

Identifying the potential of chromite mineralization in the northern region of Faryab city (Kerman) using ASTER and Landsat images

Aliyeh Seifi^{1*}, Mohammad Eskandarnejad Tehrani², Ahmad Khazaei Khalaf¹

¹ Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

² Zamin Peyjooyan Negar Co., Tehran, Iran

¹ aliyeh.seifi@birjand.ac.ir, ahmadkhazaei@birjand.ac.ir, ² tehrani@zpnegar.com

....

Article Info	Abstract
Keywords: Chromite ASTER Landsat Faryab Kerman	The study area lies within the mélange ophiolite belt known as the Esfandagheh-Faryab metallogenic belt, situated in the south and southwest of Kerman, hosting Iran's largest chromite deposits, Esfandagheh and Faryab. This research focuses on a section of the Esfandagheh-Faryab belt to identify chromite deposits using ASTER and Landsat satellite imagery. After performing the required corrections, a false color composite was generated from multiple band ratios, providing an initial characterization of the region's peridotites. A novel band ratio was developed and applied to emphasize dunite and related rock types, effectively highlighting areas corresponding to mélange ophiolite units, amphibolites linked to ultramafic rocks, and metagabbro. The dunite band ratio was examined through two phases: qualitative and quantitative. In the qualitative phase, spectra from rock and mineral libraries helped verify that the highlighted areas corresponded to dunite and associated rocks. The quantitative phase involved using a confusion matrix on classification outcomes from neural network and support vector machine models, achieving over 85% total accuracy. Both qualitative and quantitative analyses validated the effectiveness of the proposed band ratio, and its alignment with known geological units suggests that this area holds strong potential for chromite exploration.

Corresponding author. aliyeh.seifi@birjand.ac.ir

Email: aliyeh.seifi@birjand.ac.ir

<https://doi.org/10.48306/jgrs.2026.553221.1022>

Received September 2025; Accepted November 2025

©2025 Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. This is an open article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Extended abstract

1. Introduction:

Iran, rich in natural and mineral resources, must harness the capabilities of remote sensing in earth sciences, particularly for exploring mineral resources and managing land. The country's chromite deposits, often irregular in shape, primarily occur within ophiolite complexes. One notable ophiolite region is the melange ophiolite belt in south and southwest Kerman—known as the Esfandaghe-Faryab belt—which includes two key chromite-bearing zones: Esfandaghe and Faryab. Because Iran's ophiolite formations lie in rugged, hard-to-access mountainous areas, exploring chromite deposits has been challenging. Remote sensing offers an effective approach for detecting chromite in these regions. Accordingly, this study focuses on a section of the Esfandaghe-Faryab metallogenic belt in Kerman province, aiming to identify chromite deposits through the analysis of multispectral ASTER and Landsat satellite imagery using image processing techniques.

2. Study Area

The study area, situated in Faryab County in the southwest of Kerman Province, lies within the southwestern section of the 100,000-scale sheet of Pagdar. Ophiolite melange-related rocks are found in the northeastern part of the region, while limited remnants of flysch deposits occur centrally. Serpentinized dunites containing chromite are present in the western part of the study area. The region's mines are primarily associated with the ophiolite melange, serpentinized dunites, amphibolites, and ultramafic rocks.

3- Methodology

Satellite images offering both spectral and spatial resolution were selected to identify lithological and mineralogical units associated with chromite mineralization. The ASTER image includes appropriate bands for distinguishing minerals containing Al-OH, Mg-OH, and Fe-OH, as well as for identifying lithological units, while the Landsat image is also effective for detecting minerals rich in iron, magnesium, and similar elements. In this study, the Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) preprocessing method was applied to both ASTER and Landsat 8 images to eliminate atmospheric effects on image pixels. Geometric accuracy was verified using Google Earth software, confirming that no geometric corrections were necessary. Subsequently, various image processing techniques were employed to enhance the visibility of rocks and minerals relevant to chromite exploration. A color composite of band ratios 4/7, 3/4, and 2/1 (in RGB) was generated for the ASTER image to provide an overview of peridotite distributions in the area. Following that, a new band ratio, based on the full spectral characteristics of dunite derived from the processed ASTER and Landsat 8 spectra, was developed to highlight dunite and its related rocks. To qualitatively assess this dunite band ratio, the subpixel matched filtering (MF) technique was applied using spectral signatures of rocks and minerals from the ENVI software's spectral libraries. Quantitative evaluation was then conducted by calculating confusion matrices from classifications produced by neural networks (NN) and support vector machines (SVM), focusing on dunite-highlighted regions. For this validation process, petrological units from the geological map served as ground truth.

4- Results

A color composite image using three band ratios (4/7, 3/4, and 2/1 in RGB) was created to provide a general overview of the peridotite conditions in the area. In this image, zones of amphibolite and gabbro with potential mineralization appeared in shades from red to dark red, while parts of the ophiolite mélangé showed up as dark blue. These correspond well with the ophiolite mélangé, ultramafic, and metagabbro with amphibolites units in the geological map. The band ratio, derived from the absorption and reflection properties of dunite rock in the visible to shortwave infrared

spectrum of ASTER and Landsat 8 imagery, also clearly highlighted the ophiolite mélangé along with ultramafic and metagabbro amphibolite units on the map.

To qualitatively analyze and more accurately identify the lithology and mineralogy of these highlighted regions—and specifically to pinpoint chromite-bearing units—the spectral signatures of rocks (dunite and hornblende schist) and minerals (olivine, augite, hornblende, and serpentine) from the ENVI spectral library were applied using the MF method. The MF results mainly matched the mélangé ophiolite rock unit, with some correspondence to the ultramafic and metagabbro amphibolite units mapped in the area. The identified minerals aligned consistently with both the dunite band ratio results and the spectral highlighting of dunite and hornblende schist (amphibolite), primarily located within parts of the mélangé ophiolite and amphibolite-metagabbro units.

A quantitative classification of the dunite-highlighted areas was then performed using NN and SVM methods. The classification maps from both approaches showed strong agreement, with the ophiolite mélangé and amphibolite-metagabbro units closely matching most highlighted regions. The amphibolite-ultramafic rock unit identified in the geological map also corresponded very well with the classification results. The classified maps were evaluated quantitatively using confusion matrix analysis based on the dunite band ratio. Accuracy metrics—including producer's accuracy, user's accuracy, and overall accuracy—were assessed. Both NN and SVM classifications achieved total accuracies exceeding 85%. Specifically, accuracy for the ophiolite mélangé and amphibolite-ultramafic units surpassed 90%, while the amphibolite-metagabbro unit scored just below 90%. Notably, known chromite mines occur within the ophiolite mélangé and amphibolite-ultramafic rock units delineated on the geological map, underscoring the potential of these units for chromite exploration in this region.

5- Conclusion

This study found that the dunite band ratio derived from ASTER and Landsat images highlighted areas corresponding to ophiolite mélangé rock units, amphibolites, and associated ultramafic and metagabbro rocks. In the qualitative analysis using the MF method, minerals such as olivine, pyroxene (augite), amphibole, and serpentine—as well as dunite and hornblende schist rocks—showed strong correlation with these rock units. Quantitative analysis employing NN and SVM classification, supported by confusion matrix calculations, achieved overall accuracies exceeding 85% for the amphibolite-metagabbro unit and over 90% for both the ophiolite mélangé and amphibolite-ultramafic units.

شناسایی پتانسیل کانی‌سازی کرومیت در محدوده شمال شهر فاریاب (کرمان) با استفاده از

تصاویر استر و لندست

عالیه سیفی^{۱*}، محمد اسکندر نژاد تهرانی^۲، احمد خزاعی خلف^۱

^۱ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ایران

^۲ شرکت زمین پی جویان نگار، تهران، ایران

^۱ aliye.h.seifi@birjand.ac.ir^۱, ahmadkhazaei@birjand.ac.ir, ^۲ tehrani@zpnegar.com^۱

چکیده:

منطقه مورد مطالعه در نوار افیولیت ملانژ معروف به کمر بند فلز زائی اسفندقه - فاریاب واقع در جنوب و جنوب غرب کرمان قرار گرفته است که در این محدوده بزرگترین ذخایر کرومیت ایران به نام های اسفندقه و فاریاب وجود دارد. هدف از این پژوهش، مطالعه قسمتی از کمر بند فلز زائی اسفندقه - فاریاب جهت شناسایی کانسارهای کرومیت با استفاده از تصاویر ماهواره ای استر و لندست است. پس از انجام

تصحیحات لازم، ترکیب رنگی کاذب حاصل از نسبت باندهای متعدد ایجاد شد و شناخت اولیه‌ای نسبت به پدیدت‌های منطقه به دست آمد. نسبت باندهای جدیدی برای بارزسازی دونیت و سنگ‌های همراه تعریف و اجرا گردید که مناطق منطبق بر واحدهای سنگی افیولیت ملانژ، آمفیبولیت‌های همراه سنگ‌های اولترامافیک و متاگابرو را بارز نمود. دو مرحله بررسی کیفی و کمی نسبت باندهای دونیت صورت پذیرفت. در بررسی کیفی، کانیها و سنگ‌های مرتبط با مناطق بارز شده به عنوان دونیت و سنگ‌های همراه با کمک طیف سنگها و کانیهای موجود در کتابخانه‌های طیفی شناسایی شدند. در بررسی کمی، با اعمال روش ماتریس آشفستگی بر روی نتایج طبقه‌بندی شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان، نتایج با دقت کل بالای ۸۵٪ به دست آمد. نتایج بررسی کیفی و کمی، نسبت باندهای ارائه شده را مثبت ارزیابی نموده و تطابق آنها با واحدهای زمین‌شناسی منطقه، ما را به این نتیجه می‌رساند که این منطقه پتانسیل خوبی برای اکتشاف کرومیت دارد.

واژگان کلیدی: کرومیت، استر، لندست، فاریاب، کرمان

۱- مقدمه

اکتشاف منابع و ذخایر زیرزمینی با تولید ماده اولیه بسیاری از صنایع و ایجاد اشتغال، از جمله فعالیت‌های اقتصادی- راهبردی هر کشور به شمار می‌رود (مؤمنی، ۱۳۹۲). پراکندگی این منابع در تمام مناطق دنیا به صورت همگن نبوده و هر کانسار دارای ویژگی‌های منحصر به خود است که این موجب تنوع روش‌های اکتشاف و شناسایی کانسارهای مختلف می‌شود. به طور کلی روش‌های سنجش از دور، برای شناسایی کانسارها به کار می‌رود. اکتشافات معدنی و نقشه‌برداری زمین‌شناختی با استفاده از روش‌های مرسوم مانند پیمایش صحرایی و بازدید محلی، مطالعات ژئوشیمی و ژئوفیزیک فرآیندی پیچیده، پرهزینه و چالش برانگیز است و در دهه‌های اخیر، فناوری سنجش از دور به عنوان روشی مؤثر برای تسهیل فرآیند نقشه‌برداری معدنی مطرح شده است (Seifi et al., 2021). تصاویر ماهواره‌ای به دلیل میدان دید فرامنطقه‌ای، تکرار داده‌ها، دسترسی آسان، دارا بودن اطلاعات ارزشمندی از لایه‌های سطح زمین، توانایی بارزسازی و فراهم نمودن تصاویر رنگی می‌توانند در اکتشاف مواد معدنی بسیار سودمند باشند. با تکنولوژی سنجش از دور می‌توان به سرعت و با دقت زیاد به نقشه‌برداری کانی‌های دگرسانی، شناسایی شکستگی‌ها و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی پرداخت و مناطق امیدبخش معدنی را معرفی نمود (میرشکارپور، ۱۳۹۱). کشور ایران با در اختیار داشتن منابع طبیعی و معدنی فراوان نیازمند بهره‌گیری از پتانسیل‌های سنجش از دور در علوم زمین به ویژه اکتشاف ذخایر معدنی و مدیریت منابع زمینی است. از طرف دیگر ویژگی‌های خاص اقلیمی و نبود پوشش گیاهی، دارا بودن منابع عظیم معدنی ایران را به یکی از بهترین نواحی آزمایشی در پژوهشها و کاربردهای سنجش از دور زمین‌شناختی تبدیل کرده است.

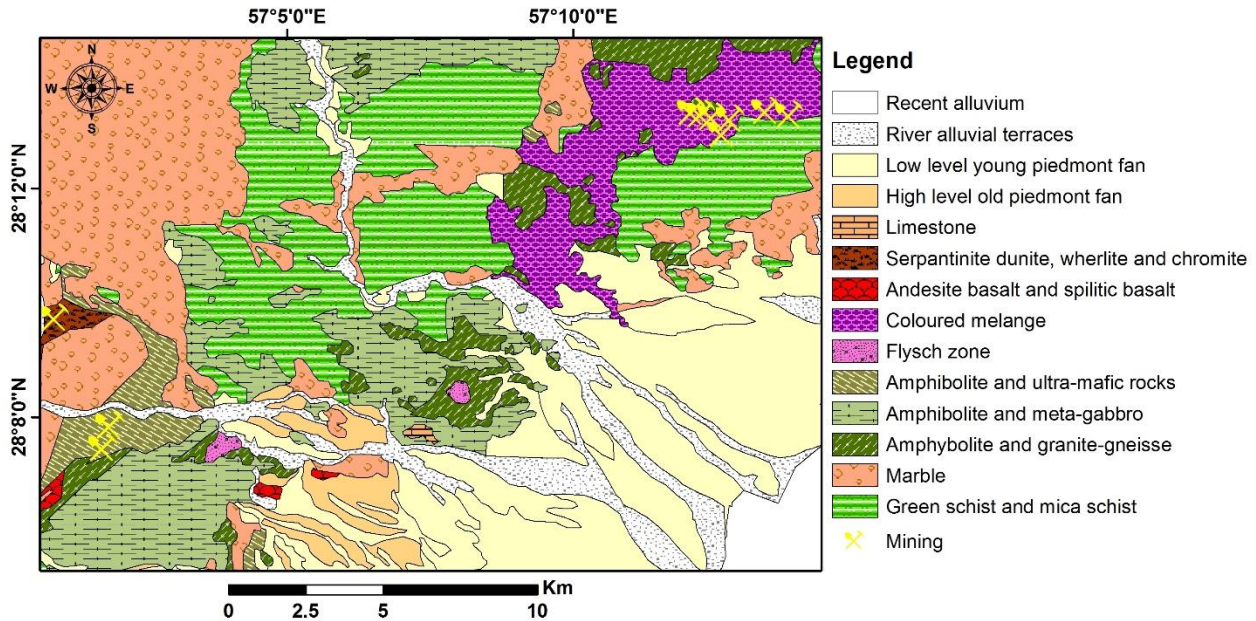
کانسارهای کرومیت ایران که اکثر آنها به صورت اشکال نامنظم ظاهر شده‌اند، عمدتاً در مجموعه‌های افیولیتی قرار دارند. یکی از محدوده‌های افیولیتی ایران، نوار افیولیت ملانژ جنوب و جنوب‌غرب کرمان معروف به کمر بند اسفندقه - فاریاب است که از شمال اسفندقه تا منطقه حاجی‌آباد به طول ۳۶۰ کیلومتر و عرض ۴ تا ۱۵ کیلومتر امتداد دارد. این کمر بند متعلق به پایان زون سنندج- سیرجان است که از خاور به فروافتادگی جازموریان، از جنوب و جنوب‌غرب به زون‌های مکران و زاگرس، از شمال به سنگ‌های آتشفشانی زون ارومیه - دختر محصور شده است. کلیه سنگ‌های این مجموعه (به استثنای منطقه چهار گنبد) شامل انواع اولترابازیک و بازیک تا انواع حدواسط و اسیدی است و در این محدوده دو منطقه کرومیت‌دار به نام‌های اسفندقه و فاریاب وجود دارد که تاکنون بزرگترین ذخایر کرومیت ایران را تشکیل داده‌اند (درویش زاده، ۱۳۷۰؛ قربانی، ۱۳۸۴). با توجه به اینکه کمر بند فلزائی اسفندقه - فاریاب بر روی زون سنندج - سیرجان قرار گرفته و بزرگترین ذخایر کرومیتی کشور با حدود ۲۴ کانسار و اندیس کرومیت که برخی از آنها اقتصادی هستند در این محدوده واقع شده است (موسوی، ۱۳۹۵)، در طول دهه‌های

گذشته تا به امروز پروژه‌های اکتشاف مختلفی در این منطقه انجام گرفته که داده های اکتشافی ارزشمندی به خصوص در زمینه کرومیت شناسایی شده است (صفائی، ۱۳۷۴؛ موسوی، ۱۳۸۸؛ قریب بلوک، ۱۳۸۸؛ قوی اندام اماموردیخان، ۱۳۸۹؛ کمالی، ۱۳۹۹؛ Pournamdari, 2014؛ Pournamdari and Hashim, 2014؛ Beiranvand Pour et al., 2015؛ Eslami et al., 2015). با وجود این، هنوز هم پتانسیل‌های معدنی زیادی در این کمربند ناشناخته مانده است که نیاز به انجام فعالیت‌های اکتشافی را در این منطقه نشان می‌دهند. از آنجایی که سازندهای افیولیتی ایران در مناطق کوهستانی و غیرقابل دسترس واقع شده که این مسئله اکتشاف ذخایر کرومیت را با مشکل مواجه کرده است، بنابراین سنجش از دور می‌تواند ابزار مناسبی برای شناسایی کرومیت در مناطق افیولیتی ایران باشد (Eslami et al., 2015). استفاده از تکنولوژی سنجش از دور اعم از تصاویر ماهواره‌ای استر و لندست و همچنین تصاویر پهپادی، در مطالعات کمربندهای افیولیتی به منظور اکتشاف کرومیت در ایران (افیولیت سبزوار)، افغانستان (کمربند افیولیت لوگار)، عمان (توده‌های افیولیتی سمیل) و ترکیه (منطقه افیولیتی ارزروم-کارس) انجام گرفته است (Rajendran et al., 2012؛ Eskandari et al., 2023؛ El-Raouf et al., 2024؛ Muhammad et al., 2025). در این مطالعات از روش‌های مختلف پردازش تصویر مانند ضریب شاخص بهینه (OIF)، ترکیب رنگی کاذب (FCC)، کسر کمترین نوفه (MNF)، آنالیز مولفه اصلی و مستقل (PCA-ICA) و همچنین نقشه بردار زاویه طیفی (SAM) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای شناسایی مناطق دارای کانی‌سازی استفاده شده است. پس بدون شک استفاده از سنجش از دور در مطالعات اکتشاف کرومیت نه تنها سرعت انجام آن را بیشتر می‌کند، بلکه از نظر دقت، هزینه و نیروی انسانی نیز بسیار با صرفه است. با توجه به موارد گفته شده هدف از این پژوهش مطالعه قسمتی از کمربند فلززائی اسفندقه - فاریاب در استان کرمان جهت شناسایی کانسارهای کرومیت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی استر و لندست و روش‌های پردازش تصویر است.

۲- زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه که در شهرستان فاریاب (جنوب غرب استان کرمان) واقع شده است در قسمتی از جنوب غرب برگه ۱۰۰۰۰۰۰ پاگدار قرار می‌گیرد. برگه ۱۰۰۰۰۰۰ پاگدار از دیدگاه ساختاری جزئی از پهنه ساختاری سنندج- سیرجان است که از سمت شرق توسط گسل سبزواران غربی از دیگر پهنه‌ها جدا شده است و مرز جنوبی آن به وسیله گسل‌های رورانه واقع در ورقه نودز از زون ساختاری زاگرس تفکیک شده است. در این محدوده رخنمون‌هایی از افیولیت ملانژ به صورت فلس‌های تکتونیکی در حدفاصل دو زون یاد شده مشاهده می‌گردد (ناظم‌زاده شعاعی، ۱۳۹۶).

عمده واحدهای سنگی موجود در منطقه مورد مطالعه مربوط به پالئوزوئیک و مزوزوئیک است. بیش از نیمی از منطقه توسط سنگهای دگرگونی از جمله مرمر، شیست، آمفیبولیت، متاگابرو و گنیس گرانیتی پوشیده شده است. در جنوب شرق منطقه واحدهای کواترنر به همراه رسوبات عهد حاضر است که شهر فاریاب در این رسوبات واقع شده است. سنگ‌های مربوط به افیولیت ملانژ شمال شرق منطقه و باقیمانده‌های مناطق فلیش به صورت محدود در قسمت مرکزی منطقه مشاهده می‌شوند. دونیت‌های سرپانتینی شده به همراه کرومیت در غرب منطقه مورد مطالعه واقع شده‌اند. معادن موجود در منطقه در واحدهای سنگی افیولیت ملانژ، دونیت‌های سرپانتینی شده و آمفیبولیت‌های همراه با سنگ‌های اولترامافیک قرار گرفته‌اند (شکل ۱).



شکل (۱) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه برگرفته شده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ پاگدار (ناظم‌زاده شعاعی، ۱۳۹۶)

۳- مواد و روش‌ها

همانطور که قبلاً اشاره گردید، هدف از انجام این پژوهش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای کاهش زمان و هزینه مطالعات اکتشاف کرومیت می‌باشد. بدین منظور، باید تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شود که از دو مشخصه قدرت تفکیک طیفی و مکانی مناسبی برخوردار بوده و قادر به شناسایی واحدهای سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی مرتبط با کانی‌سازی کرومیت باشند. تصویر استر دارای باندهای مناسبی برای تفکیک کانیهای حاوی بنیان‌های $Al-OH$ ، $Mg-OH$ و $Fe-OH$ به همراه باندهای مناسب شناسایی واحدهای سنگ‌شناسی بوده و همچنین تصویر لندست برای شناسایی کانی‌های حاوی عناصر آهن، منیزیم و غیره مناسب می‌باشد. لذا استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر و لندست برای مطالعات دورسنجی اکتشاف کرومیت قابل توجیه است. سنجنده تابش سنج بازتابی و گسیلش گرمایی فضابرد پیشرفته یا همان استر یک تصویربردار چندطیفی است که در دسامبر ۱۹۹۹ روی مدار فضاورد ترای سیستم مشاهده زمینی قرار گرفت. تصاویر استر با ۱۴ باند محدوده‌های مرئی فروسرخ نزدیک (۳ باند)، فروسرخ موج کوتاه (۶ باند) و فروسرخ حرارتی (۵ باند) طیف الکترومغناطیس را پوشش می‌دهند. در حال حاضر تنها مشکل بزرگ مربوط به استر، نقص سنجنده فروسرخ موج کوتاه به دلیل حرارت خیلی بالای آشکارساز آن می‌باشد که اطلاعات باندهای فروسرخ موج کوتاه را از ۱ آپریل ۲۰۰۸ غیرقابل استفاده کرده و تصاویر بعد از این تاریخ فاقد باندهای محدوده فروسرخ موج کوتاه است. (Duda et al., 2020) در این پژوهش، تصویر استر سطح 1T مورد استفاده قرار گرفته است که تصحیحاتی مانند تصحیحات رادیومتری و هندسی، ضرایب تصحیح کراستاک (الگوریتم تکمیلی است که تأثیر بازتاب نور باند ۴ روی باندهای ۵-۹ را از بین می‌برد) و ضرایب تبدیل نسبی روی آن انجام شده است و نیازی نیست که کاربر آنها را انجام دهد (Duda et al., 2020). ماهواره لندست ۸ که در سال ۲۰۱۳ پرتاب شد، دارای دو ابزار تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) با ۷ باند و سنجنده فروسرخ حرارتی (TIRS) با ۲ باند است. سنجنده OLI اطلاعات سطح زمین را توسط باندهای طیفی مرئی، فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه جمع آوری می‌کند و همچنین دارای باندهایی برای مطالعات مواد معلق در هوا و آبهای ساحلی و آشکارسازی ابرهای سیروس است. دو سنجنده OLI و TIRS از نظر رادیومتری تصحیح و همزمان نسبت به مختصات کارتوگرافی به همراه تصحیحاتی برای انتقال زمین در یک تصویر رقومی تصحیح شده استاندارد ثبت می‌شوند (Ihlen and

(Zanter, 2019) سعی شد تصاویر در تاریخ نزدیک به هم و در تابستان اخذ شوند تا هم بیشترین انرژی خورشید توسط سنجنده‌ها دریافت شود و هم اختلاف زاویه خورشید در بازه‌های زمانی مختلف تاثیری در نتایج پردازش تصویر نداشته باشد. بنابراین تصاویر ماهواره‌ای استر و لندست ۸ که در بازه زمانی ماه آگوست (به ترتیب ۲۰۰۶ و ۲۰۲۴) تصوبرداری شده است، تهیه گردید.

تصاویر اخذ شده توسط ماهواره‌های سنجنش از دور علاوه بر اطلاعات سطح زمین دارای اطلاعاتی از جو و خود سنجنده هستند و همچنین حرکت ماهواره، چرخش زمین و اثر توپوگرافی بر هندسه تصاویر تاثیر می‌گذارند. لذا باید تصاویر ماهواره‌ای مورد تصحیح و پیش‌پردازش قرار بگیرد تا اطلاعات اضافی مانند اثر جو، توپوگرافی و غیره از داخل پیکسل‌های تصویر حذف شده و فقط اطلاعات مورد نیاز از سطح زمین در تصویر باقی بماند. پیش‌پردازش‌های مختلفی توسط شرکت‌های متولی اخذ تصاویر ماهواره‌ای بر روی تصاویر انجام می‌شود ولی با این حال نیاز است که کاربر نیز تصحیحاتی بر روی تصاویر اعمال نماید. در این مقاله براساس نیاز تصاویر استر و لندست ۸ مورد استفاده، پیش‌پردازش معروف تحلیل جوی سریع خط دید تصاویر ابرطیفی (FLAASH) بر روی تصاویر انجام گرفت تا اثرات جو بر روی پیکسل‌های تصویر حذف گردد. روش FLAASH برای بازیابی بازتاب طیفی از تصاویر تابشی فراطیفی است که برای تصحیح اثرات جوی تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی و فراطیفی قابل استفاده می‌باشد. این ابزار تصحیح جوی در محدوده طول موج‌های مرئی تا ۳ میکرومتر را انجام می‌دهد و همچنین بازیابی بخار آب و آئروسول را توسط باندهایی در طول موج مناسب اعمال می‌کند (Anderson et al., 2002; Research System Inc., 2009). دقت هندسی تصاویر مذکور با کمک نرم افزار گوگل ارث بررسی و مشخص شد که از نظر هندسی دقیق بوده و به تصحیح هندسی نیاز ندارد. در ادامه با اعمال روش‌های مختلف پردازش تصویر نسبت به بارزسازی سنگ‌ها و کانی‌های مرتبط با اکتشاف کرومیت اقدام گردید. به این منظور در ابتدا نسبت باندهای متعددی برای بارزسازی واحدهای سنگی مرتبط با مناطق افیولیتی در ترکیب رنگی کاذب استفاده گردید و سپس نسبت باندهای جدیدی برای بارزسازی دونیت و سنگ‌های همراه آن تعریف شد. علاوه بر این، روش طیفی زیرپیکسلی پالایش تطبیقی (MF) با کمک طیف سنگ‌ها و کانی‌های موجود در کتابخانه‌های طیفی نرم افزار ENVI اجرا گردید. در مرحله بعد، براساس مناطق بارز شده در نسبت باندهای دونیت و نقشه زمین‌شناسی و همچنین با کمک روش‌های شبکه عصبی (NN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نقشه طبقه‌بندی شده منطقه تهیه و سپس با استفاده از روش ماتریس آشفتگی مورد ارزیابی قرار گرفت.

نسبت باندهای روش مفیدی برای تشخیص ویژگی‌های زمین‌شناسی در تصاویر چندطیفی است که برای کاهش اثر نور خورشید و توپوگرافی و همچنین برجسته کردن اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود. از این روش برای نقشه برداری از پوشش گیاهی، رسوبات، سنگ‌ها و خاک‌ها و شناسایی مناطق دگرسانی گرمایی استفاده می‌شود. با اختصاص تصاویر نسبت باندهای به کانالهای سه رنگ اصلی آبی، سبز و قرمز، تصویر رنگی ترکیبی تولید می‌شود که برای درک ویژگی‌های طیفی در تشخیص پدیده‌ها و نوع پوشش منطقه بسیار مهم است (Pour et al., 2023). روش پالایش تطبیقی (MF) برای یافتن فراوانی پیکسل‌های خالص تعریف شده توسط کاربر با استفاده از عدم اختلاط جزئی، پاسخ پس‌زمینه ناشناخته را سرکوب می‌کند و پاسخ پیکسل خالص شناخته شده را به حداکثر رسانده و با طیف شناخته شده «تطبیق» می‌کند. در مناطقی با واحدهای سنگی مختلط، که در آن شناسایی تمام پیکسل‌های خالص دشوار است، MF ممکن است انتخاب بهتری برای طبقه‌بندی باشد (Harris et al., 2005). شبکه عصبی (NN) برای انجام طبقه‌بندی غیرخطی به کار می‌رود که این روش از پسانتشار استاندارد برای یادگیری نظارت‌شده استفاده می‌کند. می‌توان تعداد لایه‌های پنهان و تابع فعال‌سازی را به گونه‌ای تعیین نمود تا تنظیم وزن‌ها در گره برای به حداقل رساندن تفاوت بین فعال‌سازی گره خروجی و خروجی رخ دهد (Research System Inc., 2009). در اکتشاف مواد معدنی، شبکه‌های عصبی داده‌های سنجنش از دور ماهواره‌ای چندطیفی را برای نقشه‌برداری

مناطق دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی تجزیه و تحلیل کرده و همچنین تغییرات طیفی ظریف در تصاویر فراطیفی را برای اکتشاف شناسایی می‌کنند (Farahbakhsh et al., 2025; Yu & Zhang, 2025). ماشین بردار پشتیبان (SVM) یک سیستم طبقه‌بندی مشتق شده از نظریه یادگیری آماری است که برای انجام طبقه‌بندی نظارت‌شده به منظور شناسایی کلاس مرتبط با هر پیکسل استفاده می‌شود. این سیستم، کلاس‌ها را با یک سطح تصمیم‌گیری به نام ابرصفحه بهینه که حاشیه بین کلاس‌ها را به حداکثر می‌رساند، جدا می‌کند. خروجی طبقه‌بندی SVM مقادیر تصمیم‌گیری هر پیکسل برای هر کلاس است که برای تخمین احتمال استفاده می‌شوند (Research System Inc., 2009). این روش به دلیل کارایی آن برای داده‌های با ابعاد بالا و نمونه‌های آموزشی محدود، در کاربردهای سنجش از دور، مانند پردازش تصویر فراطیفی و چندطیفی برای نقشه‌برداری واحد زمین‌شناسی، طبقه‌بندی پوشش زمین و اکتشاف مواد معدنی، برتری دارند. در زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی، SVMها تصاویر چندطیفی را برای تعیین واحدهای زمین‌شناسی طبقه‌بندی می‌کنند و در زمین‌های پیچیده از روش‌های سنتی بهتر عمل می‌کند (Kovacevic et al., 2009; Beirami & Mokhtarzade, 2017). روش ماتریس آشفستگی چارچوبی برای ارزیابی دقت آماری فراهم کرده و محاسبه معیارهای مختلف دقت از جمله دقت کلی، ضریب کاپا، ماتریس آشفستگی، خطاهای مربوط به اضافه و حذف، و دقت تولیدکننده و کاربر را امکان‌پذیر می‌سازد (Research System Inc., 2009; Pour et al., 2023).

در مراحل پردازش تصویر، نسبت‌های بانندی 2/1 و 3/4، 4/7 و 3/4 برای تصویر استر ایجاد و در ترکیب رنگی قرار داده می‌شود. ترکیب رنگی حاصل از سه نسبت بانندی فوق‌الذکر توسط کمالی (۱۳۹۹) برای نقشه‌برداری پریدوتیت‌ها استفاده گردید و در این پژوهش به منظور به دست آوردن دید کلی از منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه نسبت بانندی زیر براساس کلیه ویژگیهای طیفی دونیت در طیف بانویسی شده استر و لندست ۸ اعمال می‌شود تا مناطق دارای دونیت و سنگهای همراه بهتر مشخص گردد:

$$\text{ASTER: } ((2/1)*(2*3))+((2/3)*(4/3))+((4/3)*(4/8))$$

$$\text{Landsat8: } ((3/1)*(3/5))+((3/5)*(7/5))$$

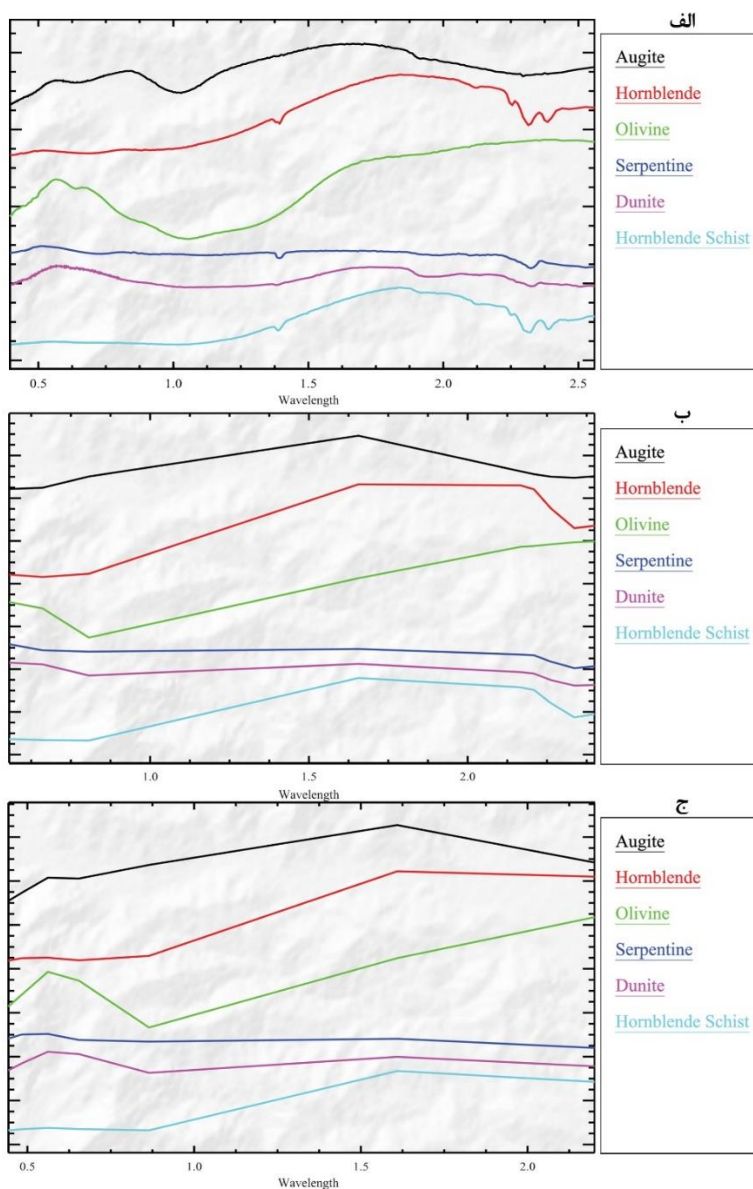
در مرحله بعد به منظور بررسی کیفی تطابق کانیها و سنگهای مناطق افیولیتی با مکانهای بارز شده توسط نسبت بانندی دونیت از طیفهای موجود در کتابخانه‌های طیفی USGS و JHU موجود در نرم‌افزار ENVI شامل طیف کانیهای اوزیت، هورنبلند، اولیوین و سرپانتین و طیف سنگهای دونیت و هورنبلندشیست (بجای آفیولیت) استفاده و روش طیفی MF اجرا می‌گردد. بعلاوه از مناطق بارز شده به عنوان دونیت که منطبق بر واحدهای زمین‌شناسی موجود در نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱) هستند، پیکسلهایی به عنوان مناطق موردنظر (ROI) انتخاب و در روش‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان برای طبقه‌بندی و بررسی مناطق دارای دونیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله نهایی با کمک روش ماتریس آشفستگی بررسی کمی مناطق دارای دونیت طبقه‌بندی شده صورت می‌پذیرد و برای این منظور از نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه برای اعتبارسنجی کمی نقشه‌ها استفاده می‌گردد.

۴- نتایج و بحث

از آنجایی که سنگ‌ها مجموعه‌ای از کانی‌ها می‌باشند و از نظر شیمیایی پیچیده‌تر و متغیرتر از کانیها هستند، تعیین منحنی طیفی آنها مشکل است. در حقیقت طیف سنگها به طیف کانی‌های تشکیل‌دهنده و ویژگی‌های بافتی آنها مانند اندازه دانه‌ها، انباشتگی و مخلوط‌شدگی بستگی دارد. در ادامه ویژگی‌های طیفی برخی از سنگها و کانیهای تشکیل‌دهنده سری افیولیتی مرتبط با کانی‌سازی کرومیت شرح داده می‌شود. دونیت یک سنگ اولترامافیک است که بیش از ۹۰ درصد آن از کانی الیوین تشکیل شده و خصوصیات طیفی آن مربوط به الیوین می‌شود. ویژگیهای طیفی الیوین در محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک قرار

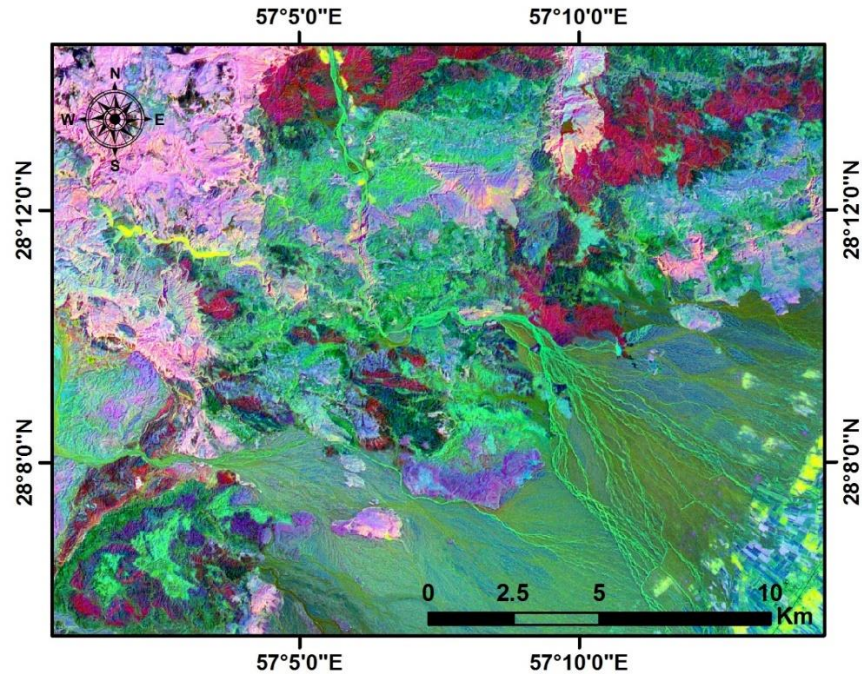
دارد که عمدتاً مربوط به انتقال الکترونی فلزات آهن و منیزیم می‌باشد (شکل ۲) (میرشکارپور، ۱۳۹۱؛ کمالی، ۱۳۹۹). پریدوتیت‌ها سنگ‌های اولترامافیکی هستند که حاوی بیش از ۴۰ درصد الیومین، ارتوپیروکسن، کلینوپیروکسن، هورنبلند، بعضی اوقات بیوتیت و مقادیر کمتری گارنت و اسپینل می‌باشد (van der Meer, 1995). خصوصیات طیفی پیروکسن‌ها در محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک به دلیل انتقال الکترونی فلز منیزیم بوده و ویژگی‌های طیفی هورنبلندها بدلیل انتقال الکترونی فلزاتی مانند آهن و منیزیم (محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک) و ارتعاش پیوندهای OH (محدوده فرسرخ موج کوتاه) پدیدار می‌شود (شکل ۲) (کمالی، ۱۳۹۹). با توجه به اینکه پریدوتیت‌ها دارای ترکیب متفاوتی از الیومین و پیروکسن هستند، منحنی طیفی آنها نیز براساس میزان این کانی‌ها در سنگ متفاوت است (Hunt et al., 1974). سنگ‌های هارزبورژیتی شامل کانی‌های الیومین و ارتوپیروکسن یا مقدار کمتر کلینوپیروکسن هستند که شامل ترکیبات آهن هیدراته بوده و ویژگی‌های جذب اصلی آنها در محدوده فرسرخ موج کوتاه یافت می‌شود (میرشکارپور، ۱۳۹۱). گابروهای پیروکسن‌دار غنی از آهن توسط ویژگی‌های طیفی مربوط به انتقال الکترونی آهن (محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک) و همچنین بنیان‌های Fe-OH (محدوده فرسرخ موج کوتاه) مشخص می‌شوند (Hunt et al., 1974).

همانطور که قبلاً بیان شد، سنجنده استر دارای ۹ باند در محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک و فرسرخ موج کوتاه است. ۶ باند از این مجموعه باند، مربوط به فرسرخ موج کوتاه بوده که برای بارزسازی کانیهای دارای بنیانهای Al-OH، Mg-OH و Fe-OH استفاده می‌شوند. کانی‌های اوزیت، هورنبلند، سرپانتین و همچنین سنگ‌های دونیت و آمفیبولیت ویژگی جذبی عمیق در باند ۸ به همراه جذب کمتری در باندهای ۷ و ۶ نشان می‌دهند. کانی اولیومین فقط در سه باند اول دارای ویژگی طیفی است (شکل ۲ب). ۷ باند سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک و فرسرخ موج کوتاه بوده که ۵ باند آنها مربوط به مرئی و فرسرخ نزدیک می‌باشد. بنابراین توانایی آشکارسازی ویژگیهای طیفی ناشی از انتقال الکترونی فلزاتی مانند آهن و منیزیم توسط این باندها وجود دارد. کانیهای اولیومین، اوزیت و سرپانتین و همچنین سنگ دونیت دارای ویژگی بازتاب در باندهای ۳ و ۴ و سیمای جذبی در باندهای ۱ و ۵ هستند. کانی هورنبلند و سنگ هورنبلندشیت در این محدوده فقط جذب پهن نشان می‌دهند (شکل ۲ج) (منبع: کتابخانه طیفی USGS و JHU). ویژگی‌های طیفی فوق‌الذکر در شناسایی و تفکیک کانی‌ها و سنگ‌ها نقش اساسی دارند به طوری که باعث بارزسازی و شناسایی مواد مورد نظر در تصاویر حاصل از روش‌های نسبتی، طیفی و طبقه‌بندی می‌شوند.



شکل ۲) طیف کانیها و سنگهای مناطق افیولیتی؛ الف) طیف کتابخانه USGS، ب) طیف بازنویسی شده برطبق باتدهای استر، ج) طیف بازنویسی شده برطبق باندهای لندست ۸

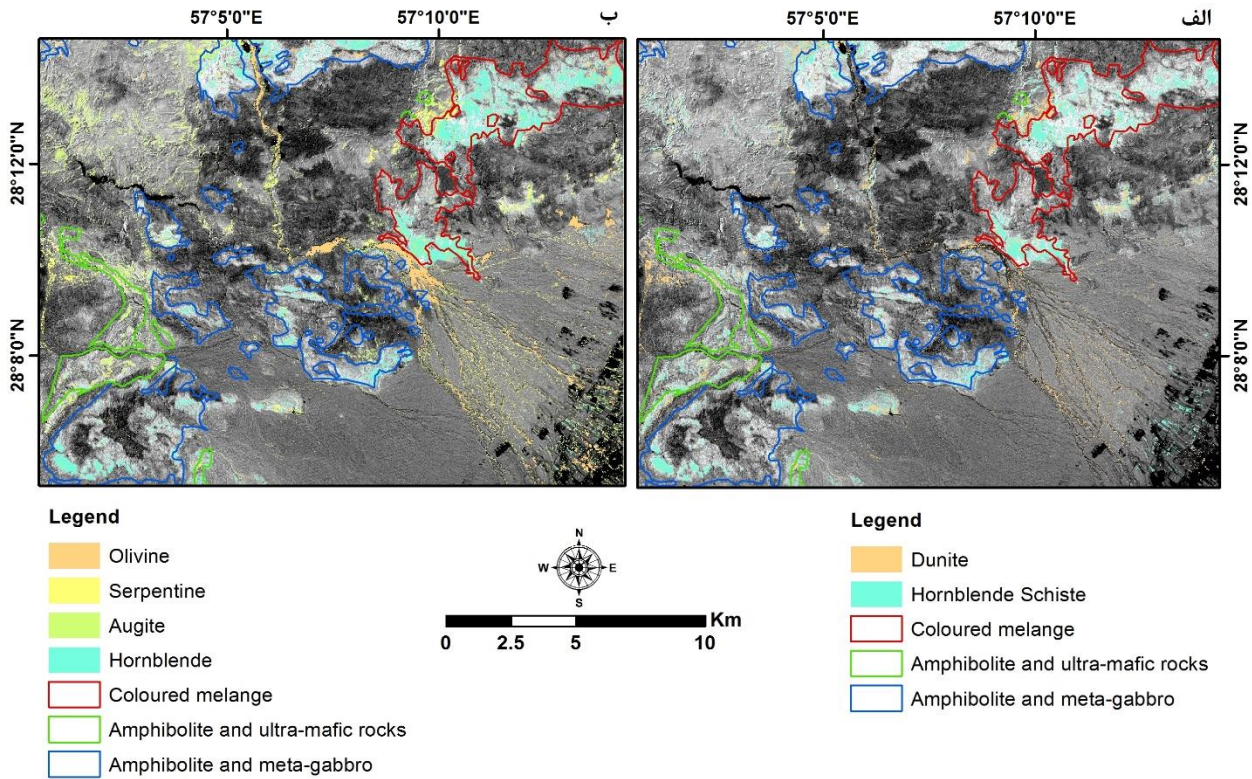
برای تفکیک بهتر واحدهای سنگ‌شناسی و آشنایی کلی با وضعیت پدیدتیت‌های موجود در منطقه، سه نسبت باندی $3/4$ ، $4/7$ و $2/1$ ایجاد شده و در ترکیب رنگی کاذب قرار گرفتند. در این تصویر ترکیب رنگی، مناطق دارای آمفیبولیت و گابرو با احتمال کانی‌سازی با رنگ قرمز تا قرمز تیره و همچنین آبی تیره مشخص شدند که این مناطق با افیولیت ملانژ و همچنین اولترامافیک و متاگابرو همراه با آمفیبولیت‌های موجود در نقشه زمین‌شناسی تطابق دارد (شکل ۳ و شکل ۱).



شکل ۳) ترکیب رنگی کاذب 4/7, 3/4 و 2/1 تصویر استر (به ترتیب در کانالهای قرمز، سبز و آبی)

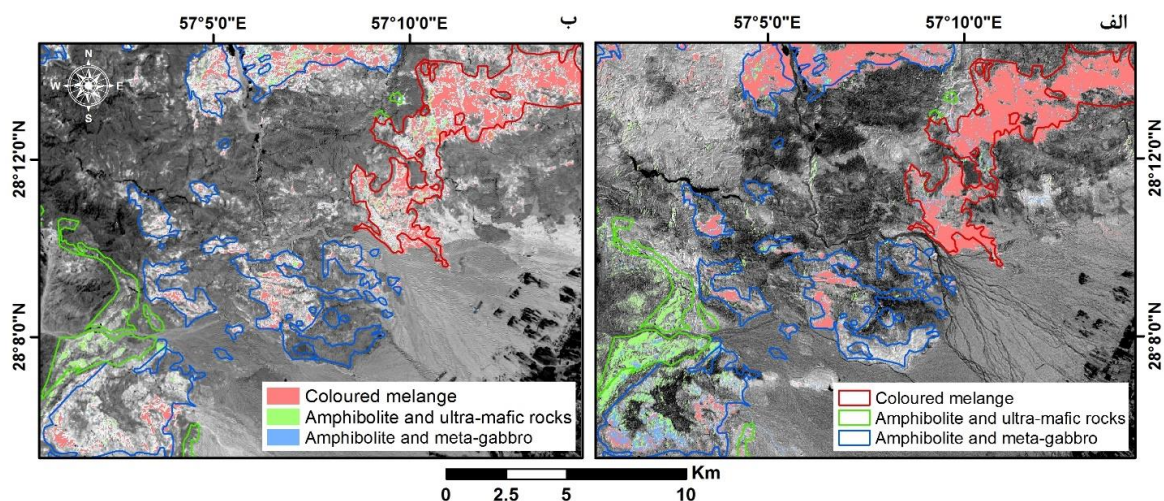
به منظور اینکه مناطق کانی‌سازی کرومیت بهتر مشخص شود، نسبت بانندی براساس ویژگیهای جذبی و بازتابی سنگ دونیت در محدوده مرئی تا فرورسرخ موج کوتاه برای تصاویر استر و لندست ۸ (شکل ۲ ب و ج) تعریف و اعمال گردید. نتایج بارز شده توسط نسبت بانندی دونیت استر و لندست ۸ بطور کلی با یکدیگر مطابقت دارند و همچنین اختلافاتی در دو تصویر وجود دارد که به دلایلی همچون تعداد باندهای استر و لندست ۸ در محدوده مرئی-فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ موج کوتاه، محدوده‌های طیفی هر باند و اندازه پیکسل دو تصویر ارتباط دارد. چرا که تصویر استر در محدوده فرورسرخ موج کوتاه تعداد باندهای بیشتری دارد و دارای اندازه پیکسل ۱۵ متر در تصویر مورد پردازش است در حالیکه تصویر لندست ۸ در محدوده مرئی-فرورسرخ نزدیک بیشتر با اندازه پیکسل ۳۰ متر است. با تطابق واحدهای زمین‌شناسی با نتایج بارز شده مشخص شد که در نسبت بانندی دونیت تصویر استر قسمت‌های خاصی از سنگهای افیولیت ملانژ و اولترامافیک‌ها و متاگابروهای همراه با آمفیبولیت‌ها دارای رنگ روشن‌تر نسبت به قسمت‌های دیگر هستند (شکل ۴ الف). درحالیکه در نسبت بانندی دونیت تصویر لندست قدرت تفکیک سنگهای افیولیت ملانژ و اولترامافیک‌ها و متاگابروهای همراه با آمفیبولیت‌ها کمتر است به طوری که مناطق حاوی دونیت در راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب در منطقه با رنگ روشن مشخص می‌شوند. البته لازم به ذکر است که مرکز باندهای تصویر لندست مخصوصاً در محدوده فرورسرخ موج کوتاه نیز در این امر مؤثر است (شکل ۴ ب).

از افیولیت ملانژ همراه با سایر کانی‌های بارز شده مشاهده می‌شود. با بررسی امتداد آبراهه‌های حاوی کانی اولیوین می‌توان به منشاء آنها در خارج از منطقه مورد مطالعه دست پیدا کرد (شکل ۵ب).



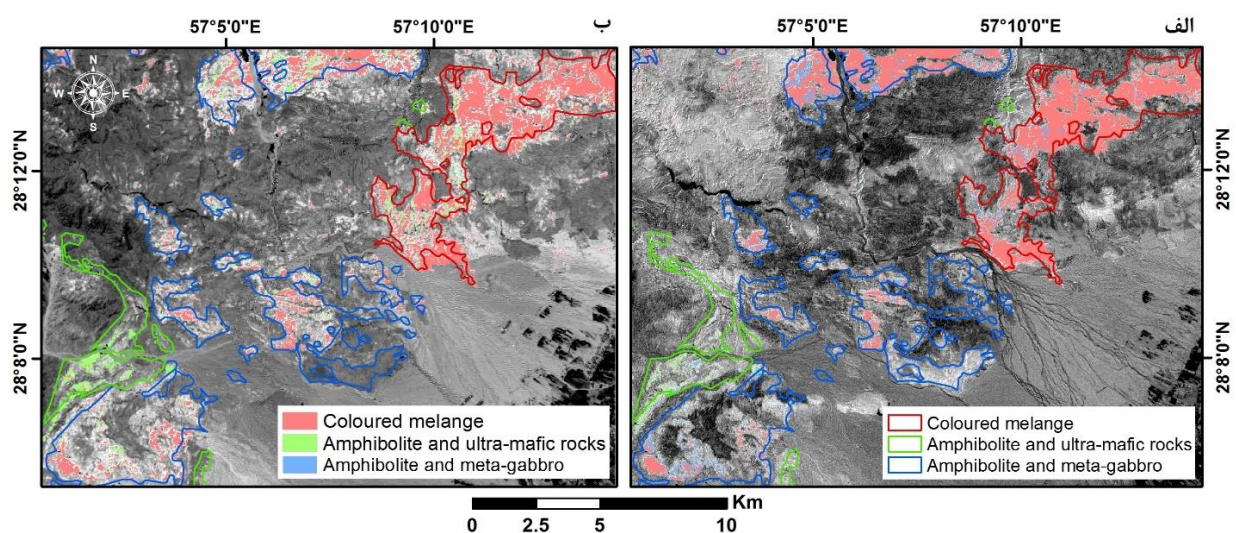
شکل ۵ سنگها و کانیهای بارز شده توسط روش پالایش تطبیقی (MF)؛ الف) دونیت و هورنبلندشیت؛ ب) اولیوین، اوژیت، هورنبلند و سرپانتین (نقشه دونیت بارز شده به عنوان پس زمینه قرار گرفته و واحدهای سنگی موجود در نقشه زمین‌شناسی مرتبط با مکانهای بارز شده روی تصاویر پلات شده‌اند).

از آنجایی که در روش MF، وجود سنگها و کانیهای مناطق بارز شده به عنوان دونیت به صورت کیفی مورد بررسی قرار گرفت، نیاز به این می‌باشد که این مناطق به صورت کمی نیز مورد بررسی قرار بگیرند. برای این منظور از مناطق بارز شده بعنوان دونیت و با توجه ویژه به انطباق این مناطق با واحدهای زمین‌شناسی موجود در منطقه مورد مطالعه، پیسکل‌های مناسب انتخاب و تحت عنوان ROI در روش‌های طبقه‌بندی شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان استفاده گردید. در نقشه طبقه‌بندی شده توسط شبکه عصبی مناطق دارای افیولیت ملانژ و آمفیبولیت-متاگابرو در قسمت اعظم مناطق بارز شده مطابقت دارند که این به دلیل وجود کانیهای مشترک مانند آمفیبول و پیروکسن در این واحدهای سنگی است. واحد سنگی آمفیبولیت-ولترامافیک بارز شده بر واحد متناظر در نقشه زمین‌شناسی خیلی خوبی دارد (شکل ۶). در نقشه طبقه‌بندی شده توسط تصویر استر محدوده‌های بیشتری نسبت به تصویر لندست بارز شده است که این می‌تواند به دلیل باشد که تصویر استر برای کانیهای موجود در سنگهای موجود در مناطق افیولیتی من جمله آمفیبول و سرپانتین‌های حاصل از دگرسانی اولیوین باندهای بیشتری در محدوده فروسرخ موج کوتاه دارد. بعلاوه باندهای تصویر لندست بیشتر قادر به شناسایی سنگهای حاوی کانیهای اولیوین و پیروکسن است.



شکل ۶) مناطق طبقه‌بندی شده توسط روش شبکه عصبی؛ الف) تصویر استر؛ ب) تصویر لندست (نقشه دونیت بارز شده به عنوان پس زمینه قرار گرفته و واحدهای سنگی موجود در نقشه زمین‌شناسی مرتبط با مکانهای بارز شده روی تصاویر پلات شده‌اند).

در نقشه طبقه‌بندی شده توسط ماشین بردار پشتیبان نیز همانند نتایج شبکه عصبی مناطق دارای افیولیت ملانژ و آمفیبولیت-متاگابرو در قسمت اعظم مناطق بارز شده مطابقت دارند. واحد سنگی آمفیبولیت-اولترامافیک بارز شده بر واحد متناظر در نقشه زمین‌شناسی مطابقت خیلی خوبی دارد ولی در روش ماشین بردار پشتیبان نسبت به شبکه عصبی مناطق کمتری بارز شده است (شکل ۷). در این روش نیز مناطق طبقه‌بندی شده توسط تصویر استر محدوده‌های بیشتری نسبت به تصویر لندست بارز شده است اما مساحت سطحی مناطق بارز شده در دو تصویر اختلاف کمتری نسبت به روش شبکه عصبی دارند. محدوده‌های بارز شده در تصویر لندست توسط ماشین بردار پشتیبان نسبت به شبکه عصبی گسترش بیشتری دارد که این منجر به کاهش اختلاف مساحت مناطق بارز شده در دو تصویر توسط روش ماشین بردار پشتیبان شده است. به طور کلی، تغییرات سطحی بارزسازی‌های انجام شده توسط روش‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان عمدتاً مربوط به مباحث محاسباتی در دو روش مورد استفاده می‌باشد که باعث شده مساحت هر طبقه در هر روش نسبت به دیگری تغییراتی نشان دهد.



شکل ۷) مناطق طبقه‌بندی شده توسط روش ماشین بردار پشتیبان؛ الف) تصویر استر؛ ب) تصویر لندست (نقشه دونیت بارز شده به عنوان پس زمینه قرار گرفته و واحدهای سنگی موجود در نقشه زمین‌شناسی مرتبط با مکانهای بارز شده روی تصاویر پلات شده‌اند).

به منظور بررسی کمی نقشه‌های طبقه‌بندی شده بر مبنای نسبت باندی دونیت، توسط روش‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان از روش ماتریس آشفتگی استفاده گردید. از نتایج محاسبات ماتریس آشفتگی مقادیر دقت تولیدی، دقت کاربر و دقت کل مورد مطالعه قرار گرفت. دقت تولیدی، دقت اختصاص یافته به هر کلاس از دیدگاه سازنده است که با تقسیم تعداد نمونه‌های صحیح طبقه‌بندی شده برای کلاس X بر تعداد نمونه‌های واقعی برای آن کلاس محاسبه می‌شود. دقت کاربر، دقت اختصاص یافته به هر کلاس از دیدگاه کاربر نقشه است که با تقسیم تعداد نمونه‌های صحیح طبقه‌بندی شده برای کلاس X بر تعداد کل نمونه‌های طبقه‌بندی شده به عنوان کلاس X محاسبه می‌شود. دقت کل توسط تقسیم مجموع نقاط تعداد پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده بر تعداد کل پیکسل‌ها محاسبه می‌شود که به عنوان یک شاخص کلی از دقت نقشه عمل کرده ولی خطاهای مربوط به هر کلاس را شناسایی نمی‌کند (Research System Inc., 2009). دقت کل برای کلیه نقشه‌های طبقه‌بندی شده توسط شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان بالای ۸۵ درصد است. در میان دقت کل به دست آمده، دقت کل برای واحدهای سنگی افیولیت ملانژ و آمفیبولیت-اولترامافیک بالای ۹۰ درصد بوده و برای واحد سنگی آمفیبولیت-متاگابرو زیر ۹۰ درصد می‌باشد. در واحدهای سنگی افیولیت ملانژ و آمفیبولیت-اولترامافیک موجود در نقشه زمین‌شناسی منطقه، معادن کرومیت وجود دارد (شکل ۱) که نشان دهنده پتانسیل این واحدهای سنگی برای اکتشاف کرومیت در منطقه می‌باشد.

جدول ۱) بررسی کمی نقشه‌های طبقه‌بندی شده توسط شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان با روش ماتریس آشفتگی

ماشین بردار پشتیبان			شبکه عصبی				
دقت کل	دقت کاربر	دقت تولیدی	دقت کل	دقت کاربر	دقت تولیدی		
۹۳.۰۰	۵۰.۴۱	۴۰.۷۱	۹۲.۷۹	۴۸.۸۵	۴۹.۳۲	دارای افیولیت ملانژ	استر
	۹۵.۵۷	۹۶.۹۷		۹۶.۱۶	۹۶.۰۹		
۸۶.۱۱	۴۴.۷۶	۱۵.۵۳	۸۶.۱۹	۴۶.۴۰	۱۹.۶۹	دارای آمفیبولیت-متاگابرو	استر
	۸۸.۱۳	۹۷.۰۳		۹۶.۴۸	۸۸.۵۹	فاقد آمفیبولیت-متاگابرو	
۹۷.۲۸	۵۱.۱۹	۳۰.۸	۹۶.۷۳	۳۵.۵۸	۲۵.۱۵	دارای آمفیبولیت-اولترامافیک	استر
	۹۷.۳۶	۹۹.۹۲		۹۷.۹۳	۹۸.۷۳	فاقد آمفیبولیت-اولترامافیک	
۹۲.۸۶	۴۹.۳۶	۴۱.۲۰	۹۳.۰۲	۵۰.۹۲	۳۲.۳۴	دارای افیولیت ملانژ	لندست
	۹۵.۵۹	۹۶.۷۹		۳۵.۰۰	۹۷.۶۳	فاقد افیولیت ملانژ	
۸۵.۴۸	۳۴.۶۷	۸.۹۸	۸۵.۶۶	۳۷.۱۳	۹.۴۹	دارای آمفیبولیت-متاگابرو	لندست
	۸۷.۳۱	۹۷.۳۷		۸۷.۳۹	۹۷.۵۰	فاقد آمفیبولیت-متاگابرو	
۹۶.۷۴	۲۴.۶۹	۹.۶۰	۹۶.۸۹	۲۱.۹۰	۵.۴۱	دارای آمفیبولیت-اولترامافیک	لندست
	۹۷.۵۱	۹۹.۱۸		۹۷.۴۰	۹۹.۴۶	فاقد آمفیبولیت-اولترامافیک	

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش شناسایی واحدهای سنگی حاوی کرومیت با استفاده از تصاویر چندطیفی استر و لندست ۸ است. برای این امر، نسبت بانندی دونیت برای تصویر استر و لندست اجرا گردید که مناطق بارز شده با واحدهای سنگی افیولیت ملانژ، آمفیبولیت‌های همراه سنگهای اولترامافیک و متاگابرو مطابقت داشتند. دو مرحله بررسی کیفی و کمی نسبت بانندی دونیت صورت پذیرفت. در بررسی کیفی نسبت بانندی دونیت از روش پالایش تطبیقی اعمال شده با کمک طیف سنگها و کانیهای موجود در کتابخانه‌های طیفی استفاده گردید که نتایج خوبی داشتند به طوری که کانیهای اولیون، پیروکسن (اوژیت)، آمفیبول و سرپانتین و همچنین سنگهای دونیت و هورنبلندشیست با واحدهای سنگی مرتبط با کانی‌سازی‌های کرومیت به ویژه افیولیت ملانژها و متاگابرو و اولترامافیک‌های همراه با آمفیبولیت‌ها هماهنگی خوبی داشتند. بررسی کمی نسبت بانندی دونیت با استفاده از اجرای طبقه‌بندی شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان به همراه روش ماتریس آشفتگی صورت گرفت که نتایج آنها دارای دقت کل بالای ۸۵ درصد برای واحد سنگی آمفیبولیت-متاگابرو و دقت کل بالای ۹۰ درصد برای واحدهای سنگی افیولیت ملانژ و آمفیبولیت-اولترامافیک بوده است. نتایج بررسی کیفی و کمی، نسبت بانندی ارائه شده را مثبت ارزیابی نموده و تطابق آنها با واحدهای زمین‌شناسی منطقه، ما را به این نتیجه می‌رساند که این منطقه پتانسیل خوبی برای اکتشاف کرومیت دارد.

منابع:

- درویش زاده، ع. (۱۳۷۰). زمین‌شناسی ایران. تهران. موسسه انتشارات امیرکبیر.
- قربانی، م. (۱۳۸۴). ایالتها، کمربندها و مناطق متالوژی و معدنی ایران. بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- صفائی، م.ر. (۱۳۷۴). ژئوشیمی و زمین‌شناسی کانسار کرومیت فاریاب استان هرمزگان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز.
- قریب بلوک، ا. (۱۳۸۸). بررسی و مطالعه کاربرد روش AMS در اکتشاف کانسارهای کرومیت (مطالعه موردی کانسار کرومیت فاریاب). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قوی‌اندام اماموردیخان، ب. (۱۳۸۹). بررسی و مطالعه‌ی روش پردازش تصویر (Image Processing) در اکتشاف کانسارهای کرومیت (مطالعه موردی کانسار کرومیت فاریاب). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کمالی، ف. (۱۳۹۹). شناسایی پتانسیل کانسارهای کرومیت با استفاده از تکنیکهای سنجش از دور (مطالعه موردی: کمر بند فلز زائی اسفندقه- فاریاب استان کرمان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه یزد.
- موسوی، س.ا. (۱۳۸۸). زمین‌شناسی و ژنز کانسار کرومیت فاریاب و سنگ‌های آذرین وابسته. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- موسوی، س. س. (۱۳۹۵). مدل سازی پتانسیل های معدنی با استفاده از تلفیق داده های ماهواره ای، ژئوفیزیکی هوایی و ژئوشیمی در GIS، مطالعه موردی منطقه دولت آباد اسفندقه، جنوب استان کرمان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان.
- مؤمنی، س. (۱۳۹۲). شناسایی مناطق امیدبخش از نظر وجود منابع فلزی با استفاده از تلفیق و تحلیل داده های ماهواره ای و فتوگرامتری بررسی موردی: منطقه آران و بیدگل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تفرش.

میرشکارپور، ر. (۱۳۹۱). مقایسه داده های بازتابی فرورسرخ گرمایی استر برای تفکیک واحدهای سنگی و پتانسیل یابی اکتشافی کرومیت، مطالعه موردی کمپلکس افیولیتی اسفندقه جنوب کرمان. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز.

ناظمزاده شعاعی، م. (۱۳۹۶). گزارش نقشه زمین‌شناسی ایران، شماره ۷۴۴۶، برگه ۱:۱۰۰۰۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Anderson, G. P., Felde, G. W., Hoke, M. L., Ratkowski, A. J., Cooley, T. W., Chetwynd Jr, J. H., ... & Lewis, P. E. (2002, August). MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm: FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes). In Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery VIII (Vol. 4725, pp. 65-71). SPIE.

Beirami, B. A., & Mokhtarzade, M. (2017, November). SVM classification of hyperspectral images using the combination of spectral bands and Moran's I features. In 2017 10th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP) (pp. 139-144). IEEE.

Beiranvand Pour, A., Hashim, M., & Pournamdari, M. (2015). Chromitite prospecting using landsat TM and ASTER remote sensing data. *Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, 99-103.

Chavez, P., Guphill, S.C., & Bowell, J.A. (1984). Image Processing techniques for Thematic Mapper data. *Proceedings, ASPRS-ACSM Technical Papers*, 2, 728-742.

Duda, K., Daucsavage, J., Siemonsma, D., Brooks, B., Oleson, R., Meyer, D., & Doescher, C. (2020). Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (aster) level 1 precision terrain corrected registered at-sensor radiance product (ast_11t). Version 1.1. US Geological Survey, USA.

El-Raouf, A. A., Doğru, F., Bilici, Ö., Azab, I., Taşci, S., Jiang, L., ... & Amer, O. (2024). Combining Remote Sensing Data and Geochemical Properties of Ultramafics to Explore Chromite Ore Deposits in East Oltu Erzurum, Turkey. *Minerals*, 14(11), 1116.

Eskandari, A., Hosseini, M., & Nicotra, E. (2023). Application of satellite remote sensing, UAV-geological mapping, and machine learning methods in the exploration of podiform chromite deposits. *Minerals*, 13(2), 251.

Eslami, A., Ghaderi, M., Rajendran, S., Pour, A. B., & Hashim, M. (2015). Integration of ASTER and landsat TM remote sensing data for chromite prospecting and lithological mapping in Neyriz ophiolite zone, south Iran. *Resource Geology*, 65(4), 375-388.

Farahbakhsh, E., Goel, D., Pimparkar, D., Müller, R. D., & Chandra, R. (2025). Convolutional neural networks for mineral prospecting through alteration mapping with remote sensing data. *PFG—Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 1-22.

Harris, J. R., Rogge, D., Hitchcock, R., Ijewliw, O., & Wright, D. (2005). Mapping lithology in Canada's Arctic: application of hyperspectral data using the minimum noise fraction transformation and matched filtering. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42(12), 2173-2193.

Hunt, G. R., Salisbury, J. W., & Lenhoff, C. J. (1974). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: IX. Basic and ultrabasic igneous rocks. *Modern Geology*, 5, 15-22.

Ihlen, V., & Zanter, K. (2019). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0. US Geological Survey, USA.

Jensen, J.R., (2005). *Introductory Digital Image Processing a Remote Sensing Perspective*, No. 621, p. 3678.

Kovacevic, M., Bajat, B., Trivic, B., & Pavlovic, R. (2009, November). Geological units classification of multispectral images by using support vector machines. In 2009 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (pp. 267-272). Ieee.

- Muhammad, B. J. H., Rahmani, N. R., Mohabbat, M. J., Islam, I., Ahmad, I., & Ping, W. (2025). Integration of Remote Sensing and Geochemical analysis of Chromite bodies in Logar Ophiolitic Complex, Southeast Afghanistan. *Kuwait Journal of Science*, 100427.
- Pour, A. B., Ranjbar, H., Sekandari, M., Abd El-Wahed, M., Hossain, M. S., Hashim, M., ... & Muslim, A. M. (2023). Remote sensing for mineral exploration. In *Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration* (pp. 17-149). Elsevier.
- Pournamdari, M. (2014). Lithological mapping of ophiolite complex with emphasis on chromite and magnesite exploration using remote sensing techniques. Doctoral dissertation. Universiti Teknologi Malaysia.
- Pournamdari, M., & Hashim, M. (2014). Detection of chromite bearing mineralized zones in Abdasht ophiolite complex using ASTER and ETM+ remote sensing data. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 1973-1983.
- Rajendran, S., Al-Khirbash, S., Pracejus, B., Nasir, S., Al-Abri, A. H., Kusky, T. M., & Ghulam, A. (2012). ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman Mountains: Exploration strategy. *Ore geology reviews*, 44, 121-135.
- Research System Inc. (2009) ENVI user's guide, Version 4.7. TT Visual Information Solutions.
- Seifi, A., Esmaeily, A., & Mokhtari, Z. (2021). A new hybrid method for epithermal gold exploration using multi-sensor satellite data in Sistan and Baluchestan Province (Iran). *Ore Geology Reviews*, 138, 104357.
- van der Meer, F. (1995). Estimating and simulating the degree of serpentinization of peridotites using hyperspectral remotely sensed imagery. *Nonrenewable Resources*, 4, 84-98.
- Yu, X., & Zhang, T. (2025, April). Hyperspectral Image Classification Utilizing Convolutional Neural Network and Transformer. In *2025 6th International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS)* (pp. 127-130). IEEE.