Scientific Quarterly Journal of Geosciences, Vol. 36, Issue 3, Serial No. 141, Autumn 2026, pp. 119-136

www.gsjournal.ir

Original Research Paper

Study of ASTER and Landsat Satellite Data in the Firuzabad area and their consistency with the hydrothermal alteration zones of the region (Kowsar – Ardabil province)

Samin Karbalaei Alizadeh Eifa[1], Mohammad Reza Hosseinzadeh[1]*, Kamal Siahcheshm[1] and Shadi Sattari[1]

[1] Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 2026 May 19
Accepted: 2026 August 15
Available online: 2026 September 23

Keywords:
Firuzabad
Kowsar
Alteration
Argillic
Sensor
ASTER
Landsat

ABSTRACT

The Firuzabad area is located in the southwest of Kowsar County, in the southwestern part of Ardabil Province, and belongs to the Alborz-Azerbaijan structural-geological zone. In this study, the identification and delineation of hypogene alteration zones in the area were conducted using remote sensing data from ASTER and Landsat 9 sensors. To this end, following the necessary preprocessing of satellite imagery, common and effective methods—including False Color Composites (FCC), Band Ratio, Principal Component Analysis (PCA), and Spectral Angle Mapper (SAM)—were employed to differentiate and identify alteration zones. The results of the remote sensing analyses indicate the presence of argillic, silicic, carbonatic, and iron oxide alteration zones within the study area. Subsequently, to validate the results derived from the satellite imagery, targeted field controls and microscopic studies were performed on samples collected from the proposed zones. Furthermore, the correlation between the alteration zones extracted via different detection methods, along with the comparison of spectral curves from the delineated zones with standard spectral libraries from the USGS, confirms the accuracy and reliability of the study's results.

1. Introduction

Hydrothermal alterations result from the interaction between hydrothermal fluids and the host rocks and are commonly accompanied by changes in the chemical composition, mineralogy, color, and texture of the rocks. Investigation of the type and spatial distribution of alteration zones can provide valuable information on the conditions of formation, concentration of mineralization, and interpretation of geological processes, and can serve as a reliable basis for further exploration studies. In this context, remote sensing, as one of the widely used methods in geology and mineral exploration, enables the identification and discrimination of alteration zones over large areas with adequate accuracy, high efficiency, and lower cost. In the present study, conventional remote sensing techniques were applied to enhance and delineate alteration zones within the study area. In addition, comparison of standard

* Corresponding author: Mohammad Reza Hosseinzadeh; E-mail: mr-hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

Citation:

Karbalaei Alizadeh Eifa, S., Hosseinzadeh, M. R., Siahcheshm, K., and Sattari, Sh., 2026. Study of ASTER and Landsat Satellite Data in the Firuzabad area and their consistency with the hydrothermal alteration zones of the region (Kowsar – Ardabil province). Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 36(3), 141, 119-136. https://doi.org/10.22071/gsj.2026.582087.2253.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2026.582087.2253 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.6.8

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

spectral curves with those of the study area, field investigations, and microscopic analyses of thin sections were carried out to validate the obtained results.

2. Research methodology

This research focused on the identification and delineation of alteration zones within the Firuzabad region, utilizing remote sensing data from the ASTER and Landsat 9 sensors. The SWIR bands of ASTER, due to their sensitivity to alteration minerals, and its TIR bands, for their capability in extracting thermal information relevant to silicic alteration patterns, proved highly beneficial. LANDSAT imagery was employed to identify altered areas, particularly those rich in iron oxides. Processing methods included False Color Composite (FCC), Band Ratioing (B.R.), Principal Component Analysis (PCA), and Spectral Angle Mapping (SAM). In the subsequent step, the results were validated through field visits, sampling, microscopic studies of thin sections, and comparison of spectral curves from the area with library standards in the ENVI software.

Based on the geological map of 1:100,000 scale of Kivi (Hajialilou and Rezaei, 2001), the oldest outcrops in the Firuzabad region belong to the Eocene, consisting of andesitic to basaltic lavas accompanied by glassy tuffs. Younger units of the late Neogene appear as red conglomerate (with fragments of Eocene volcanic rocks) and alternating marl and sandstone. The youngest unit in the region is Quaternary riverine deposits, including pebbles, gravel, and sand in riverbeds. These outcrops are predominantly found on both sides of the Ardabil-Khalkhal Road. The Firuzabad region of Ardabil is located in the Alborz-Azerbaijan structural zone. Based on a 1:1000 geological map (Figure 1; Azar Saroj Sabalan Company, 2023) the oldest and most extensive rock unit is the Eocene sequence, comprising intermediate volcanic rocks with hydrothermal alterations and agglomerate interlayers. Oligocene heterogeneous red conglomerate unconformably overlies the Eocene units, covering approximately 20% of the area, with the remainder covered by young alluvial deposits. The region's structure is influenced by numerous fault systems with a dominant northeast-southwest trend.

3. Results and discussions

Remote sensing data, such as ASTER and Landsat 9, are an efficient approach in mineral exploration due to their ability to identify alteration minerals. These sensors, with their multispectral bands, facilitate the spatial analysis of alteration zones on a regional scale. Through satellite image processing techniques, spatial patterns of alteration zones are identified and highlighted to aid in geological interpretations and targeted field studies.

3.1. Landsat sensor

Landsat sensors (OLI/TIRS) with their visible, near-infrared, short-wave infrared, and thermal infrared bands provide data with spatial resolutions of 15-30 meters (for reflective bands) and approximately 100 meters (for thermal bands). This data is very useful for mapping hydrothermal alteration zones (such as argillic and iron oxide) as well as for identifying vegetation cover and tectonic structures.

3.2. ASTER sensor

The ASTER sensor features 14 spectral bands: 3 VNIR bands with a spatial resolution of 15 meters, 6 SWIR bands with a spatial resolution of 30 meters, and 5 TIR bands with a spatial resolution of 90 meters. This sensor, with an approximate image coverage of 60 kilometers, is a capable tool for identifying and mapping hydrothermal alteration zones and for geological analyses (NASA Earthdata, 2023; NASA, 2005). The SWIR bands are effective in detecting characteristic alteration minerals and extracting spectral indices, while the TIR bands assist in extracting surface emissivity information and thermal variations, useful for analyzing silicic alterations and surface tectonics (Chen et al., 2022; El-Desoky et al., 2022; Semi-Automatic Classification Plugin, 2023).

3.3. Preprocessing of satellite images

To extract spectral information, geometric and radiometric preprocessing was performed on the images. ASTER images at the L1T level were only subjected to radiometric corrections, and for this purpose, the QUAC method was used in ENVI software. ASTER thermal bands were also corrected separately. Landsat 9 images were at level 2 and collection 2 and did not require re-correction. All processing was performed using ENVI 5.6 software.

3.4. Satellite Image Processing

Satellite image processing, through the analysis of spectral and spatial data, serves as an effective tool in geological studies, environmental monitoring, and natural hazard assessment, and improves the accuracy of producing reliable maps. This processing is conducted within visual and digital frameworks, and their integration enhances the discrimination of surface features. In the visual approach, interpretation is based on the qualitative analysis of spectral and spatial patterns and the generation of false color composite (RGB) images (Mokhtari et al., 2013).

3.5. False Band Combination Method

Satellite data processing was performed in two frameworks: visual and digital processing. In visual processing, false color combinations were used to analyze spectral and spatial patterns. The RGB-468 false color combination of the ASTER sensor was used to identify argillic and propylitic alterations, and the RGB-461 combination was used to highlight areas with iron oxide and hydrothermal alterations (Figure 2).

3.6. Band Ratio Method

In Landsat images, the band ratio of 6/7 was used to identify altered areas and the band ratio of 4/2 was used to highlight iron oxides (Figure 3-a and b). In order to avoid interference from vegetation, this cover was also identified (Figure 3-c). The color combination R:6/7 G:4/2 B:6/5 also allowed for the differentiation of alteration types (Figure 3-d). In ASTER data, different band ratios were used to identify argillic, phyllic, and propylitic alterations, and the resulting color combination identified the alteration zones (Figure 4). Also, band ratios of 12/14 and 13/14 were used to identify silicic and carbonate alterations, respectively (Figure 5).

3.7. Principal Component Analysis Method

In the principal component analysis (PCA) using the Crusta method, the bands were selected based on the spectral characteristics of the indicator minerals associated with each alteration zone. The results obtained for the argillic, phyllic, and propylitic alteration zones are presented in Tables 1–3, respectively, and the corresponding images are shown in Figure 6. The final color composite image generated using this method provides a clear separation of the alteration zones in the study area (Figure 6-d).

Also, using the principal component analysis method using the Crust method, iron oxide areas were identified on Landsat bands 2, 4, 5, and 6. The highest iron oxide differentiation (reflectance in band 4 and absorption in band 2) was seen in the PC4 component of the Crust method (Table 4) and its image is shown in Figure 7.

3.8. Spectral Angle Mapping Method

Spectral angle mapping was used as a supervised classification method, using the USGS reference spectra for the indicator minerals of each alteration type. The spectra of alunite, kaolinite, chlorite, epidote, muscovite, quartz and calcite minerals were used to highlight the argillic, propylitic, phyllic, siliceous and carbonate zones, respectively. The results of this method are displayed on the corrected ASTER image and the SAM angle values are presented in Table 5 (Figures 8 and 9).

3.9. Alterations

After the initial identification of alteration zones using remote sensing data, field and microscopic studies are essential to confirm their geological nature. These studies, by analyzing outcrops and examining thin sections, help in interpreting mineralogy, determining the type of alteration, and validating remote sensing results. Therefore, alteration serves as an interpretative-confirmatory stage, complementing satellite image analyses.

In the study area, various types of alterations including silicic, argillic, carbonate, and iron oxide are observed in different rock units. Silicic alteration has mainly occurred in the northeastern and southwestern parts of the area and is often associated with iron oxide and argillic alterations. Argillic alteration is also seen in association with various units and alongside other alterations. Carbonate alteration appears more limitedly and is usually associated with argillic alteration, while iron oxides are dispersedly present in the latitic units. (Figures 10)

4. Conclusion

This study, using data from ASTER and Landsat 9 sensors, has identified alteration zones in the Firuzabad region with remote sensing methods such as false color composition, band ratio, principal component analysis (Crusta), and spectral angle mapping (SAM). Due to its higher spectral resolution, the ASTER sensor has been superior in identifying hydrothermal, silicic, and carbonate alterations, while Landsat 9 has been effective in identifying iron oxides. The results indicate the spread of argillic and silicic alterations, while more limited and phyllic carbonate alteration is seen in association with argillic. Propylitic alteration also has a small spread. Overall, the SAM method showed good capability in identifying and discriminating alteration zones through spectral matching with a reference spectral library, with its results showing good agreement with geological and spectral evidence. Remote sensing data are therefore an effective tool for the initial identification of alteration zones.

فصلنامه علمی علوم زمین، پاییز ۱۴۰۵، دوره ۳۶، شماره ۳، پیاپی ۱۴۱، صفحه ۱۱۹ تا ۱۳۶

مقاله پژوهشی

پیوند صفحه نخست: www.gsjournal.ir

بررسی داده‌های ماهواره‌ای ASTER و Landsat در محدوده فیروزآباد و میزان انطباق آن با پهنه‌های دگرسانی گرمابی منطقه (کوثر – استان اردبیل)

ثمین کربلای علیزاده ایفا[1]، محمدرضا حسین‌زاده[1]*، کمال سیاه‌چشم[1] و شادی ستاری[1]

[1] گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

فیروزآباد

کوثر

دگرسانی

آرژیلیک

سنجنده

استر

لندست

چکیده

منطقه فیروزآباد در جنوب‌باختر شهرستان کوثر و جنوب‌باختر استان اردبیل واقع شده و از نظر تقسیم‌بندی ساختاری- زمین‌شناسی در پهنه البرز -آذربایجان قرار دارد. در این پژوهش، شناسایی و بارزسازی پهنه‌های دگرسانی درون‌زاد (هیپوژن) منطقه با تکیه بر داده‌های دورسنجی سنجنده‌های ASTER و Landsat 9 انجام شده است. بدین منظور، پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر ماهواره‌ای، از روش‌های متداول و کارآمد شامل ترکیب رنگی کاذب (FCC)، نسبت‌گیری باندی (Band Ratio)، آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA) و نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) به‌منظور تفکیک و شناسایی پهنه‌های دگرسانی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های دورسنجی، حضور پهنه‌های دگرسانی آرژیلیکی، سیلیسی، کربناتی و اکسید آهن را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. در ادامه، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای، کنترل‌های صحرایی هدفمند و مطالعات میکروسکوپی بر روی نمونه‌های برداشت‌شده از پهنه‌های پیشنهادی انجام گرفت. همچنین، انطباق نواحی دگرسانی استخراج‌شده از روش‌های مختلف آشکارسازی با یکدیگر و مقایسه منحنی‌های طیفی پهنه‌های بارزسازی‌شده با داده‌های استاندارد کتابخانه طیفی USGS، صحت و قابلیت اعتماد نتایج این مطالعه را تایید می‌کند.

۱- پیش‌نوشتار

هدف از بررسی زمین‌شناسی یک منطقه، مطالعه واحدهای سنگی و روابط متقابل آن‌ها، زمین‌ساخت، دگرسانی‌ها و بررسی ارتباط هر یک از این پدیده‌ها با کانی‌سازی است. با تحلیل این فرایندها و ویژگی‌ها می‌توان به درک بهتری از موقعیت مکانی و زمانی دگرسانی و کانه‌زایی دست‌یافت و زمینه پی‌جویی آن‌ها را در مناطق مشابه فراهم کرد. دگرسانی‌ها حاصل کنش و واکنش سیالات گرمابی با سنگ‌های دربرگیرنده هستند و معمولا با تغییرات شیمیایی، کانی‌شناسی، رنگ و بافت سنگ‌های دیواره همراه‌اند. نوع و گسترش دگرسانی‌ها در منطقه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط تشکیل و تمرکز کانی‌سازی ارائه دهد. ازاین‌رو، بررسی دگرسانی‌ها مبنای مناسبی برای تفسیر فرایندهای زمین‌شناسی و ادامه مطالعات اکتشافی فراهم می‌کند. سنجش از دور، یکی از روش‌های پرکاربرد در زمین‌شناسی و اکتشاف ذخایرمعدنی است که به‌ویژه در شناسایی و تفکیک دگرسانی‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. این روش با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای، امکان بررسی و تحلیل مناطق وسیع را با دقت مناسب، سرعت بالا و هزینه کمتر فراهم می‌سازد. به‌کارگیری روش‌های مختلف سنجش از دور می‌تواند در شناسایی الگوهای دگرسانی و هدایت مراحل بعدی مطالعات اکتشافی نقش موثری داشته باشد. هدف از این پژوهش استفاده از روش‌های مرسوم سنجش از دور برای بارزسازی نواحی دگرسانی پیرامون منطقه مورد مطالعه است. افزون بر موارد یاد شده، از روش مقایسه منحنی‌های استاندارد با منحنی‌های منطقه مورد مطالعه، بازدیدهای صحرایی و مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک تهیه شده، برای تایید نتایج به‌دست آمده استفاده شده‌است.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش، شناسایی و بارزسازی پهنه‌های دگرسانی منطقه فیروزآباد، در گام نخست با استفاده از داده‌های دورسنجی انجام شده است. بدین منظور با استناد

* نویسنده مسئول: محمدرضا حسین‌زاده؛ E-mail: mr-hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

ماخذنگاری:

کربلای علیزاده ایفا، ث.، حسین‌زاده، م. ر. ،سیاه‌چشم، ک. و ستاری، ش.، ۱۴۰۵، بررسی داده‌های ماهواره‌ای ASTER و Landsat در محدوده فیروزآباد و میزان انطباق آن با پهنه‌های دگرسانی گرمابی منطقه. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۳)، ۱۴۱، ۱۱۹-۱۳۶. https://doi.org/10.22071/gsj.2026.582087.2253.

doi: 10.22071/gsj.2026.582087.2253 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.6.8

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

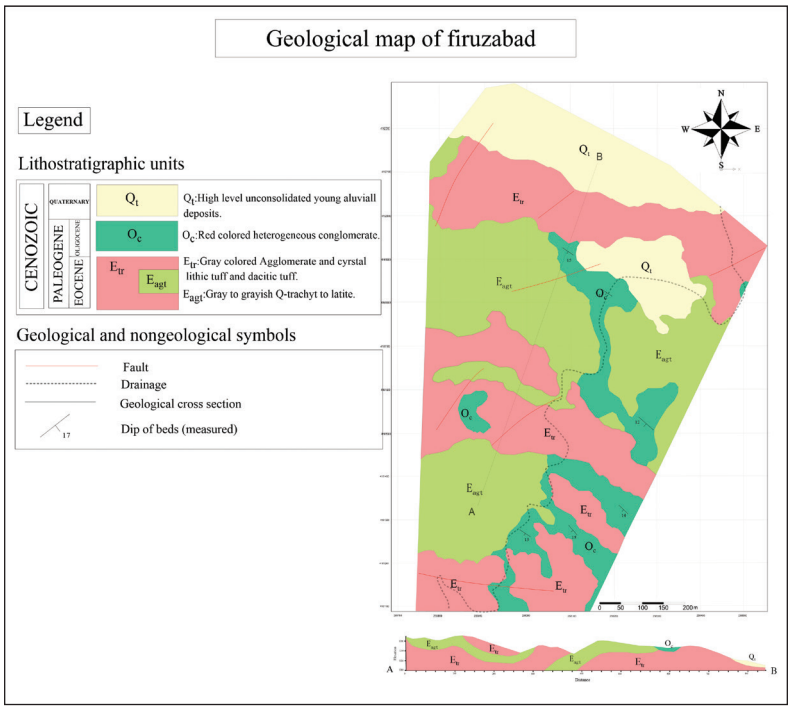
به ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیوی (حاج‌علیلو و رضایی، ۱۳۸۰)، تصاویر منطبق بر منطقه مورد مطالعه، از سایت NASA بارگیری شد. در این راستا تصاویر سنجنده‌های ASTER-L1T و Landsat 9 انتخاب و موردپردازش قرار گرفتند. تصاویر حاصل از سنجده استر ابزار بسیار قدرتمندی برای شناسایی و نقشه‌برداری پهنه‌های دگرسانی گرمابی به‌شمار می‌رود. باندهای SWIR این سنجنده برای تشخیص کانی‌های شاخص دگرسانی‌های گرمابی بسیار حساس هستند و امکان استخراج شاخص‌های طیفی و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) را فراهم می‌آورند. همچنین باندهای حرارتی (TIR) این سنجنده، توانایی استخراج اطلاعات مربوط به ضریب نشر سطحی و خواص تابشی سطح زمین را دارند، که می‌تواند الگوهای دگرسانی سیلیسی و تغییرات حرارتی سطحی را مشخص نمود. از تصاویر حاصل از سنجده لندست نیز برای شناسایی مناطق دگرسان به خصوص مناطق اکسیدآهن در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. در این پژوهش از روش‌هایی همچون ترکیب رنگی کاذب (FCC)، نسبت‌گیری باندی (B.R)، آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA) و روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) برای بارزسازی مناطق دگرسان در منطقه مورد مطالعه بهره گرفته شده‌است.

در گام بعد، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، بازدیدهای صحرایی هدفمند انجام شد و از رخنمون‌های شاخص پهنه‌های دگرسانی پیشنهادی نمونه‌برداری صورت گرفت. از نمونه‌های برگزیده، به تعداد ۴۰ عدد مقاطع نازک و نازک-صیقلی تهیه شده و مطالعات میکروسکوپی جهت شناسایی کانی‌های دگرسانی انجام پذیرفت. نتایج این مطالعات به‌عنوان شواهد کنترلی برای ارزیابی صحت و دقت پهنه‌های دگرسانی استخراج‌شده از داده‌های دورسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. افزون بر این، به‌منظور تایید طیفی پهنه‌های شناسایی‌شده از مقایسه منحنی‌های استاندار کتابخانه‌ای نرم‌افزار ENVI و منحنی‌های مربوط به منطقه مورد مطالعه بهره گرفته شد تا میزان انطباق کانی‌شناسی و پاسخ طیفی پهنه‌های دگرسانی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳- داده‌ها و اطلاعات

بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیوی (حاج‌علیلو و رضایی، ۱۳۸۰)، قدیمی‌ترین واحدهای ورقه مربوط به پیش از کرتاسه شامل سریسیت‌شیست، آندالوزیت و میکاشیست است، اما در محدوده مورد مطالعه قدیمی‌ترین رخنمون‌ها به ائوسن تعلق دارد و از گدازه‌های آندزیتی تا بازالتی همراه با توف‌های شیشه‌ای با ساخت جریانی و حضور آپاتیت تشکیل شده‌اند. واحدهای جوان‌تر اواخر نئوژن به صورت کنگلومرای قرمز با سیمان آهکی ـ رسی و جورشدگی ضعیف رخنمون دارند که قطعات آن به‌طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن منشا گرفته و بر روی آندزیت‌بازالت‌های ائوسن و گاه ریولیت‌های الیگوسن قرار گرفته‌اند. بخش بالایی این توالی با تناوب مارن و ماسه‌سنگ‌های نئوژن همراه است که در صحرا تفکیک‌پذیر نیست. این رخنمون‌ها در دو سوی جاده اردبیل ـ خلخال گسترش دارند. جوان‌ترین واحد منطقه رسوبات رودخانه‌ای کواترنری شامل قلوه‌سنگ، شن و ماسه در بستر رودخانه‌های گیوی‌چای و سنگورچای است.

منطقه فیروزآباد در جنوب‌باختر استان اردبیل و در پهنه ساختاری البرز-آذربایجان قرار دارد. براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ (شکل ۱؛ شرکت آذر ساروج سبلان، ۱۴۰۲) واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه به ۴ گروه تقسیم می‌شوند که قدیمی‌ترین و گسترده‌ترین آن‌ها سکانس ائوسن است. این واحد شامل سنگ‌های آتشفشانی حدواسط با ترکیب تراکیت تا لاتیت، خمیره میکرولیتی حفره‌دار و بلورهای درشت آلکالی‌فلدسپار بوده و دگرسانی‌های سیلیسی، سریسیتی و کربناتی ناشی از فعالیت‌های گرمابی در آن مشاهده می‌شود. میان‌لایه‌ای از آگلومرا و لیتیک‌توف کریستالی نیز درون این مجموعه وجود دارد که به‌طور عمده در شمال منطقه رخنمون داشته و حالت صخره‌ساز با هوازدگی کم دارد. کنگلومرای ناهمگون (هتروژن) قرمز رنگ الیگوسن به صورت دگرشیب بر روی واحدهای ائوسن قرار گرفته و بخش‌های گسترده‌ای از منطقه را پوشانده است و حدود ۲۰ درصد مساحت نیز با نهشته‌های آبرفتی جوان پوشیده شده است. از نظر ساختاری، منطقه تحت تاثیر سامانه‌های گسلی تبریز، ارس، ماسوله، آستارا، سنگ‌آباد و بزگوش بوده و راستای چیره آن شمال‌خاوری-جنوب‌باختری و هم‌راستا با سامانه گسلی ارس است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه فیروزآباد (شرکت آذر ساروج سبلان، ۱۴۰۲).

Figure 1. Geological map of Firuzabad (Azar Saroj Sabalan Company, 2023).

۴- بحث

با توجه به گستردگی منطقه مورد مطالعه و ماهیت هیدروترمال دگرسانی‌ها، استفاده از داده‌های دورسنجی به‌عنوان گام نخست در تحلیل فضایی زون‌های دگرسانی، رویکردی کارآمد و متداول در مطالعات اکتشاف معدنی محسوب می‌شود. سنجنده‌های ASTER و Landsat 9 با دارا بودن باندهای چندطیفی در محدوده‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز کوتاه‌موج، امکان شناسایی و تفکیک پاسخ‌های طیفی کانی‌های شاخص دگرسانی را در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌کنند. از این‌رو، در این پژوهش ابتدا با بهره‌گیری از روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای نظیر ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری باندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و نقشه‌برداری زاویه طیفی، الگوهای فضایی زون‌های دگرسانی محتمل شناسایی و بارزسازی شده‌اند تا مبنایی برای تفسیرهای زمین‌شناسی و بررسی‌های میدانی هدفمند فراهم شود.

۴-۱- سنجنده لندست

سنجنده‌های لندست، به‌ویژه OLI/TIRS، دارای باندهای مرئی و مادون‌قرمز نزدیک (VNIR)، مادون‌قرمز کوتاه (SWIR) و مادون‌قرمز حرارتی (TIR) هستند که وضوح مکانی آن‌ها بین ۱۵ تا ۳۰ متر برای باندهای بازتابی و حدود ۱۰۰ متر برای باندهای حرارتی است و پوشش صحنه‌ای هر تصویر حدود ۱۸۰ کیلومتر عرض دارد (Roy et al., 2014; Wulder et al., 2022). از این داده‌ها می‌توان برای بارزسازی و نقشه‌برداری پهنه‌های دگرسانی گرمابی، به‌ویژه دگرسانی آرژیلیکی و اکسیدآهن استفاده کرد. همچنین داده‌های سنجنده لندست برای شناسایی پوشش‌های گیاهی و تحلیل ساختارهای زمین‌ساختی مناسب هستند.

۴-۲- سنجنده استر

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) یک سنجنده چندطیفی پیشرفته است که شامل ۱۴ باند طیفی است که شامل ۳ باند در محدوده مرئی و مادون‌قرمز نزدیک (VNIR)، ۶ باند مادون‌قرمز کوتاه (SWIR) و ۵ باند مادون‌قرمز حرارتی (TIR) می‌باشد. وضوح مکانی این باندها به ترتیب ۱۵ متر (VNIR)، ۳۰ متر (SWIR) و ۹۰ متر (TIR) است و پوشش هر تصویر سنجنده استر حدود ۶۰ کیلومتر عرض دارد، که امکان پایش پهنه‌های وسیع زمین‌شناسی را فراهم می‌کند (NASA Earthdata, 2023; NASA, 2005). این سنجنده به عنوان ابزار بسیار قدرتمندی برای شناسایی و نقشه‌برداری پهنه‌های دگرسانی گرمابی به‌شمار می‌رود. باندهای SWIR آن برای تشخیص کانی‌های شاخص دگرسانی بسیار حساس هستند و امکان استخراج شاخص‌های طیفی و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) را فراهم می‌آورند. همچنین باندهای حرارتی (TIR) توانایی استخراج اطلاعات مربوط به ضریب نشر سطحی و خواص تابشی سطح زمین را دارند، که می‌تواند الگوهای دگرسانی سیلیسی و تغییرات حرارتی سطحی را مشخص کند. این ویژگی‌ها استر را به ابزاری توانمند برای تحلیل دگرسانی‌های گرمابی، زمین‌ساخت سطحی و مطالعات کانی‌شناسی تبدیل کرده‌است (Chen et al., 2022; El-Desoky et al., 2022; Semi-Automatic Classification Plugin, 2023).

۴-۳- پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای

برای آنالیز داده‌ها و استخراج اطلاعات مورد نیاز از تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر، لازم است پیش‌پردازش و تصحیحاتی روی این داده‌ها اعمال شود. عملیات پیش‌پردازش به‌منظور برطرف‌سازی خطاهای تصویر، شامل تصحیح مشکلات نقایص و نوفه (نویز)های به‌وجودآمده در فرایند تصویربرداری پیش از انجام پردازش‌های اصلی ضروری می‌باشد. این پیش‌پردازش‌ها به‌طور عمده شامل ۲ دسته پیش‌پردازش‌های هندسی و رادیومتریک هستند. پیش‌پردازش‌های هندسی برای انطباق کامل سیستم مختصات تصویر با سیستم مختصات زمینی است. پیش‌پردازش‌های رادیومتریک شامل تصحیحات سنجنده و تصحیحات اتمسفری می‌باشد. در تصحیحات سنجنده، کالیبراسیون داخلی سنجنده و نحوه عمل آشکارسازهای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. تصحیحات اتمسفری نیز شامل حذف اثراتی چون عبور نور خورشید از ابر، ذرات معلق موجود در فضا، اکسیژن، نیتروژن و عناصر دیگر که ایجاد نوفه (پارازیت) کرده، می‌باشد. به عبارت دیگر تصحیحات اتمسفری عواملی که روی طیف‌های دریافتی تاثیر گذاشته‌اند را حذف و در تصاویر دریافتی ایجاد تباین (کنتراست) می‌کنند.

تصاویر سنجنده ASTER استفاده شده در سطح L1T بوده که براساس اطلاعات مربوط به المان‌های مداری ماهواره و با دقت بسیار بالا تصحیح سه‌بعدی شده‌اند؛ یعنی نیازی به انجام تصحیحات هندسی نمی‌باشد. برای تصاویر سنجنده استر فقط تصحیحات رادیومتریک انجام می‌گیرد. برای انجام این تصحیحات از روش QUAC (Quick Atmospheric Correction) در نرم‌افزار ENVI استفاده شده‌است. همچنین به‌دلیل اینکه در بارزسازی برخی دگرسانی‌ها و مطالعات زمین‌شناسی، مانند بارزسازی دگرسانی سیلیسی و کربناتی، باندهای حرارتی سنجنده استر دارای اهمیت هستند، لازم است از داده‌هایی که شامل باندهای حرارتی می‌باشند، استفاده شود. برای این باندها نیز لازم است که به صورت جداگانه تصحیحات اتمسفری انجام بگیرد.

در رابطه با تصویر مورد استفاده از سنجنده لندست نیز از تصویر سنجنده لندست ۹ در سطح ۲ و کالکشن ۲ استفاده شده‌است که تصحیحات مورد نیاز برای این تصاویر اعمال شده و نیاز به انجام دوباره تصحیحات نمی‌باشد. همچنین در این مطالعه از نرم‌افزار ENVI5.6 برای پردازش داده‌های دورسنجی و بارزسازی پهنه‌های دگرسانی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده‌است.

۴-۴- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

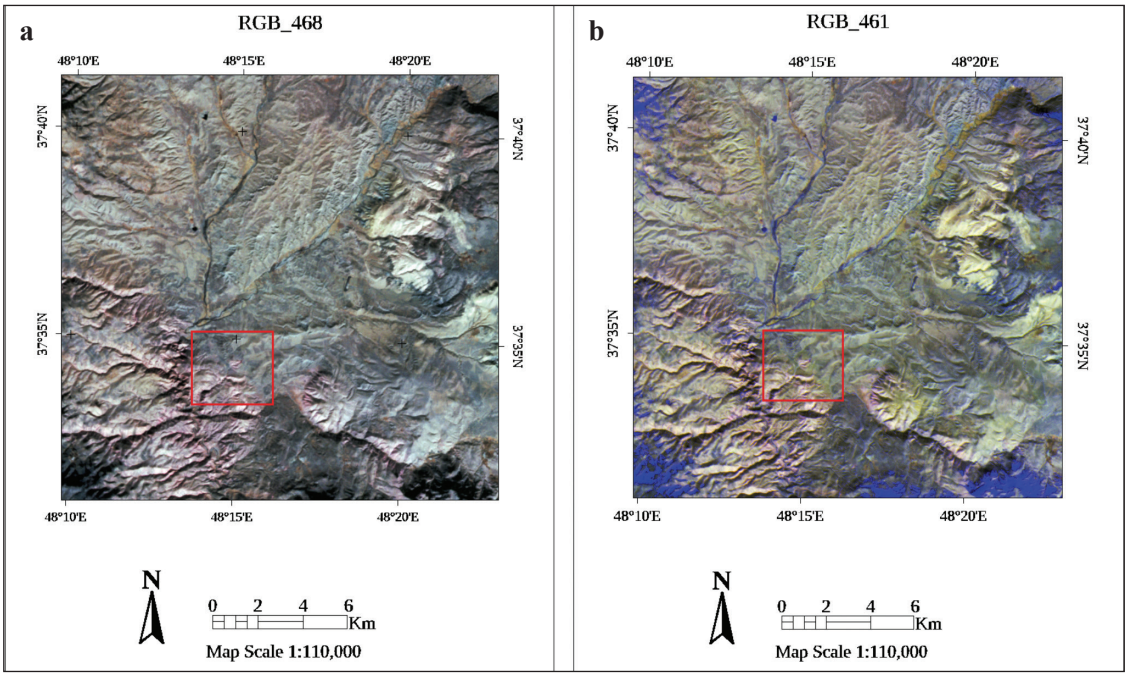
پردازش تصاویر ماهواره‌ای امکان استخراج اطلاعات دقیق از پدیده‌های سطح زمین را فراهم می‌سازد. این فناوری با تحلیل داده‌های طیفی و مکانی، به عنوان ابزاری قدرتمند برای شناسایی ویژگی‌های زمین‌شناسی، پایش تغییرات محیطی، مدیریت منابع و ارزیابی مخاطرات طبیعی شناخته شده‌است. پردازش علمی تصاویر ماهواره‌ای سبب افزایش دقت تفسیر، بهبود تفکیک پدیده‌ها و تولید نقشه‌ها و مدل‌های اطلاعاتی قابل اعتماد برای مطالعات پژوهشی و کاربردی می‌شود. پردازش داده‌های ماهواره‌ای به طور کلی در دو چارچوب پردازش بصری و پردازش رقومی انجام می‌پذیرد. ترکیب این دو رویکرد سبب افزایش دقت و قابلیت تفکیک عوارض سطحی شده و امکان شناسایی مطمئن‌تر ویژگی‌های زمین‌شناسی را فراهم می‌سازد. در روش پردازش بصری، تفسیر تصاویر بر پایه مشاهده و تحلیل کیفی الگوهای طیفی و فضایی صورت می‌گیرد که یکی از ابزارهای متداول آن تهیه تصاویر ترکیب رنگی کاذب از طریق قرار دادن باندهای طیفی مختلف در کانال‌های رنگی قرمز، سبز و آبی (RGB) است (مختاری و همکاران، ۱۴۰۲).

۴-۵- روش ترکیب رنگی کاذب (FCC)

یکی از روش‌های موثر در شناسایی پدیده‌های زمین‌شناسی، بهره‌گیری از روش ترکیب رنگی باندها تصاویر ماهواره‌ای است. از آنجا که بیشتر تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت چندباندی ارائه می‌شوند، تحلیل هر باند به‌طور مستقل نمی‌تواند تمامی اطلاعات مورد نیاز را تامین کند. درک ارتباط میان طول‌موج‌های مختلف برای تشخیص ویژگی‌های سطح زمین و نوع پوشش منطقه، اهمیت زیادی دارد و نمایش هم‌زمان چند باند طیفی بر روی سامانه‌های پردازش تصویر، امکان استخراج اطلاعات جامع‌تر و دقیق‌تری را فراهم می‌سازد. این رویکرد در تولید تصاویر ترکیب رنگی کاذب متداول بوده که طی آن ۳ باند طیفی انتخابی به رنگ‌های آبی، سبز و قرمز

(RGB) نسبت داده می‌شوند و بدین ترتیب قابلیت تفکیک بصری پدیده‌های مورد نظر افزایش می‌یابد (Chaves et al.,1991).

در روش ترکیب رنگی کاذب سنجنده استر برای شناسایی و تشخیص دگرسانی‌های گرمابی نتایج بهتری را خواهد داشت که به دلیل وجود باندهای مادون‌قرمز کوتاه این سنجنده می‌باشد. در این سنجنده‌ها، ترکیب رنگی کاذب باندهای RGB-468 مناسب‌ترین ترکیب برای شناسایی مناطق دگرسان می‌باشند. باتوجه به منحنی‌های استاندارد USGS، به‌دلیل جذب کانی‌های شاخص دگرسانی فیلیک ـ آرژیلیک در باند ۶ و جذب کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک در باند ۸ برای آشکارسازی در محدوده کانسار مناسب می‌باشد (Azizi et al., 2010; Boloki et al., 2009; Tommaso et al., 2007). در این ترکیب رنگی، دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی تا قرمز و دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز نمایان می‌شود. (شکل۲-a) افزون برآن، ترکیب رنگی کاذب باندهای RGB-461 نیز برای بارزسازی مناطق دارای اکسیدآهن و دگرسانی‌های گرمابی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این ترکیب رنگی مناطق دارای اکسیدآهن به رنگ سبز، مناطق دارای دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ آبی و دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی و زرد مایل به صورتی مشخص می‌شوند (آلیانی و همکاران، ۱۳۹۱) (شکل۲-b).



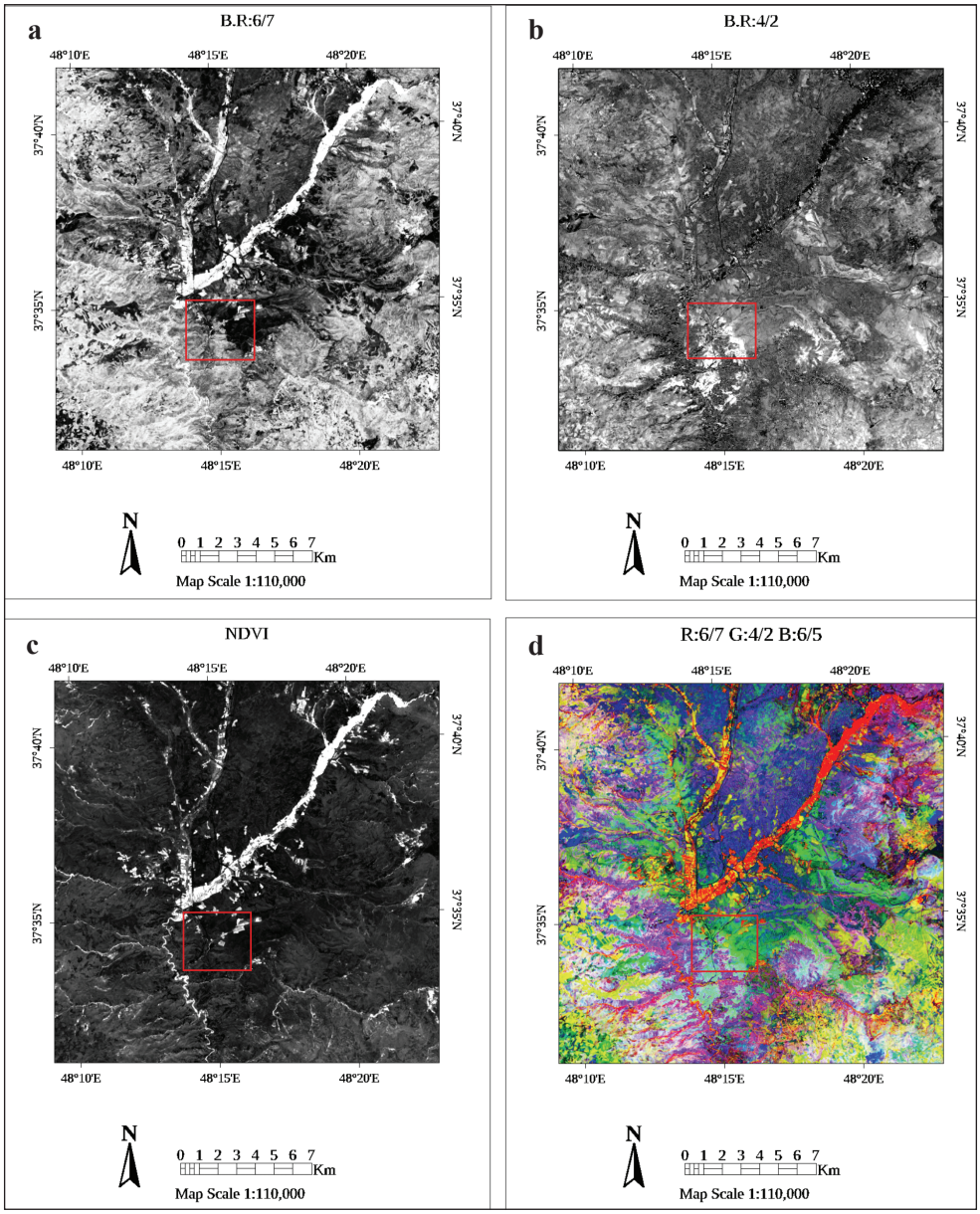
شکل۲- تصاویر ترکیب رنگی کاذب سنجنده استر منطقه مورد مطالعه: a) RGB-468 که مناطق صورتی رنگ در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده دگرسانی آرژیلیکی در منطقه می‌باشد. b) RGB-461؛ در منطقه مورد مطالعه مناطق متمایل به صورتی نشانگر دگرسانی آرژیلیکی و مناطق سبز روشن نشان دهنده اکسید آهن در منطقه می‌باشند. مناطق دارای رنگ آبی در حاشیه تصویر پوشش ابری بوده و مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه نمی‌باشند.

Figure 2. False Color Combination images of the ASTER sensor in the study area: a) RGB-468, where the pink areas indicate argillic alteration in the study area. b) RGB-461; in the study area, the pinkish areas indicate argillic alteration and the light green areas indicate iron oxide. The blue areas at the edge of the image are cloud cover and are not related to propylitic alteration in the area.

۴-۶- روش نسبت‌گیری باندی (B.R)

یکی از روش‌های متداول در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، روش نسبت‌گیری باندی است. این روش از شیوه‌های مفید در بارزسازی پدیده‌های در تصاویر چندباندی به‌شمار می‌رود (Wilkinson et al., 2020). از روش نسبت‌گیری باندی برای کاهش تاثیر روشنایی خورشید، توپوگرافی و بارزسازی اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود. در این روش از تقسیم باندهایی که در شناسایی پدیده مورد بررسی تاثیرگذار هستند، انجام می‌گیرد؛ به‌صورتی که باندی که میزان بازتابش از هدف مورد بررسی در آن بیشتر است، در صورت کسر و باند دیگر که میزان جذب برای هدف در آن بیشتر است، در مخرج کسر قرار می‌گیرد.

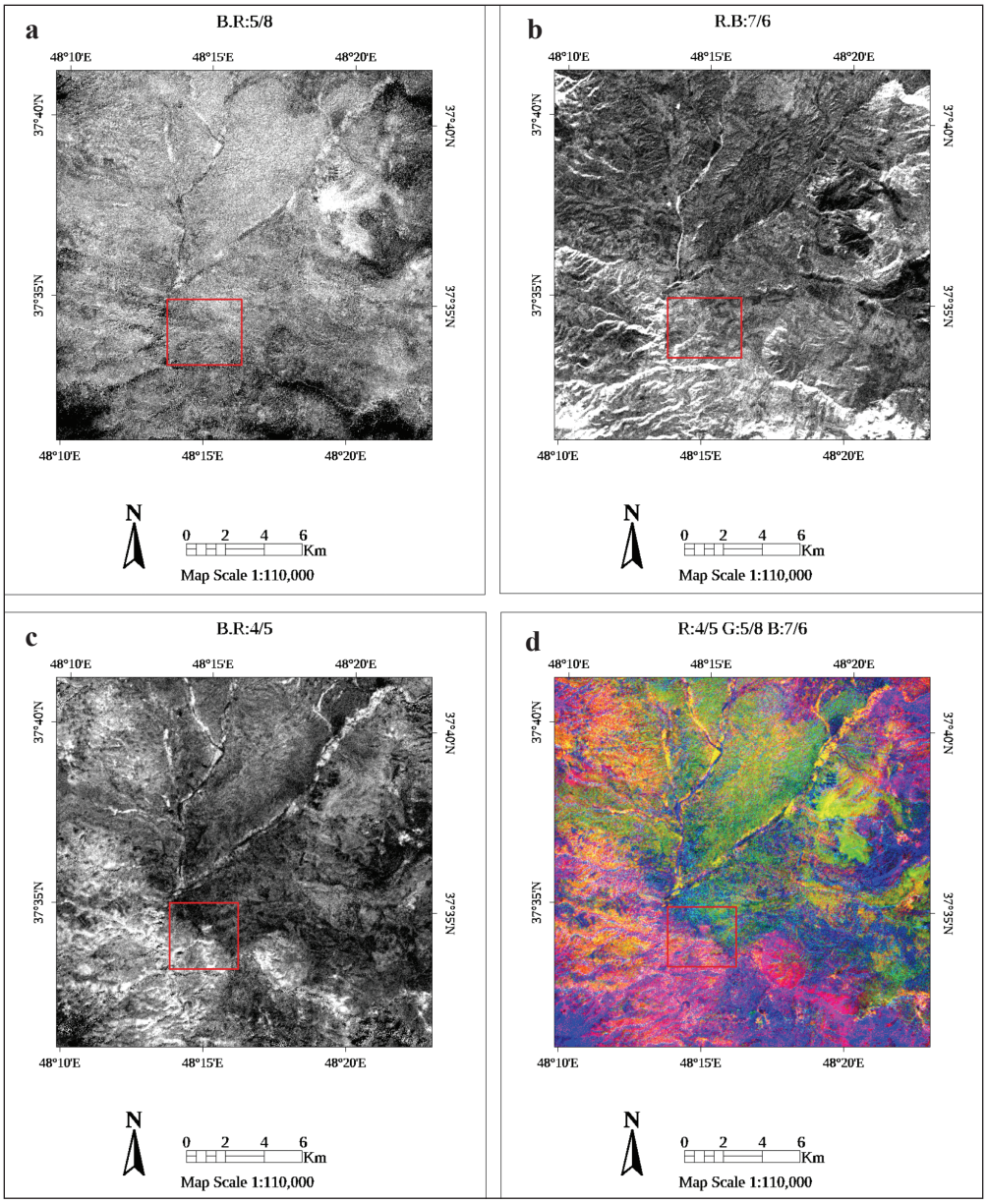
جهت بارزسازی مناطق دگرسانی با استفاده از تصاویر حاصل از سنجنده لندست، نسبت باند ۶ به ۷ می‌تواند نشانگر مناطق دگرسانی باشند. در این تصویر مناطق دگرسان شده، به صورت پیکسل‌های روشن‌تر قابل مشاهده می‌باشند. شکل (۳ – a) در این سنجنده، می‌توان از نسبت باندهای ۴ به ۲ برای شناسایی مناطق دارای اکسیدآهن استفاده کرد که در تصویر حاصل نیز مناطق مشخص شده با پیکسل‌های روشن‌تر، نشانگر مناطق اکسیدآهن می‌باشند (اسمعیل‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳) (شکل۳ – b). البته این نکته حائز اهمیت می‌باشد که برای شناسایی دقیق‌تر مناطق دگرسانی در منطقه مورد مطالعه، بهتر است پوشش‌های گیاهی منطقه را نیز شناسایی نمود؛ زیرا ممکن است در شناسایی مناطق دگرسانی و واحدهای سنگی، پوشش‌های گیاهی نیز به عنوان مناطق دگرسانی در نظر گرفته شوند (شکل۳ – c). همچنین ترکیب رنگی R:6/7 G:4/2 B:6/5 که نتایج حاصل آن، در شکل (۳ – d) قابل مشاهده است، نمایان‌گر مناطق دگرسانی می‌باشد که در این تصویر، مناطق نارنجی رنگ نشانگر دگرسانی فیلیک، مناطق صورتی نشانگر دگرسانی آرژیلیک، مناطق سبز نشانگر دگرسانی پروپیلیتیک و مناطق زرد نشانگر پوشش گیاهی در منطقه می‌باشند (مختاری و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۳- پردازش تصاویر سنجنده لندست: a) روش نسبت‌گیری باند ۶ به ۷؛ پیکسل‌های روشن در تصویر نشان‌دهنده مناطق دگرسانی در منطقه می‌باشند. b) نسبت‌گیری باندهای ۴ به ۲؛ پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده مناطق اکسیدآهن می‌باشند. c) شاخص NDVI که در تصویر حاصل، پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده پوشش گیاهی در منطقه می‌باشند. d) ترکیب رنگی R:6/7 G:4/2 B:6/5 که در منطقه مورد مطالعه، مناطق صورتی رنگ نشانگر دگرسانی آرژیلیکی می‌باشند.

Figure 3. Landsat images processing: a) Ratio of bands 6 to 7; bright pixels in the image indicate alteration areas in the region. b) Ratio of bands 4 to 2; bright pixels indicate iron oxide areas. c) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) index, in which bright pixels in the resulting image indicate vegetation cover in the region. d) Color combination R:6 / 7 G:4 / 2 B:6 / 5, in the study area, pink areas indicate argillic alteration.

داده‌های سنجنده استر به دلیل دارا بودن باندهای محدوده SWIR، انتظار می‌رود که در رابطه با بارزسازی مناطق دگرسان، نتایج بهتری را نمایان کنند. برای بارزسازی هر پهنه دگرسانی باتوجه به کانی‌های شاخص آن پهنه و باندهای دارای بازتاب و جذب قوی توسط این کانی‌ها، که توسط کتابخانه طیفی نرم‌افزار ENVI5.6 بررسی و تعیین شده‌اند، از نسبت‌های باندی مختلفی برای مشخص کردن آن‌ها استفاده می‌شود. برای نمایان کردن پهنه‌های مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک از نسبت باندهای ۵ به ۸ (شکل۴ – a)، برای پهنه‌های دگرسانی فیلیک از نسبت باندهای ۷ به ۶ (شکل۴ – b) و برای پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک از نسبت باندهای ۴ به ۵ (شکل۴ – c) استفاده کرد. بعد از به دست آوردن نسبت‌های باندی می‌توان از روش ترکیب رنگی کاذب به‌صورت R:4/5 G:5/8 B:7/6 استفاده کرد (شکل۴ – d). در تصویر حاصل پیکسل‌های قرمز و قرمز مایل به صورتی نشانگر پهنه آرژیلیک، پیکسل‌های سبز نشانگر پهنه پروپیلیتیک و پیکسل‌های آبی نشانگر پهنه فیلیک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۴- پردازش تصاویر سنجنده استر: a) روش نسبت گیری باند ۵ به ۸؛ پیکسل‌های روشن در تصویر نشان‌دهنده دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه می‌باشند. b) نسبت گیری باندهای ۷ به ۶؛ پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک در منطقه می‌باشند. c) نسبت گیری باندهای ۴ به ۵؛ پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده دگرسانی آرژیلیک در منطقه می‌باشند. d) ترکیب رنگی R:4/5 G:5/8 B:7/6 که در منطقه مورد مطالعه مناطق قرمز تا صورتی رنگ نشانگر دگرسانی آرژیلیکی می‌باشند.

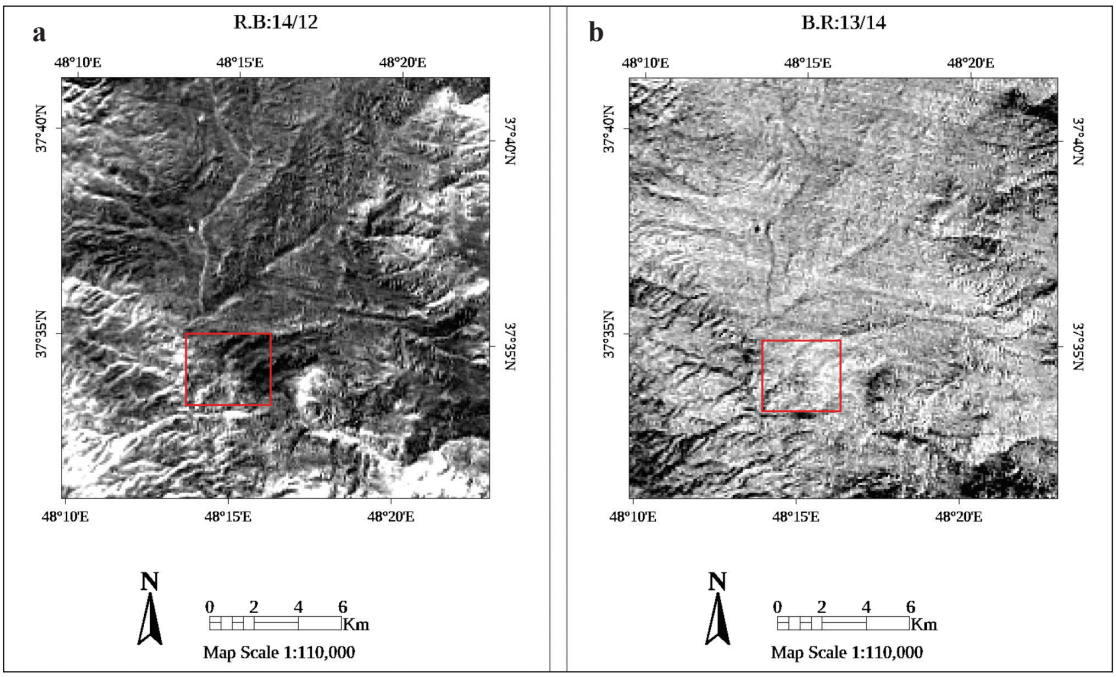
Figure 4. ASTER sensor images processing: a) Ratio of bands 5 to 8; bright pixels in the image indicate propylitic alteration in the area. b) Ratio of bands 7 to 6; bright pixels indicate phyllic alteration in the area. c) Ratio of bands 4 to 5; bright pixels indicate argillic alteration in the area. d) Color combination R:4 / 5 G:5 / 8 B:7 / 6, in the study area, red to pink areas indicate argillic alteration.

برای شناسایی مناطق دگرسانی سیلیسی و سنگ‌های غنی از سیلیس در منطقه مورد مطالعه، می توان نسبت باندهای ۱۴ به ۱۲ استفاده کرد (شکل۵ – a). در تصویر حاصل از این نسبت گیری باندی، پیکسل‌های روشن نشانگر مناطق دگرسانی سیلیسی و سنگ‌های غنی از سیلیس می‌باشند (مختاری و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین برای شناسایی مناطق دارای دگرسانی کربناتی در منطقه، از نسبت باندی ۱۳ به ۱۴ استفاده شده است (شکل۵ – b).

۴-۷- روش آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA)

تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی روشی قدرتمند برای فشرده‌سازی و از بین بردن اثرات ناخواسته در تصاویر ماهواره‌ای به‌شمار می‌رود (علوی‌پناه،۱۳۸۲). در این روش، مجموعه داده‌های اصلی که دارای همبستگی نسبت به هم می‌باشند، به مولفه‌های فاقد همبستگی نسبت به هم تبدیل می‌شوند. در صورتی که در این روش از باندهای مناسبی برای بارزسازی پدیده موردنظر استفاده شود، نتیجه مناسب و دقیقی حاصل

خواهد شد. روش آنالیز مولفه‌های اصلی در افزایش تمایز میان پدیده‌های مختلف و در نتیجه تهیه نقشه‌های دگرسانی و سنگ‌شناختی کاربرد زیادی دارد (Adiri et al., 2016; 2020). در روش آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی یا روش کروستا (DPCA) از باندهای خاصی که کانی‌های هدف در آن محدوده‌ها دارای ویژگی‌های جذب بالا و انعکاس بالا هستند، انتخاب می‌شود. البته جلوگیری از تداخل با مناطق حاوی کانی‌های دیگر نیز در این انتخاب مدنظر قرار می‌گیرد که به همین دلیل روش کروستا دقت بالایی نسبت به سایر روش‌ها دارد. برای پهنه‌های دگرسان لازم است که براساس نوع دگرسانی از یک سری باندهای محدوده SWIR سنجنده استر استفاده شود.



شکل ۵- پردازش تصاویر سنجنده استر: a) نسبت گیری باندهای ۱۴ به ۱۲؛ پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده مناطق دگرسانی سیلیسی می‌باشند. b) نسبت‌گیری باندهای ۱۳ به ۱۴؛ پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده دگرسانی کربناتی در منطقه می‌باشند.

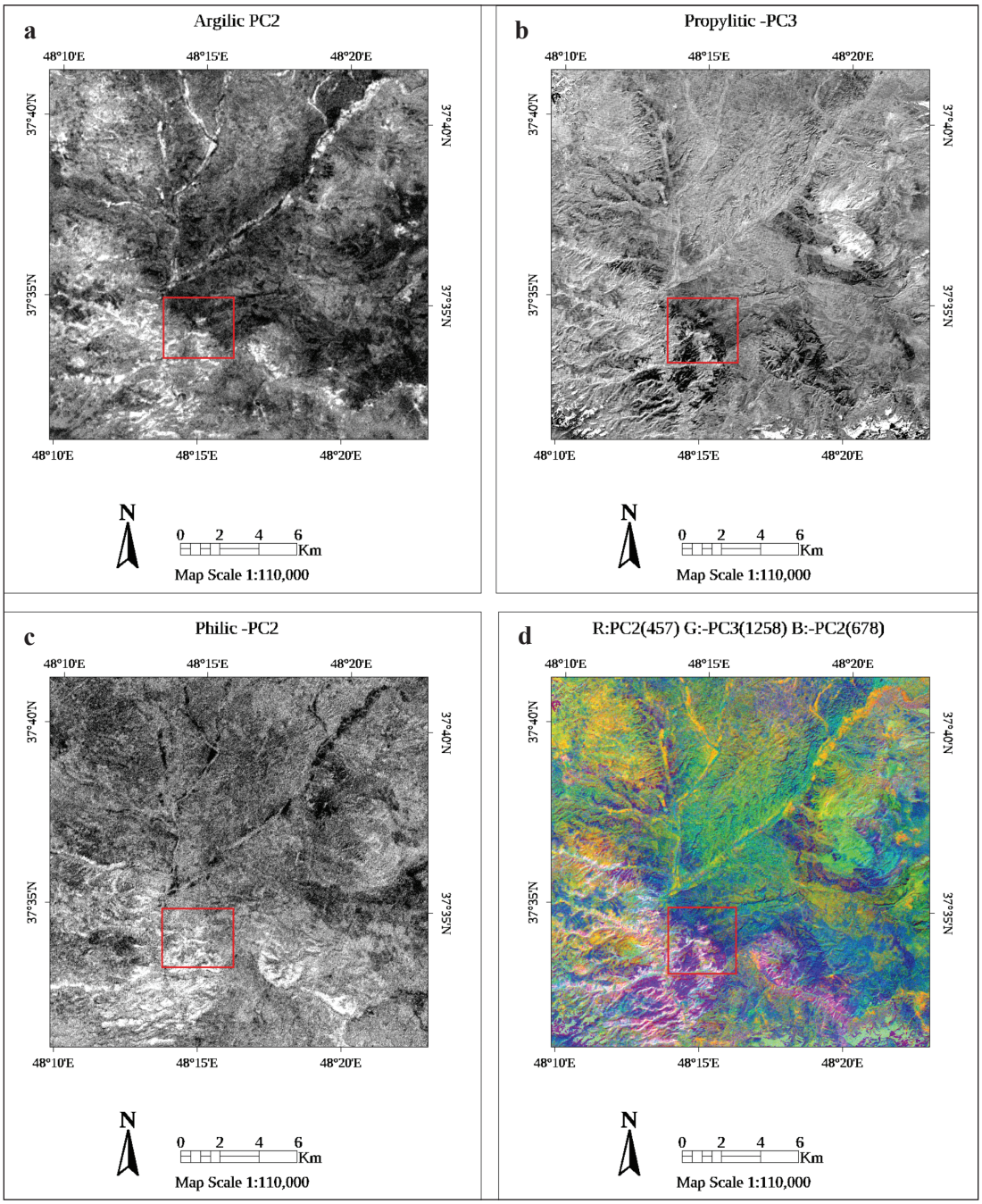
Figure 5. ASTER sensor images processing: a) Ratio of bands 14 to 12; bright pixels indicate silicic alteration aeras. b) Ratio of bands 13 to 14; bright pixels indicate carbonate alteration in the region.

پس از بررسی رفتارهای طیفی کانی‌های شاخص هر دگرسانی با استفاده از کتابخانه نرم‌افزار، برای شناسایی پهنه دگرسانی آرژیلیکی از باندهای ۴، ۵ و ۷، برای شناسایی پهنه دگرسانی پروپیلیتیک از باندهای ۱، ۲، ۵ و ۸ و برای شناسایی پهنه دگرسانی فیلیک از باندهای ۶، ۷ و ۸ به عنوان ورودی روش کروستا استفاده شد. در پهنه دگرسانی آرژیلیکی با توجه به این که در باند ۴ بازتاب و در باند ۵ جذب صورت گرفته، بیشترین اختلاف این باندها در مولفه ۲ (PC2) روش کروستا صورت گرفته است (جدول۱) و تصویر حاصل از آن در شکل ۶ – a به صورت پیکسل‌های سفید رنگ قابل مشاهده‌است. در پهنه دگرسانی پروپیلیتیکی، در باند ۱ بازتاب و در باند ۲ جذب صورت گرفته و بیشترین اختلاف این باندها در مولفه ۳ (PC3) وجود دارد (جدول۲) ولی باتوجه به این که باند ۱ به صورت منفی و باند ۲ به صورت مثبت است، در تصویر حاصل از آن، پهنه دگرسانی پروپیلیتیکی با پیکسل‌های تیره مشخص خواهد شد. پس (-PC3) برای این پهنه درنظر گرفته می‌شود تا نتیجه به صورت پیکسل‌های روشن مشخص شود شکل (۶ – b). در پهنه دگرسانی فیلیکی نیز در باند ۷ بازتاب و در باند ۶ جذب صورت گرفته و بیشترین اختلاف آن‌ها نیز در مولفه ۲ (PC2) قابل مشاهده‌است (جدول۳)؛ اما باتوجه به این که باند ۷ به صورت منفی و باند ۶ به صورت مثبت است این مولفه نیز به صورت (-PC2) در نظر گرفته شده‌است و در تصویر حاصل از آن پیکسل‌های سفید رنگ گویای پهنه دگرسانی فیلیک در منطقه مورد مطالعه می‌باشند شکل (۶ – c). همچنین در نهایت تصویر ترکیب رنگی کاذب حاصل از روش کروستا به صورت R: PC2(457), G: -PC3(1258), B: -PC2(678) در شکل (۶ – d) قابل مشاهده است که مناطق قرمز تا صورتی نشانگر پهنه دگرسانی آرژیلیک، مناطق سبز نشانگر پهنه دگرسانی پروپیلیتیک و مناطق آبی رنگ نشانگر پهنه دگرسانی فیلیک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جدول۱- آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای پهنه دگرسانی آرژیلیکی.

Table 1. Demixed Principle Component Analysis for the argillic alteration zone.

Eigenvector	Band 4	Band 5	Band 7
PC1	0.686264	0.573355	0.447555
PC2	0.724677	-0.591703	-0.353172
PC3	-0.62327	-0.566702	0.821562



شکل ۶- پردازش تصاویر سنجنده استر به روش کروستا: a) تصویر (PC2) مربوط به ترکیب باندهای ۴، ۵، ۷؛ پیکسل‌های روشن در تصویر نشان‌دهنده دگرسانی آرژیلیک در منطقه می‌باشند. b) تصویر (PC3-) مربوط به ترکیب باندهای ۱، ۲، ۵، ۸؛ پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه می‌باشند. c) تصویر (PC2-) مربوط به ترکیب باندهای ۶، ۷، ۸؛ پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک در منطقه می‌باشند. d) ترکیب رنگی کاذب (R: PC2(457), G: -PC3(1258), B: -PC2(678 که در منطقه مورد مطالعه مناطق قرمز تا صورتی رنگ نشانگر دگرسانی آرژیلیکی می‌باشند.

Figure 6. ASTER sensor images processing by the Crusta method: a) Image (PC2) related to the combination of bands 4, 5, 7; bright pixels in the image indicate argillic alteration in the study area. b) Image (-PC3) related to the combination of bands 1, 2, 5, 8; bright pixels indicate propylitic alteration in the study area. c) Image (-PC2) related to the combination of bands 6, 7, 8; bright pixels indicate phyllic alteration in the study area. d) False color combination R: PC2(457), G: -PC2(1258), B: -PC2(678); red to pink areas indicate argillic alteration in the study area.

جدول ۲- آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای پهنه دگرسانی پروپیلتیکی.

Table 2. Demixed Principle Component Analysis for the propylitic alteration zone.

Eigenvector	Band 1	Band 2	Band 5	Band 8
PC1	-0.643948	-0.741159	-0.147736	-0.119110
PC2	-0.201146	-0.075094	0.785208	0.580818
PC3	-0.731981	0.660107	-0.161199	0.049774
PC4	0.095259	-0.096450	-0.579342	0.803732

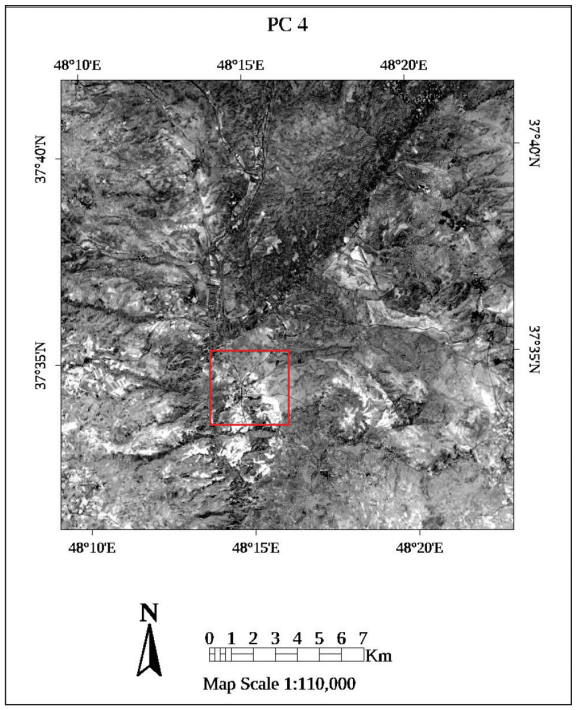
جدول ۳- آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای پهنه دگرسانی فیلیک.

Table 3. Demixed Principle Component Analysis for the phyllic alteration zone.

Eigenvector	Band 6	Band 7	Band 8
PC1	0.681255	0.529185	0.505821
PC2	0.732002	-0.500014	-0.462773
PC3	-0.008025	-0.685528	0.728002

با استفاده از داده‌های سنجنده لندست نیز به روش آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی، می‌توان مناطق دارای اکسیدآهن در منطقه را مشخص کرد. برای شناسایی اکسیدآهن در منطقه از باندهای ۲، ۴، ۵ و ۶ سنجنده لندست استفاده شده‌است.

باتوجه به بازتاب کانی‌های اکسیدآهن در باند ۴ و جذب در باند ۲، بیشترین اختلاف این باندها در مولفه ۴ (PC4) روش کروستا مشاهده شده‌است (جدول۴) و تصویر حاصل از آن در شکل۷ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۷- پردازش تصاویر سنجنده لندست به روش کروستا؛ تصویر (PC4) مربوط به ترکیب باندهای ۲، ۴، ۵، ۶؛ پیکسل‌های روشن در تصویر نشان‌دهنده اکسید آهن در منطقه می‌باشند.

Figure 7. Landsat sensor images Processing by the Crusta method; Image (PC4) is a combination of bands 2, 4, 5, 6; bright pixels in the image indicate Iron oxide in the study area.

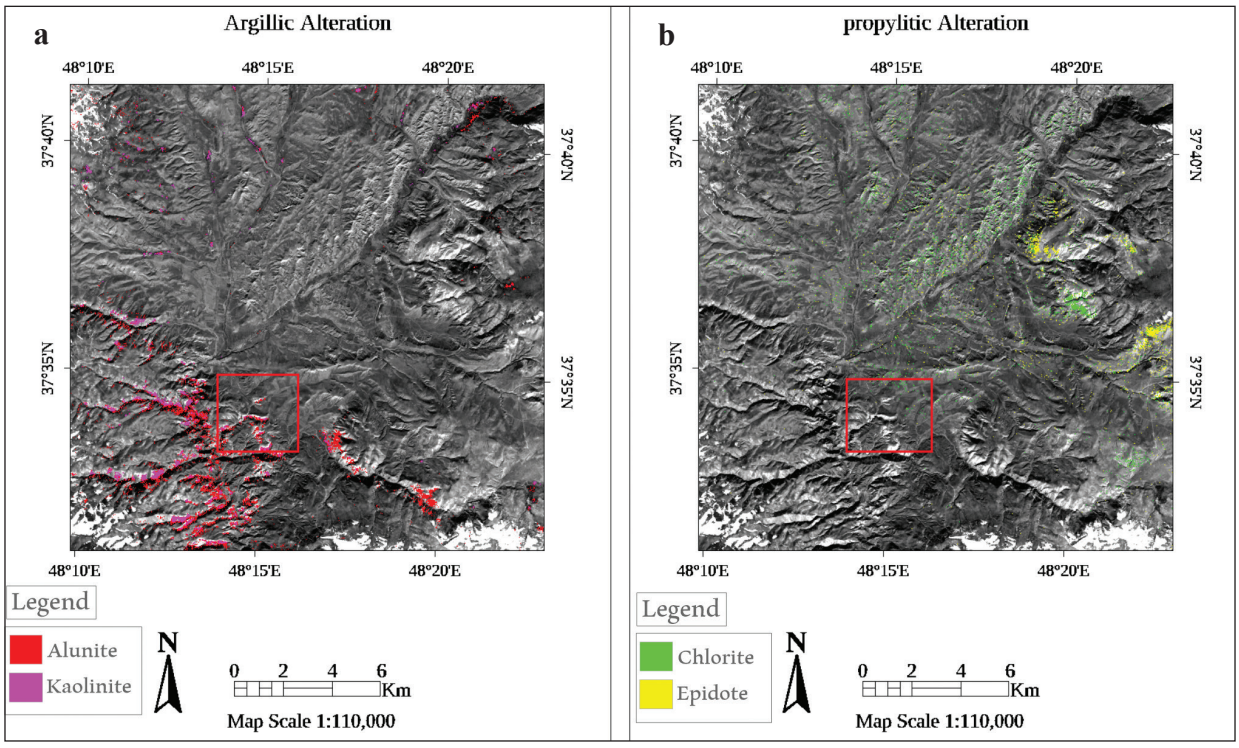
جدول ۴- آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای اکسیدآهن.

Table 4. Demixed Principle Component Analysis for Iron oxide.

Eigenvector	Band 2	Band 4	Band 5	Band 6
PC1	-0.204147	-0.470953	-0.573043	-0.638865
PC2	0.189427	0.346617	-0.818167	0.417824
PC3	-0.346402	-0.679352	-0.038223	0.645775
PC4	-0.895794	0.44329	-0.027637	-0.015772

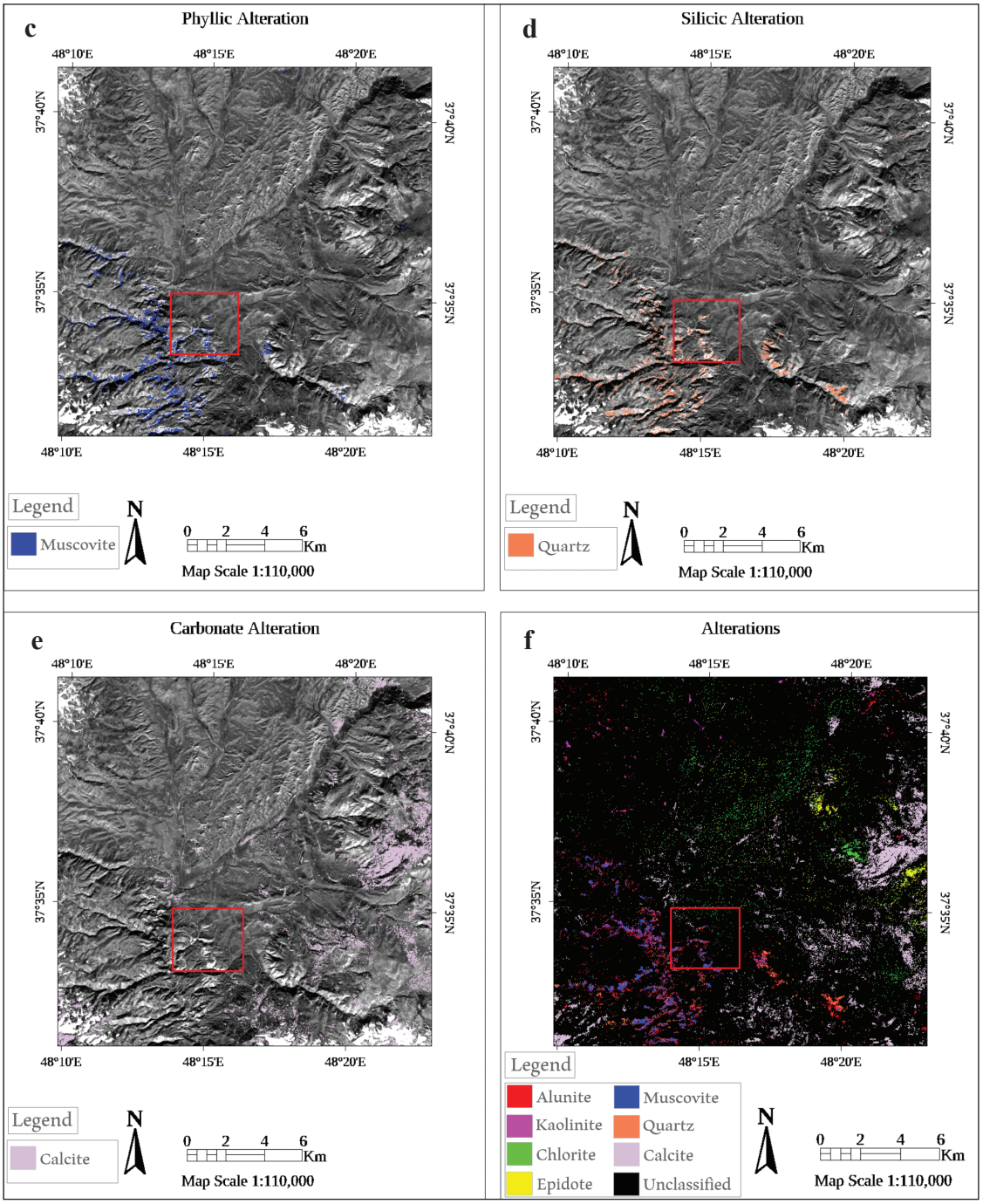
۴-۸- نقشه برداری زاویه طیفی (SAM)

روش نقشه‌برداری زاویه طیفی، یک روش طبقه‌بندی به صورت نظارت‌شده می‌باشد که در این روش نقشه‌برداری سریع پدیده‌های مورد مطالعه را از طریق محاسبه شباهت طیفی بین بردار تصویر با داده‌های طیفی مرجع ممکن می‌سازد (Yuhas et al., 1992). همچنین در این روش مشابهت بین دو طیف به وسیله زاویه‌طیفی بین آن دو محاسبه می‌شود. در این مطالعه، داده‌های طیفی مرجع، داده‌های کتابخانه‌ای USGS نرم‌افزار در نظر گرفته شده‌اند. برای بارزسازی پهنه آرژیلیک از طیف کانی‌های آلونیت و کائولینیت، برای بارزسازی پهنه پروپیلیتیک از طیف کانی‌های کلریت و اپیدوت، برای بارزسازی پهنه فیلیک از طیف کانی مسکوویت و برای بارزسازی دگرسانی سیلیسی و کربناتی در منطقه مورد مطالعه نیز به ترتیب از کانی کوارتز و کلسیت استفاده شده‌است و نتایج آن‌ها روی تصویر تصحیح‌شده سنجنده استر مشخص شده‌است (شکل ۸). همچنین در جدول ۵، نتایج مقادیر زوایای SAM برای بارزسازی هر گروه از کانی‌ها نشان داده شده‌است. در نهایت، طیف پیکسل‌های استخراج‌شده از مناطق شناسایی‌شده با روش SAM با طیف‌های مرجع USGS بهنجار شده نسبت به باندهای سنجنده ASTER مقایسه شد. همخوانی ویژگی‌های جذبی شاخص، صحت شناسایی کانی‌های دگرسانی و نتایج پردازش طیفی را تایید کرد (شکل ۹).



شکل ۸- پردازش تصاویر سنجنده استر به روش نقشه‌برداری زاویه‌طیفی: a) بارزسازی کانی‌های شاخص پهنه دگرسانی آرژیلیک، b) بارزسازی کانی‌های شاخص پهنه دگرسانی پروپیلیتیک،

Figure 8. ASTER sensor images Processing by spectral angle mapper method: a) Highlighting the indicator minerals of the argillic alteration zone, b) Highlighting the indicator minerals of the propylitic alteration zone,



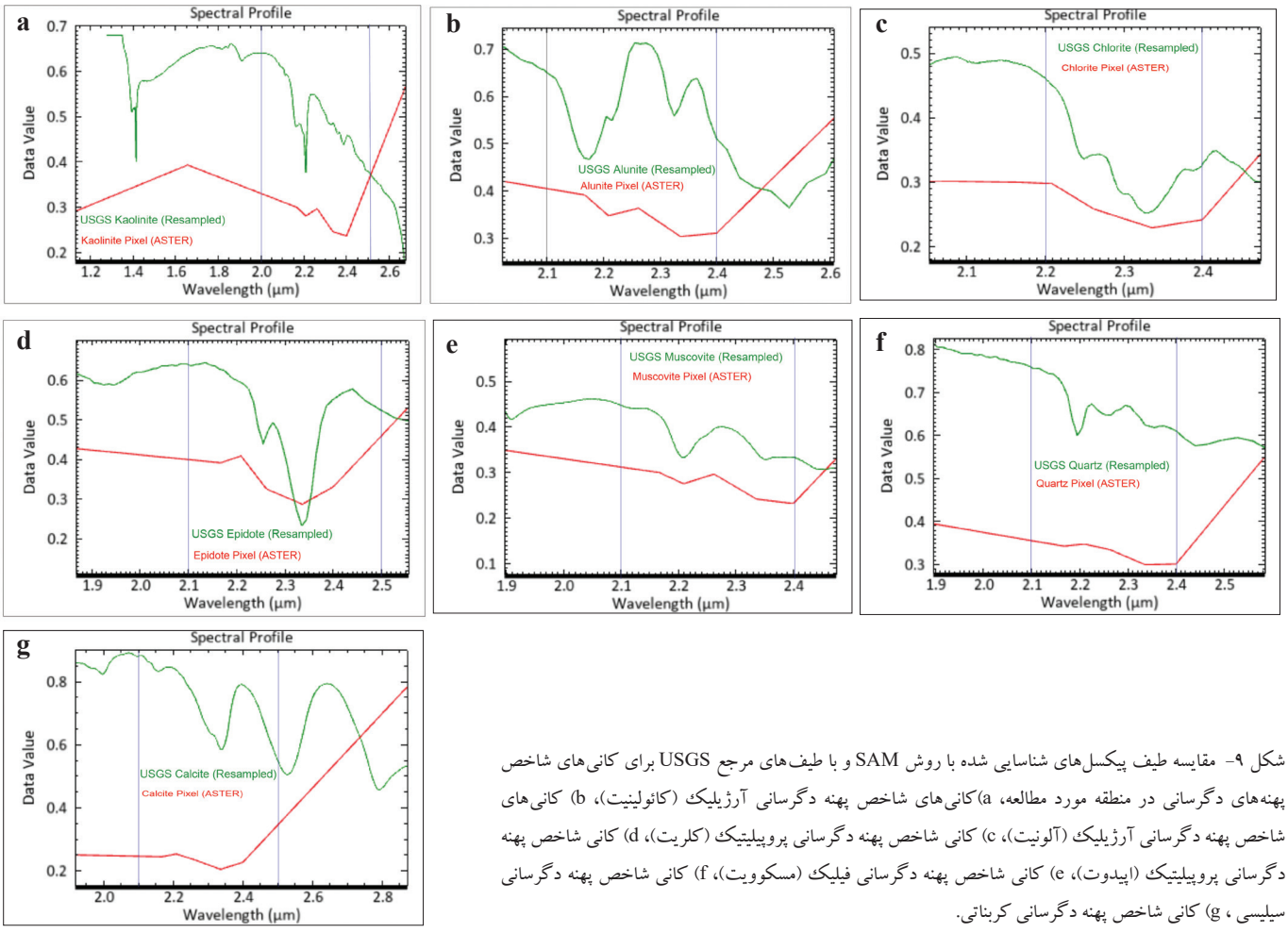
ادامه شکل ۸- پردازش تصاویر سنجنده استر به روش نقشه‌برداری زاویه‌طیفی: c) بارزسازی کانی‌های شاخص پهنه دگرسانی فیلیک، d) بارزسازی کانی شاخص پهنه دگرسانی سیلیسی، e) بارزسازی کانی شاخص دگرسانی کربناتی، f) بارزسازی دگرسانی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه؛ کانی‌های شاخص هر پهنه با رنگ‌های متفاوت نمایش داده شده‌اند.

Continued from Figure 8. ASTER sensor images Processing by spectral angle mapper method: c) Highlighting the indicator minerals of the phyllic alteration zone, d) Highlighting the indicator minerals of the siliceous alteration zone, e) Highlighting the indicator minerals of the carbonate alteration zone, f) Highlighting the alterations in the study area; the indicator minerals of each zone are displayed in different colors.

جدول ۵- مقادیر زوایای روش نقشه بردار زاویه طیفی برای کانی‌های شاخص هر کلاس طیفی.

Table 5. Angle values of the spectral angle mapper method for the indicator minerals of each spectral class.

spectral class	Mineral	SAM
Argillic alteration zone	Alunite	0.22
	Kaolinite	0.22
Propylitic alteration zone	Chlorite	0.073
	Epidote	0.2
Phyllic alteration zone	Muscovite	0.099
Silicic alteration zone	Quartz	0.048
Carbonate alteration zone	Calcite	0.045



شکل ۹- مقایسه طیف پیکسل‌های شناسایی شده با روش SAM و با طیف‌های مرجع USGS برای کانی‌های شاخص پهنه‌های دگرسانی در منطقه مورد مطالعه، a)کانی‌های شاخص پهنه دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت)، b) کانی‌های شاخص پهنه دگرسانی آرژیلیک (آلونیت)، c) کانی شاخص پهنه دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت)، d) کانی شاخص پهنه دگرسانی پروپیلیتیک (اپیدوت)، e) کانی شاخص پهنه دگرسانی فیلیک (مسکوویت)، f) کانی شاخص پهنه دگرسانی سیلیسی ، g) کانی شاخص پهنه دگرسانی کربناتی.

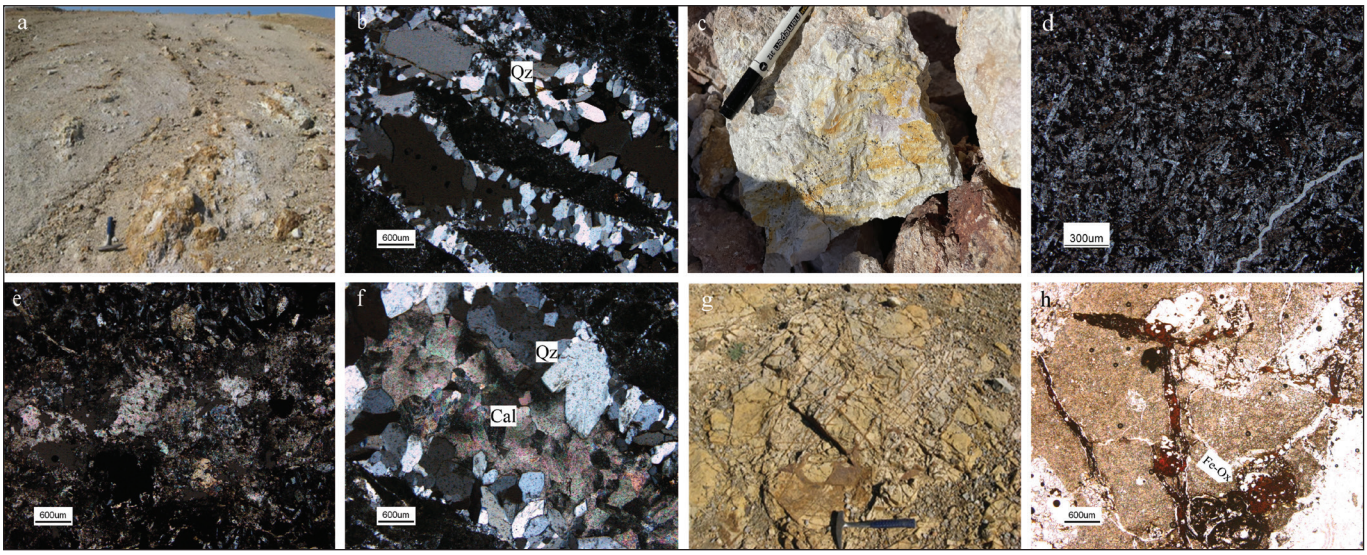
Figure 9. Comparison of the spectra of pixels identified using the SAM method with the USGS reference spectra for the indicator minerals of the alteration zones in the study area: a) indicator minerals of the argillic alteration zone (kaolinite), b) indicator minerals of the argillic alteration zone (alunite), c) indicator mineral of the propylitic alteration zone (chlorite), d) indicator mineral of the propylitic alteration zone (epidote), e) indicator mineral of the phyllic alteration zone (muscovite), f) indicator mineral of the silicic alteration zone, and g) indicator mineral of the carbonate alteration zone.

۴-۹- دگرسانی

پس از شناسایی اولیه پهنه‌های دگرسانی بر پایه پردازش داده‌های دورسنجی، بررسی ماهیت و ویژگی‌های زمین‌شناسی این پهنه‌ها از طریق مطالعات صحرایی و میکروسکوپی ضروری است. این مطالعات به‌منظور تفسیر کانی‌شناسی، تعیین نوع و شدت دگرسانی و ارزیابی میزان انطباق نتایج دورسنجی با شواهد واقعی زمین‌شناسی انجام می‌شوند. در این راستا، تحلیل رخنمون‌ها و بررسی مقاطع نازک و نازک ـ

صیقلی امکان شناسایی دگرسانی‌های آرژیلیکی، سیلیسی، کربناتی و اکسیدآهن را فراهم کرده و نقش مهمی در اعتبارسنجی و تکمیل نتایج حاصل از مطالعات دورسنجی ایفا می‌کند. بنابراین، مبحث دگرسانی در این مطالعه به‌عنوان مرحله تفسیری ـ تایبدی، مکمل تحلیل‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای در نظر گرفته شده‌است.

دگرسانی سیلیسی در منطقه به دلیل گسترش سامانه‌های رگه ـ رگچه‌ای و گاه استوک‌ورکی اهمیت دارد و اغلب همراه با دگرسانی‌های اکسیدآهنی و آرژیلیکی دیده می‌شود. این دگرسانی عمدتا در بخش‌های شمال‌خاوری و جنوب‌باختری منطقه مورد مطالعه و در واحدهای تراکیتی و لاتیتی رخنمون داشته و در برخی موارد تحت کنترل ساختارهای زمین‌ساختی هستند. اشکال مختلف این دگرسانی در منطقه مورد مطالعه شامل سیلیسی‌شدن زمینه سنگ، رگه ـ رگچه‌ها، استوک‌ورک و ریزچین‌های سیلیسی می‌باشد (شکل‌های ۱۰- a, b). دگرسانی آرژیلیکی در بسیاری از بخش‌های منطقه و در ارتباط با واحدهای زمین‌شناسی گوناگون قابل مشاهده می‌باشد. این نوع از دگرسانی نیز در ارتباط نزدیک با سایر دگرسانی‌ها در منطقه مورد مطالعه هستند (شکل‌های ۱۰- c, d). دگرسانی کربناتی در منطقه در مقاطع میکروسکوپی قابل مشاهده بوده و به صورت پرکننده فضاهای خالی و نیز رگه ـ رگچه‌های تاخیری در واحدهای مختلف، به‌ویژه در همراهی با دگرسانی آرژیلیکی، دیده می‌شود (شکل‌های ۱۰- e, f). اکسیدهای آهن نیز در منطقه به صورت پراکنده دیده می‌شوند و عمدتا به شکل رگچه‌های ظریف استوک‌ورکی یا کانی‌های متمرکز مانند گوتیت، لیمونیت و هماتیت ظاهر شده‌اند. سامانه‌های استوک‌ورکی این اکسیدها بیشتر در واحد لاتیتی رخنمون دارند و گاه همراه با دگرسانی‌های آرژیلیکی و سیلیسی دیده می‌شوند (شکل‌های ۱۰- g, h).



شکل ۱۰- دگرسانی های گرمابی در منطقه مورد مطالعه: a) رگه ضخیم سیلیس، b) تصویر میکروسکوپی از رگه سیلیسی (XPL)، c) نمونه دستی مربوط به دگرسانی آرژیلیکی، d) زمینه دگرسان شده در مقطع میکروسکوپی (XPL)، e) دگرسانی کربناتی به صورت پراکنده در زمینه (XPL)، f) رگه تاخیری کربناتی (XPL)، g) برونزد اکسیدآهن به‌صورت استوک‌ورکی، h) اکسید آهن در مقاطع میکروسکوپی (PPL). Cal: کلسیت، Fe-Ox: اکسید آهن، QZ: کوارتز (Whitney and Evans, 2010).

Figure 10. Microscopic images of carbonate alteration in the study area: a) Thick vein of silica, b) Microscopic image of a sillica vein (XPL), c) Manual sample of argillic alteration, d) Microscopic view of the altered matrix in thin section (XPL), e) Scattered carbonate alteration in the field (XPL), f) Carbonate delayed vein (XPL), g) Iron oxide outcrop in the form of stockwork, h) Iron oxides observed in thin section microscopy (PPL). Cal= Calcite, Fe-Ox=Iron Oxide, QZ= Quartz (Whitney and Evans, 2010).

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شناسایی و تفکیک پهنه‌های دگرسانی منطقه فیروزآباد عمدتا بر پایه پردازش داده‌های دورسنجی سنجنده‌های ASTER و Landsat 9 انجام شد. به‌کارگیری روش‌هایی مانند ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری باندی، آنالیز مولفه‌های اصلی به روش کروستا و نقشه‌برداری زاویه طیفی به بارزسازی موثر پهنه‌های دگرسانی عمده در منطقه انجامید. توان تفکیک طیفی بالاتر و تنوع باندهای سنجنده استر در محدوده SWIR امکان بررسی دقیق‌تر رفتار طیفی کانی‌های شاخص دگرسانی را فراهم کرده و برتری این سنجنده را در شناسایی دگرسانی‌های گرمابی، سیلیسی و کربناتی نسبت به سایر سنجنده‌های چندطیفی نشان می‌دهد. در مقابل، داده‌های سنجنده لندست ۹ کارایی مناسبی در بارزسازی مناطق دارای اکسیدهای آهن از طریق روش‌های نسبت‌گیری باندی و کروستا از خود نشان داده‌اند. نتایج حاصل از پردازش‌های دورسنجی، به‌ویژه روش نقشه‌برداری زاویه طیفی، بیانگر گسترش شایان‌توجه دگرسانی‌های آرژیلیکی و سیلیسی در منطقه است، در حالی‌که دگرسانی کربناتی به‌صورت محدودتر و دگرسانی فیلیکی عمدتا در همراهی با دگرسانی آرژیلیکی مشاهده می‌شود. در مقابل، دگرسانی پروپیلیتیکی گسترش چندانی در منطقه ندارد. در مجموع، روش SAM با بهره‌گیری از تطبیق طیفی مبتنی بر کتابخانه مرجع، توانایی مناسبی در شناسایی و تفکیک پهنه‌های دگرسانی در منطقه مورد مطالعه نشان داد و نتایج حاصل از آن با شواهد زمین‌شناسی و طیفی از همخوانی مناسبی برخوردار بود. از این‌رو، این روش به‌عنوان یکی از روش‌های موثر برای شناسایی پهنه‌های دگرسانی در این مطالعه معرفی می‌شود.

در نهایت، تطابق مناسب نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای با مشاهدات صحرایی هدفمند و مطالعات میکروسکوپی انجام‌شده، صحت پهنه‌های دگرسانی شناسایی‌شده را تایید می‌کند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که پردازش داده‌های دورسنجی، به‌ویژه با استفاده از تصاویر استر و لندست، ابزار کارآمد و قابل اعتمادی برای شناسایی اولیه پهنه‌های دگرسانی در مناطق مشابه به‌شمار می‌رود.

سپاسگزاری

مقاله حاضر بخشی از دستاوردهای پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نگارنده نخست می‌باشد که در چهارچوب برنامه‌های پژوهشی انجام شده است. نویسندگان بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه، به‌سبب حمایت‌های علمی و فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی قدردانی می‌نمایند. همچنین از شرکت محترم آذر ساروج سبلان که با همکاری‌های میدانی خود و ایجاد امکان انجام بازدیدهای صحرایی و نمونه‌برداری، نقش مهمی در تکمیل داده‌های پژوهش داشته‌اند، تشکر و سپاسگزاری می‌شود. در پایان، نگارندگان از داوران ارجمند مجله که با ارائه دیدگاه‌های ارزشمند و اصلاحات سازنده خود موجب ارتقای کیفیت علمی این مقاله گردیدند، قدردانی می‌کنند.

کتابنگاری

اسمعیل‌زاده کلخوران، س.، قنادپور، س، س.، معینی راد، ا. و جلیلی، ه.، ۱۴۰۳، مقایسه عملکرد تصاویر ماهوارهای استر و لندست ۸ در بارزسازی اکسیدآهن و دگرسانی‌های مس پورفیری در منطقه ظفرقند استان اصفهان. نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره نهم، شماره ۱، ص. ۴۴-۶۵. JMRE.2023.19459.1669/10.30479.

آلیانی، ف.، دادفر، ث. و معانی‌جو، م.، ۱۳۹۱، آشکارسازی زون‌های دگرسانی کانسار آهن حاجی‌آباد با استفاده از داده‌های (SWIR+ VNIR) سنجنده ASTER. فصلنامه علوم‌زمین، دوره ۲۴، شماره ۹۴، ص ۷۳-۸۰. gsj.2015.43119/10.22071.

حاجی علیلو، ب. و رضایی، ح. ، ۱۳۸۰، نقشه زمین‌شناسی کیوی، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

شرکت آذرساروج سبلان، ۱۴۰۲، گزارش پایانی اکتشاف سیلیس فیروزآباد.

علوی‌پناه، ک.، ۱۳۸۲، کاربرد سنجش از دور در علوم زمین، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول. ص ۴۷۸.

مختاری، ک.، اسدی هارونی، ه.، علی آبادی، م، ع. و بیرانوند، س.، ۱۴۰۲، شناسایی دگرسانی‌های هیدروترمال در منطقه موته شمال غرب اصفهان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، دوره ۳۲، شماره ۱۲۶، ص. ۲۹-۴۷. sepehr.2023.563665.2920/10.22131 .

References

Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L., and 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. Doi: https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016005.

Adiri, Z., Lhissou, R., El Harti, A., Jellouli, A., and Chakouri, M., 2020. Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat 8 and Sentinel 2 applications. Ore Geology Reviews, 117, Article 103332. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103332.

Alavi-Panah, K., 2003. Application of Remote Sensing in Earth Sciences, Tehran University Press, first edition. P. 478. (In Persian).

Aliani, F., Dadfar, S., and Maanijoo, M., 2012. Detection of alteration zones in Hajiabad iron deposit using (SWIR+ VNIR) data from ASTER sensor. Quarterly Journal of Earth Sciences, Volume 24, Issue 94, pp. 73-80. (In Persian).

Azar Saroj Sabalan Company, 2023. Final report on the exploration of Firuzabad silica, (In Persian).

Azizi, H., Tarverdi, M. A., and Akbarpour, A., 2010. Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR datafrom east Zanjan, northern Iran. Advances in Space Research, 46: 99-109. Doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.014.

Boloki, M., and Poormirzaee, R., 2009. Using ASTER Image Processing for Hydrothermal Alteration and Key Alteration Minerals Mapping in Siyahrud area, Iran. International Journal of Geology, 3, pp. 38–43. Doi: https://www.naun.org/multimedia/NAUN/geology/20-047.pdf.

Chaves, P. S., Sides, S. C., and Anderson, J. A., 1991. Comparison of three different methods to merge multi resolutdata-Landsat TM and SPOT panchromatic, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57(3): 265-303.

Chen, Q., Zhao, Z., Zhou, J., Zhu, R., Xia, J., Sun, T., Zhao, X., and Chao, J., 2022. ASTER and GF 5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb–Zn Deposit, SW China. Remote Sensing, 14(5), 1253. Doi: https://doi.org/10.3390/rs14051253.

Esmailzadeh Kalkhoran, S., Ghanadpour, S., S., Moeini-Rad, A., and Jalili, H., 2024. Comparison of the performance of ASTER and Landsat 8 satellite images in highlighting iron oxide and porphyry copper alterations in the Zafarqand region of Isfahan province. Journal of Mineral Resources Engineering, Volume 9, No. 1, pp. 44-65. (In Persian).

El Desoky, H. M., Tende, A. W., Abdel Rahman, A. M., Ene, A., Awad, H. A., Fahmy, W., El Awny, H., and Zakaly, H. M. H., 2022. Hydrothermal Alteration Mapping Using Landsat 8 and ASTER Data in Abu Ghalaga, Southeastern Desert, Egypt. Remote Sensing, 14(14), 3456. Doi: https://doi.org/10.3390/rs14143456 .

Hajialilou, B., and Rezaei, H., 2001. Geological Map of Kiwi, Scale 1:100,000, Publications of the Geological and Mineral Exploration Organization of the Country. (In Persian).

Mokhtari, K., Asadi Harouni, H., Aliabadi, M., A., and Beiranvand, S., 2013. Identification of hydrothermal alterations in the Mote region, northwest of Isfahan using satellite images, Quarterly Journal of Geographic Information Science and Research, Sepehr, Volume 32, No. 126, pp. 29-47. (In Persian).

NASA, 2005. ASTER Mission Factsheet. NASA https://asterweb.jpl.nasa.gov/ .

NASA Earthdata, 2023. ASTER Sensor and Data Overview. https://earthdata.nasa.gov.

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., Schaaf, C.B., Schott, J.R., Sheng, Y., Vermote, E.F., Belward, A.S., Bindschadler, R., Cohen, W.B., Gao, F., Hipple, J.D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C.O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z.P., Lymburner, L., Masek, J.G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R.H., and Zhu, Z., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global-change research. Remote Sensing of Environment. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001.

Semi-Automatic Classification Plugin, 2023. Introduction to Remote Sensing: ASTER.

Tommaso, D. I., and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina, Ore Geology Reviews, 32: 275-290. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004 .

Whitney, D. L., and Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American mineralogist, 95(1), 185-187.

Wilkinson, J. J., Baker, M. J., Cooke, D. R., and Wilkinson, C. C., 2020. Exploration targeting in porphyry Cu systems using propylitic mineral chemistry: A case study of the El Teniente deposit, Chile. Economic Geology, 115(4): 771-791. Doi: https://doi.org/10.5382/econgeo.4738.

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., Huntington, J. L., Lymburner, L., Hostert, P., Gao, F., Lyapustin, A., Pekel, J. F., Strobl, P., and Cook, B. D., 2022. Fifty years of Landsat science and impacts. Remote Sensing of Environment. Doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195 .

Yuhas, R. H., Goetz, A. F. H., and Boardman, J. W., 1992. Discrimination among semiarid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm. In Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication, 92-14, 1, 147-149.