوده کاشان استفاده شد. علاوه بر بکارگیری روش‌های مختلف پردازشی

تلفیق دو روش سریع و نسبتاً ارزان سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی هوابرد همراه با مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی، نشان می‌دهند که محدوده کاشان از نظر کانه‌سازی آهن دارای پتانسیل بالایی است. اگرچه براساس گردش صحرایی و مشاهدات میدانی، در حال حاضر در دو بخش از شمال محدوده مورد مطالعه با شرایط زمین‌شناسی یکسان و تصاویر ماهواره‌ای مشابه با بی‌هنجاری‌های حاصل از عملیات مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، دو معدن فعال آهن وجود دارد، ولی به منظور اعتبارسنجی نتایج و حصول اطمینان از صحت آنها، لازم است که در محدوده بی‌هنجاری‌های مغناطیسی حاصل، برداشت مغناطیسی زمینی نیز صورت گیرد و براساس نتایج آن، موقعیت بهینه عملیات حفاری پیشنهاد گردد. 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.

دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک نیز آشکارسازی شدند. حضور زون‌های دگرسانی و نیز اکسید آهن، مستعد بودن محدوده مورد مطالعه را برای مطالعات بیشتر پتانسیل‌های معدنی نشان داد. براساس نتایج مرحله شناسایی و پی‌جویی توسط روش دورسنجی و احتمال وجود اکسید آهن در محدوده، به کمک مغناطیس‌سنجی هوابرد، انجام تصحیحات مورد نیاز و اعمال پردازش‌های مختلف بر روی داده‌ها، زون‌های بی‌هنجاری منطقه شناسایی شدند. سپس عملیات مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی برداشت شده، منجر به تعیین محل بیشترین میزان مغناطیدگی در مرکز و جنوب شرقی محدوده، تخمین شکل تقریبی توده کانسار و عمق دفن آن شد. در زون‌های سولفیدی آهن‌دار کانی‌های پیریت و کالکوپیریت به وفور همراه با دیگر کانی‌های آهن، سیلیس و کلسیت یافت می‌شوند. با این استدلال در زون‌های دورسنجی فیلیتیک، شناسایی پهنه‌های سولفیدی آهن می‌تواند راهنمایی بر تشخیص محدوده‌های احتمالی تشکیل کانه‌سازی مفید آهن باشد. استفاده از نتایج پژوهش حاضر از طریق

پانوش

- 1-Instantaneous Field of View
- 2-Earth Observing System
- 3-Visible and near-infrared (VNIR)
- 4-Short-wave infrared (SWIR)
- 5-Thermal infrared(TIR)
- 6-Image to Image
- 7-IARR (Internal Average Relative Reflectance)
- 8-False Color Composite
- 9-Banding Ratio
- 10-Crosta
- 11-Directed Principal Component Analysis
- 12-Spectral Angle Mapper

- 13-Land surface temperature
- 14-Normalized difference vegetation index
- 15-Emissivity
- 16-Aero Service Houston, Texas
- 17-Reduce to pole
- 18-Upward continuation
- 19-Signal
- 20-Noise
- 21-Total horizontal derivative
- 22-Data miss-fit
- 23-Initial Model

منابع

- رادفر، ج. و علایی مهابادی، س.، ۱۳۷۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- ضیاءظریفی، ا.، ۱۳۸۹. مبانی اکتشافات رادیومتریکی ژئوفیزیکی، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، ۳۱۲ ص.
- 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. Master of Science Thesis in Geo-information Science and Earth Observation, Specialisation: Mineral Resource Exploration, Enschede the Netherlands.
- Aliani, F., Dadfar, S. and Maanijou, M., 2013. Detection of alteration zones of Haji Abad iron deposit with (SWIR+VNIR) data of ASTER sensor, *Geosciences*, v. 24(94), p. 73-80.
- Alilou, S.K., Norouzi, G.H., Doulati, F. and Abedi, M., 2014. Application of magnetometry, electrical resistivity and induced polarization for exploration of polymetal deposits, a case study: Halab Dandi, Zanjan, Iran. 2nd International Conference on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics At: Istanbul, Turkey.
- Armson, D., Stringer, P. and Ennos, A.R., 2012. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 11, p. 245-255.
- Avdan, U. and Jovanovska, G., 2016. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, v. 2016, 8 p.
- 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*, v. 46(1), p. 99-109.
- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, v. 22(2), p. 359-383.
- Baranov, V. and Naudy, H., 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, v. 29, p. 67-79.
- Behnam, S. and Ramazi, H., 2019. Interpretation of geomagnetic data using power spectrum and 3D modeling of Gol-e-Gohar magnetic anomaly. *Journal of Applied Geophysics*, v. 171, p. 103-129.
- 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*, v. 2(3), p. 38-43.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, v. 32(10), p. 1585-1591.
- Crosta, A.P. and Moore, J.M.C.M., 1989. Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. *Proceedings of the 9th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary (Ann Arbor, MI: Environmental

- Research Institute of Michigan), p. 1173-1187.
- 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*, v. 24(21), p. 4233-4240.
- Di Tommaso, I. and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, v. 32(1-2), p. 275-290.
- Gupta, H.K. and Roy, S., 2006. *Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century*. Elsevier Science, 292 p.
- 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*, v. 99(1-2), p. 159-172.
- Jin, M. and Dickinson, R.E., 2010. Land surface skin temperature climatology: benefitting from the strengths of satellite observations. *Environmental Research Letters*, v. 5(4), doi:10.1088/1748-9326/5/4/044004.
- 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*, v. 5(8), p. 61-69.
- Kustas, W.P., Li, F., Jackson, T.J., Prueger, J.H., MacPherson, J.I. and Wolde, M., 2004. Effects of remote sensing pixel resolution on modeled energy flux variability of croplands in Iowa. *Remote Sensing of Environment*, v. 92, p. 535-547.
- Lelievre, P.G. and Oldenburg, D.W., 2006. Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility. *Geophysical Journal International*, v. 166(1), p. 76-90.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1996. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, v. 61(2), p. 394-408.
- Liu, S., Hu, X. and Zhu, R., 2018. Joint inversion of surface and borehole magnetic data to prospect concealed orebodies: A case study from the Mengku iron deposit, northwestern China. *Journal of Applied Geophysics*, v. 154, p. 150-158.
- Maanijou, M., Puyandeh, N., Sepahi, A.A. and Dadfar, S., 2015. Mapping of hydrothermal alteration of Dashkasan (Sari Gunay) epithermal gold mine using ASTER sensor images and XRD analysis. *Journal of Geoscience*, v. 24(95), p. 95-104.
- Mohammadzadeh Moghaddam, M., Mirzaei, S., Nouraliee, J. and Porkhial, S., 2016. Integrated magnetic and gravity surveys for geothermal exploration in Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 9(7), p. 1-12.
- Phillips, N.D., 2002. Geophysical inversion in an integrated exploration program: Examples from the San Nicolas deposit, Doctoral dissertation, University of British Columbia.
- Prost, G.L., 2002. *Remote sensing for geologists: a guide to image interpretation*. CRC Press, 326 p.
- Rosid, M.S., Sari, N.I. and Jaman, A.P., 2020. Identification of gold mineralization zone in "GB" field, Jambi, Indonesia using 3D inversion magnetic data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 481(1), p. 012052.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Shell, J.A. and Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden, S.C., Mercanti, E.P., Becker, M.A. (Eds.), *Third Earth*

- Resources Technology Satellite-1 Symposium. Goddard Space Flight Center, Washington, D.C.: Scientific and Technical Information Office, NASA. p. 309-317.
- 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*, v. 84(3), p. 350-366.
- Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, v. 14(3-4), p. 157-183.
- Sobrino, J.A. and Raissouni, N., 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, p. 353-366.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. and Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, v. 90(4), p. 434-440.
- 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*, v. 26, p. 21-28.
- Taghavi, A., Maanijou, M., Lentz, D. and Sepahi, A.A., 2019. Partial sub-pixel and pixel-based alteration mapping of porphyry system using ASTER data: regional case study in western Yazd, Iran. *International Journal of Image and Data Fusion*, v. 10(4), p. 300-326.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, v. 86, p. 370-384.
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A. and Zhao, S., 2015. An improved monowindow algorithm for land surface temperature retrieval from landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, v. 7, p. 42-68.
- Weng, Q., Lu, D. and Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, v. 89, p. 483-467.
- 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.
- Yuhas, R.H., Goetz, A.F. and Boardman, J.W., 1992. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm, *JPL, Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, v. 1, AVIRIS Workshop.