

Research Article

Investigating porphyry copper alterations and spectral behavior of related minerals using ASTER satellite images in the Zafarghand district, Isfahan

Samane Esmaelzade Kalkhoran¹, Seyyed Saeed Ghannadpour^{1*}, Hadi Jalili¹, Amir Moeini Rad

1-Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)

2-Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Keywords *Zafarghand, Porphyry Copper, Remote Sensing, Alteration, ASTER Sensor.*

1-Introduction

Everything has a different and unique reaction to radiant energy, which is determined by different degrees of energy reflection. The ratio of reflected, absorbed, and transmitted energy in different phenomena for a wavelength is different and depends on the type of material, its conditions, and its status. These differences make it possible to identify different phenomena in the image. The energy ratio in the three mentioned states for a given phenomenon also differs in different wavelengths (Campbell et al., 2011). The purpose of this article is to investigate the spectral behavior of indicator minerals related to porphyry copper alterations using the widely employed remote sensing sensor (ASTER) in the Zafarghand (as an already known area) on which previous studies have been conducted, and field studies have confirmed the existence of alterations.

2-Case study

The Zafarghand copper exploration area is located in southeastern Ardestan, in central Iran, about 110 kilometers northeast of Isfahan. The deposit is situated in the west of Zafarghand, as part of the 1:100,000 Ardestan geological sheet, ranging from 52°23'55"E to 52°26'30"E longitude and 33°10'30"N to 33°11'52"N latitude (Alaminia et al., 2017). To access the area, one can use the Ardestan-Naeen Road in the eastern part, Ardestan-Isfahan Road in the central section, Zafarghand-Zefreh Road in the southern part, and Ardestan-Natanz Road in the northern part of the region. The studied deposit is located at the western margin of the Central Iran structural zone and on the central part of the Urmia-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA); similar to other porphyry copper deposits in Iran and worldwide, it had a magmatic origin (Alaminia et al., 2017). Through field and microscopic investigations, five distinct types of alteration associated with mineralization processes have been identified in the region. These alterations are frequently observed near intrusive masses and host rocks surrounding the South Ardestan fault (ANJC, 2011). In the southeastern part of the range, potassic alteration exhibits a very limited outcrop near the quartz diorite mass.

In contrast, phyllic alteration is evident in the intrusive masses of diorite, quartz diorite porphyry, dacite, and rhyolite volcanic rocks. Both siliceous and argillic alterations have taken place to a restricted extent and are progressing away from the phyllic alterations (Radfar, 1999). The presence of propylitic alteration is widespread in the rocks forming the outer boundary of the deposit. Potassic alteration is characterized explicitly by extremely limited outcrops and secondary veins containing biotite, magnetite, and feldspar-alkaline in the vicinity of plagioclase. Understanding these alterations is crucial for comprehensively assessing the region's geological characteristics and mineral potential.

3-Material and methods

Alteration zones associated with copper have drawn the attention of numerous researchers owing to their distinctive spectral characteristics in the near-infrared range for remote sensing investigations (Rowan et

* Corresponding author: s.ghannadpour@aut.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.45697.2425

Received: 2023-10-21

Accepted: 2024-03-17

al., 2006). In this context, the imagery captured by the ASTER sensor is particularly noteworthy, given its superior short-infrared band coverage compared to sensors like those in the Landsat series. This extended band coverage is instrumental in accentuating regions with heightened variability. In the present study, various techniques were employed to discriminate and emphasize the altered areas, including False Color Composition (FCC), Band Ratio (BR), Least Squares-Fit (LS-Fit), Matched Filtering (MF), Principal Component Analysis (PCA), Spectral Angle Mapper (SAM), Purity Pixel Index (PPI), and MNF method. These methods were applied to mitigate image noise and enhance the detectability of areas exhibiting mineralogical alterations related to copper deposits.

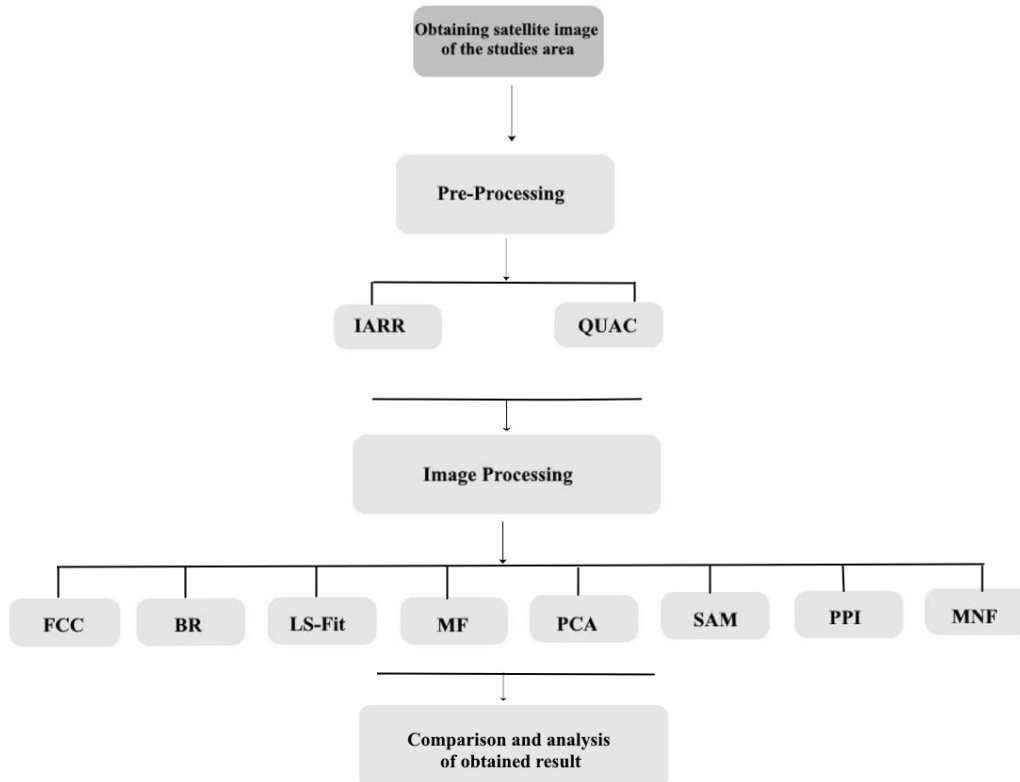


Fig 1. Flowchart of various stages and processes of task execution.

4-Results and discussions

The performance of various methods, including PCA, MF, LS-Fit, FCC, BR, and SAM, was evaluated. False Color Composition and Band Ratio methods were utilized, specifying the alteration ranges. Among the applied processes, the BR, MF, and LS-Fit methods effectively highlighted regional alterations with high accuracy, while PCA did not yield the desired results. The Minimum Noise Fraction method successfully removed noise from the image, emphasizing the color combination of argillic and propylitic alterations.

5-Conclusion

Atmospheric correction was applied to the ASTER sensor data in the studied area to mitigate noise in the image. Various image processing techniques were then employed, including False Color Composition, Band Ratio, Principal Component Analysis, Matched Filtering, Least Squares-Fit, Spectral Angle Mapper, Minimum Noise Fraction, and Purity Pixel Index, aiming to illustrate the effectiveness of these methods in the analysis. The analysis and experimental results demonstrate that the false color combination derived from the 468 bands of the ASTER sensor is well-suited for identifying alteration units. This method provides a comprehensive overview of regional changes, facilitating further investigations. Given the limited studies on alterations in this region, exploring porphyry copper in arid and semi-arid regions using ASTER sensor data is particularly useful, especially in Iran, a significant porphyry copper belt in the East. The pixel purity index and n-dimensional imager methods were employed to obtain the pure spectrum of

image pixels, resulting in the extraction of three endmembers representing argillic, potassic, and propylitic alterations. The presence of these alterations supports the possibility of porphyry copper deposits, suggesting they may extend several kilometers from the mineralization center. Notably, argillic alteration is widespread on the surface and around porphyry copper deposits, effectively highlighted by most applied methods in the target area's image analysis.

6-References

- Alaminia, A., Bagheri, H., Salehi, M., 2017. Geochemical and geophysical investigations and fluid inclusion studies in the exploration area of Zafarghand (Northeast Isfahan, Iran). *Journal of Economic Geology* 9(2), 295-312. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.56334>.
- ANJC (Alamut Naghsh-e Jahan Company), 2011. Initial exploration report of Zafarghand copper index, Isfahan, Iran. 270 P. (in Persian).
- Campbell, J.B., Wynne, R.H., 2011. *Introduction to Remote Sensing*. Fifth Edition, Ukraine. Guilford Publications, 662 P.
- Rowan, L.C., Schmidt, R.G., Mars, J.C., 2006. Distribution of hydrothermally altered rocks in the RekoDiq, Pakistan mineralized are based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 104, 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.014>.
- Radfar, J., 1999. Geological map of Ardestan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Esmaelzade Kalkhoran, S., Ghannadpour, S., Jalili, H., Moeini Rad, A., 2024. Investigating porphyry copper alterations and spectral behavior of related minerals using ASTER satellite images in the Zafarghand district, Isfahan. *Adv. Appl. Geol.* 14(3), 623-651

DOI: 10.22055/aag.2024.45697.2425

URL:https://aag.scu.ac.ir/article_19164.html

©2024 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

بررسی دگرسانی‌های مس پورفیری و رفتار طیفی کانی‌های مربوطه به کمک تصاویر ماهواره استر در منطقه ظفرقند، اصفهان

سمانه اسمعیل زاده کلخوران

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

سید سعید قنادپور*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

هادی جلیلی

مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

امیر معینی راد

مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

* s.ghannadpour@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

چکیده

امروزه به کمک سنجش از دور زمین‌شناختی می‌توان در کمترین زمان و با صرف کمترین هزینه، مناطق دگرسان را بارزسازی کرد و محل‌های مناسب برای تشکیل کانسارهای گرمایی را مشخص نمود. منطقه ظفرقند، در جنوب شرق اردستان و شمال شرق اصفهان، واقع شده است. در این منطقه، هاله‌های دگرسانی مختلفی وجود دارد که شامل فیلیک، پتاسیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک و کمی سیلیسی است. در مطالعه پیش رو، با استفاده از تصاویر سنجنده استر، به شناسایی دگرسانی‌های رسی، آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، بارزسازی دگرسانی‌های منطقه با استفاده از روش‌هایی همچون؛ ترکیب رنگی کاذب (FCC)، نسبت بانندی (BR)، کمترین مربعات رگرسیون شده (LS-Fit)، فیلترگذاری تطبیقی (MF)، آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) و نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) است و همچنین برای شناسایی پیکسل‌های خالص منطقه از روش PPI که از نتیجه حاصل از روش کسر کمترین نویز (MNF) بهره می‌گیرد، استفاده شده است (مجموعاً ۷ روش). به منظور اعتبارسنجی نتایج، از نقشه دگرسانی منطقه بهره گرفته شده است که بر این اساس نتایج حاصله، مطابقت بسیار بالایی با دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک در منطقه مطالعاتی را دارند. براساس نقشه دگرسانی منطقه مورد مطالعه، تأثیرات دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک بر بخش اعظمی از این منطقه قابل مشاهده است. در حالی که دگرسانی آرژیلیک و پتاسیک در این منطقه به صورت محدود دیده می‌شوند. روش‌های پردازش اعمال شده بر روی منطقه باعث برجسته شدن دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک شده ولی به دلیل محدود بودن دگرسانی پتاسیک در محدوده ظفرقند، شناسایی صحیح این دگرسانی در منطقه تضمین نشده است. در مورد شناسایی و بارزسازی دگرسانی‌های منطقه مورد مطالعه، روش‌های SAM، PPI، BR و PCA عملکرد بسیار مؤثری را به همراه داشته‌اند، که هر یک به تحلیل داده‌های طیفی یا تصاویر و تشخیص تفاوت‌ها و الگوهای مختلف در مناطق مورد بررسی کمک می‌کنند. در حقیقت با نگاهی جزئی‌تر می‌توان اذعان داشت که در بارزسازی دگرسانی‌های منطقه ظفرقند به کمک ۷ روش پردازشی فوق‌الذکر، دگرسانی آرژیلیک با دقت ۷۱/۴۳٪ (۵ روش)، دگرسانی فیلیک با دقت ۸۵/۷۱٪ (۶ روش) و دگرسانی پروپیلیتیک با دقت ۷۱/۴۳٪ (۵ روش) شناسایی شده و مورد تأیید قرار گرفته‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر و روش‌های پردازشی مذکور، بهبود قابل توجهی در درک فرآیندهای زمین‌شناسی و محیطی این منطقه را به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: ظفرقند، مس پورفیری، سنجنده استر، دگرسانی، سنجش از دور.

۱- مقدمه

سنجش از دور به صورت گسترده برای اهدافی چون نقشه‌برداری واحدهای سنگ‌شناسی، ویژگی‌های ساختاری زمین و اکتشاف مواد معدنی استفاده می‌شوند که به طور قابل توجهی هزینه‌های

سنجش از دور به سبب پیشرفت در فناوری ماهواره‌ای و انواع سنجنده‌ها، به سرعت رشد و توسعه یافته است. داده‌های

چون (Khalatbari Jafari, 1992; Mohammadi, 1995; Latifi, 2000; Bahramiyan, 2007; Nasr Esfahani and Vahabi Moghadam, 2010; Honarmand et al., 2010; Jabari et al., 2010; Yeghane Far and Ghorbani, 2010; Amidi, 1975) بر روی سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی رسوبی میزبان این توده و توده‌های گرانیتوئیدی همجوار یا مشابه و دایک‌های آندزیتی - بازالتی قطع کننده سنگ‌های آتشفشانی ائوسن، انجام شده است. سال ۲۰۱۱ پتروژنز توده گرانیتوئیدی ظفرقند توسط Sadeghian و Ghaffary مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت (Sadeghian and Ghaffary, 2011). Aminroayaei Yamini و همکاران (۲۰۱۷) با نگرشی بر تحولات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه، به بررسی دگرسانی‌های گرمایی این کانسار پرداختند (Aminroayaei Yamini et al., 2017). مطالعات ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و سیالات درگیر نیز توسط Alaminia و همکاران در سال ۲۰۱۷ انجام شد (Alaminia et al., 2017). Aminoroayaei Yamini و همکاران (۲۰۱۸) همچنین در مطالعه دیگری به تشریح تحولات سیستم ماگمایی این کانسار نیز با در نظر گرفتن پلاژیوکلاز به عنوان شاهد، پرداختند (Aminoroayaei Yamini et al., 2018). در پژوهش دیگری ارتباط کانی‌سازی با پهنه‌های دگرسانی با ساختارهای زمین‌ساختی به کمک مطالعات دورسنجی توسط Mohammadi و همکاران (۲۰۱۸) مورد بررسی قرار گرفت (Mohammadi et al., 2018). در سال ۲۰۱۷ میلادی، کلریتی شدن بیوتیت به منظور بارزسازی پارامترهای فیزیکی‌وشیمیایی کانی‌سازی و دگرسانی مرتبط در سیستم مس پورفیری ظفرقند مورد تحلیل شیمی کانی‌ها و ایزوتوپ پایدار قرار گرفت (Aminroayaei Yamini et al., 2017).

شناسایی مناطق آلتزه شده با توجه به وسعت آنها توسط تکنیک سنجش از دور به راحتی میسر است و نمونه‌های موفقی نیز تاکنون انجام شده است، Asadi Haroni (۲۰۰۰) در بررسی مدل طلای زرشوران با ترکیب رنگی تصاویر حاصل از آنالیز مؤلفه اصلی، محدوده دگرسان گرمایی و محدوده اکسید آهن را شناسایی و تفکیک نموده است (Asadi Haroni, 2000). وی در ادامه مطالعات با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دوری موفق به کشف دو محدوده مس-طلا دالی در استان مرکزی و محدوده مس-مولیبدن کهنگ در شهر

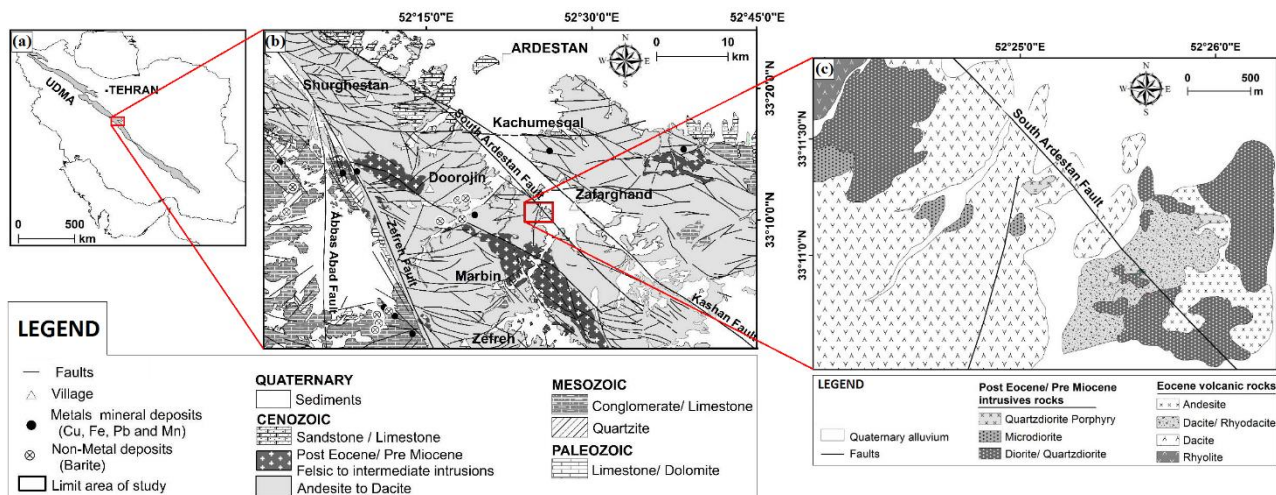
مربوط به مطالعات میدانی و صحرایی را کاهش می‌دهند (Amer et al., 2012). بنابراین سنجش از دور به عنوان روش استاندارد در بسیاری از برنامه‌های اکتشاف مقدماتی ذخایر معدنی استفاده می‌شود. کمرند فلززایی تیتس از شرق اروپا (رومانی، اسلواکی و ترکیه) تا خاورمیانه (ایران، پاکستان و افغانستان) ادامه دارد. ایران به عنوان یکی از بزرگترین نواحی بر روی ۱۷۰۰ کیلومتر از این کمرند واقع شده است و ذخایر بزرگی از مس پورفیری مانند سرچشمه را به خود اختصاص می‌دهد. بخشی از این کمرند را کمان آتشفشانی-ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) شامل می‌شود. منطقه اکتشافی ظفرقند (در شمال شرقی اصفهان) در بخش میانی این کمان واقع شده است. استان اصفهان به دلیل واقع شدن در بخش مرکزی کمرند آتشفشانی-نفوذی ارومیه-دختر، دارای پتانسیل بالایی برای ذخایر فلزی، به ویژه ذخایر مس پورفیری است. کانسار مس پورفیری به دو صورت غیر همزاد، به اصطلاح درون‌زاد و غیر همزاد، شناخته می‌شود. این بیان مشخص می‌کند که کانسارهای مس پورفیری از طریق فرآیندهای نیمه عمیق پورفیری و کالک آلکالن شکل می‌گیرند. این نوع کانسارها به دلیل خصوصیات زمانی و مکانی خود، مناطق خاصی را در زمین‌شناسی معدنی شامل می‌شوند که برای استخراج مس مناسب هستند. این کانسارها به طور معمول دارای مناطق مختلفی هستند؛ در بخش خارجی آنها، زون پروپیلیتیک و در بخش میانی به ترتیب زون‌های آرژیلیک، فلیک و پتاسیک واقع شده‌اند، اما بسته به شرایط فرسایش ممکن است که همه این زون‌ها به‌طور کامل بر سطح زمین ظاهر نشوند (Lee and Tang, 2020; Titley and Hicks, 1996). به دلیل رخمون سطحی زون‌های دگرسان آرژیلیک و پروپیلیتیک در کانسارهای پورفیری، این دو نوع دگرسانی به عنوان کلید اکتشافی مهم در مرحله مقدماتی مطالعه این نوع ذخایر استفاده می‌شوند (Tabelin et al., 2021). زون‌های دگرسانی مرتبط با مس به دلیل دارا بودن ویژگی‌های طیفی منحصر بفرد در محدوده مادون قرمز نزدیک برای انجام تحقیقات سنجش از دور مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند (Li et al., 2023). کارهای اکتشافی اولیه در منطقه به شکل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ برداشت نمونه‌های سنگی و برداشت مقاطع زمین فیزیکی در منطقه بوده است (ANJC, 2011). پس از آن مطالعات ژئوشیمیایی و پترولوژیکی متعددی

است. بخش اعظم این ناحیه در زون ساختاری ارومیه- دختر واقع شده و محدوده‌ای در جنوب غربی این برکه، زون سنندج- سیرجان را شامل می‌شود. منطقه اکتشافی مس ظفرقند در جنوب شرقی اردستان در ۱۱۰ کیلومتری شمال شرق اصفهان در ایران مرکزی واقع شده است. این کانسار در غرب ظفرقند به عنوان بخشی از برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان با جغرافیایی $52^{\circ}23'55''$ تا $52^{\circ}26'30''$ طول شرقی و $33^{\circ}10'30''$ تا $33^{\circ}11'52''$ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱) (Alaminia et al., 2017). به منظور دستیابی به منطقه، می‌توان از راه‌های آسفالت اردستان-نابین در شرق منطقه، اردستان-اصفهان در بخش میانی منطقه، ظفرقند-زفره در بخش جنوبی و اردستان-نطنز در بخش شمالی منطقه استفاده نمود. کانسار مورد مطالعه در منتهالیه بخش غربی زون ساختاری ایران مرکزی و بر روی بخش مرکزی کمان ولکانوپلوتونیسیم ارومیه-دختر واقع شده است و همانند سایر ذخایر مس پورفیری ایران و جهان، منشأ ماگمایی داشته است.

اردستان شده است. Aslani و همکاران (۲۰۰۸) تفکیک زون- های دگرسانی را در محدوده اندیس مس-طلا سربیشه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای استر انجام داده‌اند (Aslani et al., 2008). در این راستا تصاویر سنجنده استر به دلیل دارا بودن تعداد باندهای بیشتر در محدوده مادون قرمز کوتاه نسبت به سنجنده‌هایی از قبیل سنجنده‌های سری لندست به منظور بارسازی مناطق دارای دگرسانی بیشتر مورد توجه می‌باشد. هدف از این مقاله بررسی و مقایسه کارایی روش‌های پردازش طیفی با استفاده از سنجنده پر کاربرد در علم سنجش از دور در منطقه اکتشافی ظفرقند (به عنوان منطقه‌ای شناخته شده از قبل) که مطالعات قبلی بر روی آن صورت گرفته و وجود دگرسانی‌ها توسط نمونه‌های زمینی تأیید شده، می‌باشد. جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل، بهتر است از داده‌های زیر سطحی استفاده شود که در منطقه مورد مطالعه این داده‌ها در دسترس نبوده است.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان در بخش جنوبی چهار گوش ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان در شمال شرقی استان اصفهان قرار گرفته



شکل ۱- (a) نمایش موقعیت منطقه اکتشافی ظفرقند در بخش مرکزی کمان ارومیه-دختر (UDMA)، (b) بخشی از نقشه ساده شده زمین‌شناسی اردستان و شهرباب با مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ و (c) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه اکتشافی ظفرقند (پس از تغییرات از (Alaminia et al., 2017)).

Fig. 1. (a) The location of the Zafarghand exploration area in the central part of the Urmia-Dokhtar arc (UDMA), (b) A part of the simplified geological map of Ardestan and Shahrab with a scale of 1:100,000 and (c) A simplified geological map of the Zafarghand exploration area (based on modifications from (after some changes from (Alaminia et al., 2017)).

سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی متعلق به دوره زمانی ائوسن بالایی و جوان‌تر رخمون دارند که در ادامه به شرح واحدهای

بر پایه بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری انجام شده در این منطقه، سنگ‌های آذرین اسیدی تا حد واسط شامل

و حفره‌ای دارد. آندزیت‌ها در جنوب غربی و غرب منطقه رخنمون نسبتاً بزرگی دارند (شکل c۱) و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند و به علت فراوانی درشت بلورها به شکل حفره‌ای هستند. توده‌های نفوذی دیوریت، کوارتز دیوریت و میکرو دیوریت در شمال غربی و جنوب شرقی منطقه با رنگ خاکستری تیره برون زد دارند. توده نیمه نفوذی کوارتز دیوریت پورفیری در جنوب شرقی منطقه، وسعت کوچکی را می‌پوشاند (شکل c۱).

سنگی پرداخته می‌شود (Alaminia et al., 2017).

ریولیت در انتها الیه گوشه شمال غربی با رنگ خاکستری صورتی برون زد نسبتاً کوچکی در طرح دارد (شکل c۱). بافت این سنگ‌ها پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریان‌ی است. داسیت و ریوداسیت‌ها محدوده وسیعی از منطقه را با رنگ خاکستری تا سبز در بر می‌گیرند. (شکل c۱). این واحد مهمترین سنگ میزبان کانی‌سازی مس در منطقه محسوب می‌شود و بافت پورفیری با خمیره فلسیک دانه‌ریز، بی‌شکل



شکل ۲- قسمتی از رخنمون دگرسانی‌ها در منطقه اکتشافی ظفرقند (Shahi et al., 2015).

Fig. 2. A section of alteration outcrops in the Zafarghand exploration region (Shahi et al., 2015).

هستند. البته در بخش‌هایی از منطقه دگرسانی پتاسیک هم مشاهده می‌شود. این دگرسانی‌ها همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده هستند، اغلب در نزدیک توده‌های نفوذی و سنگ‌های میزبان در اطراف گسل جنوب اردستان دیده می‌شود (Alaminia et al., 2017). دگرسانی پتاسیک در منطقه جنوبی ظفرقند در گرانودیوریت (شکل a۴) و دیوریت‌ها (شکل b۴) قرار گرفته و استوک‌ورک‌های کوارتز، رگه‌های سیلیسی شامل کانی‌زایی مس و مقدار کمی مالاکیت به صورت رگچه (شکل a۴) در این دگرسانی قابل مشاهده است. دگرسانی فلیک در منطقه، به وسیله شدت

۲-۱- دگرسانی و کانی‌سازی

بخش عمده‌ای از واحدهای سنگی منطقه ظفرقند تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال به شدت دگرسان شده و محدوده دگرسانی به وجود آمده، وسعتی حدود ۷ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که بخشی از آن توسط رسوبات پوشیده شده است. نمای دوری از دگرسانی‌های منطقه در شکل ۲ قابل مشاهده است (Shahi et al., 2015).

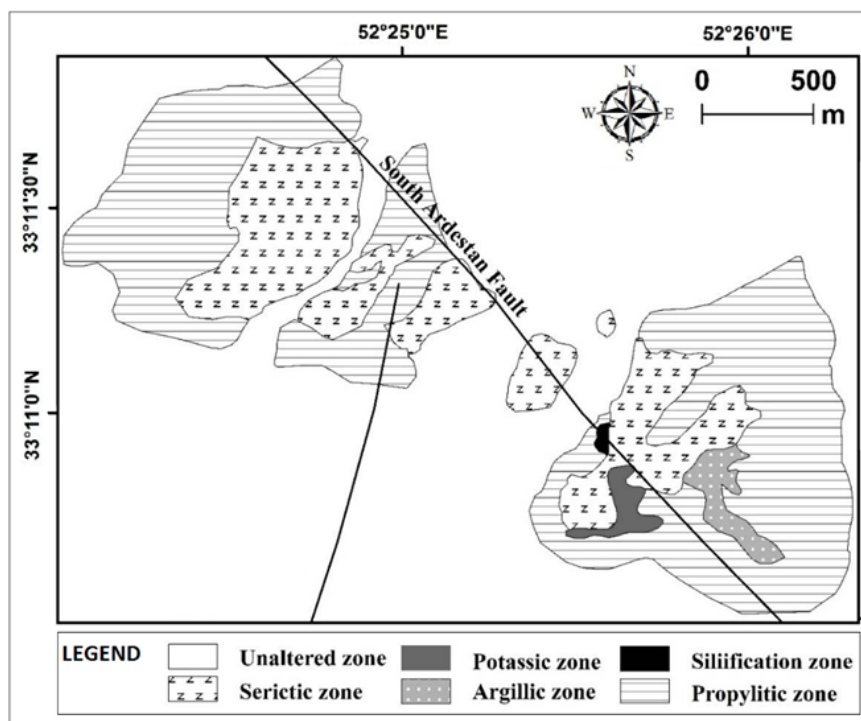
زون‌های دگرسانی از مرکز سیستم پورفیری به سمت حاشیه‌ها به ترتیب شامل فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک

پروپیلیتیک شامل آلبیت، کوارتز، کلریت، کلسیت و اپیدوت اند که به رنگ سبز در واحدهای گرانودیوریت، داسیت و ریوداسیت مشاهده می‌شوند (شکل b۵). پلاژیوکلازها بیشتر به کلریت و به طور بخشی به کلسیت و اپیدوت تبدیل شده‌اند، هر چند که پلاژیوکلاز سالم حضور دارد. آمفیبول به طور کامل به کلریت و اپیدوت تبدیل شده به طوری که تنها شبحی از آنها باقی مانده است. بیوتیت‌ها به کلریت و کانی‌های سولفید مس دگرسان شده‌اند (شکل d۵) (Aminroayaei Yamini et al., 2017).

نمای دور و نزدیکی از پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن در مناطق کانی‌سازی مس، رگه‌های کوارتز-مگنتیت و استوکورک‌های نمایش‌دهنده کانی‌سازی مالاکیت و اکسید آهن/هیدروکسید و همچنین رگه‌های سیلیسی و دگرسانی‌های سریسیتی و آرژیلیک اطراف آن نیز در شکل ۶ آورده شده است (Sabbaghi et al., 2017,) (Mohammadi et al., 2018).

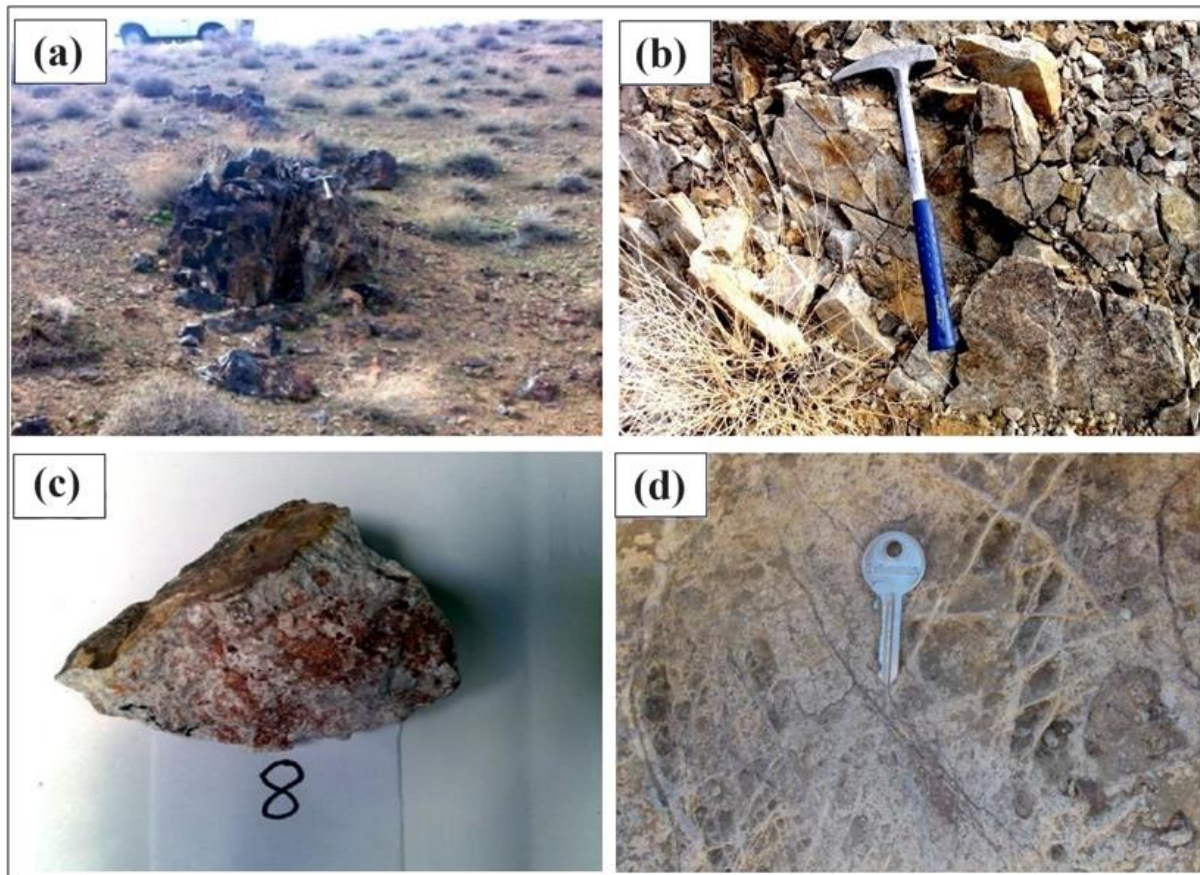
کوارتز - سریسیت، استوکورک‌های وسیع کوارتزی و اکسید آهن (عمدتاً هماتیت) در داسیت‌های پورفیری (شکل c۴) و کوارتز دیوریت‌ها مشخص می‌شود. در این دگرسانی برخی رگچه‌های اکسید آهن و کوارتز تا ضخامت ۲ سانتی‌متر قابل رؤیت است. شکل d۴ استوکورک‌های هماتیت - کوارتز موجود در دگرسانی فیلک را نمایش می‌دهد (Shahi et al., 2015; Salehi and Tangestani, 2022).

با فاصله گرفتن از فیلک، دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیکی به صورت محدود جایگزین آنها شده است و دگرسانی پروپیلیتیک در سنگ‌های محدوده بیرونی کانسار گسترش دارد (شکل a۵). شکل ۵ قسمت‌های a و b نمایی از رخمون دگرسانی‌های فیلک، آرژیلیک و پروپیلیتیک را نمایش می‌دهد. نمونه‌های دستی در دگرسانی آرژیلیک به رنگ سفید و عمدتاً در واحدهای داسیتی و ریوداسیتی قابل مشاهده هستند (شکل b۵). در زیر میکروسکوپ سنگ‌ها شامل کائولینیت، ایلیت، کلریت، اپیدوت، کوارتز و کانی‌های کدر می‌باشند (شکل c۵). کانی‌های شاخص دگرسانی



شکل ۳- گسترش هاله‌های دگرسانی در محدوده اکتشافی ظفرقند (پس از تغییرات از (Alaminia et al., 2017)).

Fig. 3. The expansion of alteration halos in the Zafarghand exploration area (based on modifications from (Alaminia et al., 2017)).



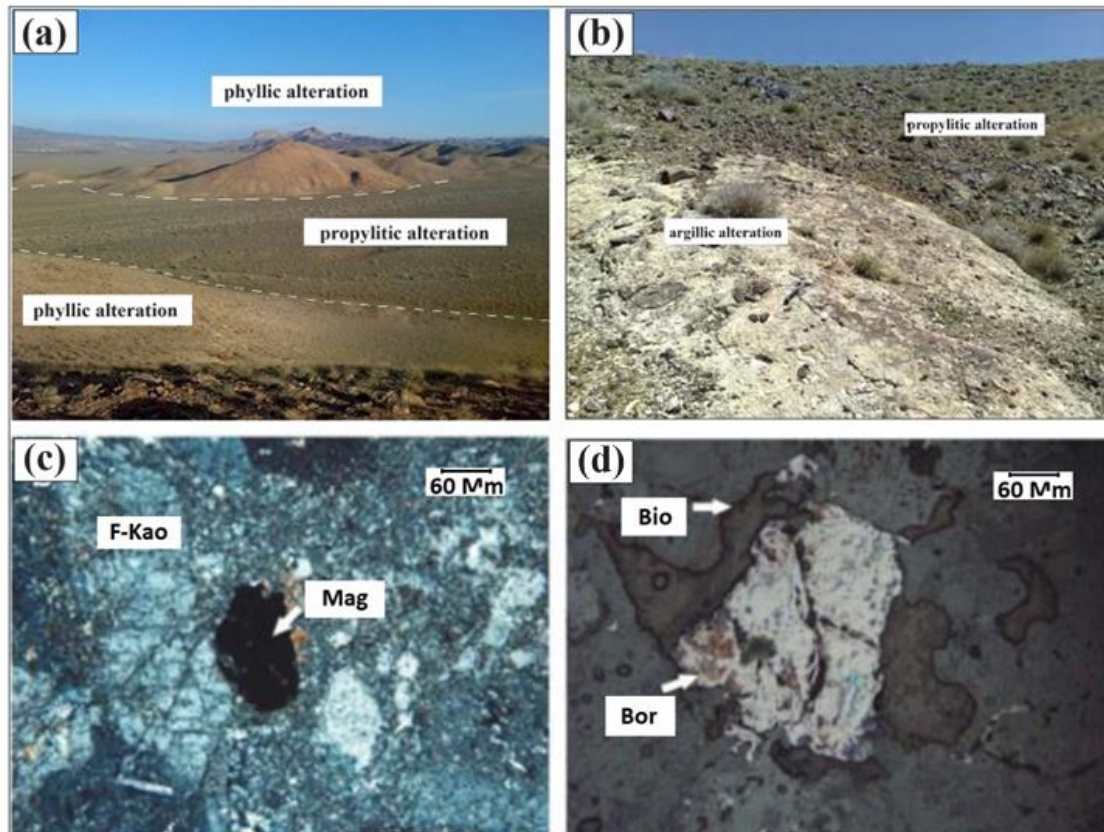
شکل ۴- تصاویر صحرایی از دگرسانی‌های منطقه مورد مطالعه. (a) رگه‌های سیلیسی شامل کانی‌سازی مس در سنگ‌های گرانودیوریت با دگرسانی شدید پتاسیک (نمای دور) (Salehi and Tangestani, 2022)، (b) سنگ‌های دیوریتی با دگرسانی شدید پتاسیک (نمای نزدیک) (Salehi and Tangestani, 2022)، (c) نمونه‌های دستی داسیت پورفیری با دگرسانی شدید فیلیک (Salehi and Tangestani, 2022) و (d) استوک‌ورک‌های هماتیت - کوارتز در دگرسانی فیلیک در منطقه جنوبی ظفرقند (Shahi et al., 2015).

Fig. 4. Field images of alterations in the study area. (a) Siliceous veins containing copper mineralization in granodiorite rocks with intense potassic alteration (distant view) (Salehi and Tangestani, 2022), (b) Diorite rocks with strong potassic alteration (close view) (Salehi and Tangestani, 2022), (c) Hand samples of porphyritic dacites showing intense phyllic alteration (Salehi and Tangestani, 2022), and (d) Hematite-quartz stockworks in phyllic alteration in the southern area of Zafarghand (Shahi et al., 2015).

Evans., 2010). کانی‌زایی سولفیدی اولیه به مقدار کم، به صورت افشان و استوک‌ورک در این پهنه به چشم می‌خورد. این دگرسانی در سنگ‌های داسیتی و دیوریتی دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی با حضور کوارتز به صورت رگه، رگچه‌ای یا کمتر به صورت پراکنده در متن سنگ و به صورت جانشینی بر روی کانی‌های اولیه دیده می‌شود. رگه‌ها به دو شکل موازی و استوک‌ورک در منطقه مشخص می‌شوند. در برخی مقاطع رگچه‌های سیلیسی رگچه‌های بیوتیت ثانویه را قطع کرده‌اند (Whitney and Evans, 2010). سولفیدها به ندرت در

۲-۲- کانی‌زایی و زمین‌شناسی اقتصادی منطقه

دگرسانی پتاسیک با رخمون بسیار محدود و با رگچه‌های ثانویه بیوتیت، مگنتیت و همچنین فلدسپار آلکان در اطراف پلاژیوکلازها مشخص می‌شود. دگرسانی فیلیک با مجموعه کانی‌های ثانویه سریسیت، کوارتز، کلریت و پیریت در درزه‌ها و شکستگی‌ها گسترش یافته است. در این پهنه کانی پلاژیوکلاز به سریسیت تجزیه شده و کانی‌های فرومنیزین مانند بیوتیت، پیروکسن و هورنبلند به کلریت تبدیل شده و زمینه سنگ به طور پراکنده سریسیتی و سیلیسی شده‌اند (Whitney and

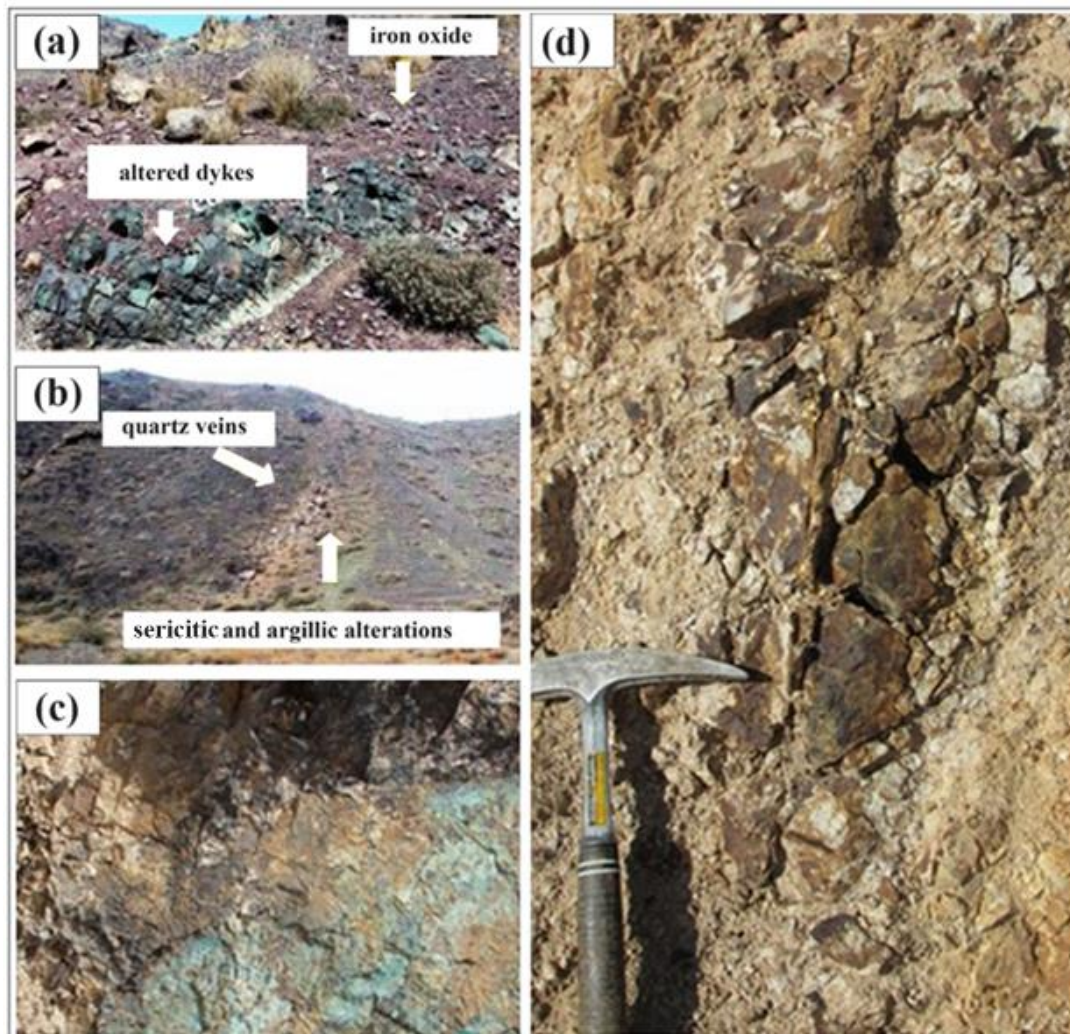


شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی و صحرایی از سنگ‌های منطقه اکتشافی ظفرقند (Alaminia et al., 2017, Aminroayaei Yamini et al., 2017). (a) رخنمون دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک، (b) رخنمون دگرسانی‌های آرژیلیک و پروپیلیتیک، (c) تصویر میکروسکوپی از داسیت‌های زون آرژیلیک در نور پلاریزه و (d) تصویر میکروسکوپی در نور انعکاسی مربوط به تبدیل بیوتیت به سولفید مس در زون پروپیلیتیکی. (F-Kao: Feldspar altered to kaolinite, Mag: Magnetite, Bio: Biotite and Bor: Bornite).

Fig. 5. Microscopic and field images of rocks from the Zafarghand exploration area (Alaminia et al., 2017, Aminroayaei Yamini et al., 2017). (a) Outcrop of phyllic and propylitic alteration, (b) Outcrop of argillic and propylitic alteration, (c) Microscopic image of argillic zone dacites in polarized light, and (d) Microscopic image in reflected light corresponding to the conversion of biotite to copper sulfide in the propylitic zone. (F-Kao: Feldspar altered to kaolinite, Mag: Magnetite, Bio: Biotite and Bor: Bornite).

شکل اولیه (هایپوژن) و ثانویه (سوپرژن) و به شکل رگه‌ای، رگچه‌ای و افشان در سنگ میزبان حضور دارند. کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، کمتر گالن و مگنتیت هستند که به صورت مجزا یا همراه کوارتز در رگچه‌ها دیده می‌شوند و کانی‌های ثانویه به شکل مالاکیت، آزوریت، هماتیت و لیمونیت هستند (Whitney and Evans, 2010). کوارتز در رگه‌ها به صورت کانی باطله حضور دارد. پهنه اکسیدی و سوپرژن گسترده‌ترین بخش در محدوده ظفرقند است که با حضور فراوان اکسیدهای آهن ثانویه قابل تشخیص است. توده گرانیتوئیدی ظفرقند فاقد کانی‌زایی قابل توجه است و فقط در بعضی از مناطق، در توف‌های میزبان، به صورت موضعی می‌توان کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، مالاکیت، آزوریت و اولیژیست را به همراه رگه‌های دندریتی منگنز و آثار کانه‌زایی روی مشاهده

رگچه‌های سیلیسی حضور دارند. پهنه آرژیلیک از توسعه کمی در منطقه برخوردار است. این دگرسانی با حضور کانی‌های رسی مشخص می‌شود. به ندرت بافت اولیه سنگ‌ها در این پهنه از بین رفته است و معمولاً به همراه اکسیدهای ثانویه آهن (هماتیت و لیمونیت) مشخص می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک یکی از گسترده‌ترین دگرسانی‌ها در منطقه است که توسط مجموعه کانی‌های اپیدوت، کلریت، سریسیت و کلسیت شناخته می‌شود. این دگرسانی حاصل تجزیه کانی‌های فرومنیزین به کلریت آهن منیزیم‌دار و کمتر سریسیت است. رگچه‌های کلریتی و اپیدوتی معمولاً توسط رگچه‌های سیلیسی و سیلیسی - سولفیدی قطع شده‌اند (Alaminia et al., 2017). کانی‌سازی در حاشیه توده‌های دیوریت، کوارتز دیوریت و در سنگ دیواره داسیتی گسترش یافته است (ANJC, 2011). کانی‌زایی به دو



شکل ۶- (a) نمایش پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن در مناطق دارای کانی‌سازی مس، (b) نمایی از رگه‌های سیلیسی و دگرسانی‌های اطراف آن (Mohammadi et al., 2018) و (c) و (d) نمای نزدیک از رگه کوارتز-مگنتیت و استوک‌ورک‌های نمایش دهنده کانی‌سازی مالاکیت و اکسید آهن/هیدروکسید (Sabbaghi et al., 2017).

Fig. 6. (a) Representation of zones with secondary iron oxides in copper mineralization areas, (b) Siliceous veins and their surrounding alterations (Mohammadi et al., 2018), and (c) and (d) Close-up view of quartz-magnetite veins and stockworks displaying malachite mineralization and iron oxide/hydroxide (Sabbaghi et al., 2017)

و آזורیت بصورت آغشتگی در سنگ‌های ولکانیکی ائوسن بالا با ترکیب آندزیت و اندزیت-بازالت دیده می‌شود که فاقد ارزش اقتصادی است. کمان ماگمایی ارومیه-دختر بخش وسیعی از استان اصفهان را متأثر نموده است. محصول این فعالیت وسیع ماگمایی و به تبع آن گرمایی، کانه‌زایی‌های فراوان پورفیری، مس و مس-طلا، اپی‌ترمال و پلی‌متال‌های مرتبط با سیستم پورفیری است. محصول دیگر فعالیت‌های گرمایی، دگرسانی وسیع و در نتیجه تشکیل خاک‌های صنعتی و نیز چشمه‌های گرمایی و تشکیل تراورتن و مرمر است. از مهمترین این کانسارها می‌توان به پورفیری کهنگ و زفره و

کرد. کانی‌سازی مس به صورت پرکننده درز و شکستگی‌ها در سطح تماس سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه و عمدتاً به شکل مالاکیت و آזורیت مشاهده می‌شود. بررسی‌های فابریک‌های مغناطیسی نیز غنی بودن توده نفوذی مخصوصاً بخش گابرویی و دیوریتی را از مواد معدنی، به ویژه مگنتیت تایید می‌کند (Guanji, 2010). چند معدن گرانیت (که در واقع سنگ‌های دیوریتی-گرانودیوریتی است) به صورت متروکه در منطقه یافت می‌شوند. شکستگی‌های زیاد، علت متروکه شدن این معادن بوده است (Ghaffary, 2010). در مسیر جاده اردستان به ظفرقند، در غرب کوه شهریاری، اندیسی از مالاکیت

بیتی و تصاویر مادون قرمز حرارتی به صورت ۱۲ بیتی طراحی شده که امکان افزایش دقت رادیومتریکی و مکانی باندهای حرارتی آن را فراهم کرده است (Ramsey and Flynn, 2003; Gupta, 2020). داده‌های سنجنده استر برای شناسایی دگرسانی‌ها، کانی‌ها و سنگ‌شناسی در مطالعات زمین‌شناسی به کار برده می‌شود. داده‌های استر به تنهایی یا بصورت ترکیبی با سایر ماهواره‌های سنجنش از دور و داده‌های زمینی برای تولید نقشه‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شوند (Abrams and Yamaguchi, 2019; Habashi et al., 2024; Guha et al., 2021). استر قابلیت استفاده ترکیبی با سایر ماهواره‌های سنجنش از دور را نیز دارد. شما می‌توانید با ترکیب داده‌های استر و سایر ماهواره‌ها و سنجنده‌ها، نقشه‌هایی با دقت بالاتر تولید کنید (Wang et al., 2022).

۳-۱- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای منطقه

در ابتدا، اطلاعات ماهواره‌ای ممکن است دارای انواع مختلفی از خطاها، از جمله خطاهای هندسی و رادیومتریکی باشند. این خطاها معمولاً به دلیل عوامل مختلفی ایجاد می‌شوند. به عنوان مثال، تصاویری که توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای تهیه می‌شوند، ممکن است به دلیل وجود گرد و غبار، مه، و توپوگرافی منطقه، انعکاس مطلوبی نداشته باشند و در نتیجه، وضوح لازم را ارائه نکنند. همچنین، خطاها ممکن است تحت تأثیر وضعیت ماهواره، سنجنده، خطاهای در زمان ثبت داده، انتقال اطلاعات، و سایر عوامل موجود باشند. به منظور بهبود کیفیت داده‌ها و اطمینان از صحت آنها، مرحله پیش‌پردازش انجام می‌شود. این مرحله شامل عملیات مختلفی است که قبل از آنالیز اصلی داده‌ها و استخراج اطلاعات، اجرا می‌شود (Nandasena et al., 2023).

در تصاویر ماهواره‌ای، خطاها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) خطاهای هندسی و (۲) خطاهای رادیومتریکی. برای استفاده مؤثر از این تصاویر، لازم است که هر دو نوع خطا تصحیح شوند تا خطاهای موجود به حداقل ممکن رسیده و دقت تصاویر افزایش یابد. تصحیحات هندسی جهت ژئورفرنس (زمین مرجع) کردن تصویر و تصحیحات رادیومتریکی شامل اعمالی برای حذف اثراتی چون عبور نور خورشید از ابر، ذرات معلق موجود در فضا، اکسیژن، نیتروژن و عناصر دیگر که ایجاد پارازیت کرده می‌باشد. به عبارت دیگر تصحیحات رادیومتریکی عواملی که روی طیف‌های دریافتی تأثیر گذاشته‌اند را حذف و در تصاویر

پلی متال‌های خونی و کالکافی و تراورتن‌های نطنز و کاشان اشاره نمود. زون زاگرس در قسمت جنوب و جنوب باختری استان اصفهان مشاهده می‌شود و واحد سنگ‌های کربناته با مصارف مصالح ساختمانی است.

۳- مواد و روش‌ها

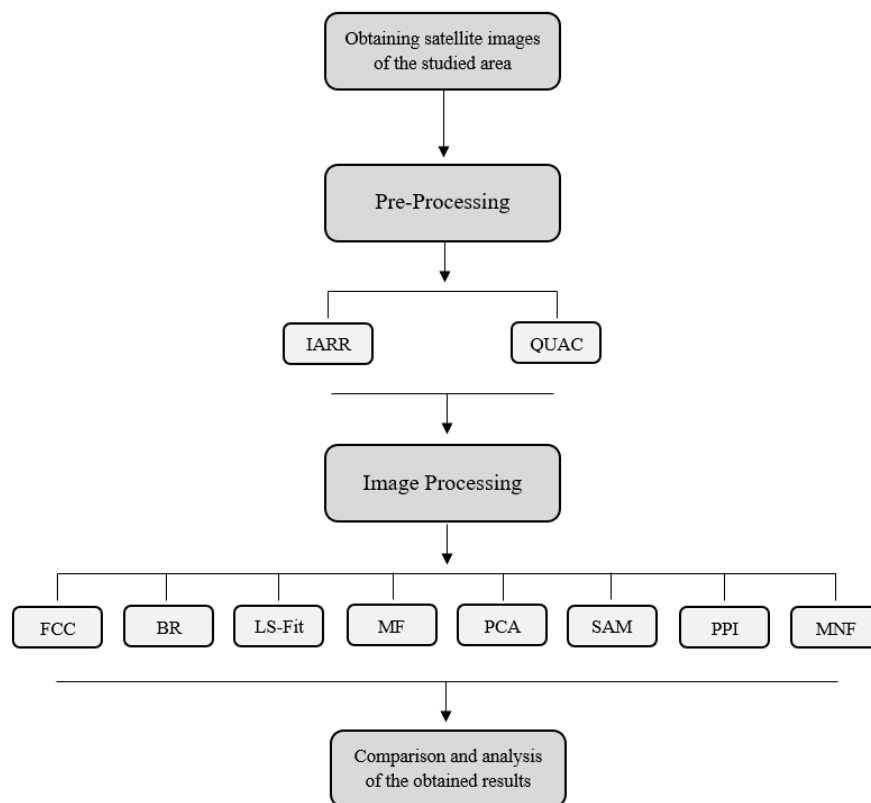
برای دستیابی به هدف مورد مطالعه در این تحقیق، از تصاویر سنجنده استر استفاده شده است. این تصاویر مربوط به تاریخ ۱۸ اوت ۲۰۰۲ می‌باشند و در سطح LIT (سطح تصحیح شده توپوگرافی) قرار دارند. از نرم‌افزار ENVI 5.3 برای انجام پیش‌پردازش و پردازش‌های مرتبط با شناسایی مناطق دارای پتانسیل استفاده شده است. نرم‌افزار ENVI 5.3 یک ابزار قدرتمند در زمینه پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که به محققان این امکان را می‌دهد که از داده‌های سنجنش از دور به صورت دقیق‌تر و اصولی‌تر استفاده کنند. در این پژوهش، این نرم‌افزار برای انجام پیش‌پردازش و پردازش تصاویر استر مورد استفاده قرار گرفته است تا مناطق دارای پتانسیل معدنی یا ویژگی‌های دیگر مورد مطالعه به نحو دقیق‌تر شناسایی و تحلیل شوند. سنجنده استر ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) بر روی ماهواره Terra قرار گرفته و در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شده است. داده‌های این سنجنده دارای ۱۴ باند است که سه باند در محدوده VNIR با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند در محدوده SWIR با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند در محدوده TIR با توان تفکیک مکانی ۹۰ متر قرار دارد. هر سین تصویر استر منطقه‌ای به وسعت ۶۰*۶۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد. تصاویر استر به دلیل تعدد باندها در محدوده SWIR و TIR کاربرد زیادی در مطالعات زمین‌شناسی به ویژه تشخیص زون‌های دگرسانی دارند (Moradpour et al., 2022). باندهای SWIR این تصاویر محدوده‌های جذبی Al-O-H, Si-O-H, Mg-O-H را دربرگرفته و می‌توانند در شناسایی آنها مؤثر واقع شوند (Li et al., 2014). در میان باندهای مادون قرمز بازتابی آن، ۶ باند در طول موج ۱/۵ تا ۳ میکرومتر طراحی شده است که برای کاربردهای زمین‌شناسی (خصوصاً کانی‌شناسی) بسیار کاربردی است. ۵ باند مادون قرمز حرارتی نیز برای برآورد دقیق دمای سطح زمین و اندازه‌گیری گسیلمندی پدیده‌های مختلف استفاده می‌شود. از لحاظ رادیومتریکی، تصاویر مرئی و مادون قرمز بازتابی به صورت ۸

استفاده از روش QUAC برای حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی در تصاویر ماهواره‌ای، جهت بهبود کیفیت داده‌ها بسیار مؤثر است. این روش یک روش تصحیح اتمسفری برای محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی است (Pordel et al., 2019). روش QUAC برای تصحیح اتمسفری تصاویر چندطیفی و ابرطیفی در بازه بین ۴۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر کاربرد دارد. این الگوریتم برای تصحیح تصاویری مناسب است که در گذشته تهیه شده یا تصاویری که فاقد نمونه‌های اتمسفری و زمینی برای اعمال روش‌های مطلق هستند (Bernstein et al., 2005). قبل از اعمال تصحیح اتمسفری QUAC، مقادیر رادیانس از طول موج کوتاه تا طول موج بلند یک سیر نزولی دارد که نشان‌دهنده میزان انرژی در دسترس است اما هنگامی که تصحیح فوق انجام می‌شود، اثر پخش و جذب الکترومغناطیسی از امواج حذف می‌شود و نسبت جذب و بازتاب صورت گرفته به درستی نشان داده می‌شود و می‌توان تحلیل‌ها را روی این طیف‌ها انجام داد.

۳-۲- روش‌های پردازش داده‌های ماهواره‌ای

پس از دریافت تصاویر ماهواره‌ای استر برای منطقه ظرفرند، پیش‌پردازش آنها توسط روش‌های مختلفی انجام گرفت. در ابتدا برای شناخت اولیه از منطقه و زون‌های دگرسانی آن، از روش ترکیب رنگی کاذب (FCC) استفاده گردیده و سپس جهت تفکیک بهتر مناطق دگرسانی روش کمترین مربعات رگرسیون شده (LS-Fit)، نسبت بانندی (Band Ratio)، فیلترگذاری تطبیقی (Matched Filtering)، آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) و زاویه بردار طیفی (SAM) به کار گرفته شده است و در نهایت نیز برای کسر نویز تصویر از روش MNF و همچنین برای شناسایی پیکسل‌های خالص الگوریتم PPI، در دستور کار قرار گرفت (شکل ۷). در مدل مس پورفیری شاخص، یک هسته کوارتزی و کانی‌های پتاسیم‌دار که عموماً شامل پتاسیم فلدسپات و بیوتیت است، توسط چندین زون دگرسانی آبدار احاطه شده‌اند (John et al., 2010). این زون‌های دگرسانی دارای کانی‌های شاخصی هستند که شامل حداقل یک کانی در محدوده مرئی مادون قرمز و مادون قرمز طول موج کوتاه دارای خاصیت جذب است (John et al., 2010).

دریافتی ایجاد کنتراست می‌کند. تصاویر سنجنده استر تصحیحات هندسی بر آنها اعمال شده است و کاربر فقط باید تصحیحات رادیومتریکی بر آن اعمال کند (Amera, 2007). تصاویر استفاده شده در این مطالعه؛ تصاویر سطح LIT استر برای سال ۲۰۰۲، که علت انتخاب این تصویر این بوده است که از سال ۲۰۰۸ میلادی، ۶ باند مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) سنجنده استر به صورت کامل از کار افتاد و داده‌های آن از این سال، بدون باندهای مذکور در سایت‌ها عرضه می‌شود. سطح تصحیح شده توپوگرافی (LIT) فرآیندی است که در آن، تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از اطلاعات دقیق توپوگرافی و هندسی بهبود داده می‌شوند. در این فرآیند، تصاویر ماهواره‌ای اصلاحاتی مانند خطای هندسی، رادیومتری و تصحیح بخش‌های مختلفی که ممکن است به دلیل عوامل مانند ناپایداری هواشناسی و غیره، دچار نوسانات شوند، تجربه می‌کنند. در این فرآیند، اشکالی مانند خمیدگی، گسستگی و چین و چروک‌های موجود در تصاویر کاهش می‌یابند تا تصاویر دقیق‌تر و با کیفیت بهتری ارائه شود. سطح تصحیح شده توپوگرافی اهمیت ویژه‌ای در بسیاری از حوزه‌های مختلف از جمله زمین‌شناسی، کشاورزی، محیط زیست و مدیریت منابع طبیعی دارد، زیرا به کمک آن، اطلاعات دقیق‌تر و قابل اعتمادتری از مناطق مختلف زمین به دست می‌آید که برای تحلیل‌های علمی و تصمیم‌گیری‌های مؤثر، استفاده می‌شود (Nandasena et al., 2023). بر روی داده‌های مورد نظر، تصحیح هندسی انجام شده و این داده‌ها به عنوان زمین مرجع استفاده شده‌اند. حال، نیاز است که تصحیح رادیومتریکی بر روی این داده‌ها اعمال شود (Oleson and Doescher, 2022). برای این منظور، از روش‌های مبتنی بر تصویر استفاده شده است. به عنوان مثال، روش IARR (Internal Average Relative Reflectance) برای تصحیحات اتمسفری بر روی این داده‌ها به کار گرفته شده است. این روش برای نواحی خشک و نیمه‌خشک به علت پوشش گیاهی اندک و میزان ناچیز بخار آب و جوی و نیز برای منطقه‌ای که هیچ اندازه‌گیری خاص زمینی وجود نداشته مؤثر است (Fereydooni and Mojeddifar, 2017). روش QUAC (Quick Atmospheric Correction) بر روی داده‌های مورد نظر اعمال شده است.



شکل ۷- مراحل و روند انجام کار.

Fig. 7. The flowchart of various stages and the process of the task execution.

۳-۲-۱- ترکیب رنگی کاذب (FCC)

ایجاد تصاویر رنگی، یکی از روش‌های پردازشی رایج در بررسی‌های سنجش از دوری است. از آنجایی که اغلب تصاویر ماهواره‌ای در فرمت‌های چند باندهی موجودند، بررسی داده‌های یک باند در یک برهه از زمان حداکثر اطلاعات را بدست نمی‌دهد. آگاهی از روابط متقابل بین طول موج‌های مختلف برای شناسایی عوارض و انواع مختلف پوشش زمین بسیار مهم است و نمایش دادن بیش از یک باند به طور همزمان بر روی سیستم پردازش تصاویر و تهیه نسخه چاپی چند باندهی سودمند و ثمربخش خواهد بود. این کار اغلب از طریق تهیه کامپوزیت‌های رنگی و به‌کارگیری تصاویر ترکیبی رنگی میسر است. در این حالت سه باند از داده‌ها به کانال‌های قرمز، سبز، آبی سیستم نمایش تصویر ارسال شده و تصویری رنگی نمایش داده می‌شود (Aboelkhair et al., 2010). استفاده از رنگ‌ها اطلاعات بصری و مفهومی بیشتری از تصویر را در اختیار ما قرار می‌دهند. آنالیزهای تجربی نشان داده‌اند که تصویری با ترکیب RGB=468 در تصاویر استر مناسب‌ترین ترکیب رنگی برای شناسایی دگرسانی در اغلب کانسارها به‌ویژه مس پورفیری و

طلای اپی‌ترمال می‌باشد. کانی‌های رسی، سریسیت، اپیدوت و کلسیت بازتاب بالایی در باند ۴ استر دارند. کلریت و اپیدوت به دلیل وجود Fe و Mg-OH جذب بالایی در باند ۸ (محدوده ۲/۳۳-۲/۳۵ میکرومتر) دارند (Mars and Rowan, 2006). دگرسانی آرژیلیک با رنگ سبز و همچنین دگرسانی فیلیک با رنگ قرمز مشخص می‌شوند (Malekshahi et al, 2019). دگرسانی پروپیلیتیک با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه ظفرقند توسط روش ترکیب رنگی کاذب به خوبی بارز شده است. در شکل ۸، دگرسانی آرژیلیک به رنگ صورتی و مناطق سبز مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک و همچنین می‌توان قسمت‌های قرمز را به دگرسانی فیلیک نسبت داد.

۳-۲-۲- نسبت باندهی (Band Ratio)

روش نسبت باندهی (BR) یکی از روش‌های پرکاربرد در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است. طی این روش، پیکسل‌های یک باند طیفی به پیکسل‌های متناظر باند دیگر بر اساس خصوصیات طیفی کانی‌های مورد نظر (جذب و بازتاب) تقسیم می‌شوند (Ranjbar, 2011, Ranjbar and Honarmand, 2004) این

و اختلاف آنها از نظر شاخص جذب و انعکاس در آن باند عمل می‌کند. با اختلاف مشاهده شده بین باندهای تخمین گر و باند مدل شده، یک تصویر خروجی محاسبه می‌شود (Aliani et al., 2015). اساس این روش، باندی که در آن جذب یا انعکاس یک کانی خاص بیشترین مقدار را دارد، انتخاب می‌شود و سپس با استفاده از رگرسیون کمترین مربعات، باندهای دیگر تخمین زده می‌شود. در دگرسانی آرژیلیک، باند ۴ بیشترین انعکاس و باند ۶ بیشترین جذب را دارا است، در دگرسانی پروپیلیتیک، باند ۶ بیشترین انعکاس و باند ۸ بیشترین جذب را دارا است، در دگرسانی فیلیک، باند ۷ بیشترین انعکاس و باند ۶ بیشترین جذب را دارد (شکل a۱۱). در این روش، پیکسل‌های روشن و سفیدرنگ نشان دهنده باند انعکاس و پیکسل‌های تیره و سیاه‌رنگ نشان باند جذب است (شکل ۱۰). دگرسانی آرژیلیک در منطقه با روش کمترین مربعات رگرسیون شده به خوبی بارزسازی شده است (شکل a۱۰). در شکل c-۱۰ که نمایان‌گر دگرسانی پروپیلیتیک است از باند ۸ که بیشترین جذب را به خود اختصاص می‌دهد استفاده شده است و پیکسل‌های سفید رنگ مشخص‌کننده این دگرسانی هستند و شکل b-۱۰ بارزسازی دگرسانی فیلیک به کمک این روش بوده است که این روش در بارزسازی این دگرسانی عملکرد دقیقی را نداشته است و این دگرسانی به طور کامل با این روش شناسایی نشده است.

۳-۲-۴- فیلترگذاری تطبیقی (Matched Filtering)

یکی دیگر از روش‌های مهم پردازش تصاویر ماهواره‌ای، روش فیلترگذاری تطبیقی (MF) است. در این روش، با استفاده از Endmemberهای تعریف شده توسط کاربر، پاسخ کاربر را افزایش داده و مانع پاسخ زمینه می‌شود. این روش وسیله‌ای سریع برای شناسایی مواد خاص بر اساس تطبیق اعضای انتهایی منحنی بازتاب طیفی با طیف تصویر می‌باشد (Bedini, 2011). این الگوریتم با هدف یافتن میزان فراوانی هر عضو تعریف شده در تصویر، از تجزیه اختلاط طیفی استفاده می‌کند (Parasath and Kusuma, 2018; Chen et al., 2023). از ویژگی‌های اصلی این روش می‌توان به طبقه‌بندی بهتر عوارضی اشاره کرد که تصویر پراکنده بوده و در روش‌های معمول طبقه‌بندی در کلاس‌های دیگر تلفیق می‌شوند. فیلترگذاری تطبیقی یک روش طیفی بدون تداخل بوده و هدف آن مشخص کردن کلاس‌های طیفی مطلوب با حذف سایر طیف رنگ‌ها است. این روش

روش اختلاف بین درجات روشنایی را آشکار می‌کند و با حذف اثرات توپوگرافی و سایه‌ها و کاهش برخی از نویزها، مرزها را مشخص می‌کند. برای مشخص کردن مناطق دگرسانی با توجه به ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص در هر نوع دگرسانی، از نسبت باندی استفاده می‌شود (Boloki and Poormirzaee, 2010). نتایج حاصل از این روش، تصاویری سیاه و سفید ایجاد می‌کند که به تنهایی ملاک و مقیاس مناسبی برای تعیین نواحی منطقه در هدف مورد مطالعه نمی‌باشند، بلکه مناطقی که بیشترین احتمال حضور ماده معدنی موردنظر را دارند یا به طور کلی اهداف جستجو در آنها وجود دارد را مشخص می‌کنند. این تصاویر را می‌توان با استفاده از ترکیب رنگی کاذب باهم ادغام و تصاویری تولید کرد که تفسیر و نتیجه‌گیری بر اساس آنها قابل اعتماد و کاربردی‌تر باشد. با شناخت خواص انعکاسی پدیده‌ها از روی نمودار طیفی آنها، می‌توان با استفاده از این روش، پدیده‌های مختلفی را همچون مرز واحدهای سنگی و دگرسانی‌ها بارز کرد. در این روش، باندی که میزان انعکاس آن از هدف مورد نظر بیشتر باشد در صورت کسر و باندی که میزان جذب برای همان هدف در آن بالاتر باشد در مخرج کسر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه کانی‌های شاخص زون حاوی دگرسانی آرژیلیک دارای جذب حداکثری در باندهای ۵ و ۶ و انعکاس در باندهای ۴ و ۷ می‌باشد، لذا از نسبت باندی آرژیلیک استفاده شده است. جهت بارزسازی زون‌های حاوی دگرسانی فیلیک، با توجه به جذب حداکثری در باند ۶ و انعکاس حداکثری در باند ۷، جهت آشکارسازی فیلیک استفاده شد، در همین راستا، به منظور آشکارسازی زون‌های حاوی دگرسانی پروپیلیتیک نیز با توجه به ویژگی‌های جذبی شاخص در باندهای ۷ و ۸ همچنین انعکاس شاخص در باندهای ۶ و ۹ از رابطه پروپیلیتیک بهره گرفته شد. در شکل ۹ دگرسانی‌های منطقه با روش نسبت باندی قابل مشاهده هستند. در شکل‌های a۹ و b۹ دگرسانی آرژیلیک و فیلیک در محدوده مورد مطالعه به خوبی بارزسازی شده‌اند. روش نسبت باندی در بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک نیز عملکرد قابل قبولی را به همراه داشته است (شکل c۹).

۳-۲-۳- کمترین مربعات رگرسیون شده (LS-Fit)

در این روش، از یک پیش‌بینی خطی با استفاده از روش حداقل مربعات برای پیش‌بینی یک باند براساس سایر باندها استفاده می‌شود. این روش بر اساس حساسیت کانی‌ها به یک باند خاص

نمایش عوارض در بر خواهد داشت (Crosta, 1989). بر مبنای این روش و بر اساس ویژگی‌های طیفی کانی‌ها، باندهای مناسب برای انجام این روش انتخاب می‌شوند. روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی از اهمیت زیادی در تفسیر تصاویر ماهواره‌ای برخوردار است. از این روش به منظور فشرده‌سازی داده‌های مربوط به باندهای مختلف در تعداد کمتری باند و حذف اطلاعات اضافی استفاده می‌شود. تکنیک PCA در افزایش تمایز میان پدیده‌های مختلف و در نتیجه تهیه نقشه‌های دگرسانی و لیتولوژیکی کاربرد زیادی دارد (Adiri et al, 2016; Crosta et al, 2003). در این روش می‌توان تنها از دو باند به عنوان ورودی استفاده نمود که با به حداقل رساندن اطلاعات، باعث راحتی بیشتر تفسیر چشمی می‌شود (Adiri et al., 2016; Crosta et al, 2003). در این مطالعه از ۴ باند که دارای کمترین همبستگی هستند، به عنوان ورودی استفاده شده است. برای بدست آوردن مناسب‌ترین مؤلفه برای جداسازی مناطق دگرسان شده از رگه‌های کربناتی باید مؤلفه اصلی را انتخاب نمود که دارای مقادیر بارگذاری بالای باندهای ۴، ۵ و ۷ (مقادیر بالای نمودار طیفی کانی‌های رسی و سربیسیت در محدوده این باندها) و مقادیر پایین باندهای ۶ و ۹ (مقادیر پایین نمودار طیفی کانی‌های رسی و سربیسیت) باشد. بررسی جدول مؤلفه‌ها گویای این مطلب است که هر کدام از مؤلفه‌ها به تنهایی در برگزیده مقادیر بارگذاری مناسب برای همه باندهای یاد شده نیست، به عنوان مثال مؤلفه سوم دارای مقدار بارگذاری ۰/۴۸- در باند چهارم و ۰/۴۴ در باند ششم است و برای باندهای ۵، ۷ و ۹ دارای مقادیر مورد انتظار نیست، بنابراین بهتر است که مؤلفه‌ها به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گیرند. از ترکیب رنگی کاذب (PC2, PC3, PC4) برای شناسایی دگرسانی‌های استفاده شد که در این ترکیب تنها دگرسانی آرژیلیک و فیلیک با رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک با رنگ صورتی تا سرخ به خوبی بارزسازی شدند (شکل a۱۲) و PC3 برای بارزسازی دگرسانی فیلیک نیز مفید است (شکل b۱۲).

۳-۵-۶- زاویه برداری طیفی (SAM)

یک روش طبقه‌بندی نظارت‌شده تصویر می‌باشد که تشابه بین طیف تصویر را با طیف مرجع اندازه‌گیری می‌کند. اندازه‌گیری تشابه طیفی بر اساس محاسبه زاویه بین دو طیف است که در فضای n بعدی به صورت برداری رفتار کرده که در آن n تعداد باندها می‌باشد (Beygi et al., 2021). نقشه برداری زاویه

وسيله‌ای برای شناسایی مواد خاص براساس تطبیق Endmemberهای منحنی بازتاب طیفی با تصویر و نیز روش مناسبی برای شناسایی دگرسانی‌های آرژیلیک، کربناتی و پروپیلیتیک است که در آن مکان‌های هدف به رنگ سفید دیده می‌شوند (Moradpour et al., 2021).

در این روش، پیکسل‌هایی از داده‌ها که طیف آنها با طیف مرجع (کتابخانه طیفی USGS) انطباق نشان دهد، به طور مشخص بارز می‌گردد. کانی شاخص دگرسانی آرژیلیک کائولینیت، برای دگرسانی فیلیک کانی مسکوویت و کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک کلریت و اپیدوت است (Chen et al., 2023). در شکل a۱۱ منحنی‌های طیفی کانی‌های کائولینیت، کلریت و مسکوویت به نمایش گذاشته شده است. با توجه به شکل a۱۱ کانی‌های کائولینیت و مسکوویت رفتار طیفی تقریباً مشابهی به هم دارند و در نتیجه بارزسازی این دو دگرسانی با تغییراتی جزئی همراه است که این روش در بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک موفق نبوده است اما در آشکارسازی دگرسانی آرژیلیک و فیلیک نتیجه قابل قبولی به همراه داشت (شکل b۱۱ و c۱۱). از این روش می‌توان دگرسانی بیوتیتی را نیز تا حدودی شناسایی کرد، اما نتیجه حاصله از این روش برای دگرسانی پتاسیک مبنی بر عدم وجود چنین دگرسانی در محدوده ظفرقند می‌باشد که این نتیجه بر اساس نقشه دگرسانی موجود از منطقه (شکل ۳) و عدم وجود این دگرسانی در نقشه، صحیح و منطقی به نظر می‌رسد. البته در نواحی دیگری از این تصویر نقاط روشنی توسط این روش مشخص شده است که با توجه به عدم وجود نقشه دگرسانی در این نواحی، امکان صحت‌سنجی نقاط وجود نداشته و به نظر نمایش این نقاط توسط این روش صحیح نمی‌باشد. بر اساس نتایج دیگر حاصله می‌توان مشاهده کرد که دگرسانی آرژیلیک نیز به خوبی شناسایی شده است.

۳-۲-۵- آنالیز مؤلفه اصلی (PCA)

تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی یک فناوری مفید برای تجزیه همبستگی داده‌های چند متغیره است (Moradi and Boomeri, 2017; Zhou et al., 2020; Hasan and Abdulazeez, 2021). به منظور استخراج اطلاعات بیشتر از باندهای سنجنده‌های مختلف، بهتر است به صورت ترکیبی مورد بررسی قرار گیرند. در صورتی که از روش تجزیه مؤلفه اصلی با انتخاب باندهای مناسب استفاده شود، نتایج مناسب‌تری را برای

شاخص زون دگرسانی پروپلیتیک، کائولینیت برای دگرسانی آرژیلیک و موسکوویت برای دگرسانی فلیک انتخاب گردیده‌اند. برای طیف مرجع نیز از طیف‌های استخراج شده از پیکسل‌های خالص تصویر استر استفاده گردید. دگرسانی آرژیلیک در محدوده مورد مطالعه به خوبی بازسازی شده است (شکل ۱۳)، نتیجه حاصل شده در بازسازی دگرسانی فلیک و پروپلیتیک منطقه نتیجه مطلوبی رو به همراه داشته است.

۳-۲-۷- کسر کمترین نويز (MNF)

روش کسر کمترین نويز (MNF)، یک رویکرد پردازش تصویر است که به منظور کاهش نويز و ارتقای کیفیت تصاویر، به ویژه در حوزه تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، ابتدا ماتریس کوواریانس تصویر محاسبه می‌شود که ارتباطات بین پیکسل‌های مختلف تصویر را نمایش می‌دهد. سپس ماتریس نويز با استفاده از بخش‌هایی از تصویر که فاقد اطلاعات مفید هستند و فقط شامل نويز می‌باشند، محاسبه می‌شود. در مرحله بعدی، با استفاده از تبدیلات خطی، تصویر به فضای MNF منتقل می‌شود، که در مرحله میانگین نويز کاهش می‌یابد و اطلاعات مفید تصویر بیشتر به نمایش در می‌آید. سپس باندهایی که دارای اطلاعات مفیدتری هستند انتخاب شده و باندهای دارای نويز حذف می‌شوند. در مرحله آخر، تصویر بازسازی شده به فضای اصلی منتقل می‌شود که منجر به بهبود کیفیت تصاویر و ارتقای دقت تحلیل‌های تکمیلی می‌شود. به کمک این روش، می‌توان اطلاعات مفیدتری را استخراج کرده و به کاهش نويز دستیابی نمود (Oliva et al., 2023). نسبت سیگنال به نويز در تصویر حاصل از این تکنیک نسبت به تصاویر PCA بالاتر است (Luo et al, 2016). در این مطالعه از این تکنیک برای کاهش نويز و بالا بردن وضوح تصویر استفاده شد، سپس باندهای حاصله، در ساخت ترکیب‌های رنگی مختلف به کار گرفته شدند. تبدیل MNF به طور وسیع در سنجش از دور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود (Gahlan and Ghrefat, 2017). در تصویر رنگی حاصله RGB: MNF5, MNF3, MNF2، در شکل ۱۴، مناطق زرد تا سبز نشان‌دهنده دگرسانی آرژیلیک و فلیک، مناطق آبی تا بنفش را می‌توان به دگرسانی پروپلیتیک نسبت داد.

۳-۲-۸- شناسایی پیکسل‌های خالص (PPI)

در تصاویر ماهواره‌ای، به دلیل وجود پدیده‌ها و مواد مختلف در سطح زمین، شناسایی پیکسل‌ها غیر ممکن بنظر می‌رسد؛

طیفی یک روش طبقه‌بندی تصویر با محاسبه تشابه بین طیف تصویر و یک طیف مرجع مانند کتابخانه‌های طیفی است (Kruse et al., 1993). الگوریتم این روش، مشابهت بین دو طیف را به وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند در واقع با تبدیل طیف‌ها به بردار در فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه بین دو بردار محاسبه می‌شود. در این روش برای محاسبه زاویه جهت بردارها اهمیت دارد و نه طول آنها، بنابراین در این روش عامل‌های دیگر در نظر گرفته نمی‌شوند. در واقع هرچه مقدار زاویه بین ۰ تا ۱ کمتر باشد شناسایی دقیق‌تر خواهد بود. در صورتی که مقدار زاویه ۱ باشد کل تصویر به عنوان پدیده مورد نظر شناسایی می‌شود. برای مقایسه یک پیکسل طیف پیکسل مورد نظر از منطقه طیف همان پیکسل در آزمایشگاه کتابخانه بر روی دو باند در یک محور مختصات رسم می‌شود. سپس نقاط به دست آمده به مبدأ وصل می‌شوند و زاویه بین دو خط به دست آمده به عنوان زاویه شناسایی پیکسل شناخته می‌شود که در این مطالعه برای کانی‌های کائولینیت، مسکوویت و کلریت زوایای محاسبه شده به ترتیب به صورت ۰/۱۶، ۰/۱۴، ۰/۱۶ و ۰/۳ بوده است. در صورتی که از تعداد باند بیشتری برای شناسایی پدیده مورد نظر استفاده شود، رابطه زیر برای به دست آوردن زاویه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Benzougagh et al., 2023).

$$a = \text{Cos}^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن nb تعداد باندها، t_i طیف تصویر منطقه مطالعاتی و r_i طیف مرجع است (Beiranvand Pour and Hashim, 2012; Tsubomatsu and Hideyuki, 2023). طیف مرجع شامل طیف کتابخانه‌های طیفی، طیف آزمایشگاهی، طیف صحرایی و همین‌طور طیف استخراج شده از پیکسل‌های خالص تصویر می‌شود (Shahriari et al., 2014). خروجی روش SAM، تخمینی طیفی از مشابهت طیف مورد نظر با هر طیف مرجع ارائه می‌دهد (Zhang and Li, 2014). در خروجی حاصل از این روش، پیکسل روشن‌تر معادل زاویه بزرگ‌تر و نشان از اختلاف بیشتر طیف مورد مطالعه با طیف مرجع و پیکسل تاریک‌تر معادل زاویه کوچک‌تر و نماد مشابهت بیشتر طیف‌ها است. در منطقه مورد مطالعه برای اعمال الگوریتم SAM ابتدا کانی‌های شاخص هر زون دگرسانی انتخاب شد بدین صورت که کانی‌های کلریت و اپیدوت به عنوان کانی‌های

احتمال وجود کانی کائولینیت، کانی شاخص دگرسانی آرژیلیک را می‌دهد. در روش PPI، حداقل آستانه به معنای حداقل مقداری از امضای طیفی که به عنوان کانی شناخته می‌شود، بیان می‌شود. به عبارت دیگر، این مقدار حداقلی از شدت یا شباهت با امضای طیفی کانی‌ها است که برای تشخیص و اختصاص به عنوان کانی مورد نظر در تصویر در نظر گرفته می‌شود. اگر امضای طیفی یک پیکسل از این حداقل آستانه بیشتر باشد، آن پیکسل به عنوان کانی شناخته می‌شود. این آستانه معمولاً به صورت مقدار ثابت یا تنظیم شده توسط کاربر یا تحلیل‌گر در این روش استفاده می‌شود و می‌تواند بسته به نوع کانی‌ها و شرایط تصویر متغیر باشد. به عنوان مثال، اگر حداقل مقدار آستانه ۱۰ باشد، تمام پیکسل‌هایی که دارای مقادیر PPI بیشتر از ۱۰ در ناحیه تعیین شده (ROI) هستند، در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، اگر داده‌های نامطلوب در تصویر PPI وجود داشته باشد، می‌توان همزمان از حداقل و حداکثر آستانه استفاده نمود (جدول ۲) (Jennings et al., 2018).

۴- نتایج و بحث

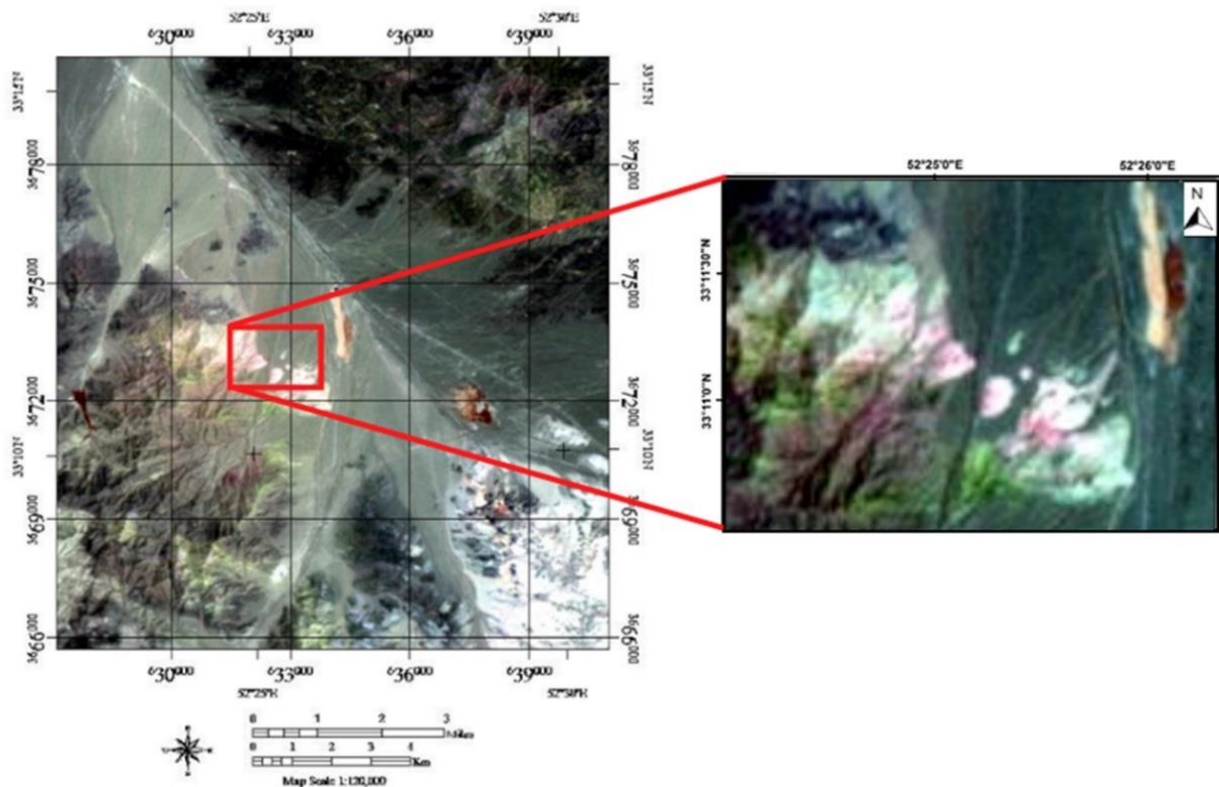
۴-۱- پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در این مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای از سطح LIT استفاده شده‌اند که دارای تصحیحات هندسی به طور پیش‌فرض می‌باشند. بنابراین، تنها نیاز به اعمال تصحیحات اتمسفری برای بهبود دقت تصاویر و حذف اثرات جوی است. در این مطالعه، از روش‌های QUAC و IARR برای انجام این تصحیحات اتمسفری استفاده شده است. در بخش مربوطه به توضیح این دو روش و جزئیات عملکرد آن‌ها پرداخته شده است.

۴-۲- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در ابتدا، برای بهترین دید به منطقه، از روش ترکیب رنگی کاذب (False Color Composite - FCC) استفاده شده است. در این روش، به هر بخش از تصویر، یک رنگ از مجموعه رنگ‌های قرمز (Red)، سبز (Green) و آبی (Blue) اختصاص داده می‌شود. در اینجا، ترکیب رنگی RGB=468 برای بارسازی مناطق مورد نظر استفاده شده است. در نتیجه این ترکیب رنگی، دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک با رنگ صورتی و دگرسانی پروپیلیتیک با رنگ سبز مشخص می‌شوند (شکل ۸).

بنابراین هر پیکسل می‌تواند از چندین نوع ماده تشکیل شده باشد. اختلاط طیفی باعث ایجاد سیمای طیفی جدید، با توجه به ترکیب مواد تشکیل‌دهنده پیکسل می‌گردد. با استفاده از شاخص خلوص پیکسل می‌توان خالص‌ترین طیف پیکسل‌ها را در تصاویر ابرطیفی و چندطیفی به دست آورد. تصاویر PPI از راه تکرار تصویر کردن نمودار پراکندگی n بعدی در یک بردار واحد تصادفی، ایجاد می‌شوند. پیکسل‌هایی که در انتهای این بردار واحد قرار دارند و تعداد آنها در این موقعیت بیشتر است، به عنوان پیکسل‌های خالص‌تر از نظر ویژگی‌های طیفی در نظر گرفته می‌شوند. پیکسل‌های روشن در تصاویر PPI نشان‌دهنده خلوص نسبی بالاتر می‌باشند؛ بنابراین پردازش فوق، پیکسل‌هایی که از نظر مشخصات طیفی نسبت به پیکسل‌های دیگر کمترین تنوع کانی باشند را پیدا می‌کند (Joseph, 1994; Boardman et al., 1995). حداستانه‌ای که برای PPI تعریف می‌شود ۲ یا ۳ برابر عددهای روشنایی نوفه‌های تصویر است؛ بدین ترتیب تنها پیکسل‌هایی در مراحل PPI وارد می‌شوند که عدد روشنایی آنها بین ۲ یا ۳ است یا کاربر حداستانه‌ای بیشتر از این مقدار با توجه به نوع سنجنده خود انتخاب کند. به منظور کاهش ابعاد تصویری که تحت شاخص خلوص پیکسل قرار می‌گیرد روی آن پردازش کسر کمترین نویز انجام می‌شود. پس از اتمام PPI، ارزشی که هر پیکسل بخود اختصاص می‌دهد تعداد دفعاتی است که در انتهای بردار تصادفی قرار گرفته است. پیکسل‌هایی که با شرایط موجود تطابق داشته باشند به صورت پیکسل‌های روشن در خروجی نشان داده می‌شوند. سپس موقعیت ارزش‌های نمایش داده شده در تصویر را مشخص می‌کنند. برای مشاهده ارزش‌های بالاتر می‌توان از برش‌زنی چگالی استفاده کرد. نواحی دارای ارزش‌های بالا انتخاب و بر روی آنها فرآیند مجسم‌کننده n بعدی اجرا می‌شود. به منظور مشخص کردن، شناسایی و دسته‌بندی خالص‌ترین پیکسل‌ها و منحنی‌های طیفی بعد از اجرای تبدیل MNF و PPI از مجسم‌کننده n بعدی استفاده می‌شود (n تعداد باندها). تبدیل PPI در تصویر حاصل از MNF از منطقه مورد مطالعه اجرا گردید؛ این عمل باعث نمایان شدن پیکسل‌های روشن شده است (شکل ۱۵). پیکسل‌های روشن‌تر نمایان‌گر پیکسل خالص است و پیکسل‌های تیره نشان‌دهنده پیکسل مخلوط است. نتایج حاصل از این روش در قسمت جنوب شرق منطقه مورد مطالعه



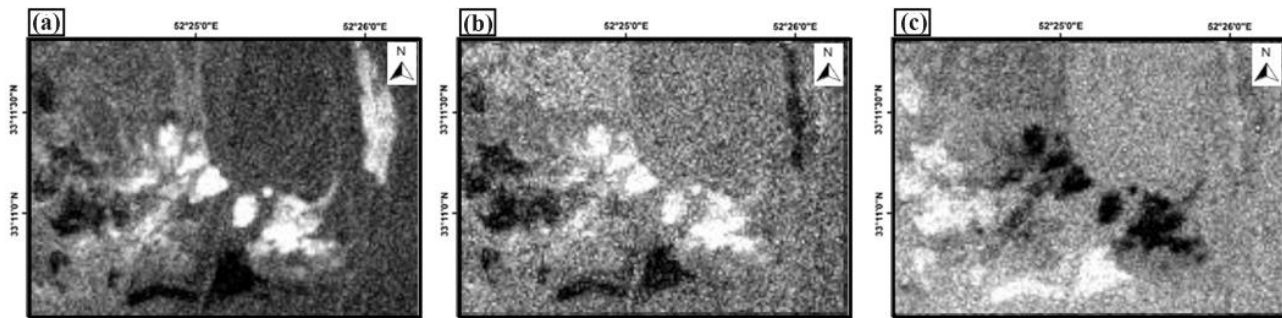
شکل ۸- تصویر حاصله از روش ترکیب رنگی کاذب (FCC)، در این تصویر مناطق صورتی رنگ مربوط به دگرسانی آرژیلیک و مناطق سبز مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک و همچنین مناطق قرمز نیز مربوط به دگرسانی فیلیک می‌باشند.

Fig. 8. The image obtained by the False Color Composite (FCC) method, in which the pink areas are related to argillic alteration and the green areas are related to propylitic alteration, as well as the red areas are also related to phyllic alteration.

باند‌هایی که دارای حداکثر جذب هستند در مخرج کسر قرار می‌گیرند و به همین ترتیب برای دگرسانی پروپیلیتیک از نسبت $6+9/7+8$ ، دگرسانی فیلیک نسبت به کار گرفته شده به صورت $7/6$ بوده است (شکل ۹).

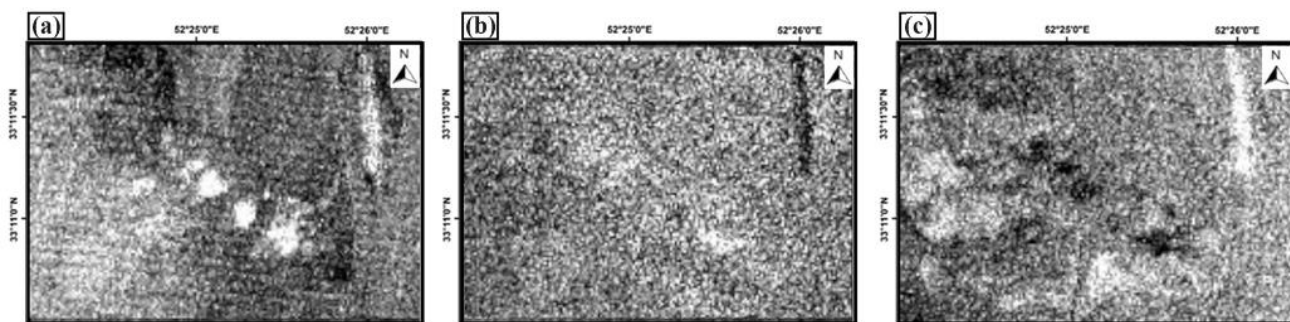
روش کمترین مربعات رگرسیون شده، معمولاً برای تخمین و پیش‌بینی ویژگی‌های زمین بر اساس داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شود. با اعمال روش کمترین مربعات، بهترین خط رگرسیون بر اساس داده‌های موجود به دست می‌آید که می‌تواند به عنوان یک مدل پیش‌بینی برای ویژگی مورد نظر استفاده شود. در شکل ۱۰ نقشه حاصله از این روش مربوط به هر دگرسانی قابل مشاهده هستند.

در ادامه جهت بارزسازی دگرسانی‌ها از پردازش‌های متنوعی بهره گرفته شده است یکی از روش‌های اعمال شده روش نسبت بانندی (BR) بوده است. روش نسبت بانندی به طور گسترده در زمینه شناسایی و تحلیل دگرسانی‌ها نیز به کار می‌رود. به عنوان اساس این روش، تفاوت بازتاب نور، در باندهای مختلف که ممکن است ناشی از ویژگی‌های مختلف مواد و ساختارها در سطح زمین باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش، از باندهایی که بیشترین جذب و انعکاس نور را نشان می‌دهند، استفاده می‌شود. بدین صورت که برای دگرسانی آرژیلیک از نسبت $7+4/6+5$ استفاده شده است مفهوم نسبت اعمالی این است که باندهایی که حداکثر انعکاس را دارند در صورت کسر و



شکل ۹- تصاویر حاصل شده از روش نسبت بانندی، (a) نمایش نسبت بانندی $7+4/6+5$ در سنجنده استر که مناطق سفید رنگ نمایانگر دگرسانی آرژیلیک هستند، (b) بارزسازی دگرسانی فیلیک به رنگ سفید با نسبت بانندی $7/6$ و (c) نسبت بانندی $6+9/7+8$ در سنجنده استر که مناطق سفید رنگ مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک می‌باشند.

Fig. 9. The images obtained from the band ratio method, (a) Showing the band ratio $7+4/6+5$ in the ASTER sensor, where the white areas represent argillic alteration, (b) Highlighting the phyllic alteration in white color with band ratio $7/6$ and (c) The band ratio $6+9/7+8$ in the ASTER sensor, where the white areas are related to the propylitic alteration.



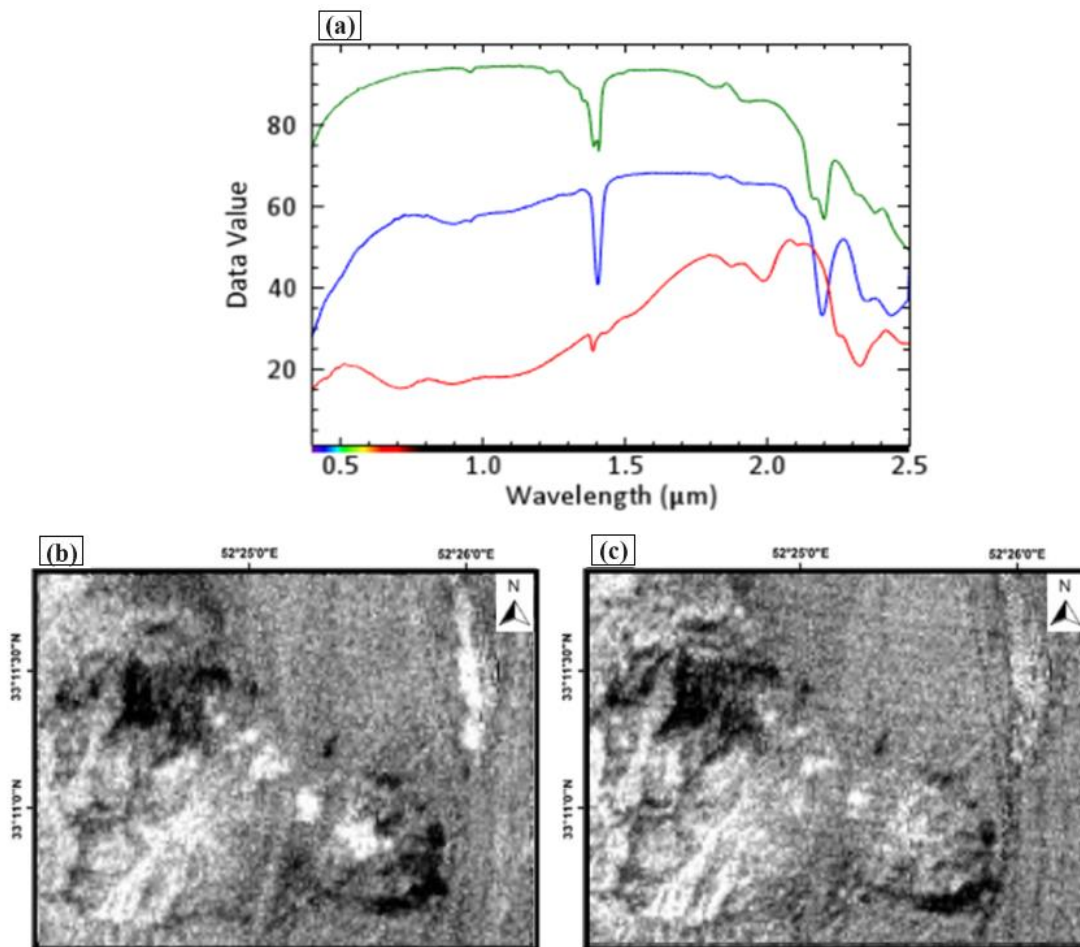
شکل ۱۰- نتایج بدست آمده از روش کمترین مربعات رگرسیون شده در منطقه مورد مطالعه، (a) نمایش دگرسانی آرژیلیک (نقاط روشن) با باند انتخابی ۴ در تصویر استر، (b) نمایش دگرسانی فیلیک (نقاط روشن) با باند انتخابی ۷ و (c) تصویر حاصله از روش کمترین مربعات رگرسیون شده برای دگرسانی پروپیلیتیک با باند انتخابی ۸.

Fig. 10. The results obtained from the LS-Fit method in the studied area, (a) Display of argillic alteration (bright points) with selected band 4 in ASTER, (b) The display of phyllic alteration (bright points) with selected band 7 and (c) Resulting image from the LS-Fit method for propylitic alteration with selected band 8.

روش اشاره شد، از این روش به منظور فشرده‌سازی داده‌های مربوط به باندهای مختلف در تعداد کمتری باند و حذف اطلاعات اضافی استفاده می‌شود. تکنیک PCA در افزایش تمایز میان پدیده‌های مختلف و در نتیجه تهیه نقشه‌های دگرسانی و لیتولوژیکی کاربرد زیادی دارد در این روش می‌توان تنها از دو باند به عنوان ورودی استفاده نمود که با به حداقل رساندن اطلاعات، باعث راحتی بیشتر تفسیر چشمی می‌شود که در این مطالعه از مجموعه ۴ بانندی جهت شناسایی نقاط هدف استفاده شده است.

روش فیلترگذاری تطبیقی یک روش پرکاربرد در سنجش از دور است. روش فیلترگذاری تطبیقی (MF) روشی است بدون تداخل و هدف آن مشخص کردن کلاس‌های طیفی مطلوب با حذف سایر طیف رنگ‌ها است. در منحنی طیفی هر یک از کانی‌های شاخص با اعمال الگوریتم موجود، تصویری حاصل می‌شود که در آن مکان‌های هدف به رنگ روشن (سفید) دیده می‌شوند (شکل ۱۱).

از دیگر روش‌هایی که جهت بارزسازی دگرسانی‌ها استفاده گردید، روش آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) بوده است. همانطور که در بخش مربوط به روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای به این

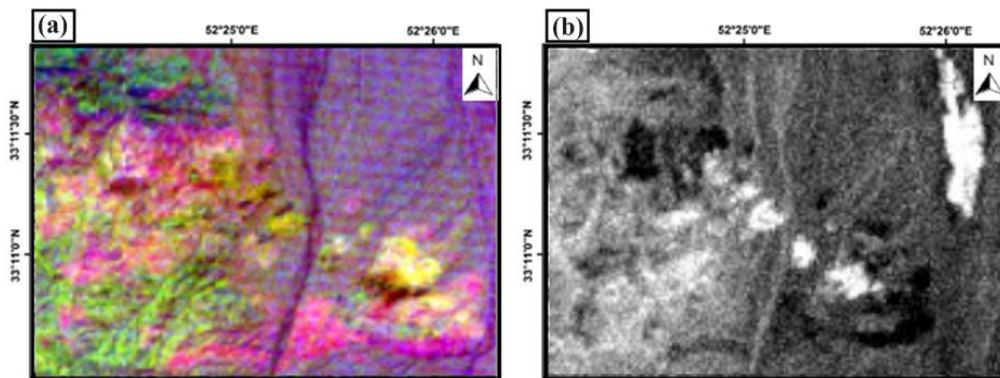


شکل ۱۱- (a) منحنی‌های طیفی کانی‌های کائولینیت (منحنی سبز)، کلریت (قرمز)، مسکوویت (آبی)، (b) تصویر حاصله از روش فیلترگذاری تطبیقی بر روی تصویر استر جهت بارزسازی دگرسانی آرژیلیک با کانی شاخص کائولینیت و (c) بارزسازی دگرسانی فیلیک با کانی شاخص مسکوویت.
 Fig 11. (a) Spectral curves of kaolinite minerals (green curve), chlorite (red), muscovite (blue), (b) The image obtained from the MF method on the ASTER image in order to highlight the argillic alteration with the kaolinite index mineral and (c) Highlighting the phyllic alteration with the muscovite index mineral.

جدول ۱- مؤلفه‌های حاصله از روش آنالیز مؤلفه اصلی.

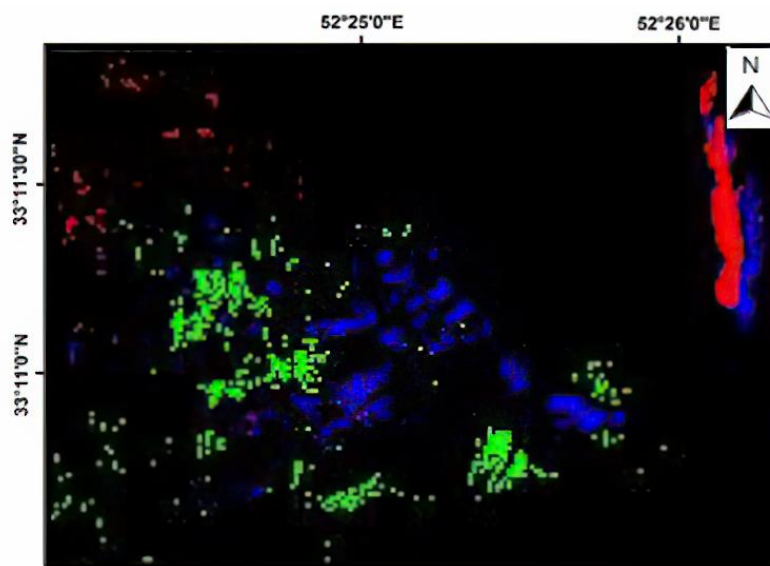
Table 1. Components resulting from the PCA method.

Component	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
PC 1	0.41	0.41	0.41	0.43	0.40	0.36
PC 2	0.63	0.30	0.14	-0.20	-0.52	-0.41
PC 3	-0.48	0.41	0.44	-0.30	-0.40	0.37
PC 4	0.41	-0.19	-0.34	-0.36	-0.13	0.71
PC 5	0.13	-0.56	0.67	-0.38	0.22	-0.06
PC 6	0.01	-0.45	0.19	0.62	-0.57	0.17



شکل ۱۲- (a) تصویر حاصل از روش آنالیز مؤلفه اصلی با مجموعه باندهای SWIR، در این تصویر مناطق صورتی تا سرخ نمایانگر دگرسانی پروپیلیتیک و مناطق زرد رنگ مربوط به دگرسانی فیلیک هستند و (b) PC3 جهت بارزسازی دگرسانی فیلیک، که در این تصویر پیکسل‌های سفید رنگ مختص این دگرسانی هستند.

Fig. 12. (a) The image resulting from the PCA method with a set of SWIR bands, in this image the pink to red areas represents propylitic alteration and yellow areas correspond to phyllic alteration and (b) PC3 to highlight the argillic alteration, which in this image, the white pixels are specific to this alteration.



شکل ۱۳- تصویر حاصله از روش نقشه‌برداری زاویه طیفی در محدوده مورد بررسی، مناطق سبزرنگ مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک و مناطق آبی رنگ نمایانگر دگرسانی فیلیک هستند.

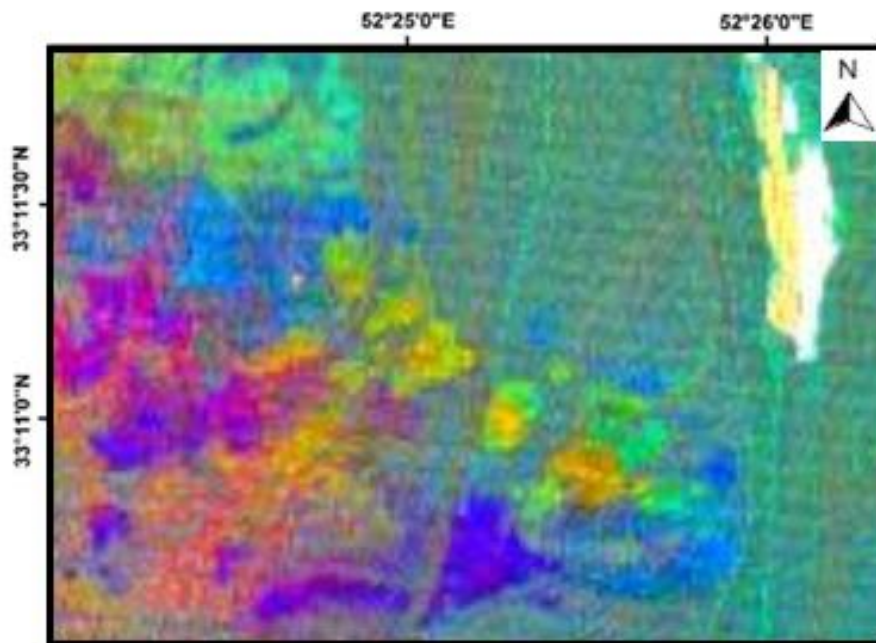
Fig. 13. The image obtained from the SAM method in the investigated area, the green areas are related to propylitic alteration and the blue areas represent phyllic alteration.

در نهایت، به منظور تحلیل هر چه بهتر و دقیق‌تر تصاویر ماهواره‌ای از روش PPI استفاده می‌شود. این روش به طور خاص برای تشخیص و انتخاب اجزاء مختلف موجود در تصویر با استفاده از اطلاعات طیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش PPI از تفاوت‌های طیفی بین اجزاء مختلف تصویر بهره می‌برد. ابتدا، با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی که معمولاً بر اساس طیف‌سنجی و تحلیل طیفی اجزاء مختلف تصویر ایجاد شده‌اند،

روش MNF یکی از روش‌های پرکاربرد در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که برای کاهش نویز و بهبود کیفیت تصویر استفاده می‌شود. این روش بر اساس تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) تعیین شده است و برای تبدیل فضای ویژگی‌های اصلی (PCs) به یک فضای جدید با ویژگی‌های کمتر نویز و بیشتر اطلاعات استفاده می‌شود. ترکیب رنگی ایجاد شده در این روش می‌تواند دگرسانی فیلیک را در منطقه نمایان سازد.

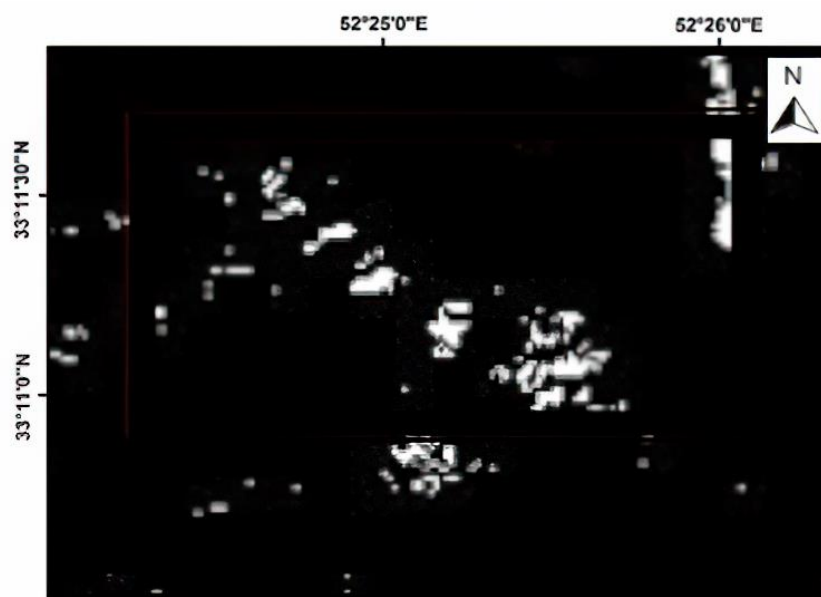
در نهایت به منظور جمع‌بندی در مورد عملکرد ۷ روش پردازشی مورد استفاده در بارزسازی دگرسانی‌های منطقه، گزارشی از عملکرد صحیح و غیر صحیح آنها به واسطه اعتبارسنجی به کمک نقشه دگرسانی منطقه اکتشافی ظفرقند تهیه و در جدول ۳ ارائه شده است.

تشخیص داده می‌شوند سپس، با تحلیل طیفی این اجزاء، برای هر پیکسل تصویر، شاخص پلاریته پیکسل یا PPI محاسبه می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده درصدی از اجزاء مختلف تصویر است که در طیف آن پیکسل حضور دارند.



شکل ۱۴- ترکیب رنگی (RGB: MNF5, MNF3, MNF2)، مناطق زرد تا سبز مربوط به دگرسانی آرژیلیک و فیلیک و مناطق آبی تا بنفش مربوط دگرسانی پروپیلیتیک است.

Fig. 14. Color composite (RGB: MNF5, MNF3, MNF2), yellow to green areas are related to argillic and phyllic alterations and blue to purple areas are related to propylitic alteration.



شکل ۱۵- تبدیل شاخص خلوص پیکسل (PPI) از تصویر حاصل MNF، پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده پیکسل خالص هستند.

Fig. 15. Pixel Purity Index (PPI) transformation from the resulting MNF image, bright pixels represent pure pixels.

جدول ۲- تعداد پیکسل‌های شناسایی شده و درصد آنها با استفاده از روش شناسایی پیکسل‌های خالص.

Table 2. The number and percentage of pixels identified using the PPI method.

Minimum threshold	The total number of pixels of the studied area	Detected pixels within the threshold	The percentage of pixels detected within the threshold
10	18758	7909	42.21
20		6248	33.30
30		5207	28.09
40		4506	24.02
50		3977	21.20
60		3522	18.77
70		3208	17.10
80		2907	15.49
90		2690	14.34
100		2464	13.13

جدول ۳- نتیجه عملکرد روش‌های پردازشی در تعیین دگرسانی (عملکرد صحیح: ۱ و عملکرد غیر صحیح: ۰).

Table 3. The performance result of the processing methods in determining the alterations (correct: 1 and incorrect: 0).

Method	Argillic	Phyllic	Propylitic
BR	1	1	1
LS-Fit	1	0	1
MF	1	1	0
PCA	1	1	1
SAM	0	1	1
MNF	1	1	1
PPI	0	1	0

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه به تحلیل دگرسانی‌های مرتبط با مس پورفیری در منطقه ظرفرند واقع در شمال شرق اصفهان پرداخته شده است. از سنجش از دور زمین‌شناختی استفاده شده است تا مناطق دگرسان را شناسایی و بارزسازی کند. در این تحقیق، از روش‌های مختلف پردازش تصاویر سنجنده استر از جمله ترکیب رنگی کاذب، نسبت بانندی و غیره استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهند که دگرسانی‌های فلیک و پروپیلیتیک بیشترین تأثیر را در منطقه دارند و در بخش اعظمی از آن قابل مشاهده هستند. اما دگرسانی‌های آرژیلیک و پتاسیک محدودتر هستند و تأثیر کمتری دارند. برای شناسایی دقیق‌تر دگرسانی‌های پتاسیک، ممکن است نیاز به داده‌های حفاری باشد. در نهایت، برای

تضمین دقت و صحت نتایج، از نقشه دگرسانی منطقه نیز استفاده شده است. از روش‌های مختلف در کنار تبدیل‌های نسبت بانندی، کمترین مربعات رگرسیون شده، فیلترگذاری تطبیقی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی به عنوان روش‌های پردازشی بهره گرفته شد تا بتوان کارآمدی تکنیک‌ها را در شناسایی مناطق هدف مقایسه کرد.

با هدف کاهش نویز، تصحیح اتمسفری بر روی تصویر سنجنده استر منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. در این راستا، ترکیب‌های بانندی متنوع به همراه تبدیل‌های نسبت بانندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی، فیلترگذاری تطبیقی، و کمترین مربعات رگرسیون شده، به منظور بهینه‌سازی کیفیت تصویر اعمال شدند. علاوه بر این، نقشه‌برداری زاویه طیفی و شناسایی

کمک کرده‌اند. روش کمترین مربعات رگرسیون شده، دگرسانی پروپیلیتیک را نسبت به دگرسانی‌های دیگر به خوبی بارزسازی کرده است. این نتیجه نشان می‌دهد که این روش برای تحلیل ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته به نحو مطلوبی عمل کرده است. الگوریتم فیلترگذاری تطبیقی، در بارزسازی دگرسانی آرژیلیک موفق بوده است در حالی که در بارزسازی دگرسانی فلیک و پروپیلیتیک نتیجه قابل قبولی را به همراه نداشته است که نشان‌دهنده این مسأله است که استفاده از روش‌های پیچیده‌تر در فرآیند فیلترگذاری می‌تواند به بهبود دقت و کیفیت نتایج کمک کند. الگوریتم‌های نقشه‌برداری زاویه طیفی و نسبت باندهای که روش‌هایی برای تمایز بین الگوهای مختلف در داده‌ها هستند، به خوبی تفکیک نمونه‌ها را انجام داده‌اند. دیگر روش‌ها مانند روش آنالیز مؤلفه اصلی و همینطور ترکیب رنگی حاصل از روش کسر کمترین نویز، توانایی خوبی در بارزسازی دگرسانی‌های محدوده مورد مطالعه داشته‌اند، که می‌توان از نتایج حاصله از روش‌های پردازشی اعمال شده بر تصویر ماهواره‌ای در محدوده مورد مطالعه نتیجه گرفت؛ انتخاب روش مناسب بسته به موضوع مورد بررسی و نوع داده‌ها می‌تواند در دقت نتایج مؤثر باشد. پیکسل‌های خالص در محدوده با استفاده از روش شناسایی پیکسل‌های خالص به خوبی مشخص شده‌اند، که این موضوع حاکی از آن است که روش مورد استفاده برای تشخیص پیکسل‌های خالص در تصویر با دقت و کارایی مناسبی عمل کرده است.

پیکسل‌های خالص نیز بر روی تصویر انجام شد. بدین ترتیب، از تکنیک‌های متعددی استفاده شد تا عملکرد بهینه این تصاویر به نمایش گذاشته شود.

نتایج نشان می‌دهد که ترکیب رنگی کاذب به همراه باندهای مشخص، نقش مهمی در تفسیر منطقه مورد بررسی ایفا می‌کند. استفاده از روش‌های مختلف تحلیلی از جمله PCA، MF، LS-Fit، FCC، BR و SAM، امکان ارزیابی دقیق دگرسانی‌های موجود در تصویر را فراهم کرده است. علاوه بر این، استفاده از روش کسر کمترین نویز به منظور حذف نویزهای موجود در تصویر و ترکیب رنگی به منظور بارزسازی دگرسانی‌های موجود، به نتایج قابل قبولی منجر شده است. همچنین، برای استخراج طیف خالص پیکسل‌های تصویر، شاخص خلوص پیکسل و مجسم‌کننده n بعدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که باعث استخراج اطلاعات مفید و دقیق از تصویر شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، وجود دگرسانی‌های آرژیلیک، پتاسیک و پروپیلیتیک به عنوان شواهدی برای حضور ذخایر مس پورفیری نشان داده شده است که ممکن است در فواصل مختلفی از مرکز کانی‌سازی واقع شده باشند. البته لازم است اشاره شود که دگرسانی پتاسیک به علت محدود بودن در منطقه توسط روش‌های پردازشی اعمالی در این مطالعه قابل شناسایی نبوده‌اند. در نتیجه، روش‌های مورد استفاده در این مطالعه، مانند BR، MF، PCA، LS-Fit و SAM، با دقت بالا و بهبود کیفیت تصویر، امکان ارزیابی دقیق‌تری از منطقه مورد بررسی را فراهم کرده‌اند و به تفسیر بهتر و دقیق‌تری از دگرسانی‌های موجود

مراجع

- Alaminia, Z., Bagheri, H., Salehi, M., 2017. Geochemical and geophysical investigations and fluid inclusion studies in the exploration area of Zafarghand (Northeast Isfahan, Iran). *Economic Geology* 9, 295-312. <https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.56334>.
- Abrams, M., Yamaguchi, Y., 2019. Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing* 11, 1394. <https://doi.org/10.3390/rs11111394>.
- ANJC (Alamut Naghsh-e Jahan Company), 2011. Initial exploration report of Zafarghand copper index, Isfahan, Iran. 270. (in Persian).
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L., Bachaoui, E.M., 2016. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas. *Applied Remote Sensing* 10, 016005. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016005>.
- Aboelkhair, H., Ninomiya, Y., Watanabe, Y., Sato, L., 2010. Processing and interpretation of ASTER TIR data for mapping of rare-metal-enriched albite granitoids in the Central Eastern Desert of Egypt. *African Earth Sciences* 58, 141-151. [10.1016/j.jafrearsci.2010.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.01.007).
- Aminroayaei Yamini, M., Tutti, F., Ahmadian, J., 2017. Examination of chloritization of biotite as a tool for reconstructing the physicochemical parameters of mineralization and associated alteration in the

- Zafarghand porphyry copper system, Ardestan, Central Iran: mineral-chemistry and stable isotope analyses. *Mineralogy and Petrology* 111, 747-759. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0486-7>.
- Aminoroayaei Yamini, M., Tutti, F., Aminoroayaei Yamini, M. R., Ahmadian, J., 2018. Plagioclase as evidence of magmatic evolution in the Zafarghand porphyry copper deposit, NE Isfahan. *Economic Geology* 10, 61-76. https://econg.um.ac.ir/article_33021.html?lang=en.
- Amera, S.A., 2007. Spectral remote sensing of hydrothermal alteration associated with volcanic massive sulphide deposit Gorob-Hope area, Namibia, ITC.
- Amer, R., Kusky, T., El Mezayen, A., 2012. Remote Sensing detection of gold related alteration zones in Um Rus area, Central Eastern Desert of Egypt. *Advances in Space Research* 49, 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.024>.
- Amidi, S. M., 1975. Contribution à l'étude stratigraphique, pétrologique et pétrochimique des roches magmatiques de la région Natanz-Nain-Surk (Iran central), Ph.D Thesis, Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Asadi Haroni, H., 2000. The Zarshuran gold model applied in a mineral exploration GIS in Iran, Ph.D thesis. Delft University of Technology.
- Aslani, S., Bahroudi, A., Karimi, J., Khodras Haghighi, A., 2008. Extracting the Alteration Haloes of the Sarbisheh Copper-Gold Mineral Prospect Using ASTER Satellite Data. *Journal of the College of Engineering* 42, 607-615. https://jfe.ut.ac.ir/article_27154.html?lang=fa
- Aliani, F., Dadfar, S., Maanijou, M., 2015. Detection of alteration zone of Haji Abad Iron Deposit with (SWIR+VNIR) data of ASTER Sensor. <https://doi.org/10.1001.1.10237429.1393.24.94.50.0>.
- Bahramiyan, S., 2007. Petrological and Geochemical Study of the Intrusive Mass of Baghm, Northeast of Isfahan. M. Sc. thesis, Faculty of Natural Sciences, Department of Geology, University of Tabriz, East Azerbaijan, Iran.
- Bernstein, L.S., Adler-Golden, S., Sundberg, R., Levine, R.Y., 2005. Validation of the QUAC Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi and hyperspectral imagery. *SPIE Proceedings, Algorithm and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery XI*, 5806, 668-678. <http://dx.doi.org/10.1117/12.603359>.
- Beygi, S., Talovina, I. V., Tadayon, M., & Pour, A. B., 2021. Alteration and structural features mapping in Kacho-Mesqal zone, Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration. *Image and Data Fusion* 12, 155-175. <https://doi.org/10.1080/19479832.2020.1838628>.
- Bedini, E., 2011. Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data. *Advances in Space Research* 47, 60-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.021>.
- Beiranvand Pour, A., Hashim, M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews* 44, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.009>.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., Green, R. O., 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data: in Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop. AVIRIS workshop.
- Boloki, M., Poormirzaee, M., 2010. Using ASTER image processing for hydrothermal alteration and key alteration minerals mapping. *Latest Trends on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology* 1, 77-82. <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1734174>.
- Benzougagh, B., Meshram, S.G., Fellah, B.E., Mastere, M., El Basri, M., Ouchen, I., Sadkaoui, D., Bammou, Y., Moutaouikil, N., Turyasingura, B., 2023. Mapping of land degradation using spectral angle mapper approach (SAM): the case of Inaouene watershed (Northeast Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment* 10, 221-231. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01711-8>.
- Crosta, A.P., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil, a prospecting case history in greenstone belt terrain. In *Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, 1989.
- Crosta, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C., 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *Remote Sensing* 24, 4233-4240. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000152291>.

- Chen, B., Liu, L., Zou, Z., Shi, Zh., 2023. Target Detection in Hyperspectral Remote Sensing Image: Current Status and Challenges. *Remote Sensing* 15, 3223. <https://doi.org/10.3390/rs15133223>.
- Fereydooni, H., Mojeddifar, S., 2017. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data, *ELSEVIER, Applied Earth Observations and Geoinformation* 63, 1-13. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017IJAEO..61....1F/doi:10.1016/j.jag.2017.04.010.
- Ghaffary, M., 2010. Petrology and geochemistry of the Zafarghand Granitoid Massif (Southeast of Ardestan). M. Sc. thesis, Faculty of Earth Sciences - Petrology, Shahrood University of Technology.
- Gahlan, H., Ghrefat, H., 2017. Detection of Gossan Zones in Arid Regions Using Landsat 8 OLI Data: Implication for Mineral Exploration in the Eastern Arabian Shield, Saudi Arabia. *Natural Resources Research* 27, 109–124. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9341-8>.
- Goetz, A., Billingsley, F., Elston, D., Lucchitta, I., Shoemaker, E., Abrams, M., Gillespie, A., Squires, R., 1975. Applications of ERTS Image and Image Processing to Regional Problems and Geologic Mapping in Northern Arizona. Jet Propulsion Laboratory 32-1597, NASA: Pasadena, CA, USA.
- Gupta, R. 2003. Remote sensing geology. Second edition, Springer, 655. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05283-9>.
- Guha, A., Chatterjee, S., Oommen, T., Kumar, K.V., Roy, S.K., 2021. Synergistic use of ASTER, L-band ALOS PALSAR, and Hyperspectral AVIRIS-NG data for exploration of lode type gold deposit—a study in Hutti Maski Schist Belt, India. *Ore Geology Reviews* 128, 103818. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103818>.
- Guanji, N., 2010. Investigating the mechanism of substitution of granitoid massif in south Zafarghand (Ardestan) using AMS method. M. Sc. Thesis, Shahrood University of Technology.
- Green, A.A., Berman, M., Switzer, P., Craig, M.D., 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 26, 65–74. <https://doi.org/10.1109/36.3001>.
- Habashi, J., Oskouei, M.M., Jamshid Moghadam, H., 2024. Classification of ASTER Data by neural network to mapping alterations related to copper and iron mineralization in Birjand. *Mining and Environment* 15, 649-665. [10.22044/jme.2023.13640.2520](https://doi.org/10.22044/jme.2023.13640.2520).
- Hasan, B.M.S., Abdulazeez, A.M., 2021. A review of principal component analysis algorithm for dimensionality reduction *Soft Computing and Data Mining* 2, 20-30. <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/jscdm/article/view/8032>
- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Mizuhiko, S., Ueda, K., Mauger, A.j., 2005. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment* 99, 159-172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.025>.
- Honarmand, M., Moayyed, M., Jahangiri, A., Bahadran, N., 2010. Investigation of Geochemical Characteristics of the Intrusive Suite of Natanz, North of Isfahan, *Petrology*, 65-88.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, Floyd, Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D., 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.
- Jabbari, A., Ghorbani, M., Koepke, Y., Tarabi, Gh., Shirdashtzadeh, N., 2010. Petrography and mineral chemistry of the outer west dikes (Southeast of Ardestan, Iran), Evidence of Magmatic Mixing. *Petrology* 17-29. https://ijp.ui.ac.ir/article_16038.html.
- Jennings, H., Slade, M., Bates, P., Munday, E., Toney, R., 2018. Best practice framework for Patient and Public Involvement (PPI) in collaborative data analysis of qualitative mental health research, methodology development and refinement. *BMC Psychiatry* 18, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12888-018-1794-8>.
- Joseph, W., 1994. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada, In 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Ann Arbor, 1407-1418.
- Kruse, F. A., Boardman, J. W., Lefkoff, A. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J. and Goetz, A. F. H., 1993. The Spectral Image Processing System SIPS Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment* 44, 145-163. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N).

- Khalatbari Jafari, M., 1992. Plutonism in the Ardestan Region. M. Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Luo, G., Chen, G., Tian, L., Qin, K., Qian, S.E., 2016. Minimum noise fraction versus principal component analysis as a preprocessing step for hyperspectral imagery denoising. *Canadian Journal of Remote Sensing* 42, 106–116. <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.2016.1160772>.
- Latifi, R., 2000. Geological, petrological, and geochemical study of intrusive bodies in the south and northwest of Zafarghand. M. Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
- Li, Q., Zhang, B., Lu, L., Lin, Q., 2014. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in Baogutu porphyry deposit, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing 17, 012174. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/17/1/012174>.
- Li, S., Gao, L., Xia, F., Chen, C., Du, X., Arkin, A., 2023. Genetic relationship between skarn and porphyry mineralization at the Saibo copper deposit, West Tianshan, NW China: Constraints from fluid inclusions, H–O–C–S–Pb isotopes, and geochronology. *Ore Geology Reviews* 105709. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105709>.
- Lee, C.T.A., Tang, M., 2020. How to make porphyry copper deposits. *Earth and Planetary Science Letters* 529, 115868. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115868>.
- Malekshahi, Sh., Rasa, I., Rashidnejad Omran, N., Lotfi, M., 2019. Investigation of satellite image processing results for alteration with field evidences in Sarkouh porphyry copper deposit. *Iranian Remote Sensing & GIS* 10, 1-26 (In Persian). <https://doi.org/10.22055/aag.2019.29579.1986>.
- Mars, J.C., Rowan, L.C., 2006. Regional mapping of phyllic and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere* 2, 161–186. <https://doi.org/10.1130/GES00044.1>.
- Moradi, R., Boomeri, M., 2017. Remote sensing detection of altered zones associated with Cu-Mo mineralization in North of Zahedan, SE Iran using Landsat-8 data. *Yerbilimleri* 38, 275-294. <https://dergipark.org.tr/en/pub/yerbilimleri/issue/39251/462194>.
- Mohammadi, S., Nadimi, A.R., Aalamnia, Z., 2018. Analysis of the relationship between mineralization and alteration zones with tectonic structures using remote sensing studies in south Ardestan area (northeastern Isfahan). *Tectonics* 2, 29-47. <http://dx.doi.org/10.22077/JT.2020.2434.1013>.
- Mohammadi, S., 1995. Investigation of Volcanism in the Ardestan Region (Central Iran). M. Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Moradpour, H., Rostami Paydar, G., Pour, A.B., Valizadeh Kamran, K., Feizizadeh, B., Muslim, A.M., Hossain, M.S., 2022. Landsat-7 and ASTER remote sensing satellite imagery for identification of iron skarn mineralization in metamorphic regions, *Geocarto International* 37, 1971-1998, 10.1080/10106049.2020.1810327.
- Moradpour, H., Rostami Paydar, G., Feizizadeh, B., Blaschke, T., Pour, A.B., Valizadeh Kamran, K., Muslim, A. M., Hossain, M. S., 2021. Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran. *Image and Data Fusion* 13, 71-94. 10.1080/19479832.2021.1915395.
- Nasr Esfahani, A., Vahabi, M.B., 2010. Tectonic and magmatic settings of the Oligocene felsic outcrops in the south of Ardestan NE of Isfahan. *Petrology*, 95-107. <https://sid.ir/paper/196894/en>.
- Nandasena, W. D. K. V., Brabyn, L., Serrao-Neumann, S., 2023. Using remote sensing for sustainable forest management in developing countries. In *The Palgrave Handbook of Global Sustainability*, 487-508. https://doi.org/10.1007/978-3-031-01949-4_35.
- Oleson, R., Doescher, Ch., 2022. Advance Spaceborne Thermal emission and reflection radiometer (ASTER) Level 1 Precisin Terrain Corrected Registered At-sensor Radiance Product (AST_L1T). Department of the Interior U.S Geological Survey, 16. <https://doi.org/10.3133/OFR20151171>.
- Oliva, F., D'Aversa, E., Bellucci, G., Carrozzo, F.G., Ruiz Lozano, L., et al., 2023. Minimum noise fraction analysis of TGO/NOMAD LNO channel high-resolution nadir spectra of Mars. *Remote Sensing* 15, 5741. <https://doi.org/10.3390/rs15245741>.
- Parasath, L.R., Kusuma, K.N., 2018. Lithological Mapping using Landsat 8 OLI and ASTER TIR Multispectral Data, a comparative study. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* 7, 2728-2745. <http://dx.doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.369>.

- Pordel, F., Ebrahimi, A., Azizi, Z., 2019. The effect of atmospheric correction methods on the relationship between vegetation indices and canopy cover (Case study: Marjan rangelands of Borujen). *Geospatial Information Technology* (2019), 133-153. <http://dx.doi.org/10.29252/jgit.7.2.133>.
- Ranjbar, H., Honarmand, M., 2004. Integration and analysis of airborne geophysical and ETM+ data for exploration of porphyry type deposits in the Central Iranian Volcanic Belt using fuzzy classification. *Remote Sensing* 25, 4729-4741. <https://doi.org/10.1080/01431160410001709011>.
- Ranjbar, H., 2011. Application of spectral analysis in mapping hydrothermal alteration of the northwestern part of the Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Iran. *Sciences, Islamic Republic of Iran* 22, 221- 238.
- Ramsey, M.S., Flynn, I.T., 2020. The spatial and spectral resolution of ASTER infrared image data: A paradigm shift in volcanological remote sensing. *Remote Sensing* 12, 738. <https://doi.org/10.3390/rs12040738>.
- Sabbaghi, H., Moradzadeh, A., Asadi Haron, H., 2017. ASTER spectral analysis for host rock associated with porphyry copper-molybdenum mineralization. *Geologica Macedonica* 31, 49-65. <http://dx.doi.org/10.1007/s12594-018-0914-x>.
- Salehi, T., Tangestani, M.H., 2020. Evaluation of WorldView-3 VNIR and SWIR data for hydrothermal alteration mapping for mineral exploration: case study from northeastern Isfahan, Iran. *Natural Resources Research* 29, 3479–3503. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09703-6>.
- Sadeghian, M., Ghaffary, M., 2011. Petrogenesis of the Zafarghand granitoid massif (southeast of Isfahan). *Petrology* 47-70. <https://sid.ir/paper/380845/en>.
- Shahriari, H., Ranjbar, H., Honarmand, M., Carranza, E.J.M., 2014. Selection of less biased threshold angles for SAM classification using the real value–area fractal technique. *Resource Geology* 64, 301-315. <http://dx.doi.org/10.1111/rge.12042>.
- Shahi, H., Ghavami, R., Rouhani, A.K., 2015. Detection of deep and blind mineral deposits using new proposed frequency coefficients method in frequency domain of geochemical data. *Geochemical Exploration* 162, 29-3. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.12.006>.
- Titley, S.R., Hicks, C.L., 1966. *Geology of the porphyry deposits, Southwestern North America*. Tucson: Univ, Ariz Prees, 287. <https://nla.gov.au/nla.cat-vn2234765>.
- Tsubomatsu, H., Hideyuki T., 2023. Region expansion of a hyperspectral-based mineral map using random forest classification with multispectral data. *Minerals* 13, 754. <https://doi.org/10.3390/min13060754>.
- Tabelin, C.B., Park, I., Phengsaart, T., Jeon, S., Villacorte-Tabelin, M., Alonzo, D., Yoo, K., Ito, M., Hiroyoshi, N., 2021. Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues. *Resources, Conservation and Recycling* 170, 105610. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610>.
- Wang, C., Zhang, H., Xu, Q., Cao, W., Wang, J., Li, D., Lou, X., 2022. Inversion of the refractive index of marine spilled oil using multi-angle sun glitter images acquired by the ASTER sensor. *Remote Sensing of Environment* 275, 113019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113019>.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming mineral. *American Mineralogist* 95, 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.
- Wilkinson, J.J., Baker, M.J., Cooke, D.R., 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, 771-791. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4738>.
- Yeganeh Far, H., Ghorbani, M. R., 2010. Geochemical characteristics and petrogenesis of basement rocks in southern ardestan. 29th Geological Congress, Geological Survey and Mineral Exploration Organization of Iran, Tehran, Iran.
- Zhang, X., Li, P., 2014. Lithological mapping from hyperspectral data by improved use of spectral angle mapper. *Applied Earth Observation and Geoinformation* 31, 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.007>.
- Zhou, P., Zhang, R., Xie, J., Liu, J., Wang, H., Chai, T., 2020. Data-driven monitoring and diagnosing of abnormal furnace conditions in blast furnace ironmaking: An integrated PCA-ICA method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68, 622-631. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2967708>.