

Research Article

Extraction of alteration minerals spectra in Angouran zinc and lead deposits using ASTER image processing

Armaghan Forouzes¹, Zahra Bonyadi^{1*}

1- Department of Geology, Faculty of Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Keywords: *Angouran, Alteration, Band ratio, Feature oriented principal components selection, Spectral angle mapper.*

1- Introduction

Remote sensing techniques have an important role in mineral exploration and other geological studies. For exploratory purposes, detection of alteration zones and preparing lithological maps are performed based on the spectral signature of minerals (Sabins, 1999). To detect the altered minerals in Angouran zinc and lead mine, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) images have been used. The purpose of this study is to identify the minerals and alteration zones in the deposit using remote sensing methods, along with field observations, microscopic studies, and X-ray diffraction (XRD) analysis.

Angouran Zn-Pb deposit is located at 36°, 37' north latitude, and 47 °, 24 ' east longitude. This deposit is located in the west of Zanjan province, in the western part of the Sanandaj-Sirjan zone, and the 1: 100000 map of Takht-e Soleiman (Babakhani and Ghalamghash, 1990). The Angouran deposit is formed between footwall schist and hanging-wall marble. Angouran marble is the main host of zinc and lead ores (Sharafi et al., 2018).

2- Material and methods

In this study, the ASTER image prepared on 14/08/2002 has been used. The preprocessing stages used include vegetation removal, spatial resolution enhancement using the Gram-Schmidt Spectral Sharpening algorithm, and Internal Average Relative Reflection (IARR) atmospheric correction.

Processing methods performed on the ASTER image to detect the alteration minerals in Angouran Zn-Pb mine include Band Ratio (BR), False Color Composite (FCC), Feature Oriented Principal Components Selection (FPCS), and Spectral Angle Mapper (SAM). The accuracy of the SAM method was evaluated using ground truth points, confusion matrix, and Kapa coefficient. Field observation, microscopic studies, and XRD analysis were applied to check the validity of the results.

3- Results and discussions

In the prepared false-color composite (RGB: 321) the white areas represent the marble unit, the blue areas represent the amphibolite, mica, gneiss, serpentinite, and brown and red areas indicate volcanic rocks and travertine, respectively.

Muscovite (sericite) has a high reflection in ASTER bands 5 and 7 and has the most absorption in band 6. Chlorite has a high reflection in bands 7 and 9 and has the highest absorption in band 8.

* Corresponding author: bonyadi@sci.ikiu.ac.ir

DOI:10.22055/AAG.2022.37214.2219

Received 2021-04-23

Accepted 2022-01-06

Dolomite has a high reflection in bands 5, 6, and 9 and has the highest adsorption in bands 7 and 8. Therefore, a band ratio of $5+7/6$ was utilized to detect the muscovite (sericite) mineral, which is an indicator of phyllic alteration. The band ratio of $7+9/8$ was also used to detect the chlorite mineral. Also, to detect the dolomite, the band ratio $((5 + 9)/7) / ((6+9)/8)$ was used.

For better visual recognition of muscovite (sericite), chlorite, and dolomite, an RGB false color combination from band ratio images was prepared (Figure 9). In this image, muscovite is seen in red, chlorite in green, and dolomite in blue.

To increase the accuracy for selecting the appropriate PCs for detecting the minerals, the Feature Oriented PCA (FPCS) method was used. Based on the FPCS obtained for the muscovite, chlorite, and dolomite, the best PCs for the detection of these minerals in the deposit are PC3, PC6, and PC4, respectively.

The reference spectrum of muscovite (sericite), chlorite, and dolomite in the spectral library of ENVI software has been used to identify these minerals by the SAM method. In these images, the spectral angle used is 0.18 for chlorite, 0.37 for dolomite, and 0.38 for muscovite. By comparing the images obtained from the band ratio and FPCS methods and the geological map of the area, it seems that the SAM method has not been able to determine the area affected by dolomitic and sericite alteration, but in the case of chlorite alteration, the result is acceptable.

In the spectral angle mapping method, the areas with chlorite, sericite, and dolomite were classified with 96.67%, 93.75%, and 88.89% accuracy, respectively. The overall accuracy of the classification was 93.75% with a kappa coefficient of 0.9016 which seems to be satisfactory.

4- Conclusion

Among the processing methods used in this study, the best results were obtained from the band ratio (BR) method and thematic oriented principal component analysis (FPCS), which detect the alteration minerals of the Angouran areas covered by these alterations, accurately. False Color Composition (FCC) prepared from the band ratio images can display alteration assemblages in an image. The spectral angle mapping (SAM) method, although suitable for the detection of chlorite, dolomite, and muscovite minerals and has an acceptable overall accuracy, had the best accuracy for chlorite and the lowest accuracy for dolomite. The overall accuracy of this method was 93.75% and the kappa coefficient was calculated to be 0.9016, which indicates the acceptability of this classification. In the SAM method, chlorite mineral was detected better than dolomite and sericite minerals.

The results of this study show that chlorite alteration is present in the form of narrow veinlets in the footwall schist. It is limited to footwall schists. Muscovite (sericite) was mostly found in Neogene volcanic units, while dolomite is found in Angouran marble and to some extent in Qom Formation limestone of Neogene age. The accuracy of the results of this study was confirmed by field observations, petrographic studies, and XRD analysis on samples taken from Angouran zinc and lead deposit.

5- References

- Babakhani, A.R., Ghalamghash, J. 1990. Geological map of Iran, 1: 100,000 series sheet Takht-e-Soleiman. Geological Survey of Iran, Tehran .
- Sabins, F.F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*. 14(3-4), 157-183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Sharafi, A., Ardejani, F. D., Rezaei, B., Sargheini, J. 2018. Environmental geochemistry of near-neutral waters and mineralogy of zinc and lead at the Angouran non-sulphide zinc mine, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 186, 77-93. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.020>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Forouzes. A, Bonyadi. Z, 2023. Extraction of alteration minerals spectra in Angouran zinc and lead deposits using ASTER image processing, Adv. Appl. Geol. 12(4), 709-731.

DOI: 10.22055/AAG. 2022.37214.2219

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_17401.html

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

استخراج طیف کانی‌های دگرسانی در کانسار روی و سرب انگوران با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای

ارمغان فروزش

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

زهرا بنیادی*

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

* Bonyadi@sci.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

چکیده

کانسار روی و سرب انگوران در غرب استان زنجان واقع شده است. طبق بازدید صحرایی، واحدهای زمین‌شناسی این معدن متشکل از فرادیواره کربناته عمدتاً به صورت مرمر و فرودیواره شیست است. هدف از انجام این پژوهش، تفکیک و بارزسازی طیف کانی‌های شاخص دگرسانی موجود در کانسار روی-سرب انگوران با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER است که با استفاده از روش‌های ترکیب رنگی کاذب، نسبت باندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت‌یافته موضوعی و نقشه‌بردار زاویه طیفی انجام شد. بر اساس این مطالعات، طیف کانی‌های دولومیت، سریسیت (موسکویت) و کلریت بارزسازی گردید که با روند کانی‌ها در بازدید صحرایی مطابقت دارد. بهترین روش از میان پردازش‌های انجام شده، روش‌های نسبت باندی و آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت‌یافته موضوعی است که محدوده گسترش دگرسانی‌ها را به درستی بارزسازی کردند. در روش نقشه‌بردار زاویه طیفی محدوده‌های دارای کلریت، سریسیت و دولومیت به ترتیب با دقت‌های ۹۶/۶۷٪، ۹۳/۷۵٪ و ۸۸/۸۹٪ طبقه‌بندی شدند. دقت کلی طبقه‌بندی ۹۳/۷۵٪ با ضریب کاپای ۰/۹۰۱۶ برآورد شد که رضایت‌بخش به نظر می‌رسد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که کلریت به صورت رگچه‌های باریک در واحد فرودیواره شیست انگوران حضور دارد و محدود به شیست‌های فرودیواره است. موسکویت (سریسیت) بیشتر در واحدهای آتشفشانی نئوژن بارزسازی شد، در حالی که دولومیت در واحد مرمر انگوران و تا حدودی در سنگ آهک سازند قم به سن نئوژن یافت شده و مرتبط با کانه‌زایی سرب و روی است. درستی نتایج این مطالعه با بازدید صحرایی و آنالیز XRD بر روی نمونه‌های برداشت شده از کانسار روی و سرب انگوران مورد تایید قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: انگوران، نسبت باندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی، نقشه‌بردار زاویه طیفی، دگرسانی

۱- مقدمه

شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها از دیگر کاربردهای تصاویر ماهواره‌ای است که در مطالعات اکتشافی مواد معدنی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد (Sabins, 1999). تا کنون پژوهش‌های متعددی بر روی زون‌های دگرسانی و کانه‌زایی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و به‌ویژه تصویر ASTER انجام شده است (Adiri et al., 2016; Akbari et al., 2015; Amer et al., 2010; Bonyadi, 2020; Bonyadi and Daryanavard, 2020; Crosta et al., 2003; Di Tommaso and Rubinstein, 2007; Gabr et al., 2015; Hassan and

سنجش از دور، سالیان طولانی است که به عنوان یکی از روش‌های کسب اطلاعات از پدیده‌های زمین، بدون تماس مستقیم فیزیکی و با استفاده از امواج الکترومغناطیسی کاربرد دارد. تکنیک‌های سنجش از دور در اکتشاف مواد معدنی و سایر مطالعات زمین‌شناسی اهمیت به‌سزایی دارند. در اهداف اکتشافی، شناسایی زون‌های دگرسانی و نقشه‌های لیتولوژیکی بر اساس ویژگی‌های طیفی کانی‌ها انجام می‌شود. علاوه بر این

ساختمان و زمان تغییر شکل به چندین زیر زون تقسیم شود (Sepahi et al., 2014). منطقه تخت سلیمان بیشتر از سنگ‌های دگرگونی شیست، مرمر، گنیس و آمفیبولیت تشکیل شده است، که با روند شمال غربی- جنوب شرقی بلندترین ارتفاعات را در بخش‌های میانی محدوده مورد نظر شکل می‌دهند (شکل ۱). این سنگ‌ها مستقیماً توسط رسوب‌های الیگو- میوسن به صورت ناپیوسته پوشیده شده‌اند (Babakhani and Ghalamghash, 1990).

کانسار انگوران در میان فرودپارچه متشکل از شیست و فرادپارچه‌ای از مرمر تشکیل شده است. واحد شیست که بخش فرودپارچه کانسار انگوران را در بخش غربی شامل شده است (شکل ۲)، در زیر افق مرمر انگوران نمایان است. فرودپارچه شیست در معدن انگوران تحت تاثیر فرآیندهای فشاری دچار تغییر شکل شده و شامل کوارتز- سربیسیت شیست، کوارتز- موسکویت شیست است. بخش کمی از کانی‌زایی سولفیدی در فرودپارچه شیست دیده می‌شود. واحد مرمر انگوران با ضخامتی قابل توجه، بخش فرادپارچه کانسار انگوران را تشکیل داده است. این واحد که میزان اصلی توده معدنی است، در افق بالایی کمپلکس دگرگونی قرار دارد و توسط سازند قرمز پایینی پوشیده شده است (Sharafi, et al., 2018). کانی‌زایی در بخش فرادپارچه متشکل از کانی‌زایی سولفیدی و کربناته بوده و حاوی حجم زیادی از کربنات روی (اسمیت زونیت) است.

۳- مواد و روش‌ها

در این مطالعه از تصویر ASTER تهیه شده در تاریخ ۲۰۰۲/۰۸/۱۴ استفاده شده است. سنجنده ASTER با داشتن ۱۴ باند، نسبت به سنجنده‌های قدیمی دارای توان تفکیک طیفی بالاتری بوده و به دلیل داشتن باندهای متعدد فروسرخ موج کوتاه، تشخیص بهتر مناطق دگرسانی را فراهم کرده است. ۱۴ باند طیفی سنجنده ASTER شامل سه باند مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR)، ۶ باند فروسرخ موج کوتاه (SWIR) و ۵ باند فروسرخ حرارتی (TIR) است. برای بارسازی دگرسانی‌های مورد نظر، ابتدا تصویر ASTER منطقه انگوران مورد پیش‌پردازش قرار گرفت و سپس با استفاده از روش‌های نسبت باندی، آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی و نقشه‌بردار زاویه طیفی مورد آنالیز قرار گرفت. مراحل پیش‌پردازش و پردازش در نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. از نرم‌افزار ARCGIS 10.3 نیز برای صحت‌سنجی داده‌ها و

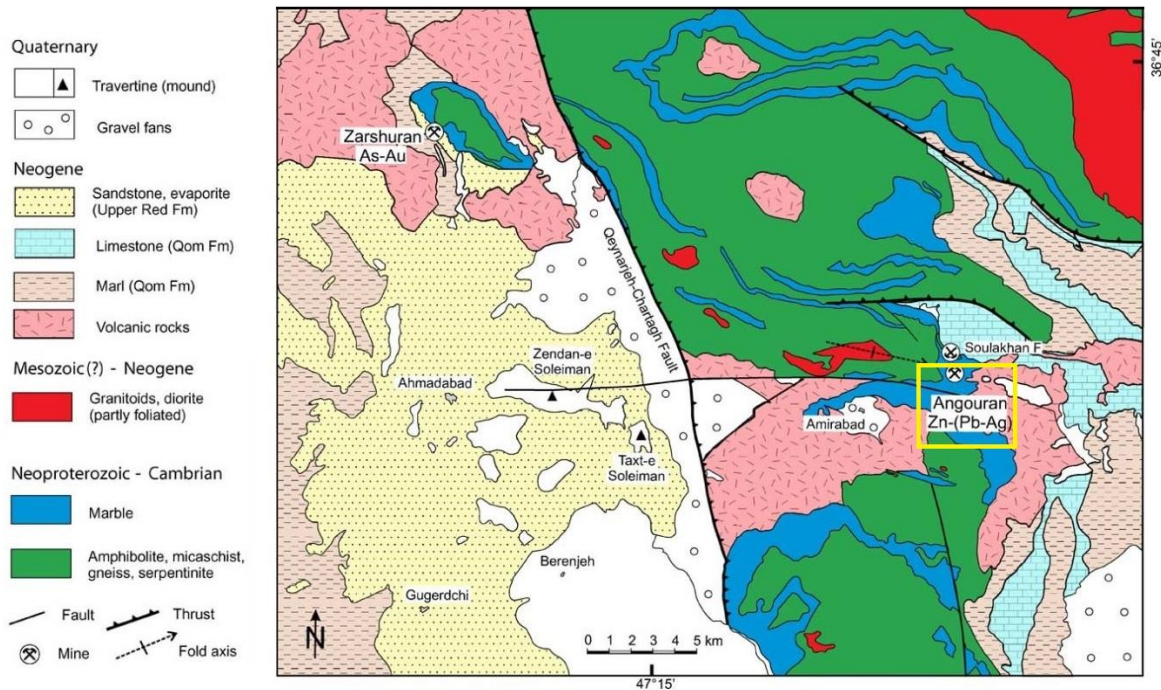
(Ramadan, 2015; Hewson et al., 2001). در ارتباط با کانسارهای سرب و روی نیز مطالعات معدودی با استفاده از روش‌های پردازشی سنجش از دور انجام گرفته است (Akbari et al., 2015; Bonyadi, 2020; Yang et al., 2018). در این مطالعات، با وجود گسترش کمتر زون‌های دگرسانی پیرامون کانسارهای سرب و روی نسبت به سایر کانسارها، استفاده از روش‌های سنجش از دوری با موفقیت همراه بوده است.

تصاویر سنجنده ASTER دارای توان تفکیک خوبی در محدوده فروسرخ هستند، محدوده‌ای که می‌تواند در تفکیک بسیاری از کانی‌ها موثر واقع کند. سنجنده ASTER دارای ۱۴ باند است که نسبت به سنجنده‌های قدیمی دارای توان تفکیک طیفی و مکانی بالاتری بوده و تشخیص بهتر مناطق دگرسانی را فراهم کرده است (Fujisada and Ono, 1994). به منظور بارسازی طیف کانی‌ها در معدن روی و سرب انگوران، از تصاویر سنجنده ASTER استفاده شده است. تصویر ASTER به دلیل تنوع باندهای SWIR در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. سایر تصاویر ماهواره‌ای به دلیل محدودیت تعداد باندهای مادون قرمز مورد استفاده قرار نگرفتند. هدف از این پژوهش بارسازی طیف کانی‌ها و دگرسانی‌های موجود در کانسار روی و سرب انگوران با استفاده از روش‌های سنجش از دور، در کنار بازدید صحرایی از کانسار روی و سرب انگوران است. تشخیص دگرسانی‌های موجود پیرامون هر کانسار می‌تواند علاوه بر کمک به اکتشاف کانسار، در تعیین تیپ کانه‌زایی نیز کمک نماید.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

کانسار روی و سرب انگوران در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی قرار گرفته است. این کانسار در غرب استان زنجان، در بخش غربی زون سنندج- سیرجان و در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان واقع شده است. زون سنندج- سیرجان یک کمربند دگرگونی شامل سنگهایی با درجات مختلف دگرگونی است که تحت نفوذ توده‌های نفوذی مختلفی با ترکیب گابرو تا گرانیت قرار گرفته است (Sepahi et al., 2014). زون سنندج- سیرجان با امتدادی حدود ۱۵۰۰ کیلومتر با جهت شمال غربی- جنوب شرقی و با عرض ۲۰۰-۱۵۰ کیلومتر به موازات کمربند کوهزایی زاگرس گسترش دارد (Shahbazi et al., 2015) و به عنوان حاشیه‌ی قاره‌ای فعال در نظر گرفته می‌شود، که می‌تواند بر اساس سنگ‌چینه‌شناسی،

آماده‌سازی نتایج استفاده گردید.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی کانسار انگوران. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است (Gilg et al., 2006, as cited in Boni et al., 2007).

Fig. 1. Geological Map of Angouran Deposit. The yellow rectangle indicates the mine area (Gilg et al., 2006, as cited in Boni et al., 2007).



شکل ۲- فرادیواره مرمر و فرودیواره شیست در معدن انگوران.

Fig. 2. Hanging wall marble and footwall schist in the Angouran mine.

۳-۱- پیش پردازش

پیش از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER، عملیات پیش‌پردازش اعمال شد. عملیات پیش‌پردازش مورد استفاده شامل حذف پوشش گیاهی، افزایش قدرت تفکیک مکانی با استفاده از الگوریتم Gram-Schmidt Spectral Sharpening با استفاده از باند ۱ و تصحیح اتمسفری میانگین نسبی بازتاب داخلی (Internal Average Relative Reflectance, IARR) است. روش میانگین نسبی بازتاب داخلی (IARR)، از یک طیف مرجع میانگین استفاده می‌کند که در آن مقادیر شدت تابش هر پیکسل، بر میانگین بازتاب پیکسل‌های تصویر تقسیم می‌شود (Kruse 1988). در این مطالعه باندهای ۱ و ۹ به عنوان طیف مرجع معرفی شدند. اگر چه در روش Gram-Schmidt ویژگی‌های طیفی باندها می‌تواند تغییر یابد، ولی پس از اجرای عملیات پردازشی بر روی تصاویر شارپ شده و شارپ نشده، تفاوت محسوس در نتایج مشاهده نشد، از اینرو به دلیل نمایش جزئیات بیشتر، از تصویر شارپ شده استفاده شد.

۳-۲- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

روش‌های پردازشی مورد استفاده بر روی تصویر ماهواره‌ای سنجنده ASTER به منظور بارسازی طیف کانی‌ها در معدن روی و سرب انگوران شامل نسبت‌های باندی (Band Ratio, BR)، ترکیب رنگی کاذب (False color composite, FCC)، آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت‌یافته موضوعی (Feature Oriented Principal Components Selection, FPCS) و نقشه بردار زاویه طیفی (Spectral Angle Mapper, SAM) است.

۳-۲-۱- نسبت باندی (BR)

در روش نسبت باندی (BR) به منظور بارسازی طیف کانی‌های مورد نظر، از تقسیم باندی که دارای بیشترین بازتاب است، به باندی که دارای بیشترین جذب است، استفاده می‌شود (Hewson et al., 2001). با به‌کارگیری این روش سایه‌ها و اثرات توپوگرافی در تصویر کاهش می‌یابد. مهمترین مزیت روش نسبت‌گیری باندی، تهیه تصویری است که مستقل از شرایط روشنایی و اثرات محیطی است (Jensen, 1996). نسبت‌گیری باندی برای آشکار ساختن تغییراتی که در تصویر باندهای منفرد قابل دیدن نیستند، به کار می‌رود (Loughlin, 1991). در این

مطالعه به منظور تشخیص باندهای دارای بیشترین بازتاب و بیشترین جذب مربوط به هر پدیده، از منحنی رفتار طیفی آن پدیده در کتابخانه طیفی نرم افزار ENVI استفاده شد.

۳-۲-۲- ترکیب رنگی کاذب (FCC)

یکی از روش‌های مؤثر برای نشان دادن بهتر بارسازی و تفکیک طیف کانی‌ها در تصاویر ماهواره‌ای، استفاده از ترکیب رنگی کاذب است. در این روش با نسبت دادن هر یک از باندها به رنگ‌های قرمز، آبی و سبز، عوارض مورد نظر به رنگ‌های متفاوتی نمایان می‌شود. تصویر RGB تهیه شده از نسبت‌های باندی به عنوان ابزاری برای شناسایی لیتولوژی و مناطق دگرسانی استفاده می‌شود (Salem et al., 2016). برای انتخاب بهترین باندها برای بارسازی هر پدیده می‌توان از ماتریس همبستگی میان باندهای مختلف استفاده نمود. روش دیگر استفاده از شاخص فاکتور بهینه (OIF) است (Chavez et al., 1982, Jensen, 1996). سه باندی که دارای بزرگ‌ترین OIF باشند، معمولاً دارای بیشترین اطلاعات و کمترین میزان تکرار هستند که به وسیله واریانس و ضریب همبستگی نمایش داده می‌شوند (Jensen 1996). ترکیب باندها، به روش آزمون و خطا نیز از روش‌های معمول است. در این روش بر اساس خصوصیات طیفی شناخته شده پدیده‌ها، باندهایی که بیشترین اطلاعات را دارند انتخاب می‌شوند.

۳-۲-۳- آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت‌یافته موضوعی (FPCS)

آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای نمایش حداکثر تفکیک‌پذیری طیفی پدیده‌ها در تصاویر ماهواره‌ای کاربرد دارد (Loughlin, 1991). آنالیز مؤلفه‌های اصلی نشان‌دهنده یک ماتریس همبستگی بوده و نتایج آن اغلب قابل تفسیرتر از تصاویر اصلی است. برای این منظور تنها باندهای خاصی انتخاب می‌شوند که حاوی ویژگی‌های جذب و انعکاس مواد معدنی مورد نظر است (Honarmand, et al., 2012). هدف اصلی از روش PCA حفظ و نگهداری اطلاعات ضمن کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها است. مولفه‌های اصلی با استفاده از حاصل ضرب مقادیر ویژه به‌دست می‌آیند. مقادیر ویژه توسط روابط پیچیده ریاضی و با استفاده از همبستگی باندها و ماتریس کواریانس محاسبه می‌شوند (Estornell et al., 2013).

شده، بازدید صحرایی و نمونه برداری از مناطق بارزسازی شده انجام گرفت. از واحدهای سنگی دارای دولومیت، سرسیت و کلریت بازدید به عمل آمد و با توجه به نقشه های زمین شناسی معدن و منطقه در مقیاس های مختلف و نتایج حاصل از این مطالعه، نقاط کنترل زمینی برای صحت سنجی داده های به دست آمده انتخاب شدند. به علاوه نمونه هایی از سنگ های دگرسان شده برداشته شد که در مراحل بعدی مورد آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و مطالعات میکروسکوپی قرار گرفتند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ترکیب رنگی کاذب (FCC)

در ترکیب رنگی کاذب با نسبت دادن هر یک از باندها یا تصاویر حاصل از سایر روش های پردازشی مانند نسبت های باندی، به رنگ های قرمز، آبی و سبز، پدیده های مورد نظر بهتر تشخیص داده می شوند. از میان ترکیب های رنگی متعدد تهیه شده، دو ترکیب RGB: 321 و RGB: 428 توانستند تفکیک بهتری میان واحدهای سنگی ایجاد کنند. در شکل ۳-۳ نواحی سفید نشان دهنده واحد مرمر، نواحی آبی نشان دهنده واحد آمفیبولیت، میکاشیست، گنایس، سرپانتین و نواحی قهوه ای و قرمز منطبق با سنگ های آتشفشانی و تراورتن است. در تصویر ۳-۳b، مرمرهای فرادیواره به رنگ آبی روشن، واحدهای آتشفشانی به رنگ بنفش و واحدهای دگرگونی فرودیواره به رنگ سبز نمایان شدند.

۴-۲- نسبت باندی (BR)

برای مشخص نمودن باندهای مناسب برای استفاده در نسبت گیری باندی ابتدا با استفاده از نمودار رفتار طیفی کانی های موجود در کتابخانه نرم افزار ENVI باندهایی با حداکثر بازتاب و حداکثر جذب برای مطالعه هر کانی انتخاب شد (شکل ۴). شدت نسبی جذب کانی ها در طول موج های مختلف و موقعیت مراکز جذب در آنها به ساختار و ترکیب شیمیایی کانی یا مواد تشکیل دهنده بستگی دارد. به همین دلیل این ویژگی می تواند به شناسایی آن کانی کمک کند. در برخی کانی ها مانند کلریت به دلیل اشباع بودن از آب، یک محدوده جذب اضافی در طول موج ۱/۸۵ میکرون ایجاد می شود. نواحی جذب باریک تر در محدوده ۲/۵ تا ۲/۱ میکرومتر نیز برای تشخیص انواع مختلف کانی های OH دار به کار می رود. شناسایی کربناتها راحت تر بوده و از طریق محدوده جذبی ۳/۵-۳/۴ و ۴/۰-۳/۹ میکرومتر انجام می شود. این کانی ها در

گاهی فقط به اطلاعات باندهای خاصی برای پردازش تصاویر مورد نیاز است، که باعث کاهش ابعاد داده های ورودی شده و نیازی به آنالیز تمام باندها نیست، در واقع زمانی که تعداد باندهای ورودی کاهش پیدا کند و از باندهایی که به طور مستقیم نشان دهنده جذب و بازتاب طیف کانی مورد نظر استفاده شود، امکان از دست رفتن اطلاعات مفید کاهش یافته و بهترین بارزسازی انجام می شود. به این روش، آنالیز مؤلفه های اصلی انتخابی (روش کروستا) گفته می شود (Crosta and Moore, 1989). یک جنبه مهم در این روش این است که پیش بینی می کند نوع سطح هدف توسط کدام یک از پیکسل های تیره یا روشن در تصویر مولفه اصلی مربوطه بارزسازی شده است (Loughlin, 1991). در این روش با کاهش تعداد باندها، احتمال بارزسازی پدیده مورد نظر در یکی از مولفه های اصلی افزایش می یابد (Tangestani and Moore, 2000). در تصاویر ماهواره ای ASTER به منظور دستیابی به مناطقی که تحت تأثیر دگرسانی های احتمالی قرار گرفته اند، از باندهای SWIR در آنالیز مولفه های اصلی استفاده می شود (Honarmand et al., 2012). در این مطالعه از روش کروستا و باندهای SWIR برای بارزسازی دگرسانی ها استفاده شد.

۳-۲-۴- روش نقشه بردار زاویه طیفی (SAM)

روش نقشه بردار زاویه طیفی از روش های مؤثر در بارزسازی تصاویر ماهواره ای است، که در آن با توجه به شباهت طیف مرجع با طیف پیکسل، زاویه بین طیف ها به وسیله محاسبه تعیین می شود (Kruse et al., 1993). روش نقشه بردار زاویه طیفی بر اساس میزان تشابه بین زاویه طیفی در دو طیف، و مقایسه طیف کانی منطقه مورد نظر با طیف استاندارد بنا شده است (Kruse et al., 1993). در این روش برای مقایسه زاویه طیفی بر حسب رادیان، به معرفی مرجع نیاز است. طیف مرجع را می توان از تصویر، کتابخانه طیفی و یا طیف تهیه شده از نمونه های صحرایی به دست آورد (Girouard et al., 2004). در این مطالعه از طیف های موجود در کتابخانه طیفی نرم افزار ENVI به عنوان طیف مرجع استفاده شده است.

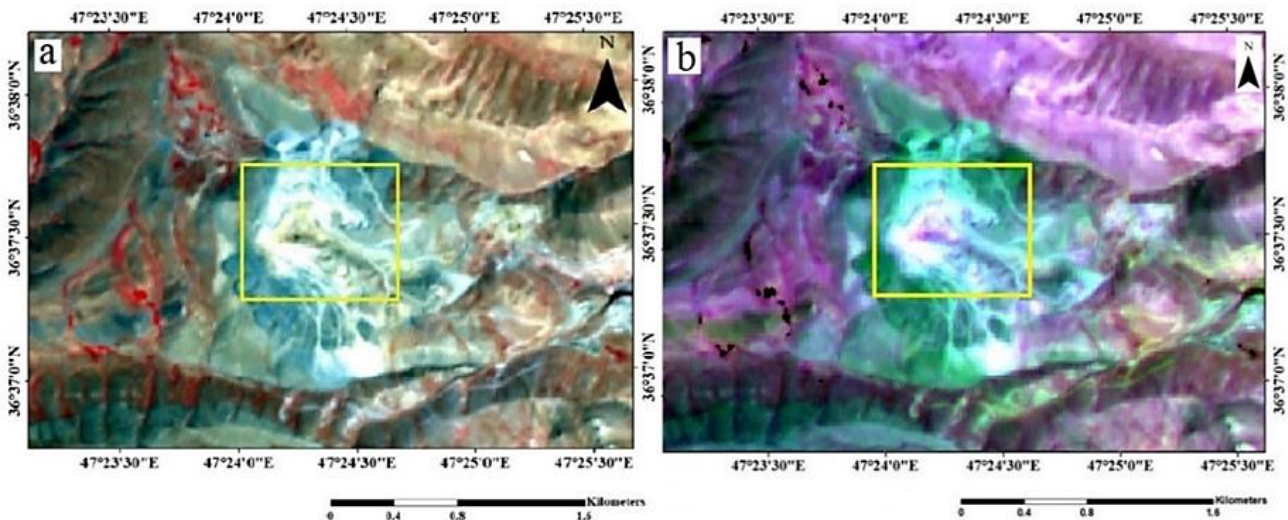
۳-۳- بازدید صحرایی، صحت سنجی داده ها، مطالعات

میکروسکوپی و آنالیز XRD

به منظور سنجش درستی نتایج حاصل از پردازش های انجام

علاوه بر نمودار طیفی، از مراجع مختلف برای یافتن بهترین نسبت باندی مرتبط با دگرسانی‌ها استفاده شد.

محدوده ۲/۲۵-۲/۳۳ و ۲/۵۳-۲/۵۰ نیز جذب دارند (Bishop et al., 2013; Ehlmann et al., 2008). محدوده جذب برای کلریت، طول موج‌های ۲/۳۷-۲/۳۳ میکرومتر را دربر می‌گیرد.

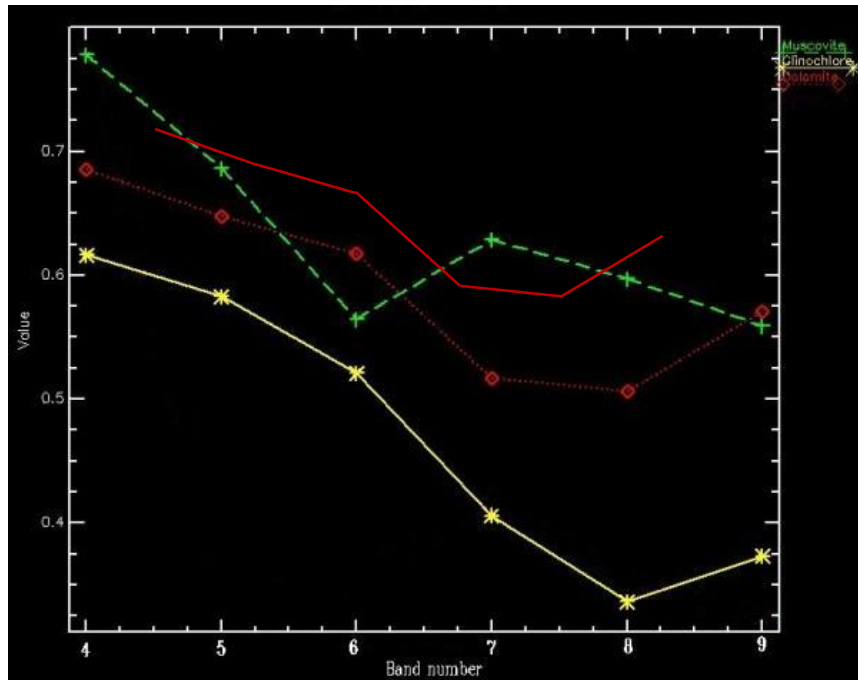


شکل ۳- بارزسازی واحدهای زمین‌شناسی با استفاده ترکیب رنگی کاذب (a) RGB: 321 نواحی سفید معرف واحد مرمر فرودادیواره، نواحی آبی معرف واحد دگرگونی فرودادیواره و نواحی قهوه‌ای و قرمز نشان‌دهنده سنگهای آتشفشانی و پوشش گیاهی را هستند. لکه‌های کوچک سفید رنگ در خارج از محدوده معدن تراورتن است و (b) RGB: 428 که در آن مرمر به رنگ آبی روشن، واحدهای دگرگونی به رنگ سبز و واحدهای آتشفشانی به رنگ بنفش دیده می‌شوند. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 3. Detection of geological units using false color combination (a) RGB: 321, the white areas represent the marble unit of the hanging-wall, the blue areas represent the metamorphic unit and the brown and red areas represent volcanic rocks and vegetation. Small white stains outside the mine are travertine and (b) RGB: 428, marble, metamorphic rocks, and volcanic rocks are represented light blue, green, and violet respectively. The mine area is marked with a yellow box.

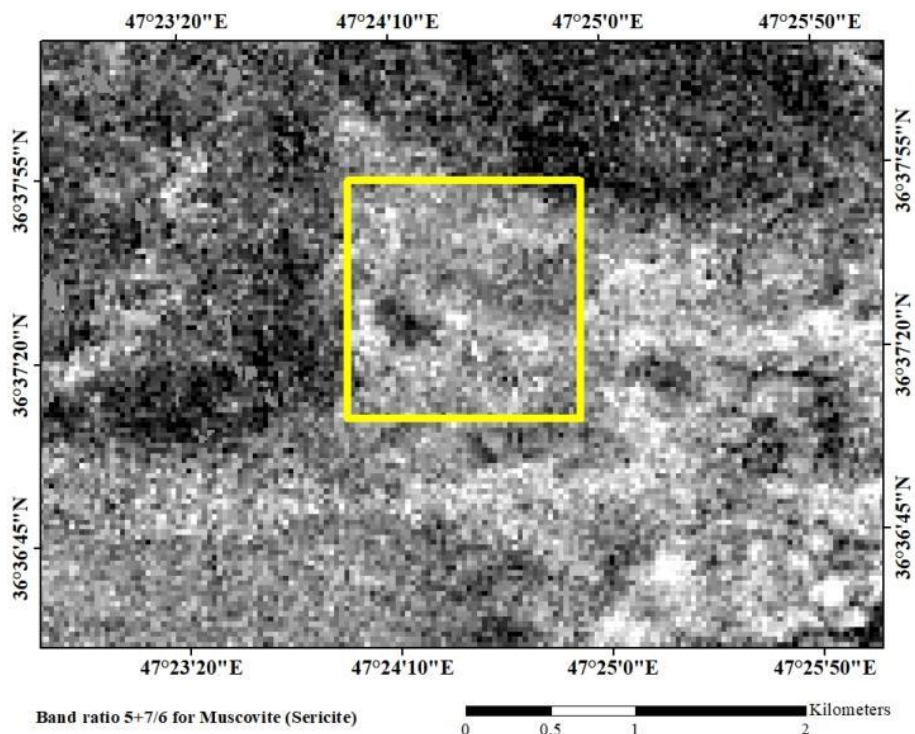
برای تشخیص بصری بهتر کانی‌های موسکویت (سریسیت)، کلریت و دولومیت، از ترکیب رنگی RGB حاصل از تصاویر نسبت باندی استفاده شد (شکل ۸). در این تصویر موسکویت به رنگ قرمز، کلریت به رنگ سبز و دولومیت به رنگ آبی دیده می‌شود. با توجه به تصاویر حاصله و مقایسه آنها با نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، می‌توان دریافت که سریسیت عمدتاً در سنگ‌های آتشفشانی منطقه تجمع یافته است، در حالی که کلریت و دولومیت به ترتیب در سنگ‌های دگرگونی و واحدهای آهکی منطقه تمرکز دارند (شکل ۸).

با توجه به شکل ۴، کانی موسکویت (سریسیت) در باندهای ۵ و ۷ بازتاب بالا و در باند ۶ بیشترین جذب را دارد. کانی کلریت در باندهای ۷ و ۹ بازتاب بالا و در باند ۸ بیشترین جذب را دارد. کانی دولومیت در باندهای ۵ و ۶ و ۹ بازتاب بالا و در باند ۷ و ۸ بیشترین جذب را دارد. از این رو، برای بارزسازی طیف کانی موسکویت (سریسیت) که شاخص دگرسانی فیلپک است از نسبت باندی $5+7/6$ استفاده شد (شکل ۵). برای بارزسازی طیف کانی کلریت که شاخص دگرسانی پروپیلیتیک است، نیز از نسبت باندی $7+9/8$ استفاده شد (شکل ۶). همچنین برای بارزسازی طیف کانی دولومیت که شاخص دگرسانی کربناتی است، از نسبت باندی $(9+6)/8$ استفاده شد (شکل ۷).



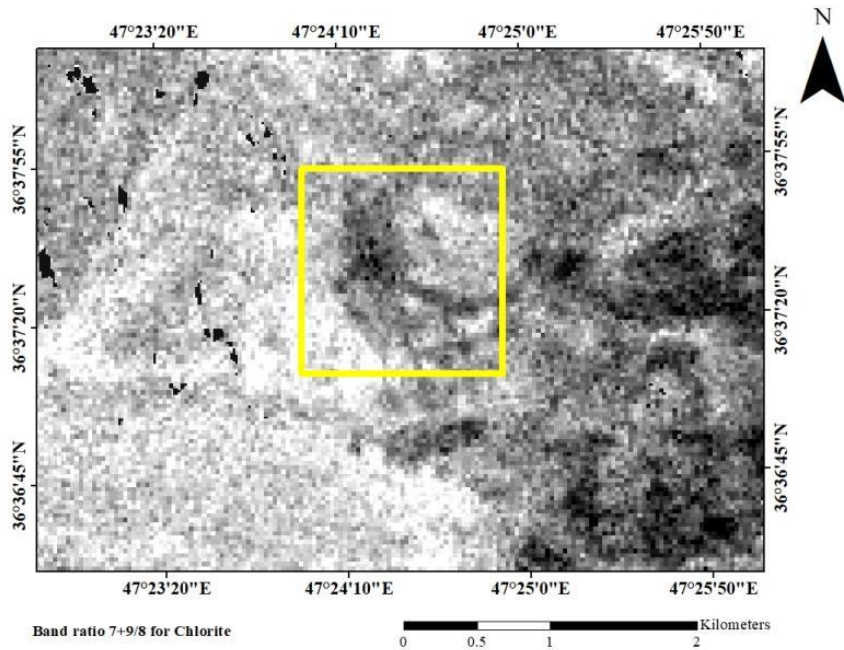
شکل ۴- منحنی بازتاب طیفی کانی‌های موسکویت (سبز)، کلریت (زرد) و دولومیت (قرمز)، در کتابخانه طیفی نرم افزار ENVI.

Fig. 4. Spectral reflectance curves of muscovite (green), chlorite (yellow) and dolomite (red) in ENVI spectral library.



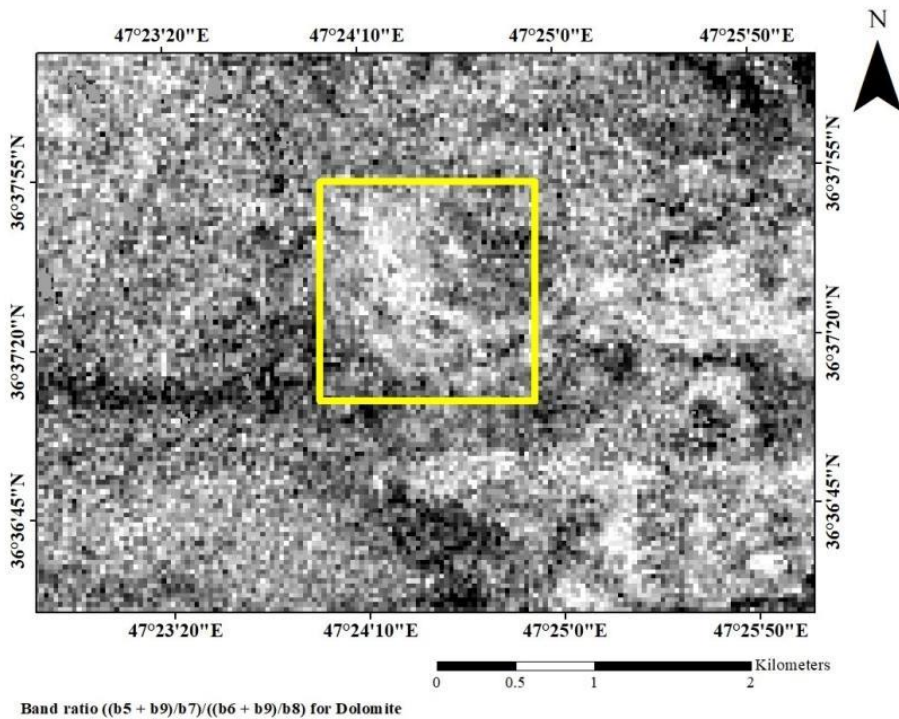
شکل ۵- بارزسازی طیف کانی موسکویت (سریسیت) (پیکسل‌های سفید رنگ) با استفاده از نسبت باندهای ۵+۷/۶. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 5. The detection of muscovite (sericite; white pixels) by a band ratio of 5+7 /6. The area of the mine is marked by the yellow box.



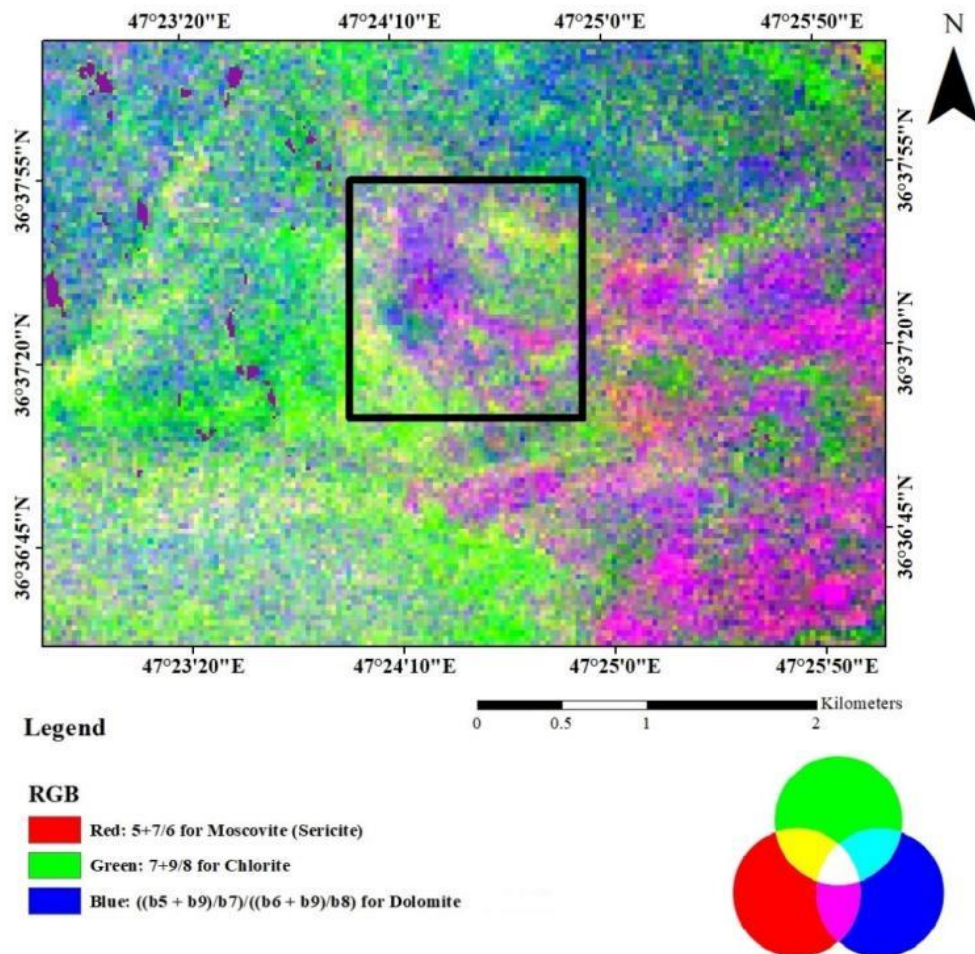
شکل ۶- بارزسازی طیف کانی کلریت (نقاط سفید رنگ) با استفاده از نسبت بانندی $7+9/8$ انجام شده است. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 6. The detection of chlorite (white pixels) using a band ratio of $7+9/8$. The area of the mine is marked by the yellow box.



شکل ۷- برای بارزسازی طیف کانی دولومیت (نقاط سفید رنگ) از نسبت بانندی $((9+5)/7)/((9+6)/8)$ استفاده شده است. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 7. The detection of dolomite (white pixels) using a band ratio of $((5+9)/7)/((6+9)/8)$. The area of the mine is marked by the yellow box.



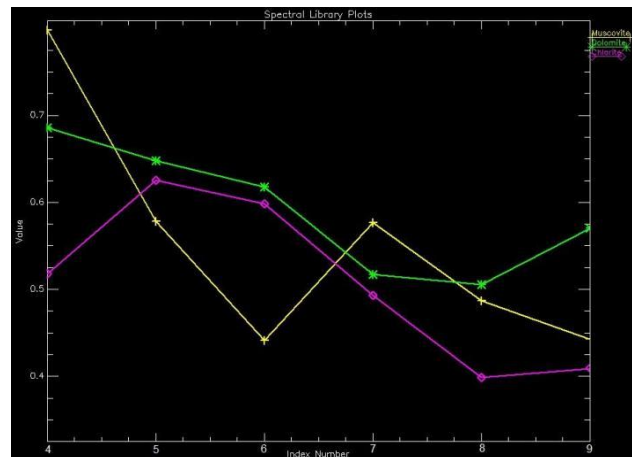
شکل ۸- ترکیب رنگی RGB متشکل از تصاویر نسبت باندی مربوط به کانی‌های موسکویت (سرسیت)، کلریت، کلسیت و دولومیت. محدوده معدن با کادر سیاه رنگ مشخص شده است.

Fig. 8. The RGB color composite consists of band ratio images of muscovite (sericite), chlorite, calcite and dolomite minerals. The area of the mine is marked by the black box.

که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. طبق جدول (۱) و طیف به دست آمده از این کانی، مؤلفه‌ای که دارای بیشترین اختلاف بین ضرایب جذب و بازتاب بود، انتخاب شد، که این مؤلفه برای کانی کلریت، PC6 است. به دلیل منفی بودن ضریب بازتاب باندهای ۹ و ۷، کانی کلریت در تصویر حاصله به صورت پیکسل تیره مشاهده می‌شود. به همین دلیل و به منظور سهولت در مشاهده طیف کانی و تحلیل‌های حاصله، PC6 در ضریب منفی ضرب شد، تا به صورت پیکسل روشن نمایش داده شود (شکل ۱۰). در این تصویر نیز مانند تصویر حاصل از نسبت‌های باندی، کانی کلریت در مناطق تحت پوشش واحدهای دگرگونی فراوانی بالایی دارد.

۳-۴- آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت‌یافته موضوعی (FPCS)

به منظور افزایش دقت برای انتخاب PC مناسب برای بارزسازی کانی مورد نظر، از روش PCA جهت‌یافته موضوعی (Feature Oriented Principal Components Selection, FPCS) استفاده شد. شکل ۹ نشان‌دهنده طیف جذب و بازتاب سه کانی شاخص دگرسانی‌های کلریت، موسکویت (سرسیت) و دولومیت در تصویر ماهواره‌ای منطقه انگوران است. در این نمودار مشاهده می‌شود که کانی کلریت دارای بازتاب بالا در باندهای ۹ و ۷ و بیشترین جذب در باند ۸ در محدوده SWIR است. بنابراین با استفاده از این سه باند، تبدیل PCA اجرا شد



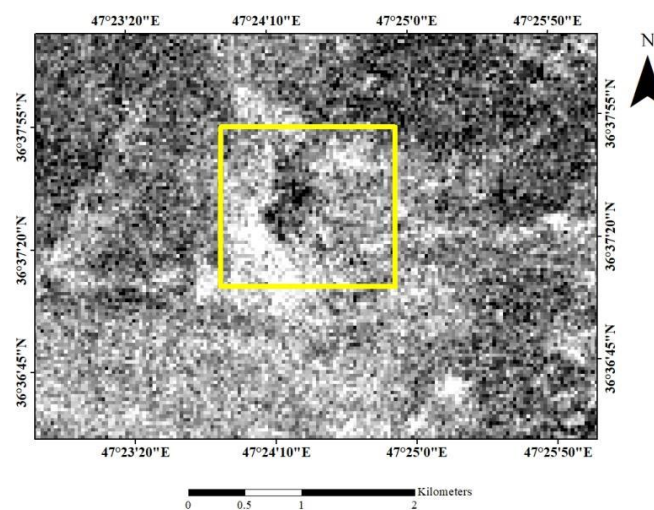
شکل ۹- منحنی‌های زرد، سبز و بنفش به ترتیب نشان‌دهنده رفتار طیفی سه کانی موسکویت (سرسیت)، دولومیت و کلریت در تصویر ماهواره‌ای ASTER منطقه انگوران است.

Fig. 9. The yellow, green, and purple curves indicate the spectral behavior of the muscovite (sericite), dolomite, and chlorite, respectively, in the ASTER image of the Angouran area.

جدول ۱- مقادیر بردار ویژه محاسبه شده به روش FPCS برای باندهای ۷، ۸، و ۹ تصویر ASTER برای کانی کلریت. مؤلفه PC6 دارای بیشترین اختلاف بین ضرایب جذب و بازتاب کلریت است.

Table 1. Eigenvector values calculated using FPCS for ASTER bands 7, 8, and 9 for chlorite. PC6 has the largest difference between the absorption and reflection coefficients of chlorite.

Eigenvector	B7	B8	B9
PC4	-0.187791	-0.437124	-0.138791
PC5	-0.68095	0.388001	0.056835
PC6	-0.406019	0.465176	-0.210205
Variance%	98.889399	0.9380343	0.1725667
Cumulative Variance%	98.8894	99.827434	100



شکل ۱۰- بارزسازی کانی کلریت به روش FPCS، پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده کلریت است. بهترین PC که نشان‌دهنده کانی کلریت باشد PC6 است. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 10. Detection of chlorite by the method of FPCS, bright pixels represent chlorite. PC6 is the best PC detecting the chlorite. The area of the mine is marked by the yellow box.

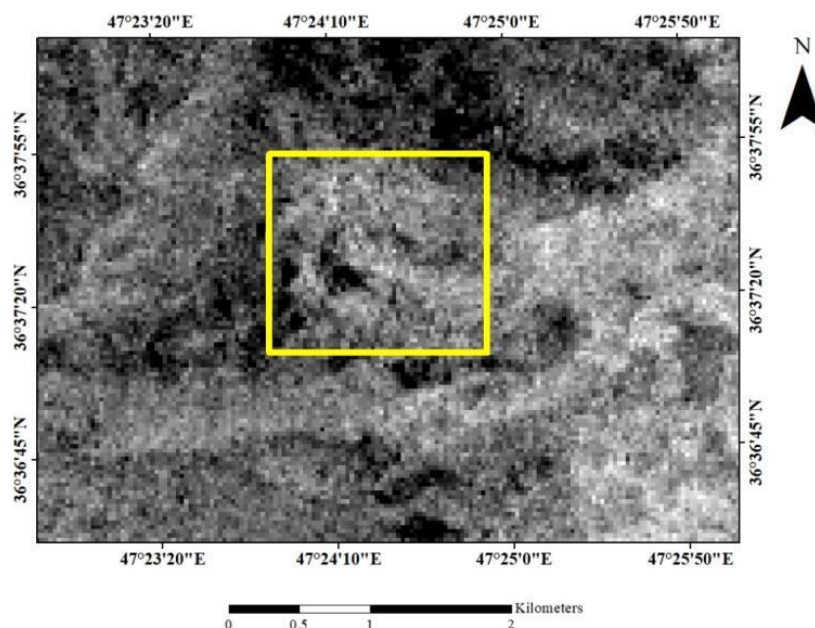
بیشترین اختلاف با باندهای بازتابش و دارای علامت منفی است. به همین دلیل در تصویر حاصله، کانی‌های سریسیت به صورت پیکسل‌های روشن بازسازی شد. نتایج حاصل از این روش، با نتیجه حاصل از روش نسبت باندهای (شکل ۵) با یکدیگر قابل مقایسه بوده و هر دو روش موفقیت بالایی در بازسازی سریسیت داشتند.

طبق مقادیر به دست آمده از طیف کانی موسکوویت (سرسیت)، باندهای ۵ و ۷ بازتاب بالا و باند ۶ بیشترین جذب را دارا هستند، بنابراین در مولفه انتخابی، باند ۶ باید علامت متفاوتی نسبت به باندهای ۵ و ۷ داشته باشد. طبق جدول (۲) PC3 مناسب‌ترین PC برای نمایش طیف کانی موسکوویت (سرسیت) است (شکل ۱۱)؛ مقدار عددی باند جذب دارای

جدول ۲- مقادیر بردار ویژه محاسبه شده به روش FPCS برای باندهای ۵، ۶ و ۷ تصویر ASTER برای کانی موسکوویت (سرسیت). مؤلفه PC3 دارای بیشترین اختلاف بین ضرایب جذب و بازتاب سریسیت است.

Table 2. Eigenvector values calculated using FPCS for ASTER bands 5, 6, and 7 for muscovite (sericite). PC3 has the largest difference between the absorption and reflection coefficients of sericite.

Eigenvector	B5	B6	B7
PC2	-0.578389	-0.572333	-0.581293
PC3	-0.260482	-0.545698	0.796469
PC4	-0.773056	0.612085	0.166543
Variance%	99.556112	0.2887577	0.1551304
Cumulative Variance%	99.556112	99.84487	100



شکل ۱۱- بازسازی کانی موسکوویت (سرسیت) به روش FPCS، پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده کانی موسکوویت (سرسیت) است. PC3 مناسب‌ترین PC برای نمایش کانی موسکوویت (سرسیت) است. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 11. Detection of muscovite (sericite) by the method of FPCS, bright pixels represent chlorite. PC3 is the best PC detecting the sericite. The area of the mine is marked by the yellow box.

انتخابی به دست آمده برای این کانی (جدول ۳)، PC4 مناسب‌ترین باند برای بازسازی کانی دولومیت در محدوده

طیف کانی دولومیت، دارای بازتاب بالایی در باندهای ۶ و ۹ و بیشترین جذب در باندهای ۷ و ۸ می‌باشد، که بر طبق PCA

کانسار روی و سرب انگوران است (شکل ۱۲). با مقایسه شکل ۱۲ با تصویر حاصل از نسبت بانندی برای کانی دولومیت (شکل ۷) مشاهده می شود که محدوده تحت پوشش دولومیت در این دو تصویر با هم تفاوت دارند. با مراجعه به نقشه های زمین شناسی موجود و مشاهدات صحرائی، مشخص شد که آنالیز مولفه های اصلی در بارزسازی دولومیت موفقیت کمتری داشته و تصویر حاصل از نسبت بانندی، دولومیت را با دقت بالاتری

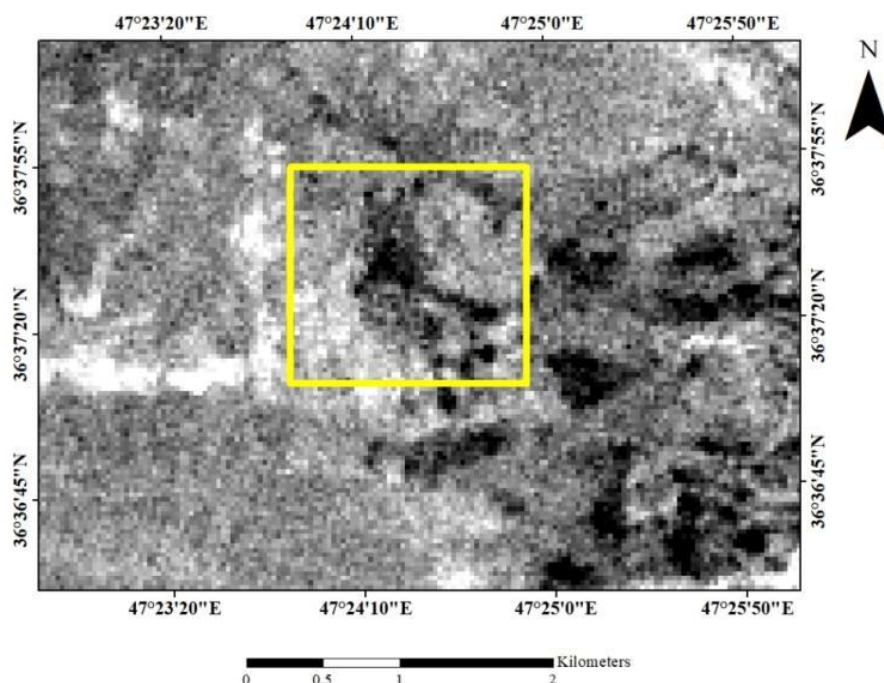
بارزسازی کرده است.

در ادامه برای تشخیص بصری کانی های موسکویت (سرسیت)، کلریت و دولومیت از ترکیب رنگی -RGB: PC3, PC6, PC4 استفاده شد (شکل ۱۳). در این تصویر سریسیت به رنگ قرمز، کلریت به رنگ سبز و دولومیت به رنگ آبی دیده می شود.

جدول ۲- مقادیر بردار ویژه محاسبه شده به روش FPCS برای باندهای ۶، ۷، ۸ و ۹ تصویر ASTER برای کانی دولومیت. مؤلفه PC4 دارای بیشترین اختلاف بین ضرایب جذب و بازتاب دولومیت است.

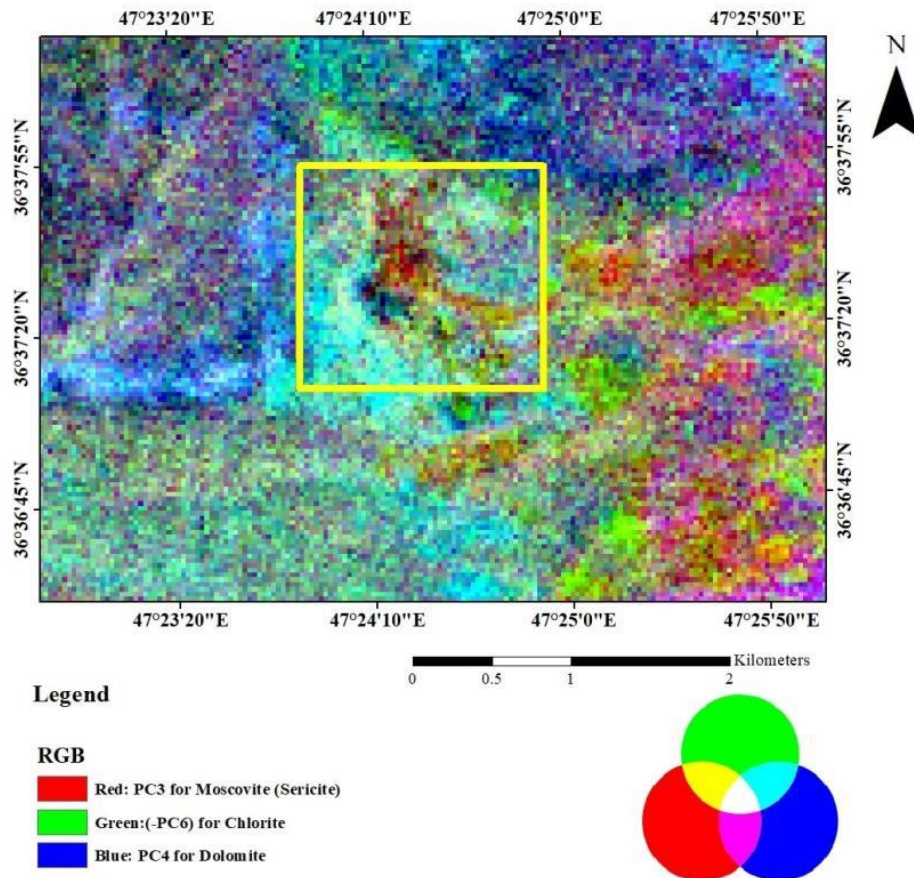
Table 3. Eigenvector values calculated using FPCS for ASTER bands 6, 7, 8, and 9 for dolomite. PC4 has the largest difference between the absorption and reflection coefficients of dolomite.

Eigenvector	B6	B7	B8	B9
PC3	-0.174776	-0.225634	-0.083166	0.89484
PC4	0.549355	-0.324856	-0.667386	0.101121
PC5	-0.681692	0.14116	-0.242465	0.126892
PC6	0.038676	0.784347	-0.525303	0.035283
Variance%	57.7506	26.62177	7.919124	7.708506
Cumulative Variance%	57.7506	84.37237	92.29149	100



شکل ۱۲- بارزسازی کانی دولومیت به روش FPCS، پیکسل های روشن نشان دهنده کانی های دولومیت و کلسیت است. PC4 مناسب ترین باند برای نمایش کانی دولومیت است. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 12. Detection of dolomite by the method of FPCS, bright pixels represent chlorite. PC4 is the best PC detecting the dolomite. The area of the mine is marked by the yellow box.



شکل ۱۳- بازسازی کانی‌های موسکویت (سریسیت)، کلریت، دولومیت با استفاده از ترکیب رنگی RGB: PC364. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 13. Detecting muscovite (sericite), chlorite, and dolomite minerals using color combination RGB: PC364. The area of the mine is marked by the yellow box.

گسترش دگرسانی دولومیتی و سریسیتی را مشخص نماید، ولی در مورد دگرسانی کلریتی، نتیجه قابل قبول تر است.

۴-۵- دقت طبقه‌بندی

دقت طبقه‌بندی اغلب به صورت درصد بیان می‌شود و در حالت کلی، میانگین داده‌های مربوط به کلاس‌ها است (Fitzgerald and Lees 1994).

الف) دقت کلی

دقت کلی (Overall accuracy) نشان‌دهنده نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده، به جمع کل پیکسل‌های معلوم است که از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

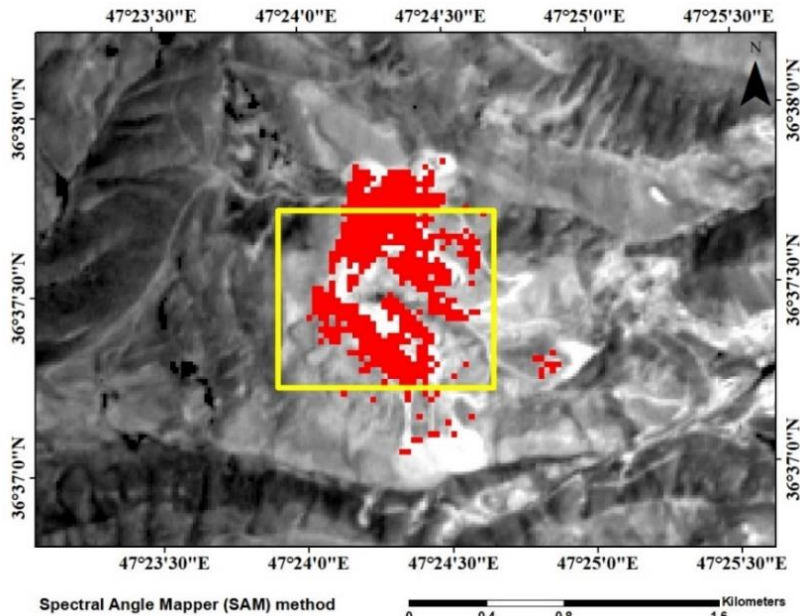
$$OA = \frac{\sum_{i=1}^c E_{ii}}{N} \quad (\text{رابطه ۱})$$

۴-۴- نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)

نقشه‌بردار زاویه طیفی یک روش طبقه‌بندی طیفی نظارت شده است، که شباهت طیف مرجع با طیف پیکسل را از طریق محاسبه زاویه بین طیف‌ها نشان می‌دهد (Kruse et al., 1993). برای بازسازی کانی موسکویت (سریسیت) (شکل ۱۴)، کانی کلریت (شکل ۱۵) و کانی دولومیت (شکل ۱۶) از طیف مرجع این کانی‌های در کتابخانه طیفی نرم‌افزار ENVI استفاده شده است. در این تصاویر، زاویه طیفی مورد استفاده برای کانی کلریت ۰/۱۸، برای کانی دولومیت ۰/۳۷ و برای کانی موسکویت ۰/۳۸ است. بر این اساس و با مقایسه با تصاویر حاصل از روش‌های نسبت باندی و FPCS و نقشه زمین‌شناسی محدوده، به نظر می‌رسد که روش SAM نتوانسته است به خوبی محدوده

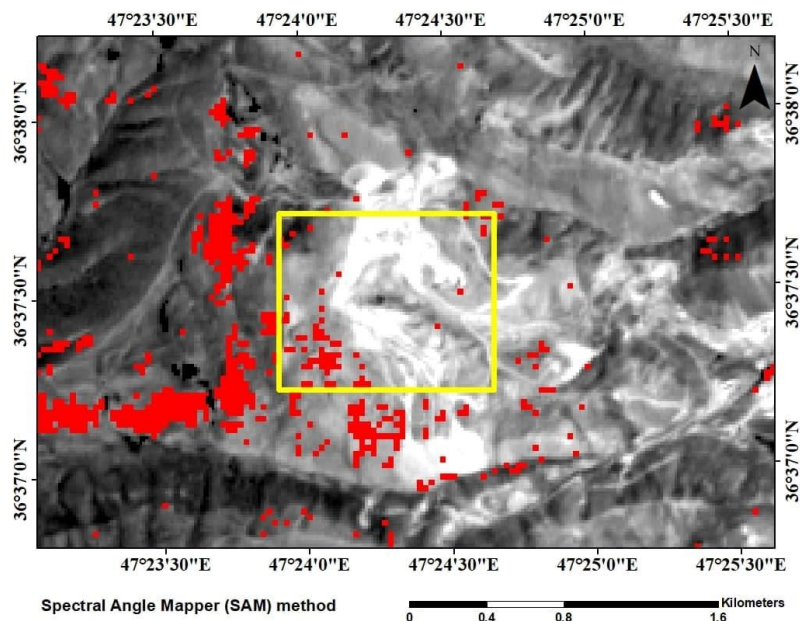
کلی نیاز به عملیات پیچیده برای محاسبه ندارد و یکی از ساده ترین پارامترهای دقت محسوب می شود (Lewis and Brown, 2001).

در این فرمول، OA دقت کلی طبقه بندی، C تعداد کلاس ها، E_{ii} اعضای قطری ماتریس خطا و N پیکسل های معلوم هستند. دقت



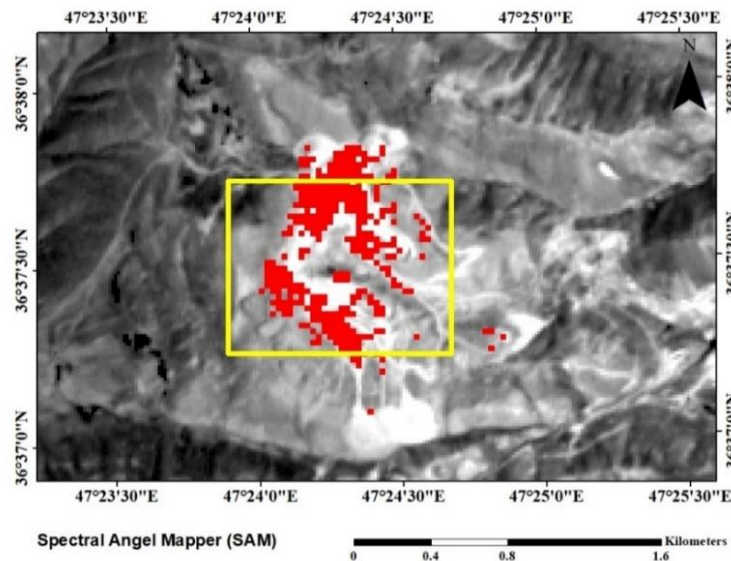
شکل ۱۴- بازسازی کانی موسکوویت (سرسیت) به روش SAM با استفاده از طیف مرجع کانی ها در کتابخانه نرم افزار ENVI. پیکسل های قرمز نشان دهنده کانی موسکوویت (سرسیت) است. محدوده معدن با کادر زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 14. Detecting muscovite (sericite) by SAM method using the ENVI mineral spectral library. Red pixels indicate muscovite (sericite) mineral. The area of the mine is marked by the yellow box.



شکل ۱۵- بازسازی کانی کلریت به روش SAM، پیکسل های قرمز نشان دهنده کانی کلریت بوده که عمدتاً منطبق بر فرودیواره شیست معدن انگوران (شیست) است. کادر زرد رنگ نشان دهنده محدوده معدن انگوران است.

Fig. 15. Detecting chlorite by SAM method using the ENVI mineral spectral library. Red pixels indicate chlorite mineral. The area of the mine is marked by the yellow box.



شکل ۱۶- بازسازی طیف کانی دولومیت به روش SAM، پیکسل‌های قرمز نشان‌دهنده کانی دولومیت بوده که منطبق بر فرادیواره مرمر و فرادیواره شیست معدن انگوران است. کادر زرد رنگ نشان‌دهنده محدوده معدن انگوران است.

Fig. 16. Detecting dolomite by SAM method using the ENVI mineral spectral library. Red pixels indicate dolomite mineral. The area of the mine is marked by the yellow box.

بزرگتر باشد، روش طبقه‌بندی بسیار خوب انجام شده است. در این مطالعه، دقت طبقه‌بندی با استفاده از نقاط واقعیت زمینی (Ground Truth Points) برای تصویر حاصل از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی محاسبه شد که نتیجه آن در جدول ۴ قابل مشاهده است. نقاط واقعیت زمینی (۶۴ نقطه) با استفاده از عملیات صحرایی و نیز با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی معدنی به دست آمد. بر این اساس دقت طبقه بندی برای کانی‌های سربیسیت، کلریت و دولومیت به ترتیب ۹۳/۷۵٪، ۹۶/۶۷٪ و ۸۸/۸۹ درصد محاسبه شد. دقت کلی طبقه بندی ۹۳/۷۵٪ و ضریب کاپا ۰/۹۰۱۶ به دست آمد که نشان‌دهنده قابل قبول بودن این طبقه بندی است. این نتایج با نتایج حاصل از مقایسه تصاویر طبقه‌بندی با سایر روش‌ها و نیز مقایسه با نقشه‌های زمین‌شناسی معدنی مطابقت دارد. به عبارت دیگر نتایج طبقه‌بندی دگرسانی دولومیتی در روش SAM ضعیف‌تر از سایر کانی‌ها است، در حالی که بهترین عملکرد این روش مربوط به کانی کلریت است.

ب) ضریب کاپا

ضریب کاپا، تشریح‌کننده میزان تطابق میان نتایج طبقه‌بندی و واقعیت زمینی است. با توجه به این نکته، تطابق‌های اتفاقی ایجاد شده، از ملاحظات حذف می‌گردند. برخی برای ارائه دقت طبقه‌بندی ملاک اندازه‌گیری آماری، از ضریب کاپا استفاده می‌کنند. این ضریب از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad (\text{رابطه } 2)$$

X_{ii} درایه‌های قطری ماتریس خطا است. X_{i+} و X_{+i} به ترتیب پیکسل‌های طبقه‌بندی شده در هر کلاس و پیکسل‌های واقعیت زمینی هر کلاس هستند (Sisodia et al., 2014). در صورتی که مقدار کاپا صفر باشد، نشان‌دهنده این است که بین داده‌های مرجع و خروجی روش طبقه‌بندی سازگاری وجود ندارد و در صورتی که مقدار آن یک باشد، نشان‌دهنده این است که سازگاری کامل بین داده‌های مرجع و نتیجه طبقه‌بندی وجود دارد (Fitzgerald and Lees, 1994). صورتی که ضریب کاپا برابر ۰/۷۵ یا

جدول ۴- ماتریس خطای تشکیل شده با استفاده از روش طبقه بندی SAM در منطقه انگوران.

Table 4 - Confusion matrix formed using SAM classification method in Angoran region.

	Sericite	Chlorite	Dolomite	Total (user)
Sericite	15	0	1	16
Chlorite	0	29	1	30
Dolomite	0	2	16	18
Total (producer)	15	31	18	64

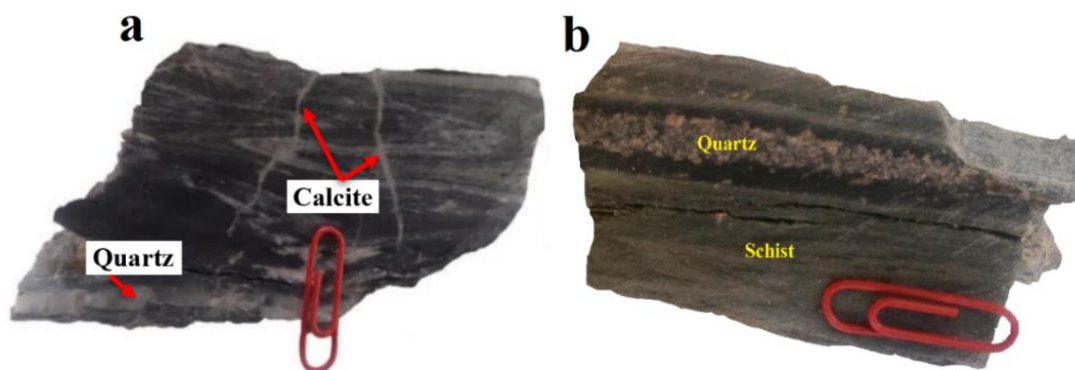
دارد و پیریت به صورت دانه پراکنده قابل مشاهده است (شکل ۱۸- c).

برای تعیین ترکیب کانی شناسی نمونه شلیست فرودیواره از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نیز استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیز XRD کانی‌های موجود شامل کوارتز، کلینوکلر، آلپیت، پیریت، بیوتیت، موسکویت و آرسنوپیریت (شکل ۱۹ و ۲۰) است.

بر اساس مطالعات میکروسکوپی و نتایج آنالیز XRD در کانسار روی و سرب انگوران، دولومیت در فرادیواره مرمر و کلریت و دولومیت آهن دار (آنکریت) در فرودیواره شلیست مشاهده می‌شود (شکل ۲۰). کانی‌های شاخص دگرسانی کلریتی شامل اپیدوت، آلپیت، کلسیت، دولومیت و آنکریت است. دگرسانی دولومیتی نیز اساساً در سنگ‌های آهکی و بیشتر در کانسارهای سرب و روی دما پایین نوع دره می‌سی‌سی‌پی رخ می‌دهد (Najafzadeh et al., 2011).

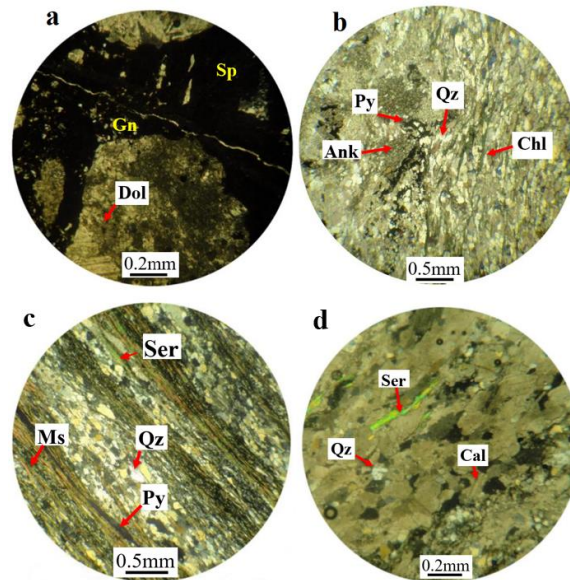
۵- بازدید صحرائی، آنالیز XRD و مطالعات میکروسکوپی

در بازدید به عمل آمده از کانسار روی و سرب انگوران، نمونه‌هایی از سنگ‌های فرادیواره و فرودیواره از سینه کارهای معدن، تونل‌های زیرزمینی و مغزه‌های حفاری برداشت شد (شکل ۱۷- a و b). سپس مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از این نمونه‌ها مطالعه گردید که حضور دولومیت، به همراه گالن و اسفالریت در مرمر فرادیواره (شکل ۱۸- a) و کانی‌های دولومیت آهن‌دار (آنکریت)، کلریت، کوارتز، کلسیت، موسکویت و سربیسیت در شلیست فرودیواره (شکل ۱۸- b، c و d) تایید شد. کوارتزهای موجود عموماً ریزبلور و گاهی درشت بلور و بی‌شکل بوده و بخش زیادی از سنگ را به خود اختصاص داده‌اند. کانی موسکویت بعد از کوارتز دارای فراوانی قابل توجهی است. کلریت به صورت رگچه‌های ظریف در شلیست مشاهده می‌شود (شکل ۱۸- b). کانی سربیسیت نسبت به کوارتز و موسکویت فراوانی کمتری



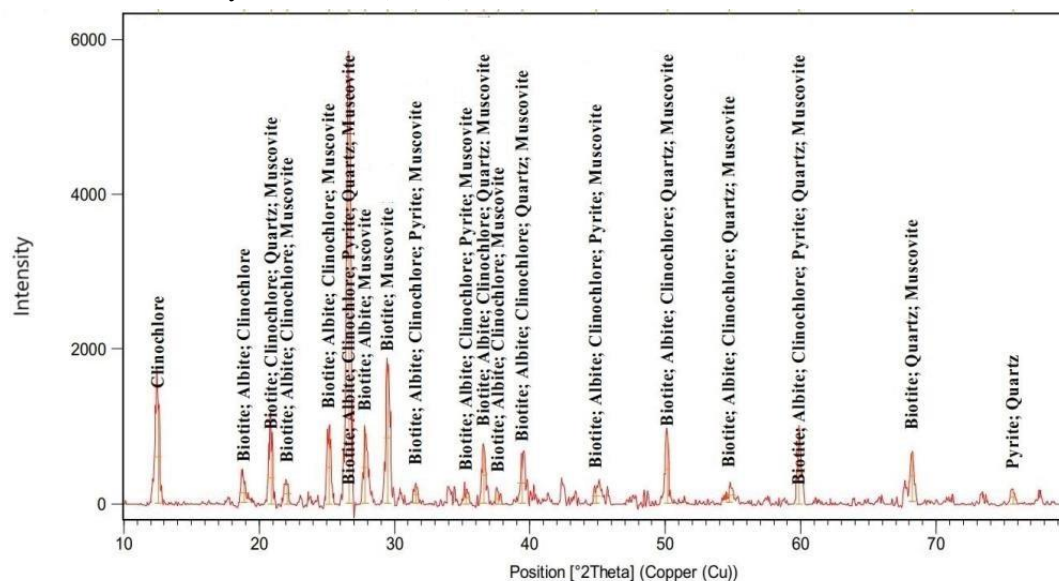
شکل ۱۷- (a) نمونه دستی شلیست نشان‌دهنده رگچه‌های کلسیتی (Cal) که شلیست را قطع کرده است، به همراه رگه کوارتز (Qz)، (b) تصویر نمونه دستی از شلیست فرودیواره معدن انگوران، حاوی رگه کوارتز.

Fig. 17. (a) A schist hand specimen showing calcite (Cal) veinlets cutting the schist host rock along with a quartz vein (Qz), (b) A hand specimen of the Angouran footwall schist containing quartz vein.



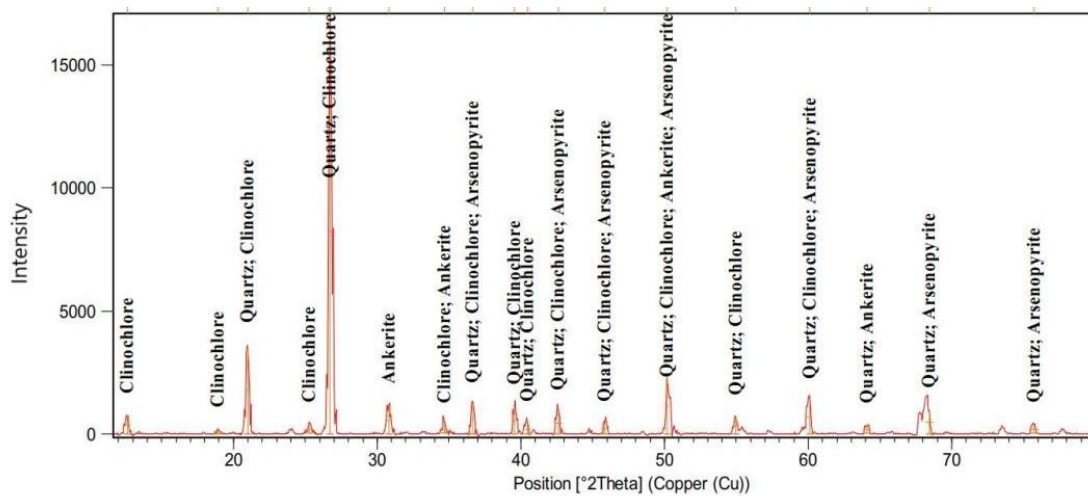
شکل ۱۸- (a) تصویر میکروسکوپی XPL نمونه فرادیواره معدن روی وسرب انگوران نشان‌دهنده دولومیت‌های ریز بلور، متراکم و بی‌شکل (Dol)، گالن (Gn) همراه با اسفالریت (Sp)، (b) تصویر میکروسکوپی XPL نمونه شیست فرودیواره، حاوی آنکریت (Ank) همراه با پیریت (Py-I) و کلریت (Chl)، (c) تصویر میکروسکوپی XPL مربوط به کوارتز- موسکوئیت شیست نشان‌دهنده بلورهای کوارتز که حجم اصلی را شامل شده است و بلورهای موسکوئیت، همراه با سریسیت (Ser) به صورت نواری به رنگ سبز و پیریت (Py) به صورت دانه پراکنده و رگچه‌ای در شیست‌های فرودیواره و (d) تصویر میکروسکوپی XPL نشان‌دهنده سریسیت (Ser) به صورت رگه‌ای همراه با کوارتز (Qz) به صورت دانه پراکنده و بلورهای کلسیت (Cal) با ماکل تیغه‌ای. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans 2010).

Fig. 18. (a) Photomicrograph of the Angouran hanging-wall sample showing fine-grained, dense and amorphous dolomites (Dol), galena (Gn) with sphalerite (Sp), XPL, (b) Footwall schist sample containing Ankite with pyrite (Py-I) and chlorite (Chl), XPL, (c) Microscopic image of quartz-muscovite-schist showing quartz (Qz) crystals as the main mineral and muscovite (Ms) crystals, along with sericite as a green band and pyrite (Py) as disseminated grains and veinlets in footwall schist, XPL, and (d) Sericite (Ser) in the form of veinlets with quartz (Qz) as scattered grains and calcite crystals (Cal) with the blade twinning, XPL. Minerals abbreviations after Whitney and Evans (2010).



شکل ۱۹- نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) در نمونه شیست فرودیواره.

Fig. 19. Results of X-ray diffraction (XRD) analysis in a footwall schist sample.



شکل ۲۰- نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) در نمونه شیست فرودپیواره حاوی کلریت.

Fig. 20. Results of X-ray diffraction (XRD) analysis in a footwall schist sample, containing chlorite.

۶- نتیجه گیری

روش‌ها علاوه بر بارزسازی کلریت و سریسیت، مناطق تحت پوشش این کانی‌ها را نیز به درستی مشخص نمودند. روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) اگرچه برای بارزسازی کانی‌های کلریت و دولومیت و موسکویت مناسب بوده و دقت کلی قابل قبولی دارد، ولی در مورد کلریت بهترین دقت و برای دولومیت کمترین دقت را دربرداشت. دقت کلی این روش معادل ۹۳/۷۵٪ و ضریب کاپا ۰/۹۰۱۶ محاسبه شد که نشان‌دهنده قابل قبول بودن این طبقه بندی است.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که دگرسانی کلریتی به صورت رگچه‌های باریک در واحد فرودپیواره شیست انگوران حضور دارد و محدود به شیست‌های فرودپیواره است. موسکویت (سریسیت) بیشتر در واحدهای آتشفشانی نئوژن بارزسازی شد، در حالیکه دولومیت در واحد مرمر انگوران و تا حدودی در سنگ آهک سازند قم به سن نئوژن یافت می‌شود. درستی نتایج این مطالعه با بازدید صحرایی و آنالیز XRD و محاسبات عددی مورد تایید قرار گرفت.

در این مطالعه با استفاده از پردازش تصویر ماهواره‌ای ASTER، به بررسی روند کانی‌های شاخص دگرسانی شامل موسکویت (سریسیت)، کلریت و دولومیت در کانسار روی و سرب انگوران پرداخته شد. پس از انجام عملیات پیش‌پردازش، پردازش و بارزسازی کانی‌های شاخص با استفاده از روش‌های نسبت بانندی (BR)، ترکیب رنگی کاذب (FCC)، آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت‌یافته موضوعی (FPCS) و روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) بر روی تصاویر ماهواره‌ای ASTER اجرا شد.

از میان روش‌های مورد استفاده، بهترین نتایج که به خوبی نشان‌دهنده طیف کانی‌های مورد نظر در محدوده کانسار روی و سرب انگوران است، روش نسبت بانندی (BR) برای کانی دولومیت دقیق‌ترین نتایج را داشت. عملکرد آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت‌یافته موضوعی (FPCS) برای کانی‌های کلریت و سریسیت به خوبی روش نسبت بانندی بود، در حالی که در مورد کانی دولومیت دقت کمتری داشت. این

References

- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L., Bachaoui, E.M., 2016. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas. *Journal of Applied Remote Sensing* 10(1), 016005. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016005>
- Akbari, Z., Rasa, I., Mohajjel, M., Adabi, M.H., Yarmohammadi, A., 2015. Hydrothermal alteration identification of ahangan deposit, west of Iran using ASTER spectral analysis. *International Geoinformatics Research and Development Journal* 6(1), 28–42.

- Amer, R.M., Kusky, T.M., Ghulam, A., 2010. New methods of processing ASTER data for lithological mapping: Examples from Fawakhir, Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 56(2–3), 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004>
- Babakhani, A.R., Ghalamghash, J. 1990. Geological map of Iran, 1: 100,000 series sheet Takht-e-Soleiman. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Bishop, J.L., Perry, K.A., Darby Dyar, M., Bristow, T.F., Blake, D.F., Brown, A.J., Peel, S.E., 2013. Coordinated spectral and XRD analyses of magnesite-nontronite-forsterite mixtures and implications for carbonates on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets* 118(4), 635–650. <https://doi.org/10.1002/jgre.20066>
- Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., Schneider, J., Allen, C.R., Moore, F., 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran. *Mineralium Deposita* 42 (8), 799–820. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0144-4>
- Bonyadi, Z., 2020. Detection of zinc-lead mineralization and associated alteration in the Mehdiabad deposit, Yazd province, using ASTER and Landsat 8-OLI satellite images. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 28(3), 697–710. <https://doi.org/10.29252/ijcm.28.3.697>
- Bonyadi, Z., Daryanavard, E., 2020. Comparison of ASTER and Landsat-8 OLI data for detecting iron occurrences and alteration in Shahrak area, Kurdistan Province. *Journal of Advanced Applied Geology* 10(2), 154–166. <https://doi.org/10.22055/AAG.2019.29579.1986>
- Chavez, P.S., Berlin, G.L., Sowers, L.B., 1982. Statistical method for selecting landsat MSS. *Journal of Applied Photographic Engineering* 8(1), 23–30.
- Crosta, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C., 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing* 24(21), 4233–4240. <https://doi.org/10.1080/0143116031000152291>
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 32(1–2), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004>
- Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Murchie, S.L., Poulet, F., Bishop, J.L., Brown, A.J., Calvin, W.M., Clark, R.N., Des Marais, D.J., Milliken, R.E., 2008. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars. *Science* 322(5909), 1828–1832. <https://doi.org/10.1126/science.1164759>
- Estornell, J., Martí-Gavilá, J.M., Sebastiá, M.T., Mengual, J., 2013. Principal component analysis applied to remote sensing. *Modelling in Science Education and Learning* 6, 83–89. <https://doi.org/10.4995/msel.2013.1905>
- Fitzgerald, R.W., Lees, B.G., 1994. Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 47(3), 362–368. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90103-1)
- Fujisada, H., Ono, A., 1994. Observational performance of ASTER instrument on EOS-AM1 spacecraft. *Advances in Space Research* 14 (3), 147–150. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90207-0](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90207-0)
- Fu, W., Yang, M.L., Guo, Q.H., Huang, X.R., Chai, M.C., Guo, W., 2013. Micro-Structure of a Special Sericite-Jade: A Preliminary Study Using XRD and SEM Analysis. *Advanced Materials Research* 690, 503–506. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.503>
- Gabr, S.S., Hassan, S.M., Sadek, M.F., 2015. Prospecting for new gold-bearing alteration zones at El-Hoteib area, South Eastern Desert, Egypt, using remote sensing data analysis. *Ore Geology Reviews* 71, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.021>
- Gilg, H.A., Boni M., Balassone, G., Allen, C.R., Banks, D., Moore, F., 2006. Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. *Mineralium Deposita* 31(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0035-5>
- Girouard, G., Bannari, A., El Harti, A., Desrochers, A., 2004. Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: Comparative study between QuickBird and Landsat-TM. XXth ISPRS Congress, Geo-Imagery Bridging Continents, Istanbul, Turkey, 12, 23.
- Hassan, S.M., Ramadan, T.M., 2015. Mapping of the late Neoproterozoic Basement rocks and detection of the gold-bearing alteration zones at Abu Marawat-Semna area, Eastern Desert, Egypt using remote sensing data. *Arabian Journal of Geosciences* 8(7), 4641–4656. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1562>

- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Huntington, J.F., 2001. Geologic and alteration mapping at Mt Fitton, South Australia, using ASTER satellite-borne data. IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217) 2, 724–726. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.976615>
- Honarmand, M., Ranjbar, H., Shahabpour J., 2012. Application of principal component analysis and spectral angle mapper in the mapping of hydrothermal alteration in the Jebal-Barez Area, Southeastern Iran. *Resource Geology* 62(2), 119-139. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00184.x>
- Jensen, J.R., 1996. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. (Issue Ed. 2). Prentice-Hall Inc.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B, Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., Goetz, A.F.H. 1993. The spectral image processing system (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics 44 (2-3) 192-201. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
- Kruse, F.A., 1988. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern grapevine mountains, Nevada, and California. *Remote Sensing of Environment* 24(1), 31-51. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)
- Lewis, H.G., Brown, M., 2001. A generalized confusion matrix for assessing area estimates from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 22(16), 3223–3235. <https://doi.org/10.1080/01431160152558332>
- Loughlin, W. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(9), 1163-1169.
- Najafzadeh, A., Khalili Mobarhan, Sh., Ahmadian, J., 2011. *Economic Geology*. Tehran: University Press, 78.
- Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14(3-4), 157-183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Salem, S.M., Sharkawi, M. El., El-Alfy, Z., Soliman, N.M., Ahmed, S.E., 2016. Exploration of gold occurrences in alteration zones at Dungash District, Southeastern Desert of Egypt using ASTER data and geochemical analyses. *Journal of African Earth Sciences* 117, 389-400. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.01.030>
- Sepahi, A., Shahbazi, H., Siebel, W., Ranin, A., 2014. Geochronology of plutonic rocks from the Sanandaj-Sirjan zone, Iran and new zircon and titanite U-Th-Pb ages for granitoids from the Marivan pluton. *Geochronometria* 41 (3), 207-215. <https://doi.org/10.2478/s13386-013-0156-z>
- Shahbazi, H., Siebel, W., Ghorbani, M., Pourmoafee, M., Sepahi, A.A., Vousoughi Abedini, M., Shang, C.K. 2015. The Almogholagh pluton, Sanandaj-Sirjan zone, Iran: geochemistry, U-(Th)-Pb titanite geochronology and implications for its tectonic evolution. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen. Journal of Mineralogy and Geochemistry* 192(1), 85-99. <https://doi.org/10.1127/njma/2014/0273>
- Sharafi, A., Ardejani, F.D., Rezaei, B., Sargheini, J., 2018. Environmental geochemistry of near-neutral waters and mineralogy of zinc and lead at the Angouran non-sulphide zinc mine, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 186, 77-93. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.020>
- Sisodia, P.S., Tiwari, V., Kumar, A., 2014. Analysis of supervised maximum likelihood classification for remote sensing image. *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909319>
- Tangestani, M., Moore, F., 2000. Iron oxide and hydroxyl enhancement using the Crosta method: a case study from the Zagros Belt, Fars Province, Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2(2), 140-146. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85007-2](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85007-2)
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist* 95 (1), 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Yang, M., Zhang, Z., Yao, A., Zhou, M., Ren, G., 2018. Application of remotely sensed data in detecting zinc-lead bearing mineralized zones in Westkunlun Huoshaoyun area. *Journal of Physics: Conference Series* 1053, 012107. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1053/1/012107>