



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2026.1175



Evaluation of the Capability of ASTER Thermal Infrared (TIR) Bands for Mapping Siliceous Outcrops Associated with Low-Sulfidation Gold Mineralization: A Case Study of the Kahyaz Prospect, Northwest of Nain, Isfahan Province, Iran

Mahin Rostami¹ , Mohammad Maanijou^{2*}

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 24 May 2026
Revised: 27 July 2026
Accepted: 08 August 2026

Keywords

Thermal bands
ASTER
Remote sensing
low sulfidation
Kahyaz

*Corresponding author

Mohammad Maanijou
✉ mohammad@basu.ac.ir

ABSTRACT

Multispectral remote sensing satellite imagery has become a cost-effective and accessible tool for the preliminary identification of hydrothermal alteration zones and mineral exploration. In this study, the capability of the thermal infrared (TIR) bands of the ASTER sensor was evaluated for mapping siliceous and carbonate outcrops associated with low-sulfidation epithermal gold mineralization in the Kahyaz prospect, northwest of Nain, within the Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. To achieve this objective, band ratios, Principal Component Analysis (PCA), False Color Composites (FCC), and Decorrelation Stretch (DS) were applied to enhance siliceous and carbonate units at the regional scale. Subsequently, quartz and calcite distribution maps were generated using the Spectral Angle Mapper (SAM) and Matched Filtering (MF) classification algorithms and validated through field investigations, petrographic observations, and X-ray diffraction (XRD) analyses. The results indicated that the second principal component (PC2) showed the highest correspondence with the 14/12 band ratio and effectively enhanced the spectral contrast between siliceous and carbonate units. In addition, the SAM and MF algorithms successfully delineated the spatial distribution of quartz and calcite with high classification accuracy. The overall accuracy ranged from 89% to 97.5% for the MF method and from 95% to 98% for the SAM method, while the kappa coefficient ranged from 0.6 to 0.7. The results demonstrate that, despite the spatial resolution limitations of the ASTER TIR bands, they provide a reliable means for mapping siliceous and carbonate outcrops associated with low-sulfidation gold mineralization when combined with appropriate image processing techniques and field validation. Therefore, ASTER TIR data can serve as an effective tool for reconnaissance-stage mineral exploration.

How to cite this article

Rostami, M. and Maanijou, M., ?. Evaluation of the Capability of ASTER Thermal Infrared (TIR) Bands for Mapping Siliceous Outcrops Associated with Low-Sulfidation Gold Mineralization: A Case Study of the Kahyaz Prospect, Northwest of Nain, Isfahan Province, Iran . Journal of Economic Geology, ?(?): ?–?. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1175>



©2026 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.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The economic deposits such as gold and copper usually are related to the hydrothermal altered rocks (John et al., 2010). Recognition of the different types of alteration, as an evident signature of probable mineralization, is important during the ore mineral exploration (Dilles and Einaudi, 1992). Detection the hydrothermal alteration zones by using the remote sensing data effectively and widely has used for the ore deposit prospecting, including the epithermal gold deposits (Bolouki et al., 2020). Remote sensing data are useable for the recognition and detection of the gold-silver epithermal deposits exposures, because the host rocks of this type of deposits have the mineral assemblages, which show the diagnostic absorption features at visible-near infrared (VNIR), short wave infrared (SWIR), and thermal infrared (TIR) regions of the electromagnetic spectrum (John et al., 2018).

Kahyaz prospect is located in the central part of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA). It is a low sulfidation epithermal gold deposit, which characterized with colloform and crustiform quartz veins, quartz-calcite-adularia alteration minerals, low content of sulfides, high content of silver (Electrum).

Materials and Methods

In this study used the thermal bands (TIR) of an ASTER L1T scene

AST_L1T_00309192002072139_20150425042239_103813), which it covered the Kahyaz prospect and several kilometers of its around. This image scene, which is free cloud and vegetation, acquired on September 19, 2002. Data processing did by Envi version 5.6 software. During the data pre-processing, at first the IARR atmospheric correction was done, and then resampled to 15 m resolution. Afterward, the methods such as band ration, false color composite, decorrelation stretch, matched filtering, and spectral angle mapper used for image processing.

Results

14/12 band ratio was used to map the quartz-rich area. In the resulted image, quartz bearing area are mainly white in color. The carbonates-rich area was detected by 13/14 band ratio, and showed with white in color. These

minerals are predominantly found in the Quaternary alluvial terraces, and also in the sandstone and conglomerate associated to tuffaceous volcanic rocks, andesitic lava and diabase. FCC method was used to quartz and carbonate detection. ASTER bands of 14, 12, and 10 set in R (Red), G (Green), B (Blue) channels, respectively. The rocks containing the quartz are mainly pale-pink and dark in color, while carbonate-bearing rocks exhibit white color. Based on MF and SAM methods, quartz coincides with the alluvial unit, dacitic-rhyodacitic rocks, andesi-basalt and andesitic lava. Carbonate overlaps with the quartz in most place and predominantly associated with the Quaternary sediment unit, and also andesitic rocks, and subvolcanic dacitic-rhyodacitic rocks.

Discussion

Using RGB band ratios of 12/14, 14/13, and 10/12, siliceous zones were identified in pink, orange, and yellow, while carbonate areas appeared in green color. The SAM and MF algorithms effectively revealed the distribution of lithological units and outcrops associated with quartz and carbonate. For example, the accuracy of the SAM method for siliceous and carbonate samples was 99.10% and 98.98%, respectively. The calcite mineral map derived from the MF algorithm is mostly consistent with Quaternary sedimentary units, whereas the map produced by the SAM algorithm is mainly associated with andesitic volcanic, pyroclastic, and dacitic-rhyodacitic subvolcanic units. The quartz mineral map obtained from the MF algorithm generally corresponds to dacitic-rhyodacitic, andesitic, and Quaternary sedimentary deposits, while the quartz mineral map derived from the SAM algorithm is related to dacitic-rhyodacitic subvolcanic units, andesitic units, tuff, sandstone, and conglomerate. Based on the validation carried out, there is good agreement among the remote sensing results, petrographic studies, and XRD analysis. The main mineralized vein in the Kahyaz prospect, composed of quartz-calcite, overlaps with the silica and carbonate signatures identified in the TIR band images. The results obtained from the SAM and MF methods are consistent with the XRD analysis performed on most pure calcite and quartz samples, with kappa coefficient values ranging from 0.6 to 0.7. These results, in turn, demonstrate the reliability of the remote sensing-derived maps in this study.



ارزیابی قابلیت بلندهای محدوده مادون قرمز حرارتی سنجنده ASTER در شناسایی رخنمون‌های سیلیسی مرتبط با کانه‌زایی طلای سولفیداسیون پایین، اندیس کهیاز، شمال غرب ناین، استان اصفهان

مهین رستمی^۱، محمد معانی جو^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
تصویرهای ماهواره‌ای چندطیفی سنجنش از دور به عنوان ابزاری کم هزینه و در دسترس، نقشی مهم در شناسایی اولیه زون‌های دگرسانی و اکتشاف ذخایر معدنی ایفا می‌کنند. در این پژوهش، قابلیت باندهای مادون قرمز حرارتی سنجنده رادیومتر پیشرفته فضا برد نشر و بازتاب حرارتی برای شناسایی رخنمون‌های سیلیسی و کربناته مرتبط با کانه‌زایی طلای اپی ترمال سولفیداسیون پایین در اندیس کهیاز، شمال غرب ناین، واقع در زون ماگمایی ارومیه-دختر، ارزیابی شد. برای این منظور، از روش‌های نسبت بلندی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ترکیب رنگی کاذب و کشش ناهمبسته برای بارزسازی واحدهای سیلیسی و کربناته در مقیاس ناحیه‌ای استفاده شد. سپس، نقشه‌های توزیع کوارتز و کلسیت با بهره‌گیری از الگوریتم‌های نقشه‌بردار زاویه طیفی و پالایش تطبیقی تهیه و با بررسی‌های میدانی، بررسی‌های سنگ‌نگاری و نتایج پراش پرتو ایکس اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان داد که مؤلفه دوم تحلیل بیشترین تطابق را با نتایج نسبت باندی ۱۴/۱۲ داشته و در افزایش کنتراست بین واحدهای سیلیسی و کربناته مؤثر است. همچنین، طبقه‌بندی SAM و MF توانستند توزیع کوارتز و کلسیت را با دقت قابل قبولی آشکار سازند؛ به طوری که دقت کلی برای روش MF بین ۸۹ تا ۹۷/۵ درصد و برای روش SAM بین ۹۵ تا ۹۸ درصد و ضریب کاپا بین ۰/۶ تا ۰/۷ به دست آمد. بلندهای حرارتی سنجنده ASTER، با وجود محدودیت قدرت تفکیک مکانی، در صورت استفاده از روش‌های پردازش مناسب و اعتبارسنجی میدانی، قابلیت مناسبی برای شناسایی رخنمون‌های سیلیسی و کربناته مرتبط با کانه‌زایی طلای سولفیداسیون پایین دارند و می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر در مراحل اولیه اکتشاف معدنی مورد استفاده قرار گیرند.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۷
	واژه‌های کلیدی باندهای حرارتی ASTER سنجنش از دور سولفیداسیون پایین کهیاز
	نویسنده مسئول محمد معانی جو mohammad@basu.ac.ir

استناد به این مقاله

رستمی، مهین و معانی جو، محمد، ۹. ارزیابی قابلیت باندهای محدوده مادون قرمز حرارتی سنجنده ASTER در شناسایی رخنمون‌های سیلیسی مرتبط با کانه‌زایی طلای سولفیداسیون پایین، اندیس کهیاز، شمال غرب ناین، استان اصفهان. زمین‌شناسی اقتصادی، ۹(۴): ۴-۹. <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1175>

مقدمه

کانسارهای اقتصادی مثل طلا و مس معمولاً مرتبط با سنگ‌های دگرسان شده گرمایی هستند (John et al., 2010). شناسایی انواع دگرسانی‌های مختلف به عنوان نشانه‌ای آشکار از رخداد کانه‌زایی احتمالی در اکتشاف مواد معدنی اهمیت دارد (Dilles and Einaudi, 1992). شناسایی زون‌های دگرسانی گرمایی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور به طور مؤثر و گسترده برای پی‌جویی انواع کانسارها، از جمله کانسارهای طلا به کار رفته است (Maanijou et al., 2015; Carrino et al., 2015; Haghighi, 2018; Bolouki et al., 2020). استفاده از داده‌های سنجنش دور برای تشخیص و شناسایی رخنمون کانسارهای طلا-نقره سولفیداسیون پایین مفید است؛ زیرا سنگ‌های میزبان این نوع ذخایر دارای کانی‌های گرمایی هستند که ویژگی‌های جذب مشخصی در محدوده‌های مرئی-مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز موج کوتاه، و فروسرخ حرارتی طیف الکترومغناطیس نشان می‌دهند (John et al., 2018).

تابش سنج بازتابی و گسیلش گرمایی فضابرد پیشرفته، یک سنجنده چندطیفی ۱۴ باندهای است که توسط ماهواره ترا در سال ۱۹۹۰ به فضا پرتاب شد. سنجنده ASTER محدوده بین ۰/۵۲ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر طیف الکترومغناطیس را پوشش می‌دهد و دارای ۳ باند در محدوده VNIR (باندهای ۱ تا ۳) با رزولوشن ۱۵ متر، ۶ باند در محدوده SWIR (باندهای ۴ تا ۹) با رزولوشن ۳۰ متر و ۵ باند (باندهای ۱۰ تا ۱۴) در محدوده TIR (۱۲ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر) با رزولوشن ۹۰ متر است (Abrams et al., 2002; Baldridge et al., 2009; Abrams and Yamaguchi, 2019). سه باند VNIR اطلاعات مهمی برای تشخیص اکسید و هیدروکسیدهای آهن (برای مثال، هماتیت، گوتیت، جاروسیت، و لیمونیت) دارد (Rowan et al., 1986)؛ در حالی که باندهای SWIR قابلیت شناسایی بسیاری از کانی‌های گروه هیدروکسیل دار (-OH) مثل کانی‌های گروه Al-OH (کائولینیت، آلونیت، ایلیت، مسکویت، مونت‌موریلونیت)، Mg-OH (اپیدوت و کلریت)، Si-OH (اوپال و کلسدونیت)، CO₃ (کلسیت و دولومیت) را دارد (Hunt, 1977; Abrams and Hook, 1995). باندهای

محدوده حرارتی ASTER برای تشخیص کوارتز بی‌آب مهم است؛ زیرا این کانی در محدوده‌های VNIR (۰/۵۲ تا ۰/۸۶ میکرومتر) و SWIR (۱/۶ تا ۲/۴۳ میکرومتر) ویژگی طیفی مشخصی ندارد (Salisbury and D'Aria 1992; Rowan and Mars, 2003; Rockwell and Hofstra, 2008). کانی‌های کربناته مثل کلسیت و دولومیت، علاوه بر ویژگی‌های طیفی مشخصی که در محدوده SWIR دارند، در محدوده حرارتی نیز قابل تشخیص هستند (Ninomiya et al., 2005). علاوه بر این، کانی‌های مافیک و فلسیک نیز با استفاده باندهای TIR قابل تفکیک هستند (Rajendran et al., 2011).

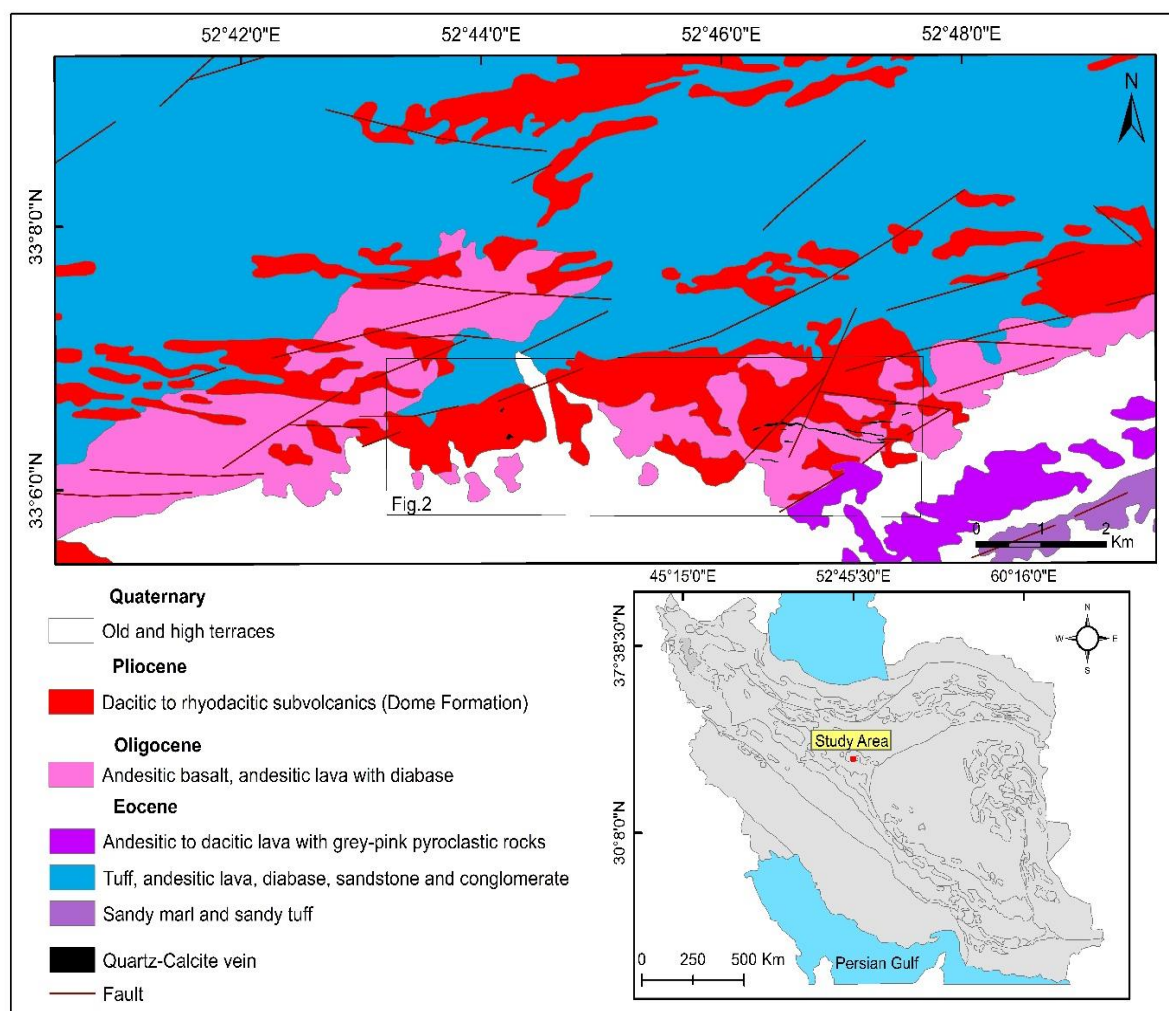
زون ماگمایی ارومیه-دختر، به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی و فلززایی تیان (Richards et al., 2012)، میزبان کانسارهای مهم پورفیری و اپی‌ترمال از جمله سرچشمه، سونگون، و ساری‌گونای است که در مرحله نهایی فرورانش اقیلنوس نئوتتیس و در طی برخورد صفحه‌های عربی-ایران تشکیل شده‌اند (Richards et al., 2006; Shafiei et al., 2009; Aghazadeh, et al., 2015; Maanijou et al., 2022). اندیس کهیاز یکی از رخداد‌های کانه‌زایی طلای سولفیداسیون پایین است که در بخش مرکزی UDMA قرار گرفته است. برخی از بررسی‌ها، در این محدوده از پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای برای شناسایی زون‌های دگرسانی استفاده کرده‌اند (Khademian et al., 2024). شناسایی کوارتز به این دلیل اهمیت دارد که بسیاری از کانسارهای پورفیری در سنگ‌های آذرین غنی از سیلیس یافت می‌شوند. همچنین، سیلیسی شدن یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کانه‌زایی گرمایی است (Rockwell and Hofstra, 2008). به همین دلیل، تشخیص مناطق غنی از سیلیس می‌تواند در اکتشاف ذخایر جدید پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا راه‌گشا باشد. در این محدوده مطالعاتی، تاکنون از بلندهای محدوده حرارتی برای نقشه‌برداری دگرسانی استفاده نشده است. از این رو، به دلیل اهمیت کانه‌زایی طلای سولفیداسیون پایین در میزبان رگه کوارتز-ذکربنات در این محدوده، این پژوهش سعی می‌کند تا از تصاویرهای ASTER برای تهیه نقشه توزیع سیلیس-کربنات برای اکتشاف ذخایر جدید سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا و پورفیری در مقیاس ناحیه‌ای

استفاده کند. بنابراین هدف از این مقاله، ارزیابی قابلیت باندهای TIR برای شناسایی رخنمون‌های سیلیسی و کربناتی مرتبط با سامانه سولفیداسیون پایین است.

موقعیت زمین‌شناسی ناحیه‌ای

کمان ماگمایی سنوزوئیک UDMA در نتیجه هم‌گرایی بین صفحه‌های عربستان و اوراسیا در امتداد کمربند کوه‌زایی زاگرس به وجود آمده است (Omrani et al., 2008; Agard et al., 2011).

سنگ‌های آتشفشانی انوسن، بیشترین حجم توالی سنگ‌شناسی UDMA را تشکیل می‌دهند (Shahabpour, 2005). در مقابل، سنگ‌های نفوذی اغلب در الیگوسن-میوسن تشکیل شده‌اند (Berberian and Berberian, 1981). در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زواره (شکل ۱)، بخش وسیعی از محدوده توسط توالی ضخیمی از توف‌ها، گدازه‌های آندزیتی، دیاباز، ماسه‌سنگ و کنگلومرا به صورت یک مجموعه غیرقابل تفکیک پوشیده شده است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی در مقیاس ناحیه‌ای (براساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زواره، با تغییر از بهرودی و فونودی (Bahroudi and Fonoudi, 2005). موقعیت اندیس کهیاز به صورت مستطیل مشکی نمایش داده شده و در شکل ۲ آورده شده است.

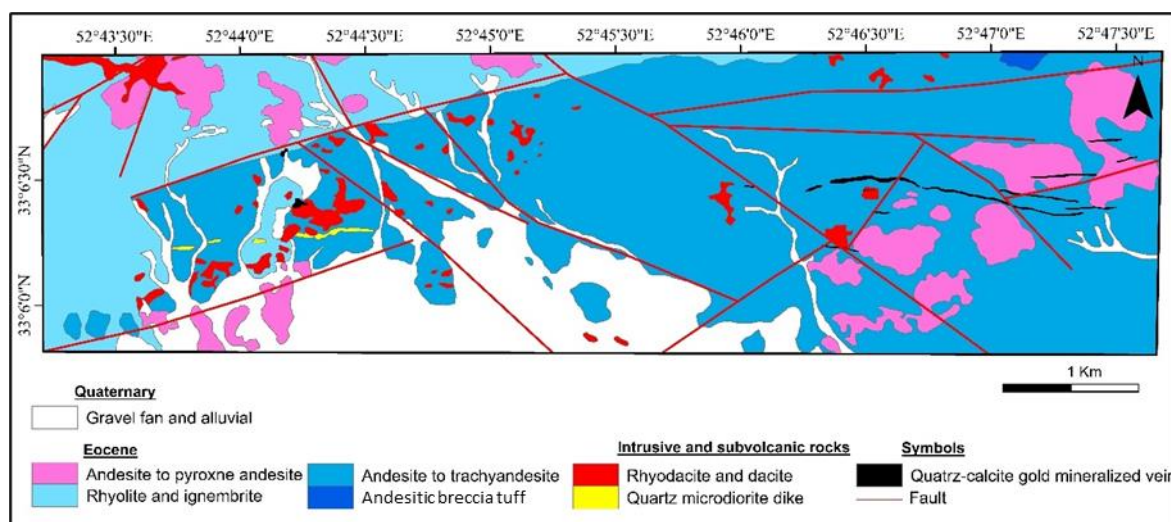
Fig. 1. Geological map of the study area on regional scale (based on 1:100000 Zavareh map, modified after Bahroudi and Fonoudi, 2005). The location of the Kahyaz prospect showed as a black rectangle, and drawn in Figure 2.

خاکستری روشن دیده می‌شوند. واحدهای یاد شده سنگ‌های آتشفشانی را به صورت دایک و یا توده‌های گنبدی کوچک قطع می‌کنند. رنگ هوازده این سنگ‌ها از خاکستری روشن تا قهوه‌ای روشن تغییر می‌کند. اندازه دانه این سنگ‌ها بسیار متنوع بوده و از نظر بافتی نیز از انواع پورفیری تا به طور کامل ریزدانه تغییر می‌کنند. علاوه بر این، می‌توان بخش‌های به شدت دگرسان شده‌ای را مشاهده کرد که بر روی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جای می‌گیرند.

زمین‌شناسی اندیس کهیاز

اندیس طلای سولفیداسیون پایین کهیاز در ۱۶ کیلومتری شمال غرب بخش نیستانک و ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان ناین قرار دارد. در محدوده کهیاز عمده رخنمون‌های سنگی شامل نهشته آتشفشانی و آذرآواری و همچنین رخنمون‌هایی از توده‌های نفوذی هستند (شکل ۲).

این واحدهای سنگی توسط آپوفیزهای فراوانی از گنبد‌های نیمه آتشفشانی داسیتی و تراکی آندزیتی پلیوسن قطع شده است. واحد گدازه و توف نیز مربوط به ائوسن است و از آندزیت و داسیت تشکیل شده است. در برخی نقاط، میان لایه‌هایی از واحدهای پیروکلاستیک به رنگ خاکستری و صورتی نیز در آن تشکیل شده است. این واحد در محدوده مورد بررسی در بخش جنوب شرقی برون زد دارد. واحد آندزیتی-بازالتی به سن الیگوسن دارای گسترش محدودی است و بر روی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جای می‌گیرد. ترکیب کلی این واحد، آندزیت بازالتی تا بازالت و دارای رنگ هوازده قهوه‌ای تا سیاه رنگ است. در بخش‌های زیادی از محدوده مورد بررسی، برون‌زدهای گسترده‌ای از بخش‌های نیمه عمیق و قطع کننده و نیز توده‌های گنبدی شکل کوچک دیده می‌شود که ترکیب آنها داسیتی تا ریوداسیتی است. روند عمومی رخنمون این واحدها تقریباً شرقی-غربی بوده و به گونه‌ای مشخص از شرق به غرب ورقه بر حجم آنها افزوده می‌شود. این واحدهای روشن رنگ، با رنگ‌های سفید تا کرم و



شکل ۲. نقشه ۱:۲۵۰۰۰ اندیس کهیاز (Barati and Aghazadeh, 2019)

Fig. 2. The geological map on the 1:25000 scale of the Kahyaz prospect (provided by Barati and Aghazadeh, 2019)

قطع کرده‌اند. قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی موجود در محدوده را نهشته‌های سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و تراکی آندزیتی تشکیل

نهشته‌های آتشفشانی و آذرآواری به ائوسن و الیگوسن تا پلیوسن تعلق دارند و توده‌های بعد از الیگوسن و دایک‌های تأخیری، این نهشته‌ها را

می‌دهند که در بخش‌های مختلف محدوده به صورت وسیع رخنمون دارند. این نهشته‌ها در بخش‌های مرکزی و جنوبی و شرقی محدوده با رخنمون وسیع دیده می‌شوند. رخنمون‌های این واحد در برگرنده رخنمون‌های ستیغ‌ساز در بخش‌های مرکزی محدوده هستند. سنگ‌های ریولیتی و ایگنمبریتی ائوسن در بخش‌های شمالی و غربی محدوده رخنمون دارند (شکل ۲). این واحد شامل سنگ‌های آتشفشانی تا آذرآواری با ماهیت ایگنمبریتی است. بخش‌های با ماهیت آذرآواری و جوش‌خورده به صورت میان‌لایه تا لایه‌های گسترده در این واحد دیده می‌شوند. رخنمون کوچکی از سنگ‌های توف برشی و توف در بخش شمالی محدوده مورد بررسی دیده می‌شود (شکل ۲). همبری این واحد با سنگ‌های آندزیتی به صورت زمین‌ساختی است. این واحد در برگرنده سنگ‌های توفی و لایلی توف و توف برشی با ترکیب اغلب آندزیتی است که با رنگ خاکستری روشن و خاکستری دیده می‌شود. این واحد به واسطه ماهیت آذرآواری از سایر واحدها قابل تشخیص است. سنگ‌های آندزی بازالت الیگوسن در بخش‌های مختلف محدوده با دگرشیبی بر روی نهشته‌های ائوسن قرار دارند. توده‌های نیمه عمیق داسیتی تا ریوداسیتی و دایک‌ها، نهشته‌های ائوسن را قطع کرده‌اند و در بخش‌های مرکزی، شمالی و شرقی محدوده مشاهده می‌شوند. همچنین، دایک‌هایی با ترکیب مافیک (میکرودیوریتی) و روند شرقی-غربی تا شمال-شرق-جنوب‌غرب در بخش‌هایی از محدوده مورد بررسی تشکیل شده‌اند.

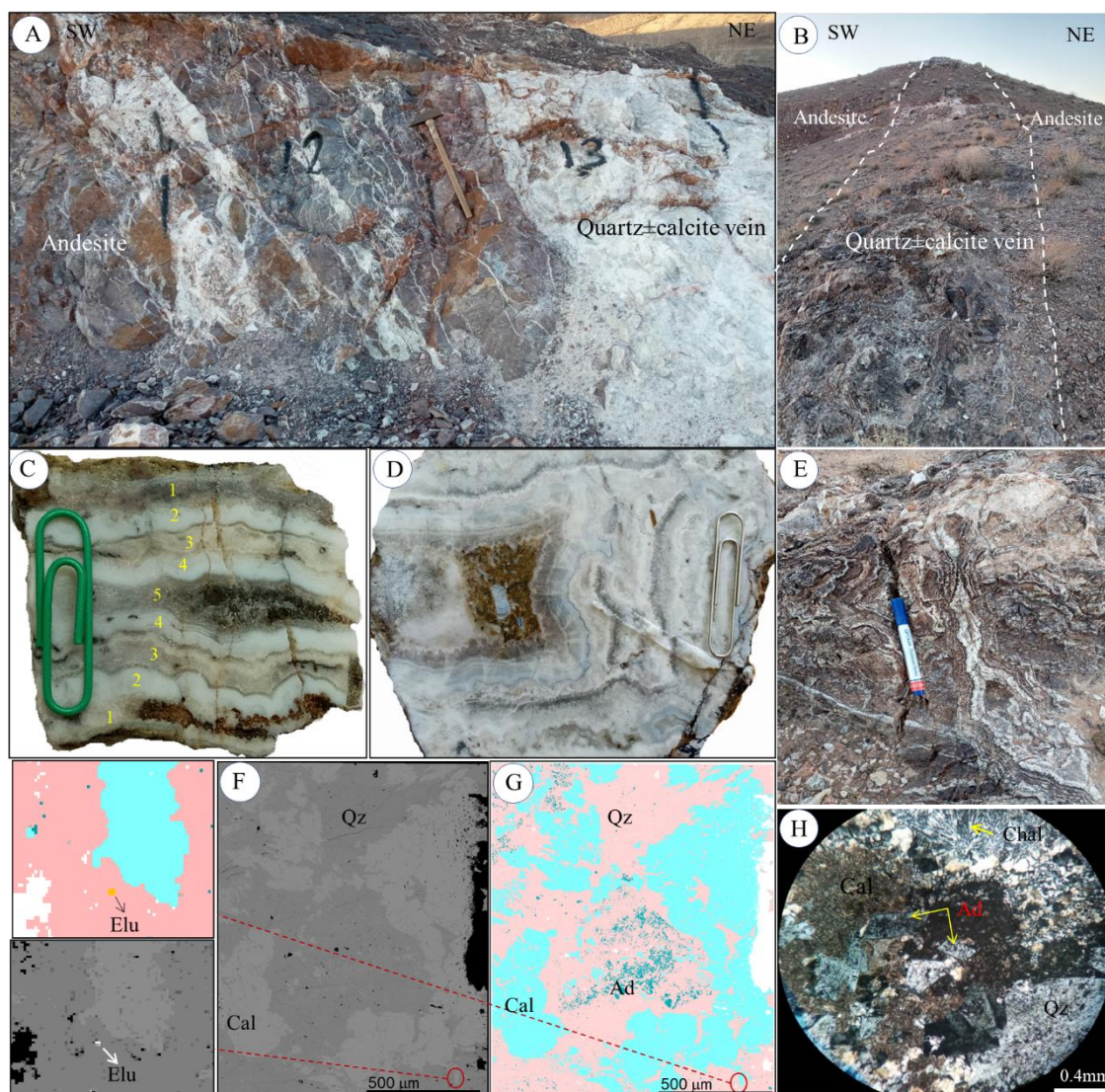
کانه‌زایی طلا در رگه‌های سیلیسی با طول ۲ کیلومتر، ضخامت ۵ تا ۲۵ متر، شیب تقریباً قائم، و با راستای تقریبی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی رخ داده است (شکل ۳-A و B). بیشترین عیار طلا به میزان ۵ گرم در تن و میانگین حدود ۱/۱ گرم در تن به دست آمده است. فراوان‌ترین کانی سولفیدی، پیریت است. کانه‌زایی طلا به صورت الکتروم (آلیاژ طلا با بیش از ۲۰ درصد وزنی نقره) در میزان کوارتز تشکیل شده است. کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی باطله دارای بافت‌های متنوع از جمله کلوفرم قشری است (شکل ۳-C، D و E). هم‌زمان با کاهش عیار در بخش‌های شرقی رگه، همراهی کلسیت با کوارتز بیشتر می‌شود. کلسیت به عنوان دومین کانی باطله فراوان در رگه، با بافت‌های توده‌ای و

تیغه‌ای مشاهده می‌شود. در بخش‌های پرعیار رگه، آدولاریا نیز همراه با کوارتز و کلسیت تشکیل شده است (شکل ۳-F، G و H). حضور آدولاریا در ارتباط با رخداد جوشش و به دنبال آن کاهش اسیدیته سیال و در ادامه، ته‌نشست طلا تفسیر می‌شود (Simmons and Browne, 2000). ویژگی‌هایی از قبیل حضور بافت‌های کلوفرم و قشری، دگرسانی کوارتز-کلسیت-آدولاریا (شکل ۱۲-D)، رخداد طلا به صورت الکتروم از جمله ویژگی‌هایی است که سبب می‌شود، کانه‌زایی در اندیس طلای کهیاز به نوع سولفیداسیون پایین نسبت داده شود. دگرسانی سیلیسی در بخش‌های مختلف به دلیل نفوذ توده‌های ریوداسیتی در داخل نهشته‌های آندزیتی ائوسن همراه با دگرسانی آرژلیک توسعه یافته است. این دگرسانی در این بخش‌ها محدود به اطراف توده‌های نفوذی است. همچنین دگرسانی سیلیسی در حاشیه رگه‌های سیلیسی در سنگ‌های میزان توسعه یافته است که بسته به عرض رگه از یک تا چندین متر در حاشیه رگه دیده می‌شوند. از مرکز سامانه رگه‌ای به طرف حاشیه، از شدت فرایند سیلیسی شدن کاسته می‌شود.

مواد و روش‌ها

در این بررسی، از باندهای مادون قرمز حرارتی یک صحنه L1T سنجنده ASTER استفاده شد که اندیس کهیاز و چند کیلومتری مناطق اطراف آن را پوشش می‌دهد. این صحنه تصویر که بدون ابر و دارای پوشش گیاهی ناچیز است، در تاریخ ۱۹ سپتامبر سال ۲۰۰۲ تهیه شده و از وب‌سایت Earthdata قابل بارگیری است. ویژگی‌های طیفی باندهای TIR در جدول ۱ آورده شده است.

برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از پردازش تصویر ماهواره‌ای، ۲۰ نمونه سنگ دگرسان شده با هاون آگاتی پودر شد و حدود ۵ گرم از هر نمونه برای انجام تجزیه و تحلیل XRD به آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا ارسال شد. همچنین برای بررسی‌های کانی‌شناسی، تعدادی مقطع نازک در دانشگاه بوعلی سینا تهیه شد و با استفاده از میکروسکوپ ZISSE مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳. تصاویرهای صحرایی، نمونه دستی و میکروسکوپی از رگه دارای کانه‌زایی طلا در اندیس کهیاز: A: رگه کوارتز-کلسیت در میزبان آندزیت، B: نمایی از واحد آندزیتی و رگه کوارتز-کلسیت، C و D: بافت قشری در نمونه دستی کوارتز، E: نمایی از بافت کلوفرم در کوارتز، F: تصویر میکروسکوپی الکترون برگشتی از کوارتز، کلسیت و آدولاریا. الکتروم به صورت ذره سفید رنگ در میزبان کوارتز تشکیل شده است، G: تصویر QEMSCAN از همان نمونه F که کوارتز، کلسیت و آدولاریا را نشان می‌دهد. الکتروم به صورت ذره زرد رنگ مشاهده می‌شود و H: تصویر میکروسکوپ نور عبوری از کوارتز، کلسدون، کلسیت و آدولاریا منشوری شکل. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Elu: الکتروم، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Ad: آدولاریا، Chal: کلسدون).

Fig. 3. Field photographs, hand specimen, and microscopic images of the gold-bearing vein from the Kahyaz prospect. A: Quartz-calcite vein hosted by andesite, B: View of the andesitic unit and the quartz-calcite vein, C: and D: Crustiform texture in the quartz hand specimen, E: View of the colloform texture in quartz; F: Backscattered electron image of quartz, calcite, and adularia. Electrum occurs as a white grain hosted within quartz, G: QEMSCAN image of the same sample shown in F, illustrating quartz, calcite, and adularia. Electrum is observed as a yellow grain, and H: Transmitted light photomicrograph of quartz, chalcedony, calcite, and prismatic adularia. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Elu: electrum, Qz: quartz, Cal: calcite, Ad: adularia, Chal: chalcedony).

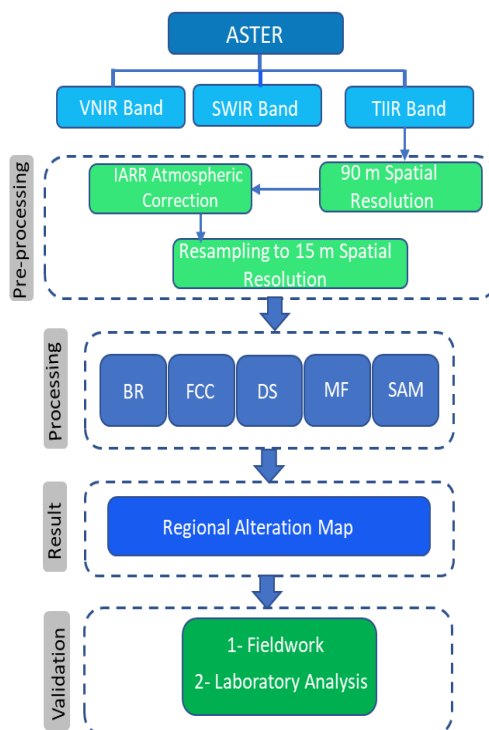
جدول ۱. ویژگی‌های طیفی باندهای محدوده حرارتی سنجنده ASTER در کهیاز (Rockwell and Hofstra, 2008)

Table 1. Spectral characteristics of the thermal bands ASTER sensor in the Kahyaz (Rockwell and Hofstra, 2008)

ASTER band	Central wavelength (μm)	Band width (μm)
10	8.291	0.344
11	8.634	0.347
12	9.075	0.361
13	10.657	0.667
14	11.318	0.593

از نرم‌افزارهای X Powder، Envi نسخه ۵/۶ و ArcGIS نسخه ۱۰/۲ به ترتیب برای تحلیل نتایج تجزیه و تحلیل XRD، پردازش تصویر ASTER، و رسم نقشه زمین‌شناسی استفاده شد. علاوه بر این، کانی‌های مرجع کتابخانه طیفی دانشگاه جان هاپکینز برای اعمال روش‌های SAM و MF استفاده شد. روش‌شناسی مورد استفاده در این بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. ابتدا پیش‌پردازش لازم بر روی تصویر انجام شد.

برای بررسی کانی‌شناسی و بافتی، ۵ نمونه با استفاده از دستگاه FEI QEMSCAN® Quanta 650F در دانشکده علوم زمین، دانشگاه ژنو سوئیس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این دستگاه مجهز به دو آشکارساز Bruker QUANTAX طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس انرژی عناصر سبک است. تجزیه و تحلیل در شرایط خلأ بالا، ولتاژ ۲۵ کیلوولت (kV) و جریان ۱۰ نانوآمپر (nA) بر روی مقاطع نازک- صیقلی با پوشش کربنی انجام شد.



شکل ۴. نمودار روش‌شناسی که برای منطقه کهیاز استفاده شده است.

Fig. 4. A methodological flowchart applied the Kahyaz area.

در طول موج‌های سبز و آبی به تصویر درآمده‌اند، به ترتیب در کانال‌های سبز و آبی قرار خواهند گرفت؛ در حالی که، در تصویر رنگی کاذب، تصویرها با طول موج‌های مختلف در کانال‌های قرمز، سبز و آبی قرار می‌گیرند (Beiranvand Pour et al., 2023). تصویرهای دیجیتال اغلب به صورت سه رنگ اصلی به نام **قرمز، سبز و آبی** یا RGB نمایش داده می‌شوند (Di Tommaso and Rubinstein, 2007).

کشش ناهمبسته: با به کارگیری این روش، همبستگی بالا در تصویرهای سنجنده‌های سنجش از دور چندطیفی حذف می‌شود. در واقع با حذف همبستگی در تصویرهای ترکیب رنگی، اختلاف و تفاوت بین طیف‌های مختلف آشکار شده و قابلیت تفسیر تصویرها افزایش می‌یابد (Gillespie et al., 1986; Harman, 2005).

برش چگالی: روش برش چگالی نوعی از طبقه‌بندی نظارت‌شده است که تن خاکستری یک تصویر تک باندهای را به تعدادی بازه چگالی با دامنه خاصی از مقادیر پیکسلی تبدیل می‌کند. به هر دامنه‌ای از مقادیر پیکسلی، رنگ‌های مختلف اختصاص داده می‌شود تا تحلیل تصویر راحت‌تر انجام شود.

نقشه‌بردار زاویه طیفی: در روش SAM طیف حاصل از یک پیکسل با طیف استاندارد حاصل از کتابخانه طیفی یا طیف حاصل از یک تصویر مقایسه می‌شود. شباهت بین دو طیف از طریق زاویه طیفی ارزیابی می‌شود (Beiranvand Pour et al., 2023).

پالایش تطبیقی: روش پالایش تطبیقی یا MF، فراوانی اعضای انتهایی که توسط کاربر با استفاده از عدم اختلاط طیفی تعیین شده است را محاسبه می‌کند. این روش، با افزایش پاسخ طیفی عضو نهایی معلوم و کاهش پاسخ ترکیب پس‌زمینه نامعلوم، علائم (پیکسل‌ها) معلوم را "تطبیق" می‌دهد (Beiranvand Pour et al., 2023). اگرچه الگوریتم MF اغلب برای داده‌های فراطیفی طراحی شده است، در این پژوهش از آن فقط به عنوان یک ابزار تکمیلی برای ارزیابی قابلیت تفکیک باندهای حرارتی ASTER استفاده شد و نتایج آن با سایر روش‌های پردازش تصویر و داده‌های میدانی اعتبارسنجی شد.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی: یکی از روش‌های کاهش ابعاد تصویر است.

سپس، نقشه کانی‌شناسی با استفاده از روش‌های پردازش تصویر مثل **نسبت باندهای**، ترکیب رنگی کاذب، کشش ناهمبسته، پالایش تطبیقی، نقشه‌بردار زاویه طیفی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی تهیه شد. نتایج به دست آمده از سنجش از دور با استفاده از بازدید صحرایی، سنگ‌نگاری و نتایج تجزیه و تحلیل XRD صحت‌سنجی شد. هر مرحله در ادامه توضیح داده شده است.

پیش‌پردازش داده‌های محدود TIR

در این بررسی، از روش **بازتاب نسبی میانگین داخلی** برای نرمال‌سازی طیفی نسبی استفاده شد که با تقسیم طیف هر پیکسل بر **میانگین طیف مرجع**، تأثیرهای مشترک ناشی از روشنایی، شرایط تصویربرداری و بخشی از تأثیرهای جوی را کاهش می‌دهد. این روش از طریق محاسبه یک میانگین طیفی برای کل صحنه تصویر و استفاده از آن به عنوان طیف مرجع انجام می‌شود. بازتاب ظاهری هر پیکسل تصویر از طریق تقسیم کردن طیف مرجع به طیف مربوط به هر پیکسل محاسبه می‌شود (Research Systems, Inc., 2001). بعد از اعمال تصحیح اتمسفری، داده‌های TIR سنجنده ASTER که دارای رزولوشن ۹۰ متر هستند، به رزولوشن ۱۵ متر بازنویسی شدند.

الگوریتم‌های پردازش تصویر

نسبت باندهای: در تصویرهای چندطیفی، روش نسبت باندهای با کاهش اثر نور خورشید و توپوگرافی، اطلاعات طیفی را تقویت کرده و به تشخیص پدیده‌های زمین‌شناسی کمک می‌کند (Beiranvand Pour et al., 2023). نسبت باندهای از حاصل تقسیم دو باند با بیشترین بازتاب و بیشترین جذب از همان پیکسل تصویر است (Gupta et al., 2013).

ترکیب رنگی کاذب: تصویر رنگی به دو روش ایجاد می‌شوند: ۱- ترکیب رنگی واقعی و ۲- ترکیب رنگی کاذب یا دروغین. در ترکیب رنگی واقعی، رنگ‌ها و طول موج‌ها با هم منطبقند، یعنی باندهای که در طول موج قرمز به تصویر درآمده است، در کانال قرمز قرار می‌گیرد. برای باندهای سبز و آبی هم به همین صورت است؛ یعنی باندهایی که

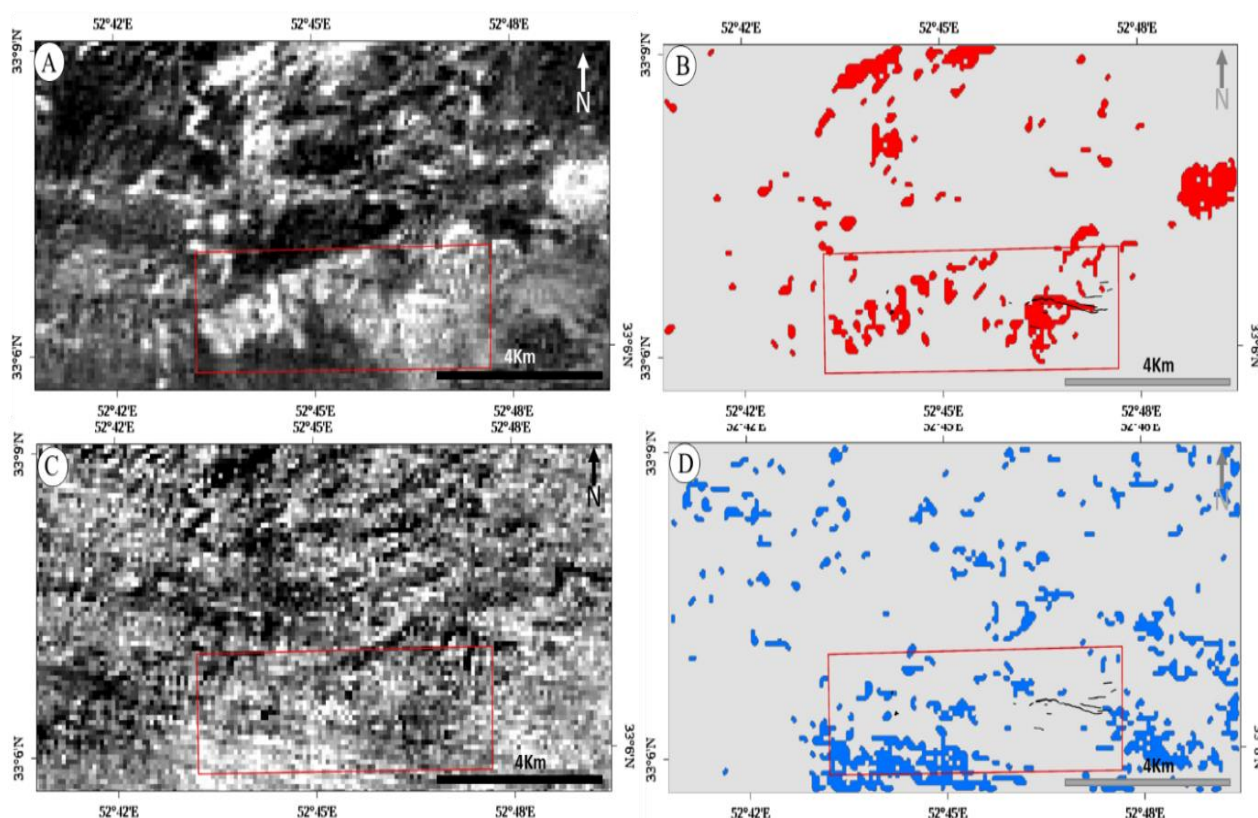
توزیع واحدهای غنی از کوارتز در بخش جنوبی بیشتر از نیمه شمالی محدوده مورد بررسی است. حضور سیلیس در این بخش‌ها در ارتباط با واحدهای نیمه‌عمیق داسیتی تا ریوداسیتی، توف، سیلت و کنگلومراست. **شکل ۵- C و D**، توزیع واحدهای کربناته را نشان می‌دهد که از طریق نسبت بانندی ۱۳/۱۴ شناسایی شدند. شدت توزیع این کانی‌ها در بخش جنوبی و در واحدهای رسوبی کواترنری و همچنین در ماسه‌سنگ و کنگلومرای همراه با سنگ‌های آتشفشانی توف، لاوای آندزیتی و دیاباز بیشتر است.

این روش، بلندهای طیفی همبسته را به مجموعه‌ای جدید از متغیرهای عمود بر هم که مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند، تبدیل کرده است و از این طریق به کاهش حجم داده منجر می‌شود. این مؤلفه‌ها از واریانس بیشتر به واریانس کمتر مرتب می‌شوند (Jolliffe, 2002).

نتایج

نقشه‌برداری کانی‌شناسی با استفاده از داده TIR

از نسبت بانندی ۱۴/۱۲ (Rowan et al., 2006) برای تشخیص توزیع مناطق غنی از سیلیس استفاده شد. **شکل ۵- A و B**، نشان می‌دهد که

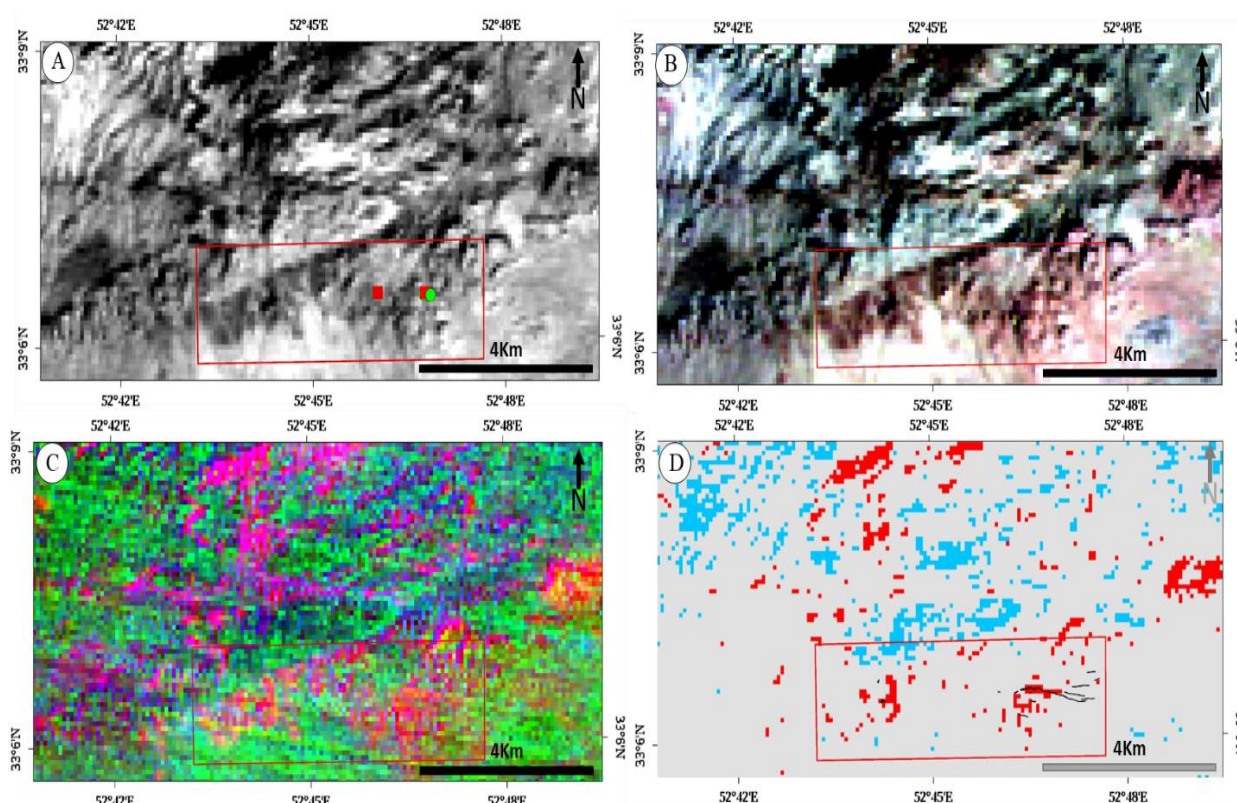


شکل ۵. نقشه کانی‌شناسی که با استفاده از روش نسبت بانندی در مقیاس ناحیه‌ای به دست آمده است. A: تصویر خاکستری از نسبت بانندی ۱۴/۱۲ که پیکسل‌های سفید رنگ، توزیع سیلیس را نشان می‌دهند، B: نواحی قرمز رنگ، نتایج نسبت بانندی ۱۴/۱۲ را نشان می‌دهد، C: تصویر خاکستری از نسبت بانندی ۱۳/۱۴ که پیکسل‌های سفید رنگ، کربنات را نشان می‌دهد و D: نواحی آبی رنگ، نتایج نسبت بانندی ۱۳/۱۴ را نشان می‌دهد (مستطیل قرمز رنگ، محدوده اندیس کهیاز را نشان می‌دهد. خطوط سیاه رنگ در داخل مستطیل، رگه‌های کوارتز- کلسیت هستند).

Fig. 5. Mineralogical map resulted of the applying the band ratio method at the regional scale. A: grey picture of 14/12 band ration, in which the white pixels show the silica distribution, B: red colored area shows the 14/12 band ratio results, C: grey picture of 13/14 band ratio, in which the white pixels exhibit the carbonate distribution, and D: blue colored area indicates the 13/14 band ratio results (The red-colored rectangle indicated the Kahyaz prospect area. Black lines in the rectangle are quartz-calcite veins).

کربنات دارای رنگ سفید هستند. شکل ۶- C و D، نتایج ترکیب رنگی کاذب نسبت باندهای ۱۴/۱۲، ۱۳/۱۴ و ۱۲/۱۰ را به صورت RGB نشان می‌دهد. واحدهای سنگی حاوی سیلیس به رنگ‌های صورتی، نارنجی و زرد مشخص شده‌اند. واحدهای کربناته با رنگ سبز ظاهر شده‌اند.

موقعیت نقاط کنترل زمینی در شکل ۶- A نشان داده شده است. از روش FCC برای تفکیک واحدهای غنی از سیلیس و غنی از کربنات استفاده شد. شکل ۶- B، ترکیب رنگی کاذب باندهای ۱۴ (قرمز)، ۱۲ (سبز) و ۱۰ (آبی) را نشان می‌دهد. در این شکل، سنگ‌های حاوی سیلیس به رنگ صورتی کم‌رنگ و سیاه مشخص می‌شوند. واحدهای غنی از



شکل ۶. A: موقعیت نقاط کنترل بر روی تصویر TIR سنجنده ASTER (دایره سبز، نقاط کنترلی برای نمونه‌های حاوی کلسیت و مربع قرمز، نقاط کنترلی برای نمونه‌های حاوی کوارتز هستند)، B: تصویر رنگی کاذب (FCC) از باندهای ۱۴، ۱۲ و ۱۰ که به ترتیب در کانال‌های قرمز (R)، سبز (G)، و آبی (B) قرار گرفته‌اند، C: تصویر FCC از نسبت باندهای ۱۴/۱۲، ۱۳/۱۴ و ۱۲/۱۰ که به ترتیب در کانال‌های قرمز، سبز و آبی قرار گرفته‌اند و D: نقشه توزیع سیلیس و کربنات (مستطیل قرمز رنگ، محدوده اندیس کهایز را نشان می‌دهد).

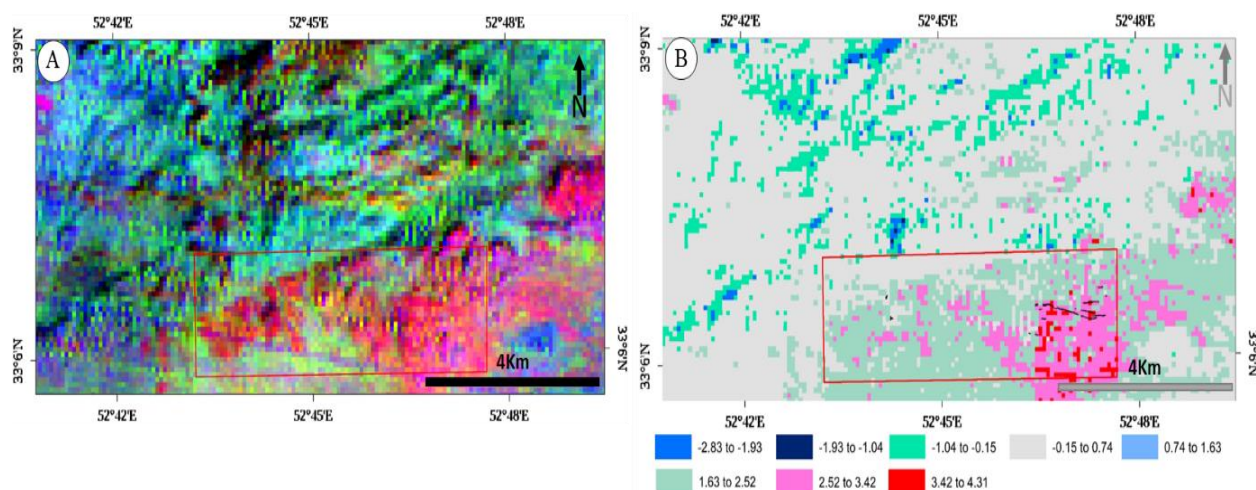
Fig. 6. A: Location of the control points on the ASTER TIR image (green circles indicate control points for calcite-bearing samples, and red squares indicate control points for quartz-bearing samples), B: False Color Composite (FCC) image of ASTER bands 14, 12, and 10 assigned to the red (R), green (G), and blue (B) channels, respectively, C: FCC image of the band ratios 12/14, 14/13, and 10/12 assigned to the red, green, and blue channels, respectively, and D: Distribution map of silica and carbonate. (The red rectangle indicates the location of the Kahyaz prospect).

A. در این تصویر، نواحی غنی از کوارتز به رنگ صورتی و زرد مشخص شدند. نواحی غنی از کربنات با رنگ سیاه در بالای تصویر

تصویر کشش ناهمبسته با قرار دادن باند ۱۴ ASTER در کانال قرمز، باند ۱۲ در کانال سبز و باند ۱۰ در کانال آبی به دست آمد (شکل ۷-۷)

سیلیس با طیف رنگی قرمز و صورتی مشخص شده است (شکل ۷-ب).

مشخص شده است (شکل ۷-ا). در تصویر حاصل از برش چگالی که با استفاده از ترکیب باندی ۱۴، ۱۲ و ۱۰ به دست آمد، نواحی غنی از



شکل ۷. تصویرها حاصل از روش‌های کَشش ناهمبسته و برش چگالی با استفاده از ترکیب باندی ۱۴، ۱۲ و ۱۰. A: تصویر کَشش ناهمبسته که در آن نواحی با رنگ صورتی و زرد، توزیع سیلیس را نشان می‌دهند. محدوده سیاه رنگ در بالای تصویر، سنگ‌های غنی از کربنات را نشان می‌دهد و B: طبقه‌بندی مقادیر پیکسلی با استفاده از برش چگالی بر روی تصویر حاصل از اعمال ترکیب باندی ۱۴، ۱۲ و ۱۰. محدوده رنگی مربوط به توزیع سیلیس با رنگ قرمز و صورتی نشان داده شده است (مستطیل قرمز رنگ، محدوده اندیس کهیاز را نشان می‌دهد. خطوط سیاه رنگ در داخل مستطیل، رگه‌های کوارتز-کلسیت هستند).

Fig. 7. Photos resulted of decoloration stretch and density slice by using the band composite of 14, 12, and 10. A: decoloration stretch photo, in which pink and yellow colored area show the distribution of silica. Black color area at top of image shows the carbonate-rich rocks, and B: pixel values classification by using the density slice method on the photo resulted of 14, 12, 10 colore composite, that colored ranges related to the silica distribution show with red and pink colores (The red-colored rectangle indicated the Kahyaz prospect area. Black lines in the rectangle are quartz-calcite veins).

ASTER، تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی پنج باند TIR انجام شد. نتایج نشان داد که مؤلفه اول (PC1) حدود ۹۷/۱ درصد از کل واریانس داده‌ها را دربر می‌گیرد و اغلب بیانگر تغییرات کلی نشر حرارتی و روشنایی سطح است (جدول ۲). مؤلفه دوم (PC2) با وجود سهم اندک در واریانس (۱/۴۲ درصد)، به دلیل ضرایب بارگذاری متضاد باندهای ۱۳ و ۱۴ نسبت به باندهای ۱۰ تا ۱۲، بیشترین توان را در افزایش کنتراست بین واحدهای سیلیسی و کربناته نشان داد (شکل ۱۰). با توجه به ضرایب بردار ویژه، مؤلفه دوم (PC2) دارای بارهای مثبت برای باندهای ۱۳ و ۱۴ و بارهای منفی برای باندهای ۱۰ تا ۱۲ است. این الگو

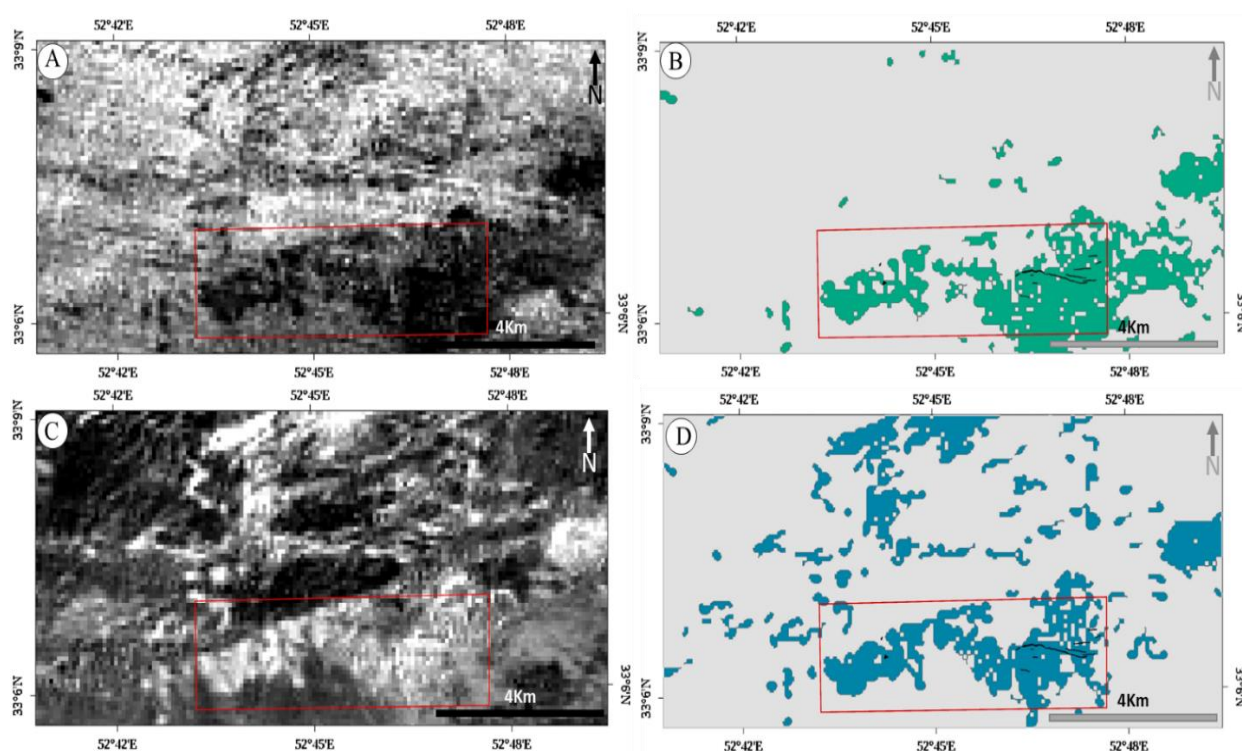
نتایج روش‌های MF و SAM برای کانی کوارتز به ترتیب در شکل ۸-ا و B و شکل ۸-ب و C و D نشان داده شده است. همچنین نتایج روش‌های MF و SAM برای کانی کلسیت به ترتیب در شکل ۹-ا و B شکل ۹-ب و C و D نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کوارتز منطبق با واحدهای آبرفتی، سنگ‌های داسیتی-ریوداسیتی و بازالت آندزیتی و لاوای آندزیتی است. کربنات اغلب در واحدهای رسوبی کواترنری و همچنین در سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و واحدهای نیمه عمیق داسیتی-ریوداسیتی مشاهده می‌شود. برای افزایش کنتراست طیفی و کاهش همبستگی بین باندهای حرارتی

بررسی‌های کانی‌شناسی، و انجام تجزیه و تحلیل XRD در مقیاس محلی تأیید شد. موقعیت نمونه‌ها برای کنترل نتایج به دست آمده از دور سنجی در **شکل ۶-A** نشان داده شده است.

مشاهدات صحرایی: در نقشه ۱:۲۵۰۰۰، کوارتز و کربنات به صورت رگه‌ای تشکیل شده‌اند (**شکل ۳-A** و **B**). رخنمون رگه اصلی در میزبان سنگ‌های آندزیتی تا تراکی آندزیتی تشکیل شده است (**شکل ۳-A**). کوارتز مشاهده شده در واحد داسیتی-ریوداسیتی مربوط به کانی اولیه و تشکیل دهنده سنگ است.

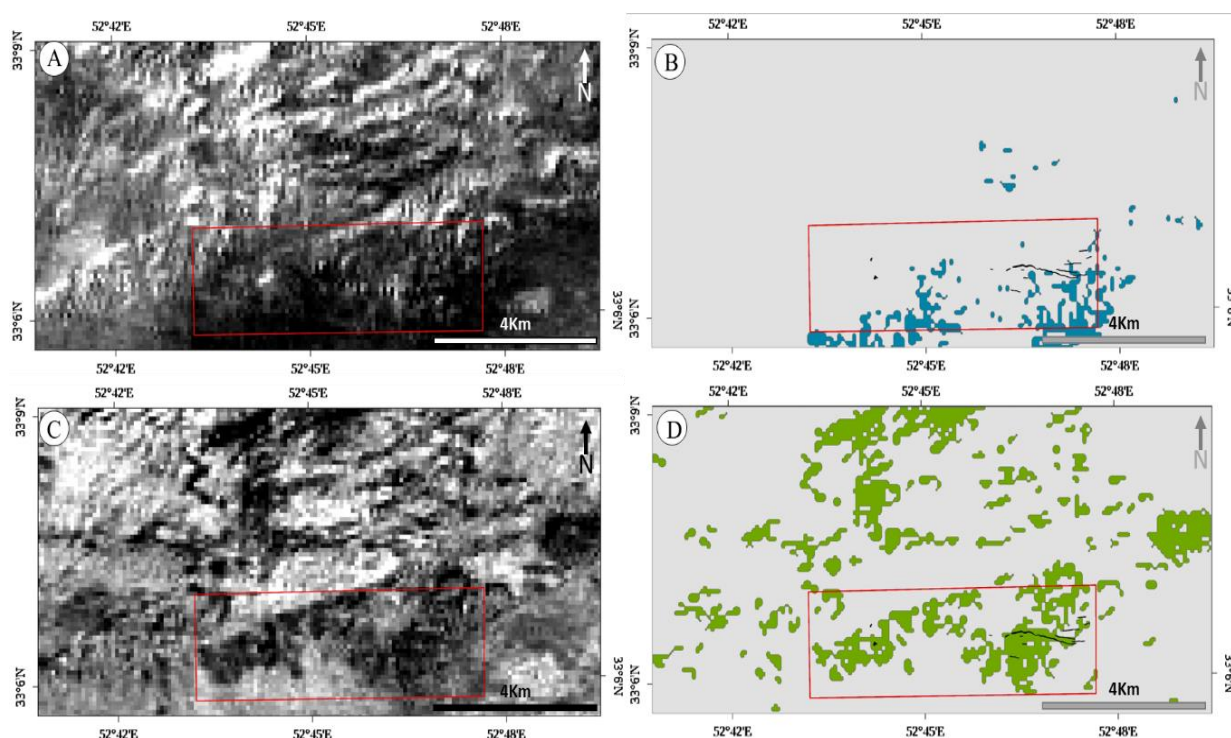
سبب تقویت اختلاف پاسخ طیفی واحدهای غنی از سیلیس شده و نتایج مشابه نسبت باندی ۱۴/۱۲ (**شکل ۵-A** و **B**) ایجاد کرده است. مؤلفه‌های سوم تا پنجم کمتر از یک درصد از واریانس کل را شامل می‌شوند و اغلب بیانگر نویز و تغییرات جزئی طیفی هستند و به همین دلیل در تفسیر زمین‌شناسی مورد استفاده قرار نگرفتند.

بازدید صحرایی، سنگ‌نگاری و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی
حضور کانی‌های دگرسانی کوارتز و کربنات از طریق بازدید صحرایی،



شکل ۸. نتایج الگوریتم‌های MF و SAM که بر روی داده‌های TIR اعمال شده است. A: تصویر حاصل از طبقه‌بندی MF کانی کوارتز از کتابخانه طیفی jhu که نواحی تیره رنگ، توزیع کوارتز را نشان می‌دهد، B: نقشه کانی‌شناسی دارای پیکسل‌هایی که بیشترین انطباق را با نتایج MF نشان می‌دهند، C: **تصویر رول** حاصل از طبقه‌بندی SAM مربوط به کانی کوارتز از کتابخانه طیفی jhu. نواحی سفید رنگ، نقاط دارای کوارتز را نشان می‌دهد و D: نقشه زمین‌شناسی از توزیع پیکسل‌هایی که بیشترین انطباق را با نتایج SAM نشان می‌دهند (مستطیل قرمز رنگ، محدوده اندیس کهیاز را نشان می‌دهد. خطوط سیاه رنگ در داخل مستطیل، رگه‌های کوارتز-دکلست هستند).

Fig. 8. MF and SAM algorithms results applying on the TIR data. A: MF classification of the quartz of jhu spectral library. Dark area shows the quartz distribution, B: mineralogical map in which showed the pixels distribution with maximum matched to MF algorithm, C: SAM classification of quartz related to the jhu spectral library. Light pixels exhibited quartz bearing area, and D: mineralogical map of the pixels which have the maximum matched to SAM classification results (The red-colored rectangle indicated the Kahyaz prospect area. Black lines in the rectangle are quartz-calcite veins).



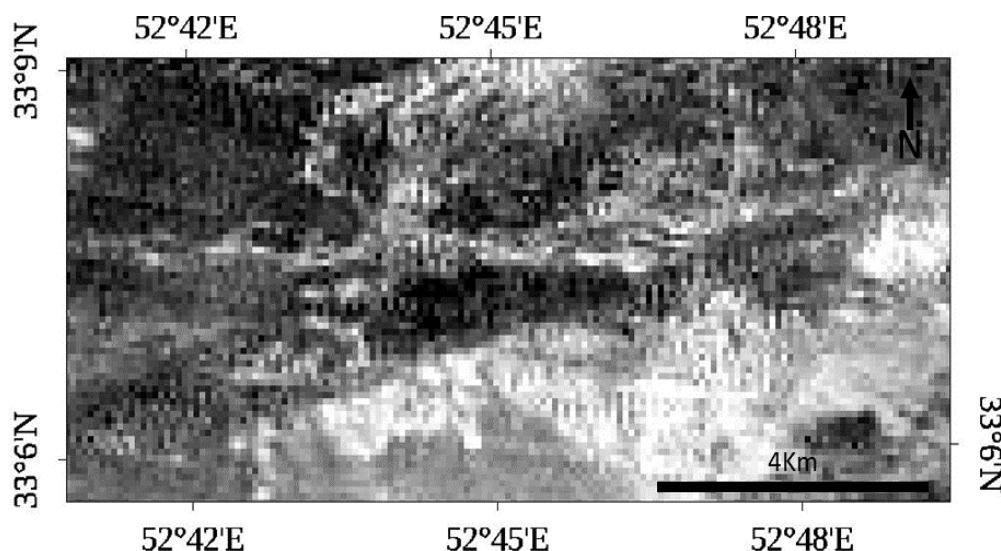
شکل ۹. نتایج روش‌های طبقه‌بندی MF و SAM که بر روی داده‌های TIR اعمال شده است. A: تصویر حاصل از طبقه‌بندی MF کانی کلسیت از کتابخانه طیفی jhu. نواحی تیره رنگ، نقاط دارای کلسیت را نشان می‌دهد، B: نقشه کانی‌شناسی از توزیع پیکسل‌هایی که بیشترین انطباق را با نتایج MF نشان می‌دهند، C: تصویر رول حاصل از طبقه‌بندی SAM مربوط به کانی کلسیت از کتابخانه طیفی jhu که نواحی خاکستری کم‌رنگ، نقاط دارای کلسیت را نشان می‌دهد و D: نقشه کانی‌شناسی از توزیع پیکسل‌هایی که بیشترین انطباق را با نتایج SAM نشان می‌دهند (مستطیل قرمز رنگ، محدوده اندیس کهیاز را نشان می‌دهد. خطوط سیاه رنگ در داخل مستطیل، رگه‌های کوارتز-کلسیت هستند).

Fig. 9. Results of the SAM and MF classification methods applying on the TIR data. A: MF classification result of the calcite from the jhu spectral library. Dark pixels are related to the calcite bearing area, B: mineralogical map of the pixels which have the maximum matching with MF algorithm, C: SAM classification result of the calcite from the jhu spectral library. White pixels are related to the calcite bearing area, and D: mineralogical map of the pixels which have the maximum matching with SAM algorithm (The red-colored rectangle indicated the Kahyaz prospect area. Black lines in the rectangle are quartz-calcite veins).

جدول ۲. ضرایب بردارهای ویژه مؤلفه‌های اصلی حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی پنج باند محدوده حرارتی سنجنده ASTER

Table 2. Eigenvector coefficients for the principal components obtained from Principal Component Analysis (PCA) of the five ASTER thermal infrared (TIR) bands

Principal Component	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14
PC1	-0.498191	-0.479413	-0.463599	-0.405941	-0.377169
PC2	-0.415995	-0.333641	-0.191453	0.573184	0.591977
PC3	0.725044	-0.279280	-0.620029	0.072545	0.081333
PC4	0.229168	-0.751010	0.598685	-0.142319	0.069193
PC5	-0.023387	0.129746	-0.074574	-0.693653	0.704204



شکل ۱۰. تصویر مؤلفه دوم تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PC2) حاصل از پنج باند حرارتی ASTER برای پتانسیل معدنی کهیاز که بیشترین توان را در افزایش کنتراست بین واحدهای سیلیسی و کربناته نشان می‌دهد.

Fig. 10. Second principal component (PC2) image derived from Principal Component Analysis (PCA) of the five ASTER thermal infrared (TIR) bands for the Kahyaz prospect, showing the highest capability for enhancing the spectral contrast between siliceous and carbonate units.

داده مرجع و نتایج طبقه‌بندی را مقایسه می‌کند. در یک ماتریس آشفتگی مؤلفه‌های صحت کلی، دقت تولیدکننده و دقت کاربر باید محاسبه شود. صحت کلی، از حاصل تقسیم تعداد کل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده به تعداد کل پیکسل‌های مورد طبقه‌بندی به دست می‌آید. دقت تولیدکننده هر طبقه، از حاصل تقسیم تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده در هر طبقه بر تعداد پیکسل‌های مرجع مورد استفاده در آن طبقه محاسبه می‌شود. دقت کاربر نیز از حاصل تقسیم تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده بر تعداد کل پیکسل‌های آن طبقه به دست می‌آید (Congalton, 1991).

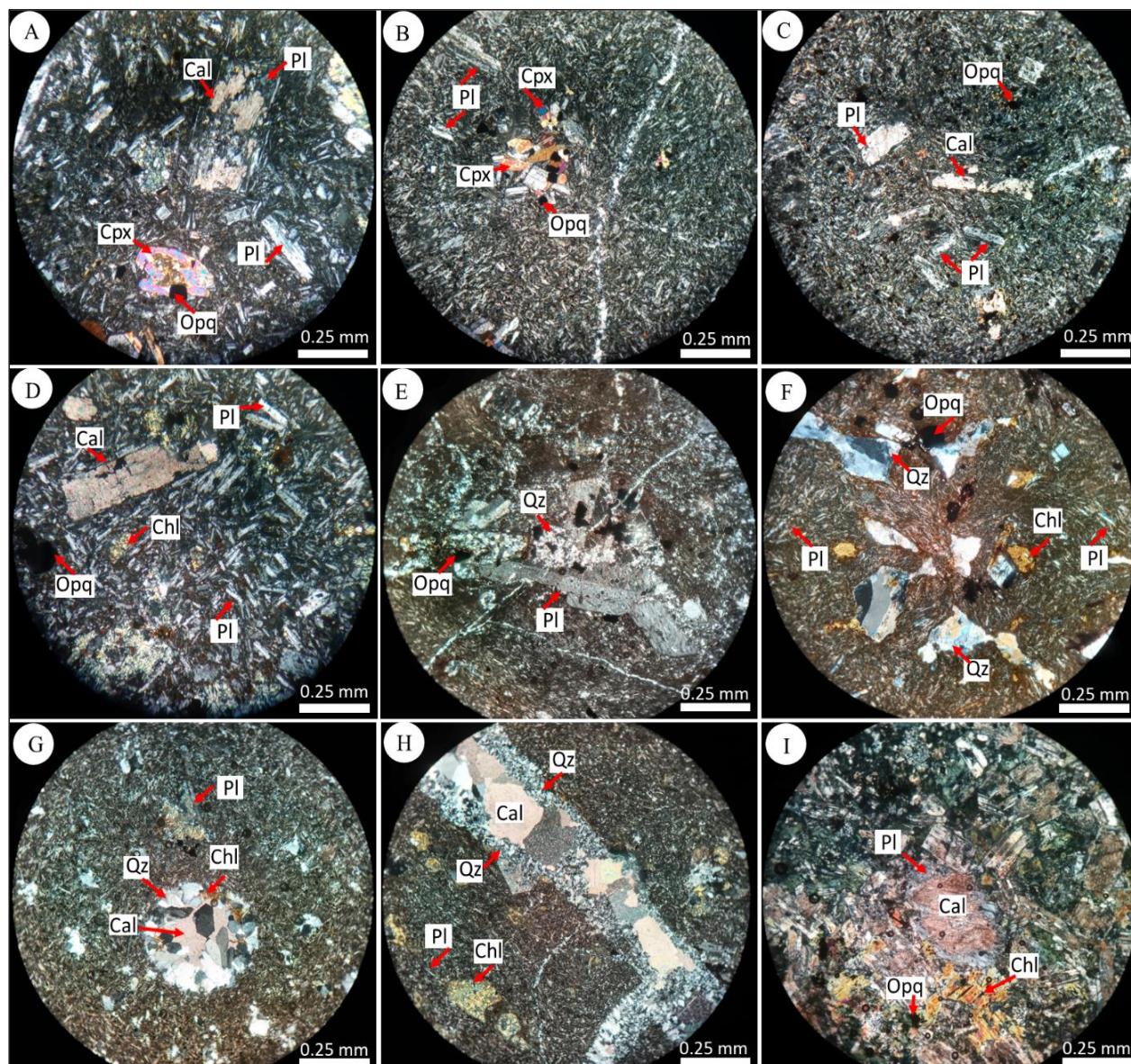
ضریب کاپا در مقایسه با صحت کلی معتبرتر است. ضریب کاپا از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K \text{ coefficient} = 2AB / (C^2 + D^2 + 2 + A + B + (A+B)(C+D))$$
 که A و B تعداد پیکسل‌های با طبقه‌بندی منطبق، C و D تعداد پیکسل‌های با طبقه‌بندی غیر منطبق است (Foody, 2004). میزان اعتبار مقادیر ضریب کاپا در جدول ۳ نشان داده شده است.

بررسی‌های سنگ‌نگاری: رگه دارای کانه‌زایی طلا و نقره علاوه بر کوارتز و کلسیت، از ارتو کلاز (آدولاریا) نیز تشکیل شده است (شکل ۳-H). در سنگ‌های آندزیتی و پیروکسن آندزیتی، کلسیت در نتیجه دگرسانی پلاژیو کلاز تشکیل شده است (شکل ۱۱-A, B, C و D). علاوه بر این، رگچه‌های کلسیت نیز به وفور در این سنگ‌ها یافت می‌شود (شکل ۱۱-E و H). کوارتز در این سنگ‌ها به صورت درشت بلورهای ثانویه و همچنین به صورت رگچه‌ای تشکیل شده است (شکل ۱۱-F, G و H). در دایک‌های میکرودیوریتی، کلسیت در اثر دگرسانی پلاژیو کلاز تشکیل شده است (شکل ۱۱-I).

ارزیابی نتایج پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای

در هنگام بررسی تصاویرهای سنجش از دور، ارزیابی دقت یکی از مهم‌ترین مراحل به شمار می‌رود (Beiranvand Pour et al., 2023). برای ارزیابی نتایج از روش‌های ماتریس آشفتگی و ضریب کاپا استفاده می‌کنند (Foody, 2004). ماتریس آشفتگی رابطه بین



شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپی نور عبوری از تشکیل کلسیت و کوارتز ثانویه در سنگ‌های میزبان محدوده اندیس کهایز. A: تصویری از پیروکسن آندزیت که در آن، پلاژیو کلاز به کلسیت تبدیل شده است، B: تشکیل رگچه کوارتز در پیروکسن آندزیت، C و D: دگرسانی پلاژیو کلاز به کلسیت در آندزیت، E: تشکیل کوارتز ثانویه در آندزیت، F: تشکیل نوع دیگری از کوارتز ثانویه در آندزیت، G: وجود کوارتز و کلسیت ثانویه در حفره‌های موجود در آندزیت، H: رگچه متشکل از کوارتز و کلسیت در آندزیت و I: تبدیل پلاژیو کلاز به کلسیت در میکرودیوریت. علائم اختصاری از ویتی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cpx: کلینوپیکروکسن، Pl: پلاژیو کلاز، Opq: کانی کدر، Cal: کلسیت، Chl: کلریت، Qz: کوارتز).

Fig. 11. transmitted-light microscopic picture of the secondary calcite and quartz formation in the host rocks of the Kahyaz prospect area. A: photo of pyroxene andesite in which plagioclase altered to calcite, B: Quartz vein formation in the pyroxene andesite, C and D: plagioclase alteration to calcite in the andesite, E: Formation of secondary quartz in andesite, F: formation the another the secondary quartz in the andesite, G: existence of the secondary quartz and calcite in the space in andesite, H: veinlet consisting of quartz and calcite in andesite, and I: Altering of plagioclase to calcite in the microdiorite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cpx: clinopyroxene, Pl: plagioclase, Opq: opaque, Cal: calcite, Chl: chlorite, Qz: quartz).

جدول ۳. میزان اعتبار مقادیر ضریب کاپا (Foody, 2004) برای محدوده کهپاز

Table 3. Validity level of the Kappa coefficient for the Kahyaz area

Kappa coefficient value	Validation
Low	0.2>
moderate	0.21-0.40
Moderate-good	0.41-0.60
Good	0.61-0.80
Very-good	0.81-1

سنجش دور برای شناسایی و بررسی اولیه امکان کانه‌زایی اهمیت می‌یابد. در این راستا، قابلیت باندهای محدوده مادون قرمز حرارتی سنجنده ASTER برای بارزسازی رخنمون‌های سیلیسی و کربناته مرتبط با سامانه کانه‌زایی طلای سولفیداسیون پایین مورد ارزیابی قرار گرفت. برای رسیدن به این هدف، با استفاده از روش نسبت بانندی ۱۴/۱۲ و ۱۳/۱۴ به ترتیب نواحی رخنمون‌های با پاسخ طیفی غالب سیلیسی و کربناته بارزسازی شدند. روش ترکیب رنگی کاذب به طور مؤثری برای تفکیک واحدهای سیلیسی و کربناته به کار رفت. در این روش با بهره‌گیری از ویژگی‌های جذب و بازتاب کوارتز و کربنات در محدوده TIR سنجنده ASTER، توزیع واحدهای سنگی مرتبط با این دو کانی بر اساس مشخصات طیفی‌شان تفکیک شد. نسبت بانندی ۱۴/۱۲ که رخنمون‌های دارای پاسخ طیفی غالب سیلیسی را در مقیاس ناحیه‌ای بارزسازی می‌کند، در محدوده مورد بررسی اغلب منطبق با واحدهای داسیتی-ریوداسیتی و آندزیتی‌بازالت است. نقشه کانی‌شناسی حاصل از نسبت بانندی ۱۳/۱۴ در منطقه مورد بررسی، اغلب با افق‌های رسوبی کواترنری و به مقدار کمتر با لاوای آندزیتی تا داسیتی و توف و لاوای آندزیتی هم‌پوشانی دارد. وجود سیلیس و کلسیت (به صورت رگه و رگچه‌های فراوان) در واحد آندزیتی‌بازالتی به دگرسانی سیلیسی و کربناتی، ناشی از نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق داسیتی و ریوداسیتی در واحد آندزیتی‌بازالت است. در این پژوهش از RGB نسبت‌های بانندی ۱۴/۱۲، ۱۳/۱۴ و ۱۲/۱۰ استفاده شد. در تصویر حاصل، نواحی سیلیسی به رنگ صورتی، نارنجی و زرد و مناطق کربناته با رنگ سبز مشخص شدند.

طبقه‌بندی مقایسه نتایج MF و SAM و نتایج تجزیه و تحلیل XRD نمونه‌های کنترلی در جدول ۴ نشان داده شده است. در محدوده مورد بررسی کهپاز، حدود ۲۰ نمونه کنترلی مورد تجزیه و تحلیل XRD قرار گرفت که نتایج ۶ نمونه در شکل ۱۲-A تا F آورده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل XRD به عنوان ورودی الگوریتم‌های MF و SAM استفاده شدند. شکل‌های ۱۳-A تا F و ۱۴-A و B، مربوط به نتایج الگوریتم MF است و شکل ۱۴-C، D، E و F، نتایج الگوریتم SAM را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار دقت کلی و ضریب کاپا برای نمونه‌های کربناته در الگوریتم SAM به ترتیب برابر با ۹۷/۹۸ درصد و ۰/۷۴۶۱ به دست آمد. در روش MF، بیشترین مقدار دقت کلی و ضریب کاپا برای نمونه‌های کربناته به ترتیب مقادیر ۹۴/۵۰ درصد و ۰/۷۰۳۵ را نشان می‌دهد (جدول ۴). بیشترین مقادیر دقت کلی برای نمونه کوارتز در روش‌های SAM و MF به ترتیب ۹۷/۵۰ و ۹۸/۸۸ درصد و ضریب کاپا برای این روش‌ها به ترتیب ۰/۷۳۰۵ و ۰/۷۴۶۶ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش دقت قابل قبولی دارند.

بحث

اندیس طلای سولفیداسیون پایین کهپاز در شمال غرب شهرستان ناین، در بخش مرکزی زون ماگمایی ارومیه-دختر قرار گرفته است. با توجه به فراوانی و رخداد مهم‌ترین کانسارهای پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا در این زون ماگمایی-فلززایی، استفاده از روش‌های

جدول ۴. ماتریس آشفتگی مربوط به روش‌های طبقه‌بندی MF و SAM برای کانی‌های کلسیت و کوآرتز از محدوده کهیاز

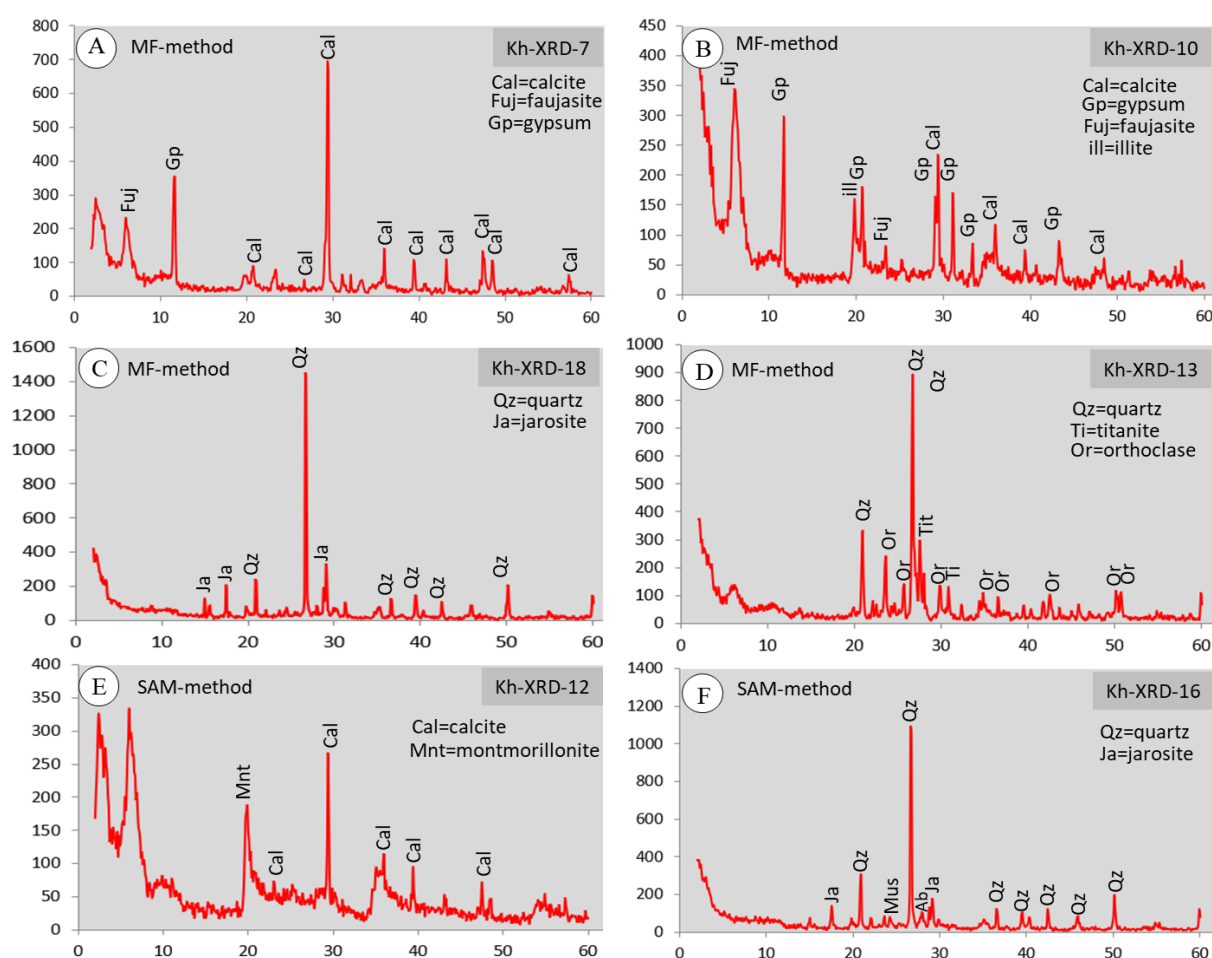
Table 4. Confusion matrix associated with the MF and SAM classification methods of the calcite and quartz minerals from the Kahyaz area

Kh-XRD-07 Latitude: 33° 6' 27.64" N, Longitude: 52° 46' 50.94" E					
MF	MF-Calcite	MF-Kh-XR-07	Total	Producer/Accuracy (%)	User's/Accuracy (%)
Unclassified	0	1068	1068		
MF-Calcite	13739	86	13825	100	99.38
Unclassified	0	1068	1068	48.06	100
Total	13739	2222	15961		
Overall Accuracy = 92.76 % Kappa Coefficient = 0.7					
Kh-XRD-10 Latitude: 33° 6' 28.67" N, Longitude: 52° 46' 46.91" E					
MF	MF-Calcite	MF-Kh-XRD-10	Total	Producer/Accuracy (%)	User's/Accuracy (%)
Unclassified	0	2045	2045		
MF-Calcite	18810	475	19286	100	97.53
Unclassified	0	2045	2045	44.79	100
Total	18810	4566	23376		
Overall Accuracy = 89.21 % Kappa Coefficient = 0.6					
Kh-XRD-18 Latitude: 33° 6' 29.80" N, Longitude: 52° 46' 1.80" E					
MF	MF-Quartz	MF-Kh-XRD-18	Total	Producer/Accuracy (%)	User's/Accuracy (%)
Unclassified	0	963	963		
MF-Quartz	51575	381	51956	100	99.27
Unclassified	0	963	963	41.74	100
Total	51575	2307	53882		
Overall Accuracy = 97.50% Kappa Coefficient = 0.6					
Kh-XRD-13 Latitude: 33° 6' 29.18" N, Longitude: 52° 46' 45.76" E					
MF	MF-Quartz	MF-Kh-XRD-13	Total	Producer/Accuracy (%)	User's/Accuracy (%)
Unclassified	0	1608	1608		
MF-Quartz	51575	65	51640	100	99.87
Unclassified	0	1608	1608	49.01	100
Total	51575	3281	54856		
Overall Accuracy = 96.95% Kappa Coefficient = 0.7					
Kh-XRD-12 Latitude: 33° 6' 28.22" N, Longitude: 52° 46' 44.59" E					
SAM	SAM-Calcite	MF-Kh-XRD-12	Total	Producer/Accuracy (%)	User's/Accuracy (%)
Unclassified	0	2775	2775		
MF-Quartz	57109	345	57454	100	99.40
Unclassified	0	2775	2775	47.07	100
Total	51109	5895	63004		
Overall Accuracy = 95.04% Kappa Coefficient = 0.7					

ادامه جدول ۴. ماتریس آشفتگی مربوط به روش‌های طبقه‌بندی MF و SAM برای کانی‌های کلسیت و کوارتز از محدوده کهپاز

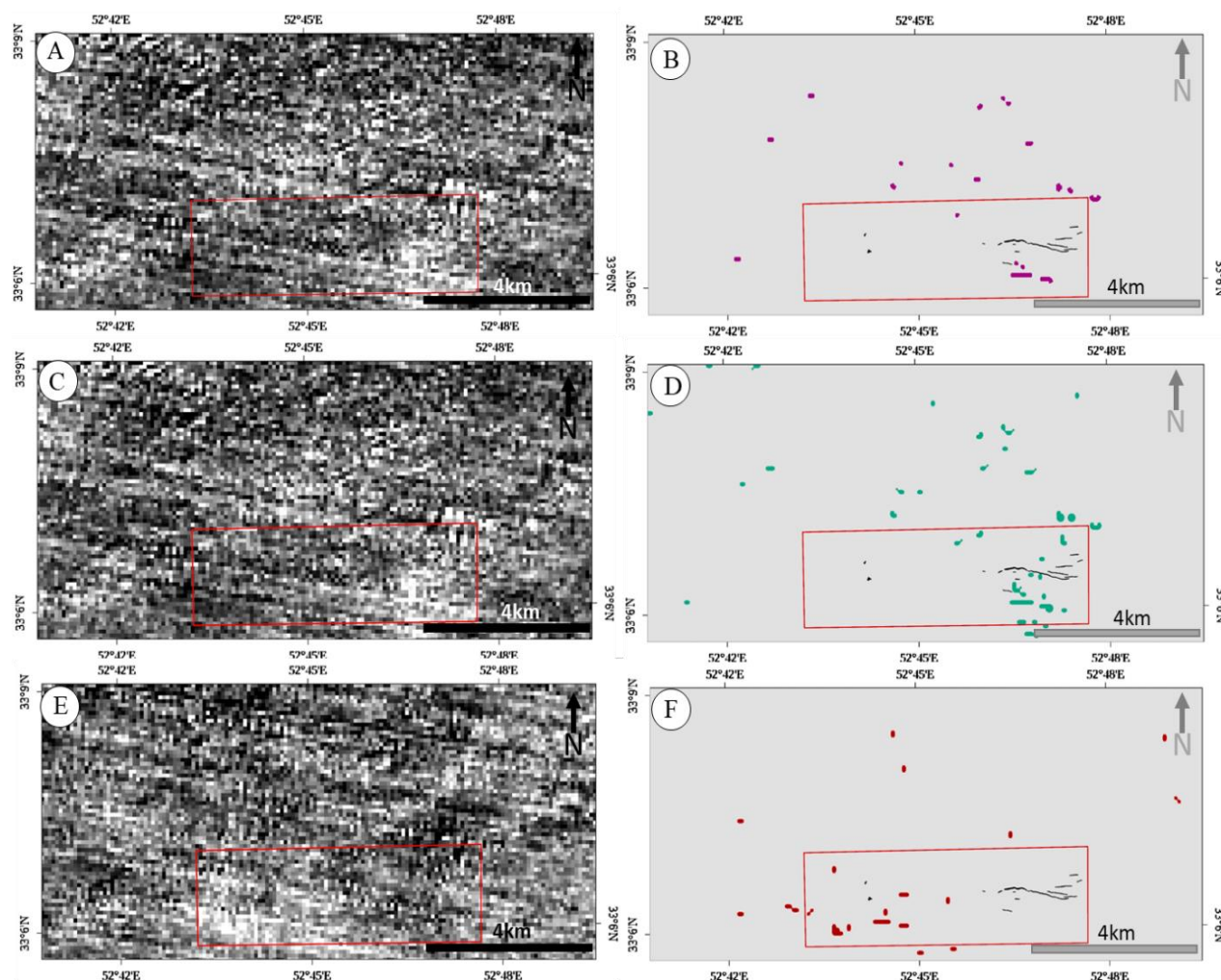
Table 4 (Continued). Confusion matrix associated with the MF and SAM classification methods of the calcite and quartz minerals from the Kahyaz area

Kh-XRD-16		Latitude: 33° 6' 29.04" N, Longitude: 52° 46' 02.06" E			
SAM	SAM-Quartz	MF-Kh-XRD-16	Total	Producer/Accuracy (%)	User's/Accuracy (%)
Unclassified	0	743	743		
SAM-Quartz	64854	0	64854	100	100
Unclassified	0	743	743	50.00	100
Total	64854	1486	66340		
Overall Accuracy = 98.88%			Kappa Coefficient = 0.7		



شکل ۱۲. نتایج تجزیه و تحلیل XRD نمونه‌های کوارتز و کلسیت محدوده کهپاز که برای صحت‌سنجی نتایج روش‌های طبقه‌بندی MF و SAM استفاده شدند. A: کلسیت همراه با ژپس و فوجاسیت در نمونه Kh-XRD-7، B: کلسیت، ژپس، فوجاسیت، و ایلیت در نمونه Kh-XRD-10، C: کوارتز و جاروسیت در نمونه Kh-XRD-18، D: کوارتز، تیتانیت و ارتوکلاز در نمونه Kh-XRD-13، E: کلسیت و مونت‌موریلونیت در نمونه Kh-XRD-12 و F: کوارتز و جاروسیت در نمونه Kh-XRD-16

Fig. 12. XRD analyze results of the quartz and calcite samples from Kahyaz area which used for validation of the MF and SAM classification result. A: calcite along with gypsum and faujasite in the Kh-XRD-7 sample, B: calcite, gypsum, faujasite, and illite in the Kh-XRD-10 sample, C: quartz and jarosite in the Kh-XRD-18 sample, D: quartz, titanite, and orthoclase in the Kh-XRD-13 sample, E: calcite and montmorillonite in the Kh-XRD-12 sample, and F: quartz and jarosite in the Kh-XRD-16 sample



شکل ۱۳. نقشه کانی‌شناسی حاصل از روش MF با استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل XRD. A و B: تصویر مربوط به اجرای روش MF با استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل XRD نمونه Kh-XRD-7، C و D: تصویر مربوط به اجرای روش MF با استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل XRD نمونه Kh-XRD-10، E و F: تصویر مربوط به اجرای روش MF با استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل XRD نمونه Kh-XRD-18 (مستطیل قرمز رنگ، محدوده اندیس کهیاز را نشان می‌دهد. خطوط سیاه رنگ در داخل مستطیل، رگه‌های کوارتز-کلسیت هستند).

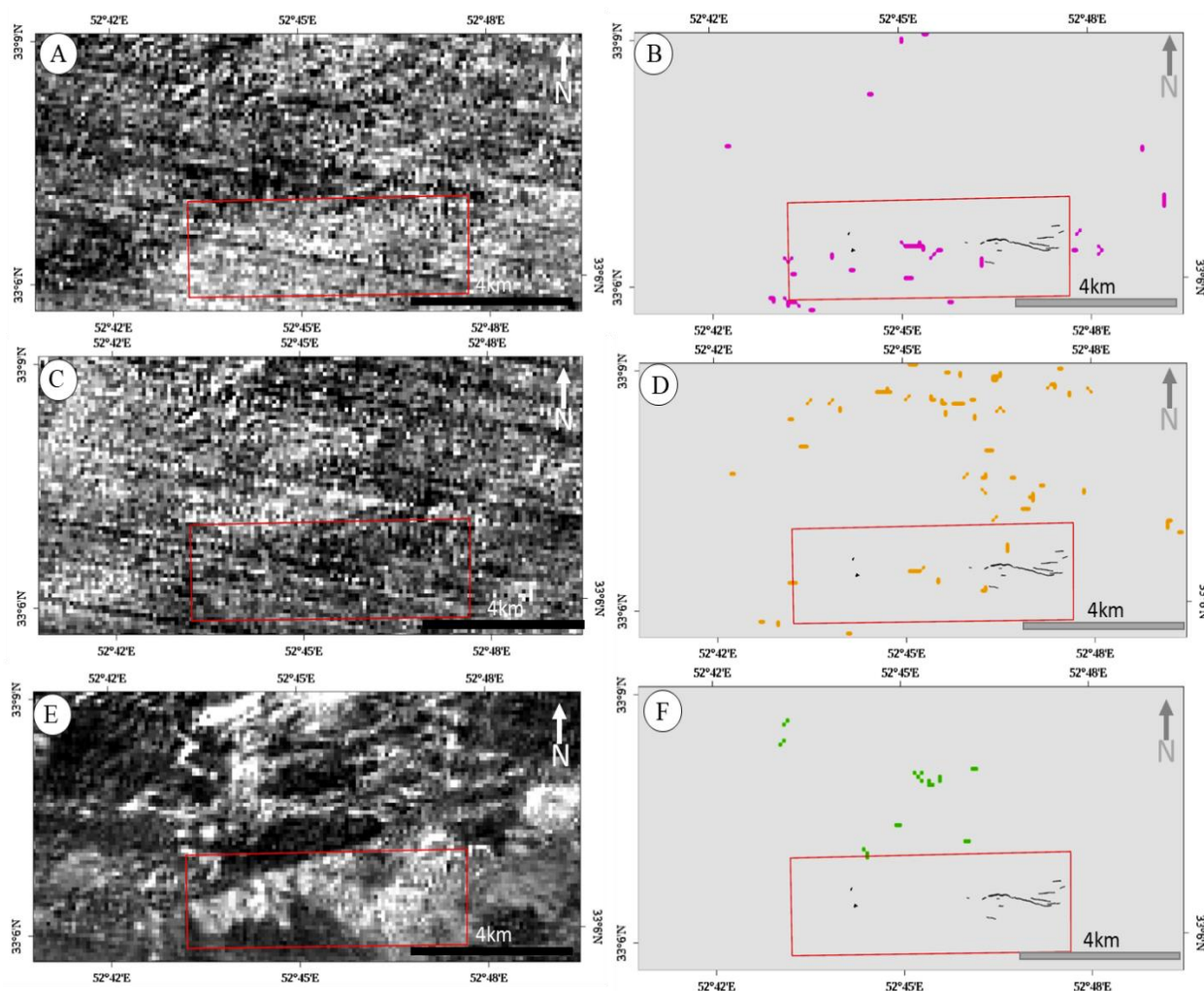
Fig. 13. Mineralogical map resulted of the MF method by using the XRD analysis results. A and B: Photo related to the MF method by using the XRD analysis results of the Kh-XRD-7 sample, C and D: Photo related to the MF method by using the XRD analysis results of the Kh-XRD-10 sample, E and F: Photo related to the MF method by using the XRD analysis results of the Kh-XRD-18 sample (The red-colored rectangle indicated the Kahyaz prospect area. Black lines in the rectangle are quartz-calcite veins).

باید همراه با اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های صحرایی تفسیر شود. برای مثال، دقت روش SAM برای نمونه‌های سیلیس‌دار و کربناته به ترتیب مقدار ۹۹/۱۰ و ۹۸/۹۸ درصد را نشان داد. نقشه کانی‌شناسی مربوط به کلسیت حاصل از الگوریتم MF اغلب منطبق با واحدهای رسوبی

الگوریتم‌های SAM و MF به طور مؤثر توزیع واحدهای سنگی و رخنمون‌های مرتبط با کوارتز و کربنات را نشان دادند. با این حال، به دلیل محدود بودن تعداد باندهای حرارتی ASTER، این الگوریتم‌ها بیشتر برای بارزسازی رخنمون‌های طیفی مشابه به کار رفتند و نتایج آنها

نهشته‌های رسوبی کواترنری است؛ در حالی که، نقشه کانی‌شناسی مربوط به کوارتز حاصل از الگوریتم SAM مرتبط با واحدهای نیمه‌عمیق داسیتی - ریوداسیتی، آندزیتی، توف، ماسه‌سنگ و کنگلومراست.

کواترنری است؛ در حالی که نقشه حاصل از الگوریتم SAM اغلب مرتبط با واحدهای آتشفشانی آندزیتی، آذرآوری و نیمه‌عمیق داسیتی - ریوداسیتی است. نقشه کانی‌شناسی مربوط به کوارتز حاصل از الگوریتم MF اغلب منطبق با واحدهای داسیتی - ریوداسیتی، آندزیتی و



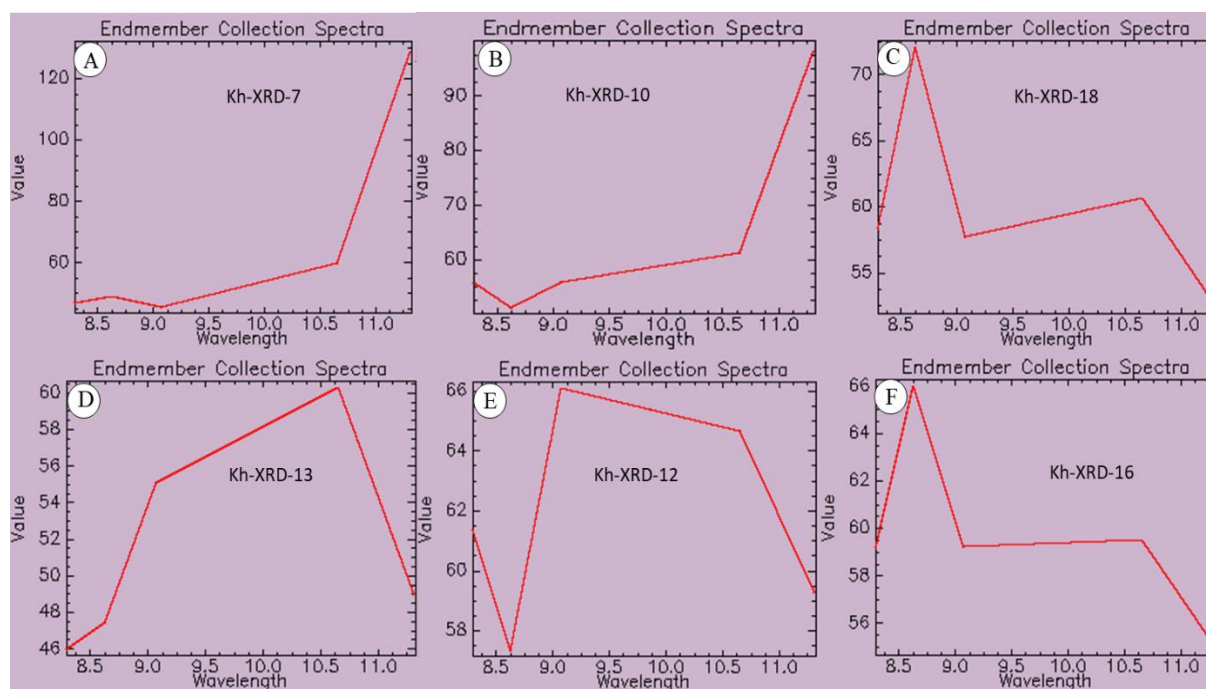
شکل ۱۴. نقشه کانی‌شناسی حاصل از روش MF و SAM با استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل XRD. A و B: تصویر مربوط به روش MF با استفاده از نتیجه تجزیه و تحلیل XRD نمونه Kh-XRD-13، C و D: تصویر مربوط به اجرای روش SAM با استفاده از نتیجه تجزیه و تحلیل XRD نمونه Kh-XRD-12، E: تصویر رول و F: تصویر مربوط به اجرای روش SAM با استفاده از نتیجه تجزیه و تحلیل XRD نمونه (Kh-XRD-16) (مستطیل قرمز رنگ، محدوده اندیس کهیاز را نشان می‌دهد. خطوط سیاه رنگ در داخل مستطیل، رگه‌های کوارتز - کلسیت هستند).

Fig. 14. Mineralogical map resulted of the MF and SAM methods by using the XRD analysis results. A and B: Photo related to the MF method by using the XRD analysis results of the Kh-XRD-13 sample, C and D: Photo related to the SAM method by using the XRD analysis results of the Kh-XRD-12 sample, E and F: Photo related to the SAM method by using the XRD analysis results of the Kh-XRD-16 sample (The red-colored rectangle indicated the Kahyaz prospect area. Black lines in the rectangle are quartz-calcite veins).

این نتایج به نوبه خود اعتبار نقشه‌های حاصل از سنجش از دور را در این بررسی نشان می‌دهد.

ویژگی‌های نشر طیفی کانی‌های کوارتز و کلسیت در شکل ۱۵-A تا F نشان داده شده است. این طیف‌ها از طریق تجزیه و تحلیل XRD به دست آمده‌اند. با توجه به شکل ۱۵، دو ویژگی جذب در طول موج‌های ۸/۲۹ میکرومتر (باند ۱۰ ASTER) و ۹/۰۷ میکرومتر (باند ۱۲ ASTER) و همچنین یک ویژگی جذب در ۸/۶۳ میکرومتر (باند ۱۱ ASTER) برای کوارتز مشخص شده است.

بر اساس صحت‌سنجی انجام شده، تطابق خوبی بین نتایج سنجش از دور، بررسی‌های سنگ‌نگاری و تجزیه و تحلیل XRD وجود دارد (شکل ۱۲). رگه اصلی کانزایی در اندیس کهپاز که از کوارتز-کلسیت تشکیل شده است، با سیلیس و کربنات مشخص شده بر روی تصویرها باندهای محدوده TIR هم‌پوشانی دارد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). نتایج به دست آمده از روش‌های SAM و MF با نتایج تجزیه و تحلیل XRD انجام شده بر روی بیشتر نمونه‌های خالص کلسیت و کوارتز مطابقت دارد و مقادیر ضریب کاپا در آنها از ۰/۶ تا ۰/۷ تغییر می‌کند.



شکل ۱۵. طیف نشر کوارتز و کلسیت حاصل از تجزیه و تحلیل XRD نمونه‌های جمع‌آوری شده از اندیس کهپاز. A: طیف نشر نمونه شماره Kh-XRD-7 که مربوط به کلسیت است، B: طیف نشر نمونه شماره Kh-XRD-10 که مربوط به کلسیت و ناخالصی‌هایی مثل ژیس است، C: طیف نشر نمونه شماره Kh-XRD-18 که مربوط به کوارتز و حضور ناخالصی ژاروسیت است، D: طیف نشر نمونه شماره Kh-XRD-13 که مربوط به کانی اصلی کوارتز و مقدار اندکی ارتوکلاز و تیتانیت است، E: طیف نشر نمونه شماره Kh-XRD-12 که ناشی از حضور کلسیت و مقدار کمی مونت‌موریلونیت است و F: طیف نشر نمونه شماره Kh-XRD-16 که مربوط به حضور کوارتز و مقدار اندکی ژاروسیت است.

Fig. 15. Emissivity spectra for quartz and calcite resulted of the XRD analysis of collected samples of the Kahyaz prospect. A: Emissivity spectra of the Kh-XRD-7 sample number that is related to the calcite, B: Emissivity spectra of the Kh-XRD-10 sample number that is related to the calcite and impurity such as gypsum, C: Emissivity spectra of the Kh-XRD-18 sample number that is associated to the quartz, and minor jarosite, D: Emissivity spectra of the Kh-XRD-13 sample number which is related to the quartz major mineral, and minor orthoclase and titanite, E: Emissivity spectra of the Kh-XRD-12 sample number which is resulted of the calcite and minor montmorillonite, and F: Emissivity spectra of the Kh-XRD-16 sample number which is related to the quartz and trace jarosite existing.

تغییر در میزان جذب و نشر طیفی به دلیل حضور کانی‌هایی مثل ژیس، فلدسپار (آلیت و ارتوکلاز)، کانی‌های گروه زئولیت (فوجاسیت)، کانی‌های رسی (ایلپت، مونت‌موریلونیت)، تیتانیت و غیره است. بنابراین، کانی‌های شناسایی شده از طریق سنجش از دور با نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل XRD تأیید می‌شود.

تصویر مؤلفه اصلی دوم (PC2) از نظر الگوی پراکنش مکانی، بیشترین همخوانی را با نتایج نسبت باندی ۱۴/۱۲ نشان می‌دهد. نواحی با مقادیر بالای PC2 اغلب بر رخنمون‌های غنی از سیلیس منطبق بوده و با واحدهای داسیتی-ریوداسیتی و آندزی‌بازالتی دارای دگرسانی سیلیسی هم‌پوشانی دارند. این تطابق نشان می‌دهد که PC2 مهم‌ترین مؤلفه در بارزسازی واحدهای سیلیسی در داده‌های حرارتی ASTER است.

یکی از چالش‌های موجود در شناسایی کانه‌زایی رگه‌ای سولفیداسیون پایین با استفاده از باندهای TIR سنجنده ASTER، این است که نواحی کانه‌زایی شده معمولاً آنقدر کوچک هستند که به راحتی نمی‌توان آنها را شناسایی کرد. همچنین به دلیل پایین بودن قدرت تفکیک مکانی و طیفی باندهای محدوده حرارتی ASTER و ماهیت ویژگی‌های طیفی کانی‌های مربوط به این محدوده طول موج، فقط می‌توان بزرگ‌ترین و ضخیم‌ترین رخنمون‌های کوارتز و کرینات را شناسایی کرد (Rockwell and Hofstra, 2008). با این وجود، در خارج از محدوده کهیاز، مناطق سیلیسی و کربناته دیگری نیز مشخص شده که بخش زیادی از آنها به دلیل رخنمون واحدهای رسوبی آهکی و ماسه‌سنگی و همچنین نهشته‌های آبرفتی جوان است. چنان‌که در اندیس کهیاز مشاهده شد، توزیع سیلیس در سنگ‌های آتشفشانی که خود فاقد سیلیس اولیه هستند، می‌تواند نشان‌دهنده دگرسانی سیلیسی و احتمالاً رخداد کانه‌زایی رگه‌ای نوع سولفیداسیون پایین باشد. بنابراین، باندهای حرارتی ASTER را می‌توان به عنوان ابزاری مناسب برای شناسایی اولیه رخنمون‌های سیلیسی و کربناته در مقیاس ناحیه‌ای به کار گرفت. با این حال، به دلیل قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر و تعداد محدود باندهای حرارتی، این داده‌ها به تنهایی قادر به تفکیک مستقیم رگه‌های باریک کوارتز-کلسیت نیستند و نتایج حاصل باید همراه با اطلاعات زمین‌شناسی، بررسی‌های صحرایی و داده‌های آزمایشگاهی تفسیر شوند.

رخنمون‌های سیلیسی شناسایی شده در واحدهای آتشفشانی، به ویژه در مجاورت توده‌های نیمه‌عمیق، می‌توانند به عنوان اهداف اولویت‌دار برای بررسی‌های اکتشافی بعدی معرفی شوند. رخنمون‌های سیلیسی شناسایی شده بیانگر واحدهای دارای غنای نسبی سیلیس یا زون‌های دگرسانی سیلیسی در مقیاس ناحیه‌ای هستند که می‌توانند به عنوان اهداف اولیه برای بررسی‌های صحرایی و اکتشافات تکمیلی مورد استفاده قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، قابلیت باندهای مادون قرمز حرارتی سنجنده ASTER برای بارزسازی رخنمون‌های سیلیسی و کربناته مرتبط با کانه‌زایی طلای اپی‌ترمال سولفیداسیون پایین در اندیس کهیاز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان‌داد که روش‌های نسبت باندی، ترکیب رنگی کاذب، کشش ناهمبسته، پالایش تطبیقی و نقشه‌بردار زاویه طیفی در شناسایی رخنمون‌های سیلیسی و کربناته، عملکرد قابل قبولی داشته و با نتایج بررسی‌های صحرایی و تجزیه و تحلیل XRD تطابق مناسبی نشان می‌دهند. ارزیابی صحت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس آشفتگی نشان‌داد که دقت کلی روش MF برای کلسیت و کوارتز به ترتیب ۸۹ و ۵/۹۷ درصد و برای روش SAM به ترتیب ۹۵ و ۹۸ درصد است. همچنین، ضریب کاپا برای روش MF بین ۶/۰ تا ۷/۰ و برای روش SAM حدود ۷/۰ به دست آمد که بیانگر قابلیت مناسب این دو روش در استخراج رخنمون‌های سیلیسی و کربناته از تصویرهای حرارتی ASTER است. نتایج نشان‌داد که رخنمون‌های سیلیسی شناسایی شده اغلب با واحدهای داسیتی-ریوداسیتی و آندزی‌بازالتی و تا حدودی با واحدهای توفی، دیلباز، ماسه‌سنگ و کنگلومرا همخوانی دارند؛ در حالی که رخنمون‌های کربناته بیشتر با نهشته‌های کواترنری و در برخی نواحی با واحدهای آتشفشانی و نیمه‌عمیق مرتبط هستند. این هم‌پوشانی با بررسی‌های زمین‌شناسی، صحرایی و نتایج XRD نشان می‌دهد که داده‌های TIR سنجنده ASTER می‌توانند برای بارزسازی رخنمون‌های سیلیسی و کربناته در مقیاس ناحیه‌ای به عنوان یک ابزار اکتشافی اولیه مورد استفاده قرار گیرند.

با وجود این، به دلیل قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر و تعداد محدود باندهای حرارتی ASTER، این داده‌ها برای شناسایی مستقیم رگه‌های باریک کوارتز-کلسیت مناسب نیستند و اغلب قابلیت آشکارسازی رخنمون‌های بزرگ‌تر و ضخیم‌تر را دارند. از این رو، نتایج حاصل باید در کنار اطلاعات زمین‌شناسی، بررسی‌های صحرایی و داده‌های آزمایشگاهی تفسیر شوند.

با توجه به پتانسیل بالای زون ماگمایی ارومیه-دختر برای کانه‌زایی‌های سولفیداسیون پایین، متوسط، بالا و پورفیری، روش ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کم هزینه برای غربالگری اولیه مناطق امیدبخش و اولویت‌بندی اهداف اکتشافی در سایر بخش‌های این زون مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های آینده از داده‌های حرارتی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر و یا تلفیق داده‌های

TIR با تصویرهای چندطیفی و فراطیفی برای افزایش دقت شناسایی رخنمون‌های سیلیسی مرتبط با کانه‌زایی استفاده شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این پژوهش بخشی از رساله دکتری در رشته زمین‌شناسی اقتصادی است که با همکاری شرکت سرمایه‌گذاری توسعه صنایع و معادن کوثر و شرکت مهندسین مشاور پارس اولنگ انجام شده است. از همکاری مهندس قدیمی، مهندس صالحی و مهندس محمدی قدردانی می‌شود. همچنین از همکاری جناب پروفیسور رابرت موریتز برای انجام تجزیه و تحلیل کانی‌شناسی در دانشگاه ژنو سوئیس سپاسگزاریم.

1. Thermal infrared (TIR)
2. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)
3. Principal Component Analysis (PCA)
4. False Color Composite (FCC)
5. Decorrelation Stretch (DS)
6. Spectral Angle Mapper (SAM)
7. Matched Filtering (MF)
8. X-ray Diffraction (XRD)
9. Second Principal Component (PC2)
10. Visible and Near-Infrared (VNIR)
11. Shortwave Infrared (SWIR)
12. Urumieh-Dokhtar magmatic Arc (UDMA)
13. AST_L1T_00309192002072139_20150425042239_103813
14. earthdataf
15. Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)
16. John Hopkins University (jhu)
17. Band Ratio (BR)
18. Internal Average Relative Reflectance (IARR)
19. Average Reference Spectrum
20. Red
21. Green
22. Blue
23. Density slice
24. Eigenvector coefficients
25. Rule image
26. Confusion Matrix
27. Kappa Coefficient
28. Overall Accuracy
29. Producer Accuracy
30. User Accuracy

References

- Abrams, M. and Hook, S.J., 1995. Simulated ASTER data for geologic studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3): 692–699. <https://doi.org/10.1109/36.387584>
- Abrams, M., Hook, S. and Ramachandran, B., 2002. *ASTER User Handbook: A dvanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Teehnology, California, 135 PP. Retrieved July 27, https://lpdaac.usgs.gov/documents/262/ASTER_User_Handbook_v2.pdf
- Abrams, M. and Yamaguchi, Y., 2019. Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11(11): 1394. <https://doi.org/10.3390/rs11111394>
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B. and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: A subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148(5-6): 692–725. <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal-spa tial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: Constraints from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- Bahrroudi, A. and Fonoudi, M., 2005. *Geological Map of Shahrab*, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Baldrige, A.M., Hook, S.J., Grove, C.I. and Rivera, G., 2009. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113(4): 711–715. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007>
- Barati, B. and Aghazadeh, M., 2019. *Geology map of the Kahyaz*, scale 1:25000, Kowsar Industries and Mines Development Investment Company, Tehran, Iran.
- Beiranvand Pour, A., Ranjbar, H., Sekandari, M., El-Wahed, M.A., Shawkat Hossain, M., Hashim, M., Yousefi, M., Zoheir, B., Wambo, J.D.T. and Muslim, A.M., 2023. Remote sensing for mineral exploration. In: A. Beiranvand Pour, M. Parsa and A.M. Eldosouky (Editors), *Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration*, Elsevier, pp. 17–149. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95608-6.00002-0>
- Berberian, F. and Berberian, M., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran. In: H.K. Gupta and F.M. Delany (Editors), *Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution*, V. 3, *Geodynamics Series*, pp. 5–32. Retrieved July 27, 2026 from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/GD003p0005>
- Bolouki, S.M., Ramazi, H.R., Maghsoudi, A., Beiranvand Pour, A. and Sohrabi, Gh., 2020. A Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area, NW Iran. *remote sensing*, 12(1): 105. <https://doi.org/10.3390/rs12010105>
- Carrino, T.A., Crosta, A.P., Toledo, C.L.B., Silva, A.M. and Silva, J.L., 2015. Geology and Hydrothermal Alteration of the Chapi Chiara Prospect and Nearby Targets, Southern Peru, Using ASTER Data and Reflectance Spectroscopy. *Economic Geology*, 110(1): 73–90. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.1.73>
- Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing Enviroment*, 37(1): 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Di Tommaso, I. and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32(1–2): 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004>
- Dilles, J.H. and Einaudi, M.T., 1992. Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada—a 6-km vertical reconstruction. *Economic Geology*, 87(8): 1963–2001. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.8.1963>
- Foody, G.M., 2004. Thematic map comparison, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(5): 627–633. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.627>
- Gillespie, A.R., Kahle, A. B. and Walker, R.E., 1986. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches, *Remote Sensing of Environment*, 20(3): 209–235. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(86\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(86)90044-1)
- Gupta, R.P., Tiwari, R.K., Saini, V. and Srivastava, N., 2013. A Simplified Approach for Interpreting Principal Component Images. *Advance in Remote Sensing*, 2(2): 111–119. <https://doi.org/10.4236/ars.2013.22015>

- Haghighi, H., 2018. Exploratory modeling of epithermal gold deposits using remote sensing, field spectroscopy, geological and geochemical data. case study of Bazman area. Ph.D. Thesis, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. 242 pp.
- Harman, J., 2005. Using decorrelation stretch to enhance rock art images. In: American Rock Art Research Association Annual Meeting, Retrieved July 27, 2026 from <https://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html>
- Hunt, G.R., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* 42(3): 501–513. <https://doi.org/10.1190/1.1440721>
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of Mineral deposit models for resource assessment, U.S. Geological Survey Scientific Investigations, Report 2010-5070-B, 169 pp. <https://doi.org/10.3133/sir20105070B>
- John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D. and Graybeal, F.T., 2018. Descriptive models for epithermal gold-silver deposits. U.S. Geological Survey Scientific Investigations, Report 2010-5070-Q, 247 pp. <https://doi.org/10.3133/sir20105070Q>
- Jolliffe, I.T., 2002. Principal Component Analysis. Springer, New York. 488 pp. <https://doi.org/10.1007/b98835>
- Khademian, F., Alaminia, Z., Nadimi, A., Lentz, D.R., Ghasemi, A. and Sharifi, M., 2024. Structural and alteration zones controls on Cu mineralization in the northwest of Nain (northeastern Isfahan, Iran): A remote sensing perspective. *Journal of African Earth Sciences*, 211: 105151. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105151>
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Abdollahy Riseh, M., Lentz, D.R. and Sepahi Gerow, A.A., 2022. Petrology and geochemistry of adakitic intrusions and dykes at Sarcheshmeh porphyry Cu-Mo±Au deposit, Iran: Insights into their source. *Resource Geology*, 72(1): e12297. <https://doi.org/10.1111/rge.12297>
- Maanijou, M., Puyandeh, N., Sepahi, A. and Dadfar, S., 2015. Mapping of hydrothermal alteration of Dashkasan (Sari Gunay) epithermal gold mine using ASTER sensor images and XRD analysis. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(95): 95–104. <https://doi.org/10.22071/GSJ.2015.42160>
- Ninomiya, N., Fu, B. and Cudahy, T.J., 2005. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor” data. *Remote Sensing Environment*, 99(1–2): 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.06.009>
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3–4): 380–398. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.008>
- Rajendran, S., Hersi, O.S., Al-Harthi, A., Al-Wardi, M., El-Ghali, M.A. and Al-Abri, A.H., 2011. Capability of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) on discrimination of carbonates and associated rocks and mineral identification of eastern mountain region (Saih Hatat window) of Sultanate of Oman. *Carbonates and Evaporites*, 26: 351–364. <https://doi.org/10.1007/s13146-011-0071-4>
- Research Systems, Inc., 2001. ENVI Tutorials, Tutorial 12. Research Systems, Inc., A Kodak Company, Boulder, Colorado, USA, 46 pp. Retrieved July 27, 2026 from https://www.glyfac.buffalo.edu/courses/gly560/Lessons/OLD/hyperspectral/assets/ENVI_Tut_12-13.pdf
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2): 295–332. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.295>
- Richards, J.P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran. *Economic Geology*, 101(8): 1455–1496. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455>
- Rockwell, B.W. and Hofstra, A.H., 2008. Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data—implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere*, 4 (1): 218–246. <https://doi.org/10.1130/GES00126.1>

- Rowan, L.C., Kingston, M.K. and Crowley, J.K., 1986. Spectral reflectance of carbonatite and related alkalic igneous rocks: Selected samples from four North American localities. *Economic Geology*, 81(4): 857–871.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.857>
- Rowan, L.C. and Mars, J.C., 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing Environment*, 84(3): 350–366.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00127-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00127-X)
- Rowan, L.C., Schmidt, R.G. and Mars, J.C., 2006. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing Environment*, 104(1): 74–87.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.014>
- Salisbury, J.W. and D'Aria, D.M., 1992. Emissivity of terrestrial materials in the 8–14 μm atmospheric window. 42(2): 83–106.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90092-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90092-X)
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44: 265–283. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Shahabpour, J. 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(4): 405–417.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.11.007>
- Simmons, S.F. and Browne, P.R.L., 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: Implications for understanding low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology* (2000) 95(5): 971–999.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.5.971>
- Whitney, D.L. and 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>