

Original Article



Mineral Mapping Related to Porphyry Copper Deposits Using Aster and Sentinel- 2 Images with Field Studies (A Case Study of Sahib Divan Copper Deposit)

Mahsa Fahmi, Seyedeh Narges Sadati[✉], Gholamreza Ahmadzadeh

Affiliation

Department of Geology,
Faculty of Science, University
of Mohaghegh Ardabili,
Ardabil, Iran

ABSTRACT

Introduction: The study area is located in the Alborz-Azerbaijan structural zone and on the 1:100,000 Lahrud sheet. In some areas, intrusive masses with a mixture of granodiorite and quartzdiorite of Oligocene age have penetrated into volcanic rocks and in the central parts around the village of Qarahgol and in the southwest of the region, in the Sahib Divan and Dust Biglo area, they are the cause of extensive hydrothermal (kaolinite), silicic and alunite alteration in Upper Eocene latite rocks. Recent technological advances in the field of spectral/spatial resolution of satellite data in classification algorithms have created interesting opportunities and solutions for geological mapping. In this study, given that the aim of exploring porphyry copper deposits is acidic to intermediate igneous rocks in which extensive argillic, phyllic and propylitic alteration has occurred, special attention has been paid to alunite, siliceous and iron oxide alteration.

Materials and Methods: In order to introduce training samples after geological investigations, 13 samples from Sahib Divan were analyzed by XRD method. Areas that represented the main alterations and their corresponding pixels in satellite images were selected as training samples for the basic spectrum methods. In the present study, MSI data sets of Aster and Sentinel-2A satellites from the 1:100,000 scale of Lahrud have been reviewed with a special focus on the Sahib Divan mine. The main objective of this study is to develop a new method, considering remote sensing data, especially Aster and Sentinel 2, in identifying alterations associated with porphyry copper deposits. This identification was based on two approaches: identification of hydrothermal alteration zones associated with porphyry copper deposits (through spectral library) and direct identification of alteration zones and copper-bearing minerals (through direct sampling from the deposit site and using it as training pixels). In the study area, MNF results were extracted from Aster and Sentinel 2A data and in the classification of the base spectrum and using the software spectral library and training samples from the altered areas, three minerals, kaolinite, muscovite and chlorite, were used as indicators for argillic, phyllic and propylitic alteration, respectively.

Results and Discussion: An interesting result obtained from this study was the highlighting of alteration in Aster images of the Sahib Divan mine, which indicated the simultaneous presence of argillic and phyllic alteration in the center and its enclosure by propylitic alteration, which is consistent with the conventional pattern of porphyry deposits. Also, the analysis of Sentinel images showed that hematite, jarosite, goethite and limonite show strong absorption features in the VNIR region and this sensor was more successful in identifying them. After obtaining geological information and conducting XRD studies, basic spectrum mineralogical mapping methods such as BE, LSU, CEM were used, among which, BE method provided the best result for isolating target pixels, especially for detecting different types of changes related to porphyry copper deposits. This was demonstrated using training pixels on Aster images. Although Sentinel images did not achieve satisfactory results for clay minerals due to low spectral resolution in the short infrared range, they were favorable for isolating iron-bearing minerals such as hematite, jarosite and goethite, and using color combination, it was concluded that it showed the presence of hematite and jarosite simultaneously.

Conclusion: The results of the study of the intrusive masses of the 100,000 Lahrud sheet, silicic veins, and the spread of faults and deformations indicate that, in general, extensive alteration is significant in the central part (Salvat and Niaz Gholi-Moshiran) and southwestern part of the study area (Sahib Divan and Dust Biglo). The products obtained from the processing were compared with the published geological map of the study area, and it was shown that the resulting maps are consistent with the conceptual geological model of the porphyry copper deposit and the alterations are related to the host rock of this type of deposit.

Keywords: Porphyry copper, Base spectrum, Aster, Sentinel, Sahib Divan.

Citation:

Fahmi, M., Sadati, S.N.,
Ahmadzadeh, Gh.R., Mineral
Mapping Related to Porphyry
Copper Deposits Using Aster
and Sentinel- 2 Images with
Field Studies (A Case Study of
Sahib Divan Copper Deposit),
Iran J Remote Sens GIS,
17(2):79-98.

* Corresponding Author: sadati_sn@uma.ac.ir
DOI: https://gisj.sbu.ac.ir/article_104453.html

Received: 2023.12.27

Accepted: 2024.04.06



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



نقشه‌برداری کانی‌شناسی مرتبط با کان‌سار مس پورفیری با استفاده از تصاویر استر و سنتینل-۲ و شواهد صحرایی (مطالعه موردی: کان‌سار مس صاحب‌دیوان)

مهسا فهمی، سیده نرگس ساداتی^{*}، غلامرضا احمدزاده

سمت

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم،
دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

سابقه و هدف: منطقه مورد مطالعه در پهنه ساختاری البرز- آذربایجان و در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهورد واقع شده است. در برخی مناطق، توده‌های نفوذی با ترکیبی از گرانودیوریت و کوارتز دیوریت با سن الیگوسن به درون سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند و در بخش‌های مرکزی اطراف روستای قره‌گل و جنوب غرب منطقه، در محدوده صاحب‌دیوان و دوست‌بیگلر، عامل دگرسانی گسترده گرمایی (کانولینیت)، سیلیسی و آلونیتی در سنگ‌های لاتیتی ائوسن بالایی محسوب می‌شوند. پیشرفت‌های اخیر فناوری، در زمینه تفکیک طیفی/ مکانی داده‌های ماهواره‌ای در الگوریتم‌های طبقه‌بندی، فرصت‌ها و راه‌حل‌های جالب توجهی را برای نقشه‌برداری زمین‌شناسی ایجاد کرده است. در این تحقیق، بر این مبنا که هدف از کاوش ذخایر مس پورفیری سنگ‌های آذرین اسیدی تا حدواسط است که دگرسانی آرژلیک، فلیک و پروپیلیتیک گسترده‌ای در آنها رخ داده، توجه ویژه‌ای به دگرسانی آلونیتی، سیلیسی و اکسید آهن شده است.

مواد و روش‌ها: به منظور معرفی نمونه‌های آموزشی، پس از بررسی‌های زمین‌شناختی، سیزده نمونه از صاحب‌دیوان با روش XRD آنالیز شد. مناطقی که نماینده دگرسانی‌های اصلی بودند و پیکسل‌های مربوط به آنها در تصاویر ماهواره‌ای، با عنوان نمونه‌های آموزشی، برای روش‌های طیف پایه انتخاب شد. در مطالعه حاضر، مجموعه داده‌های MSI ماهواره‌های استر و سنتینل-۲A از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهورد، با نگرش ویژه به معدن صاحب‌دیوان بررسی شده‌اند. هدف اصلی این مطالعه ایجاد روشی جدید با در نظر گرفتن داده‌های سنجش از دور، به ویژه استر و سنتینل-۲، در شناسایی دگرسانی‌های مرتبط با ذخایر مس پورفیری است. این شناسایی براساس دو رویکرد انجام شد: شناسایی زون‌های دگرسانی گرمایی مرتبط با ذخایر مس پورفیری (از طریق کتابخانه طیفی) و شناسایی مستقیم زون‌های دگرسانی و کانی‌های مس‌دار (از طریق نمونه‌برداری مستقیم از محل کان‌سار و استفاده از آن به‌منزله پیکسل آموزشی). در منطقه مورد مطالعه، نتایج MNF از داده‌های استر و سنتینل-۲A استخراج و در طبقه‌بندی طیف پایه و با استفاده از کتابخانه طیفی نرم‌افزار و نمونه‌های آموزشی از مناطق دگرسان شده، به ترتیب از سه کانی کانولینیت، موسکویت و کلریت به‌صورت شاخص‌هایی برای دگرسانی آرژلیک، فلیک و پروپیلیتیک استفاده شد.

نتایج و بحث: نتیجه جالب توجه به‌دست‌آمده، از این تحقیق، برجسته‌سازی دگرسانی در تصاویر استر معدن صاحب‌دیوان بود؛ این نکته گویای حضور هم‌زمان دگرسانی آرژلیک و فلیک در مرکز و محصور شدن آن با دگرسانی پروپیلیتیک بود که با الگوی مرسوم ذخایر پورفیری مطابقت دارد. همچنین تحلیل تصاویر سنتینل نشان داد هماتیت، ژاروسیت، گوتیت و لیمونیت ویژگی‌های جذبی قدرتمندی در ناحیه VNIR نشان می‌دهند و این حسگر در شناسایی آنها موفق‌تر بوده است. پس از دریافت اطلاعات زمین‌شناختی و انجام دادن مطالعات XRD، روش‌های نقشه‌برداری کانی‌شناسی طیف پایه مانند BE، LSU، CEM استفاده شد؛ از بین آنها، روش BE بهترین نتیجه را برای جداسازی پیکسل‌های هدف، به ویژه در تشخیص انواع گوناگون تغییرات ذخایر مس پورفیری، دربرداشت. این مسئله، با استفاده از پیکسل‌های آموزشی، روی تصاویر استر نشان داده شد. اگرچه تصاویر سنتینل، به دلیل وضوح طیفی پایین در محدوده فروسرخ کوتاه، نتایج رضایت‌بخشی برای کانی‌های رسی به دست ندادند، برای جداسازی کانی‌های حاوی آهن مانند هماتیت، ژاروسیت و گوتیت مطلوب بودند و با استفاده از ترکیب رنگی، نتیجه گرفته شد که وجود هماتیت و ژاروسیت را به‌طور هم‌زمان نشان می‌دهند.

استناد:

فهمی، م.، سادات، س.ن.، احمدزاده، غ.ر.،
نقشه‌برداری کانی‌شناسی مرتبط با
کان‌سار مس پورفیری با استفاده از
تصاویر استر و سنتینل-۲ و شواهد
صحرایی (مطالعه موردی: کان‌سار مس
صاحب‌دیوان)، نشریه سنجش از دور و
GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۲، تابستان
۱۴۰۴: ۷۹-۹۸.

نتیجه‌گیری: نتایج بررسی توده‌های نفوذی ورقه ۱۰۰۰۰۰ لاهورد رگه‌های سیلیسی و گسترش گسل‌ها و دگرشکلی‌ها نشان می‌دهد که به‌طور کلی، دگرسانی گسترده در بخش مرکزی (صلوات و نیازقلی- مشیران) و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه (صاحب‌دیوان و دوست‌بیگلر) شایان توجه است. محصولات حاصل از فرآوری با نقشه زمین‌شناسی منتشرشده از منطقه مورد مطالعه مقایسه و نشان داده شد که نقشه‌های حاصل با مدل زمین‌شناسی مفهومی کان‌سار مس پورفیری مطابقت دارند و دگرسانی‌ها به سنگ میزبان این نوع کان‌سار بازمی‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مس پورفیری، طیف‌مبنا، استر، سنتینل، صاحب‌دیوان.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sadati_sn@uma.ac.ir

شناسه دیجیتال مقالات: https://gisj.sbu.ac.ir/article_104453.html

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، برای نمایش پتانسیل سنجنده چندقطیفی سنتینل-۲A در پژوهش‌های زمین‌شناختی، مطالعاتی انجام شده و نقش دورسنجی اکتشافی، به منزله منبعی قدرتمند که می‌تواند مناطق مستعد کانه‌زایی را برای کان‌سارهای گوناگون مشخص کند، به اثبات رسیده است. طی این سال‌ها، از روش‌های مورد نظر برای شناسایی ساختارها و دگرسانی‌های همراه با کان‌سارهای مس پورفیری استفاده شده است (Atilah et al., 2019). این اتفاق به دلیل افزایش اهمیت و تقاضای مس رخ داده است؛ باید توجه داشت که هاله‌های دگرسانی و گوسن‌ها نشان‌دهنده حضور کان‌سار مس پورفیری (PCD) است که زیر سطح پنهان شده و توزیع فضایی مواد معدنی، به ویژه گوسن، در کشف این نوع کان‌سارها اهمیت دارد. کانی‌های مهم تشکیل‌دهنده سنگ، مثلاً کوارتز (Qz) و فلدسپار، دارای ویژگی‌های جذب در نواحی مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR) و فروسرخ موج کوتاه (SWIR) نیستند بلکه بیشتر آنها ویژگی‌های جذب مولکولی اساسی را در ناحیه طول موج فروسرخ حرارتی (TIR) دارند. این کان‌سارها زون‌بندی در دگرسانی‌ها نشان می‌دهند که با دگرسانی پتاسیک در مرکز شروع می‌شود؛ درحالی‌که به سمت بیرون با انواع دگرسانی گرمابی فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک مواجه می‌شویم. هر زون دگرسانی گرمابی شامل مواد معدنی با ویژگی‌های طیفی است که می‌توان از آن، با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، برای بارزسازی این ویژگی‌ها استفاده کرد. معمولاً ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص، مانند ایلیت-موسکویت، کائولینیت-مونت موریلونیت و اپیدوت-کلریت، برای تهیه نقشه مناطق دگرسانی گرمابی به کار می‌رود. همچنین نقشه‌برداری از واحدهای ساختاری و شکستگی‌ها، به ویژه گسل‌ها، راهنمای مناسبی برای بررسی ویژگی‌های ذخایر معدنی محسوب می‌شود زیرا درنهایت، به کشف توده‌های معدنی می‌انجامد.

استفاده از تصاویر سنجنده استر اولین بار در مرکز داده‌های سنجش از دور ژاپن (ERSDAC) و همچنین مرکز دانش و پایش منابع زمینی امریکا (EROS)، در سال ۲۰۰۰، انجام شد. نخستین بار نیز ون در میر^۱ و همکارانش (۲۰۱۴) استفاده از سنتینل-۲A MSI برای دورسنجی اکتشافی را ارزیابی، و توانایی‌های این سنجنده را با سنجنده استر در ماهواره ترا^۲ مقایسه کردند تا کانی‌شناسی سطح مرتبط با سیستم‌های دگرسانی گرمابی را نقشه‌برداری کنند. مطالعات این گروه نشان داد که افزودن این سنسور برای نقشه‌برداری از مواد معدنی اکسید آهن در محدوده طول موج مرئی و فروسرخ نزدیک تأثیرگذار است (Van der Werff et al., 2015). آنها همچنین نتیجه گرفتند باندهای سنجنده سنتینل-۲A MSI را می‌توان، در نسبت باندهایی مشابه با آنهایی که در ابتدا با لندست-۵ TM یا استر تعریف شده‌اند، به کار برد و انتظار می‌رود تداوم داده‌ها را برای دورسنجی اکتشافی فراهم کنند (van der Werff & Van der Meer, 2016). مطالعات ون در میر^۳ و ون در میر استفاده از نسبت باندهای محصولات سنتینل-۲A را برای نقشه‌برداری مواد معدنی، مثبت ارزیابی کرد (Van der Werff et al., 2018)؛ البته کارایی سنجش از دور، به منزله ابزار اکتشاف مواد معدنی، منوط به این است که سنگ بستر هدف دارای پوشش گیاهی متراکم نباشد. جست و جوی ذخایر معدنی بیش از هرچیز شامل نقشه‌برداری، شناسایی و مطالعه مجموعه‌های معدنی دگرسانی مرتبط با نوع کان‌سار معدنی مورد نظر است. این کارها از طریق تحلیل ویژگی‌های طیفی ثبت‌شده در مناطق فروسرخ حرارتی، فروسرخ موج کوتاه، مرئی و فروسرخ نزدیک طیف الکترومغناطیسی مشخص می‌شود؛ به عبارت دیگر، ویژگی‌های طیفی کلید اصلی شناسایی مواد معدنی به شمار می‌رود (Adiri et al., 2020). درباره

1. Van der Meer

2. Terra

3. van der Werff

نواحی جنوبی شهرستان لاهرود، به دلیل نزدیک بودن به ارتفاعات سبلان و قوشه‌داغ، دارای آب‌وهوای سرد و نیمه‌خشک و بخش‌های شمالی، به دلیل مجاورت با ارتفاعات جنوبی دشت مغان، دارای آب‌وهوای معتدل و نیمه‌مرطوب است. طول ماه‌های خشک و نیمه‌خشک و یخ‌بندان آن پنج تا هشت ماه و میانگین بارندگی سالیانه آن ۳۰۰ میلی‌متر است. بیشتر پوشش گیاهی این شهرستان را استپی، درمنه، ممرز، بلوط و تنگرس تشکیل می‌دهد. در ورقه لاهرود، کوه‌های شمالی-شمال‌شرق به دلیل وجود رخساره‌های سست شیلی و ماسه سنگی، مجموعاً فرسایش یافته‌اند و سطوح صاف و هوازده‌ای را به نمایش می‌گذارند و نواحی باختری و مرکزی که از گدازه‌های آتش‌فشانی سخت‌شکل گرفته‌اند، با سطوح ناهموار و ستیغ‌های بلند درمقابل پدیده مخرب فرسایش مقاومت بیشتری از خود نشان داده است. بخش جنوبی و شرقی منطقه مورد مطالعه که با رودخانه قره‌سو در راستای خاوری-باختری بریده شده، پست‌ترین نقطه در ورقه لاهرود است.

۳- مواد و روش‌ها

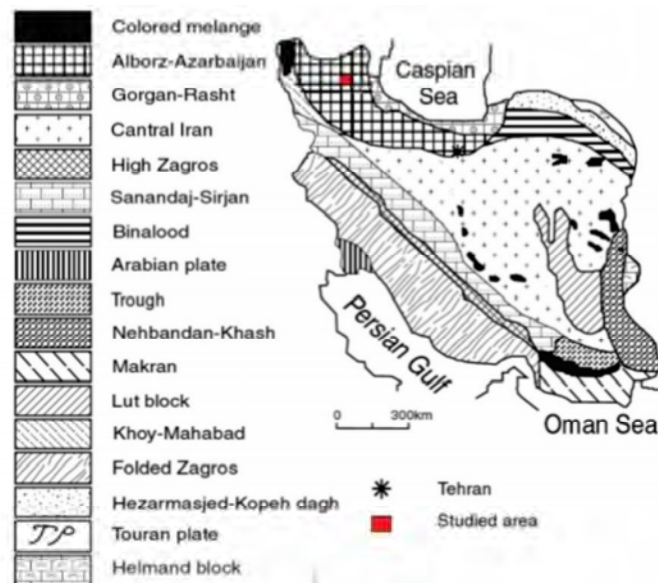
مجموعه داده‌های مورد تحلیل در این مطالعه یک تصویر سنتینل-MSI2A در سطح پردازش L1C و یک تصویر استر در سطح پردازش L1T است که در تاریخ ۲۰۲۰/۸/۸ دریافت و از پایگاه اینترنتی earthexplorer دانلود شدند. این تصاویر به دلیل نداشتن ابر و پوشش گیاهی کمتر از ۱۰٪ در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند زیرا ویژگی‌های جذبی مهم مواد معدنی در فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه باید در دامنه‌های طیفی باند خاص قرار بگیرند. سیستم مختصات، در مطالعه حاضر، UTM است و منطقه مورد مطالعه، طبق شمارشگر عرض جهانی، در زون N38 قرار گرفته و بیضوی مرجع مورد استفاده نیز WGS1984 است. مجموعه داده‌های سنجنده سنتینل (با قدرت تفکیک رادیومتریکی دوازده‌بیتی، عرض ۲۹۰ کیلومتری، ارتفاع خورشیدی ۶۶ درجه) و استر (با

استفاده از سنجنش از دور در مطالعات زمین‌شناختی، دانشمندان بحث‌های بسیاری کرده‌اند (Atillah et al., 2019; Khaleghi et al., 2020; Wenyan et al., 2020; Bentahar & Raji, 2020; Soydan et al., 2021). اتفاق نظر در مطالعات مورد نظر آن است که سنجنش از دور توانایی بهینه‌سازی استراتژی و رویکردهای اکتشاف، شناسایی چشم‌اندازهای جدید و کاهش هزینه‌های اکتشاف را دارد.

در این پژوهش، نتایج دورسنجی اکتشافی حاصل از پردازش تصاویر سنتینل-2A با تصاویر حاصل از سنجنده استر مقایسه و صحت آنها، با بازدید زمینی و مطالعات کانی‌شناختی (XRD)، ارزیابی شده است. برای این کار، از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه لاهرود (Babakhani & Hossein Khan Nazer, 1991) استفاده شد؛ موقعیت معدن صاحب‌دیوان روی این نقشه، به‌منزله کان‌سار تیپیک مس پورفیری، مطالعه شد تا با توجه به شباهت‌های طیفی، نقاط مستعد کانه‌زایی از این تیپ شناسایی شود. هدف از این مطالعه توسعه روش‌های ابتکاری و مؤثر دورسنجی اکتشافی، با قابلیت شناسایی کان‌سارهای مس پورفیری از طریق نقشه‌برداری و شناسایی مستقیم مواد معدنی و دگرسانی‌های همراه با این تیپ کان‌سارها بوده است. در مطالعه حاضر، انواع واحدهای سنگ‌شناسی و انواع دگرسانی‌ها با استفاده از تصاویر استر و سنتینل شناسایی شد و نتایج آن به‌همراه مطالعات XRD، برای شناسایی مناطق امیدبخش درمورد کان‌سارهای مس پورفیری که از لحاظ کانه‌زایی مستعدترند، به کار رفت.

۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

منطقه مورد مطالعه در زون ساختاری البرز-آذربایجان و در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود واقع شده است (Nabavi, 2004; Aghanabati, 1976) (شکل ۱). این منطقه در شمال غرب استان اردبیل قرار دارد و فاصله آن تا اردبیل ۵۵ کیلومتر است. منطقه لاهرود از توابع شهرستان مشگین‌شهر است که در شانزده کیلومتری آن قرار دارد.



شکل ۱. تقسیم‌بندی واحدهای زمین‌ساختی- رسوبی ایران (Nabavi, 1976)؛ موقعیت منطقه مورد مطالعه با مستطیل قرمز نمایش داده شده است

تصویر باید عملیات حذف پوشش گیاهی از تصویر انجام شود؛ بنابراین ابتدا شاخص پوشش گیاهی نرمالیزه‌شده (NDVI) برای تهیه مجموعه‌ای از پیکسل‌ها، با پوشش گیاهی برای هر مجموعه داده محاسبه شد. از آنجاکه برخی دگرسانی‌ها ابعاد نسبتاً کوچکی دارند، برای شناسایی آنها در تصاویر ماهواره‌ای، به وضوح تفکیک‌پذیری بیشتری نیاز است (Javi Zadeh & Ebrahimi, 2018). برای غلبه بر این مشکل، در تصاویر استر، از عملیات Pan Sharpening استفاده شد. محصول نهایی از باندهایی با رزولوشن پانزده متر فضایی برای سنجنده استر و ده متر برای سنجنده سنتینل تشکیل شده است. پس از پیش‌پردازش‌های لازم، با به‌کارگیری نمونه‌های آموزشی از منطقه صاحب‌دیوان، روش‌های طیف‌منا برای نقشه‌برداری انواع دگرسانی در منطقه به کار رفت. برای انتخاب نمونه‌های آموزشی، با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود (Babakhani & Hossein Khan, 1991) بررسی صحرایی انجام شد. پس از بازدید مقدماتی از محدوده مطالعاتی، نمونه برداری اولیه از

قدرت تفکیک رادیومتریکی ۸ و ۱۲ بیتی، عرض شصت کیلومتری، ارتفاع خورشیدی ۹۸/۳ درجه) با نرم‌افزار ENVI 5.3 پردازش شد. اندازه پیکسل ۲۰ متر، برای محصول سطح ۲A حاصل، انتخاب شد. مجموعه داده بازتاب پایین جو حاوی باندهای ۱ تا ۷، ۸a، ۹، ۱۱ و ۱۲ بود. باند وسیع فروسرخ نزدیک باند ۸ و باند ۱۰ که برای تشخیص ابر سیروس نازک استفاده می‌شود، کنار گذاشته شد زیرا پدیده‌های زمین‌شناختی، در طول موج این باندها، ویژگی‌های طیفی شاخصی در آشکارسازی دگرسانی‌ها نشان نمی‌دهند (Van der Werff & van der Meer, 2016).

در سنجش از دور، تفسیر مطلوب داده‌ها بالقوه به کنترل سیگنال و اصلاحاتی که طی فرایند کسب داده انجام می‌شود، متکی است؛ از این رو مرحله پیش‌پردازش (شامل تصحیح رادیومتریکی، جوی و هندسی)، برای به دست آوردن محصولات علمی مفید، بسیار لازم است. تصاویر دربردارنده مقادیر رقومی اند که باید به تابش و سپس به بازتاب زمینی (DN) تصحیح شوند. در مناطق دارای پوشش گیاهی، به دلیل شباهت‌های طیفی پوشش گیاهی با برخی مواد معدنی، قبل از هر پردازش

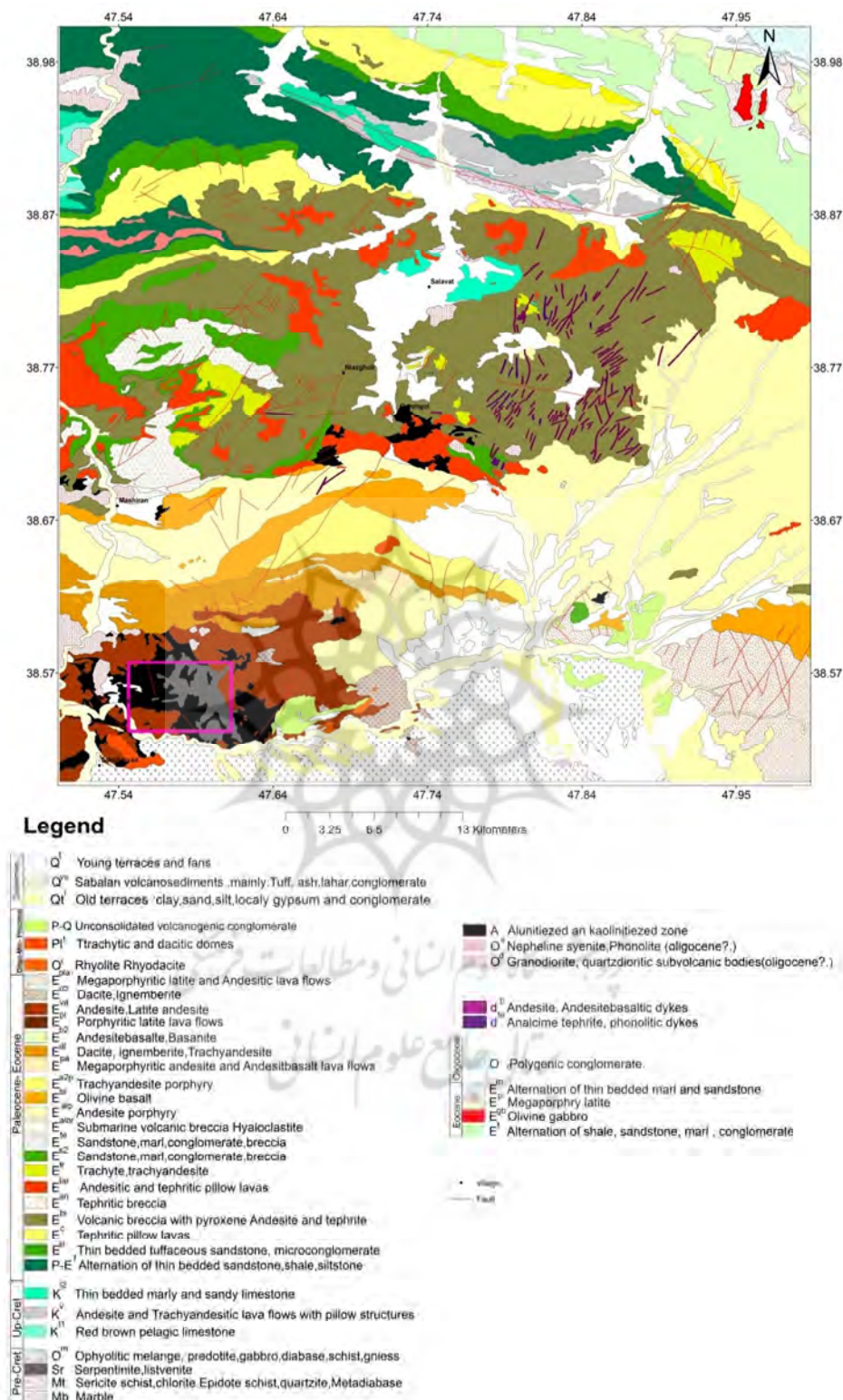
۴- نتایج و بحث

۴-۱- زمین شناسی منطقه ای

شناسایی واحدهای آذرین که دچار دگرسانی گرمایی شده اند، برای اکتشاف کان سارهای مس پورفیری حائز اهمیت است؛ از آن رو در شکل ۲، نقشه زمین شناسی منطقه براساس گسترش واحدهای آذرین درونی و بیرونی و دگرسانی های مرتبط با آن ترسیم شده است. بیش از نیمی از منطقه با رخ نمون سنگ های دوران سنوزوئیک پوشانده شده است؛ بخش بزرگی از آن از سنگ های آذرین، به همراه مقداری نهشته های آذرآواری، تشکیل شده که در ادامه، توضیح داده شده است.

اولین فعالیت های آتش فشانی پالئوسن، در محدوده مطالعاتی، با پیدایش برش های آتش فشانی واحد E^{br} آغاز می شود که ترکیب اصلی آن پیروکسن آندزیت و دارای سیمان توفی و هیالوکلاستی است. این واحد به تدریج روی واحدهای رسوبی تخریبی قبلی (E^{sl} ، P ، E^f و E^c) قرار می گیرد و گاهی شواهد بیانگر آتش فشان زیردریایی است (Badakhshan Noghadeh, 2010). اندازه ذرات آن بین ۵/۵ تا ۲۰ سانتی متر متغیر است و به طور مکرر، با دایک های پیروکسن آندزیتی d^b و گاه تفریتی d^{te} قطع می شود. در این واحد سنگی، ظهور آنالسیم در برش با قطعات گدازه تفریتی موجب تفکیک آن به صورت واحد مستقلی با عنوان E^{an} شده است و با غلبه آنالسیم به صورت تفریت آنالسیم دار پورفیری یا آنالسیمیت، به صورت واحد E^{te} مشخص می شود (شکل ۳-الف)؛ طبق این شکل، در بخش های پایینی، با بخش پیروکسن آندزیت و آنالسیم در تناوب با گدازه و برش ولکانیکی آغاز و در ادامه، با گدازه آنالسیم دار و برش آنالسیم دار مشخص می شود و بخش بالایی آن برش آنالسیم دار همراه با سیمان هیالوکلاستیت و توف شیشه ای با مقادیر بالای آنالسیم خاتمه می یابد. یکی از مورفولوژی های منطقه رخ نمون سنگ های ولکانیکی زیردریایی با شکل های بالشی، با حداکثر قطر پنج متر، در محدوده نیازقلی- مشیران است (شکل ۳-ب) که ترکیب پیروکسن آندزیتی دارد (E^{bp}) و برش های ولکانیکی قبلی را می پوشاند.

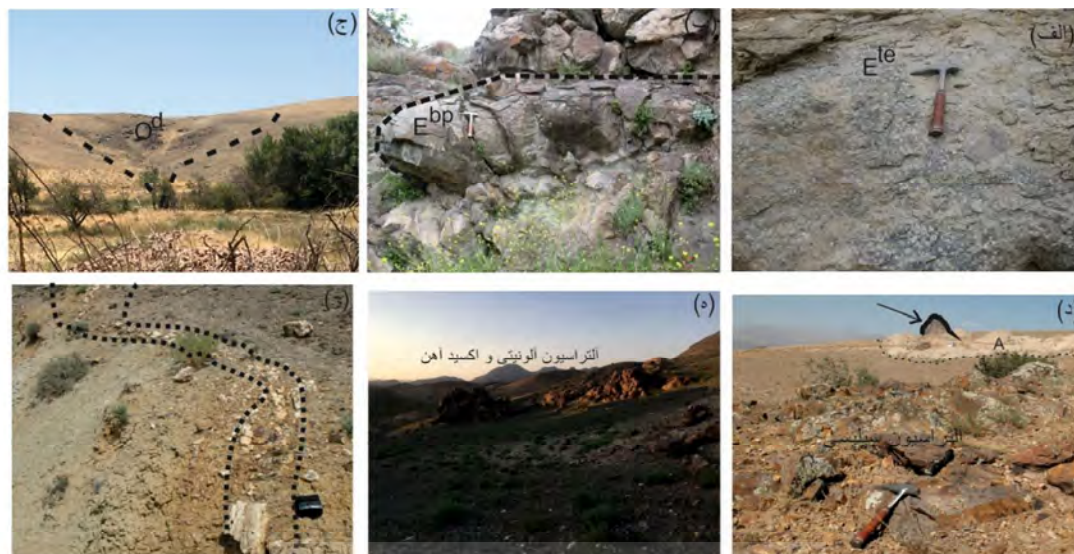
منطقه، به ویژه محدوده معدنی صاحب دیوان و زون های متفاوت دگرسانی انجام شد. همچنین از پدیده های گوناگون زمین شناختی، دگرسانی، خطواره ها و مواردی دیگر عکس برداری شد. طی عملیات صحرایی، سی نمونه دستی برداشت شد که پس از بررسی های اولیه و انتخاب بهترین نمونه ها از لحاظ دگرسانی، سیزده عدد از این نمونه ها تحلیل شد؛ این کار به منظور تعیین کانی شناسی و با استفاده از روش XRD در آزمایشگاه زرازمای تهران انجام شد. برای تحلیل نتایج XRD، طیف XRD خروجی دستگاه با بانک مرجع ICSD مقایسه شد و فرمول و ترکیب نمونه مجهول به دست آمد. نتایج آن، به منزله نمونه آموزشی، در روش های طیف مینا به کار رفت تا انواع پیکسل های متناظر با دگرسانی های عمده منطقه، از جمله آرژیلیک، فلیک، پروپیلیتی، سیلیسی و آلونیتی شدن، طبقه بندی شود. روش های طیف مینا اغلب از نوع روش های طبقه بندی نظارت شده محسوب می شود. این روش ها معمولاً از طبقه بندی زیرپیکسل تشکیل شده است که با از بین بردن پس زمینه، فراوانی هدف مورد نظر را برجسته می کند. این عملیات طیف هدف و موارد موجود در تصویر را مقایسه می کند؛ سپس به منظور پرهیز از هرگونه اشتباه بالقوه، مقدار هر پیکسل بررسی می شود. برای این منظور، از انواع روش های طبقه بندی تصویر، شامل BE و LSUU و CEM استفاده شد. در برخی روش ها، طیف های کتابخانه طیفی نرم افزار ENVI (IGCP1 و IGCP 264) به کار رفت؛ این شیوه، برای استفاده در نواحی ای که اطلاعات اندکی از آنها در دست است، روش خوبی محسوب می شود اما برای دستیابی به طبقه بندی صحیح، شناسایی دقیق منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری از پیکسل های هدف و استفاده از داده نمونه آموزشی بسیار ضروری است. برای به کارگیری روش های پردازش تصویر، از نرم افزار Arc Map (نسخه ۱۰/۶) و نیز PCI Geomatica به صورت ابزارهای مکمل دورسنجی استفاده شد.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی از پراکندگی واحدهای سنگی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود (با تغییر، Babakhani & Hossein Khan Nazer, 1991) به همراه زون دگرسانی کانولینیتی و آلونیتی‌شده؛ موقعیت محدوده معدن مس صاحب‌دیوان با کادر بنفش مشخص شده است

آندزیتی E^{va} مشخص می‌شود (شکل ۳-ز) که با مرزی هم‌شیب، واحد گدازه لاتیت پورفیری E^{pl} را پوشانده و خود آن با آخرین فاز آتش‌فشانی این دوره که از سنگ‌های ایگنمبریتی-داسیتی E^{d2} تشکیل شده است، پوشانده می‌شود. در جنوب غرب برگه لاهرود، واحد E^{pla} با ترکیب لاتیت مگاپورفیری، برون‌زد خوبی دارد که به سمت جنوب، زیر اولین فاز ولکانیسم سبلان قرار می‌گیرد. ترکیب شیمیایی این واحد شوشونیتی است و در بخش‌های پایین، تقریباً اسیدی و به سمت بالا، بازالتی می‌شود (Fahim Guilany et al., 2019). در بخش‌های مرکزی (قره‌گل) و جنوب غرب (صاحب‌دیوان) محدوده مورد مطالعه، واحدهای نفوذی نیمه‌عمیق دارای ترکیب گرانودیوریت و نیز کوارتز دیوریت با سن احتمالی الیگوسن مشاهده می‌شود. احتمالاً در گستره منطقه مطالعاتی، به‌ویژه محدوده صاحب‌دیوان، تزریق این توده‌های نفوذی و نیمه‌نفوذی یا سیالات گرمایی نشئت‌گرفته از آن موجب ایجاد دگرسانی‌های گسترده در سنگ‌های منطقه شده که روی نقشه، با واحد A مشخص شده است و در آلونیتی و کائولینیتی شدن و گاه ایجاد کلاhek های سیلیسی، به ویژه در بخش جنوبی نقشه لاهرود، در اطراف معدن صاحب‌دیوان و روستای دوست بیگلو نقش مهمی داشته است (شکل ۳-ج و ۳-و)؛ این مسئله می‌تواند، از لحاظ پتانسیل کانه‌زایی مس پورفیری، مهم باشد. واحدهای سنگی نئوژن اغلب از گدازه‌های ولکانیکی و نیمه‌عمیق، همراه با سنگ‌های آذرآواری و مقداری نهشته‌های رسوبی، تشکیل شده است. این دوره اغلب با گنبد‌های تراکیتی - داسیتی واحد PI^I با سن پلیوسن مشخص می‌شود. شروع دوران چهارم در برگه لاهرود احتمالاً با فعالیت‌های آتش‌فشانی پلئستوسن است که بالای جدیدترین سنگ‌های نئوژن قرار می‌گیرد؛ ترکیب این واحد (Q^b) بازالت‌های غنی از الیوین و پیروکسن است. پس از مدت کوتاهی نبود رسوب‌گذاری، رسوبات پادگانه قدیمی واحدهای قبلی را می‌پوشاند.

این گدازه‌های بالشی با گدازه‌های تراکیتی- تراکی آندزیتی، با شکل‌های ستونی (E^{tr})، پوشانده می‌شوند. هم‌زمان با ولکانیسم‌های مذکور (E^{tr} , E^{te} , E^{bp}) و مدت کوتاهی بعد از آن، در حالی که حوضه کم‌عمق و بسته است، رسوب‌گذاری به صورت تناوب نازکی از ماسه‌سنگ توفی، مارن با میان‌لایه ژئوپس، کنگلومرا و هیالوکلاستیت انجام شد (E^{s2}). در آن، شواهد فسیلی مشاهده نشده است اما آن را معادل نهشته‌های تیپ فلیش حوضه رسوبی مغان شمال زون افیولیتی (اللهیارلو) قلمداد کرده‌اند (Babakhani & Hossein, 1991). و با سنگ‌های آنالسیم‌دار تفریتی واحد E^{te} پوشانده می‌شود. واحدهای قدیمی‌تر E^{br} و E^{te} ، دارای پیوستگی هم‌شیب، با دو واحد از سنگ‌های آتش‌فشانی E^{bl} و E^{alp} پوشانده می‌شوند. آندزیت پورفیری است که در بخش‌هایی، به شدت دگرسان شده و گاه دارای میان‌لایه برش ولکانیکی و هیالوکلاستیت واحد (E^{albr}) است. در این لایه، قطع‌شدگی با لایه‌های کربناتی به صورت تقریباً موازی نیز مشاهده می‌شود. این واحد، گاه با غلبه پیروکسن، به صورت واحد E^{bl} مشخص می‌شود و در بخش‌های بالایی، همراه با لایه‌بندی، به گدازه‌های تراکی آندزیتی E^{a2p} تبدیل می‌گردد. پس از مدت کوتاهی نبود رسوب‌گذاری، فعالیت‌های ولکانیسم بار دیگر با گدازه‌های آندزیتی دارای بافت پورفیری (E^{pa}) آغاز می‌شود که در برخی نقاط، با واحدهای داسیتی (E^{d1}) مرز مشترکی دارد و به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناختی، تعیین تقدم و تأخر آنها قدری دشوار است. در نقاطی، این واحد به طور جانبی به واحد داسیت، ایگنمبریت و تراکی آندزیت واحد E^{dl} تبدیل می‌شود. واحد E^{pa} با آندزیت بازالت و بازانیت (E^{b2}) پوشانده می‌شود. واحدهای زیرین مجموعه سنگ‌های ولکانیکی مذکور با گدازه‌های الیوین بازالتی E^b و گدازه‌های لاتیت پورفیری E^{pl} ، با لایه‌بندی خوب و مرز هم‌شیب، پوشانده می‌شوند. آخرین فرایندهای آتش‌فشانی ائوسن، در منطقه مورد مطالعه، با گدازه‌های



شکل ۳. تفریت آنالسیم‌دار پورفیری واحد E^{te} (الف)؛ گدازه‌های بالشی واحد E^{bp} (ب)؛ توده نفوذی نیمه‌عمیق گرانودیوریتی واحد O^d (ج)؛ نمایی از دگرسانی‌های گسترده کائولینیتی، آلونیتی و سیلیسی واحد A دید به سمت شمال (د)؛ نمایی از دگرسانی آلونیت (Alu) و اکسید آهن (ه)؛ نمایی از رگه سیلیسی دید به سمت غرب در واحد آندزیتی-لاتیتی E^{va} (و)

۲-۴- نقشه‌برداری طیف‌مبنا

متعلق باشد، طیف این پیکسل میانگین وزنی ۰/۲۵ ماده (الف) به علاوه ۰/۲۵ ماده (ب) به علاوه ۰/۵۰ ماده (ج) خواهد بود؛ بنابراین روش یادشده، هم از لحاظ تعداد و هم از لحاظ کیفیت، به داده ورودی و نیز توانایی کاربر در درک صحیح منطقه و رفتار طیفی وابستگی کامل دارد. طیف ورودی داده خروجی را دستخوش تغییر شدیدی می‌کند. این روش به دست کم دو طیف ورودی احتیاج دارد و به تعداد ورودی ما، خروجی تعریف می‌کند؛ هرچه پیکسل‌های ورودی دقت بهتری از لحاظ فراوانی و تعداد داشته باشند، تصویر خروجی حاصل بهتر خواهد بود و پیکسل‌های کمتری طبقه‌بندی نشده باقی خواهند ماند. در این مطالعه، با توجه به معرفی هفت داده ورودی (دگرسانی آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک، سیلیسی شدن، آلونیتی شدن، کربناتی شدن، دگرسانی‌های اکسید آهن)،

این روش‌ها برپایه تکنیک‌های گوناگون نقشه‌برداری طیف‌مبنا بود. برای این منظور، از انواع روش‌های طبقه‌بندی تصویر، شامل CEM و BE و LSU، استفاده شد. درحقیقت، این روش نوعی طبقه‌بندی مبتنی بر پیکسل است که از اعداد دیجیتالی نمونه آموزشی انتخاب‌شده برای اجرایی کردن نقشه‌برداری بهره می‌برد تا هر پیکسل از تصویر را طبقه‌بندی کند. نقشه‌های به دست آمده، با استفاده از طیف‌های باندهای مرئی، فروسرخ نزدیک و فروسرخ کوتاه سنجنده استر و سنتینل-۲A، امکان تعیین مناطق مستعد کانه‌زایی مس پورفیری را میسر می‌سازند.

۳-۴- عدم اختلاط طیفی خطی (LSU)^۱

به این روش زیرپیکسلی هم گفته می‌شود و به‌ویژه درمورد نواحی ای که پیکسل اختلاطی داشته باشیم، کاربردی است و رفتار طیفی آن پیکسل میانگین وزنی این پیکسل‌هاست. برای نمونه، اگر ۰/۲۵ پیکسلی به ماده (الف) و ۰/۲۵ به ماده (ب) و ۰/۵۰ به ماده (ج)

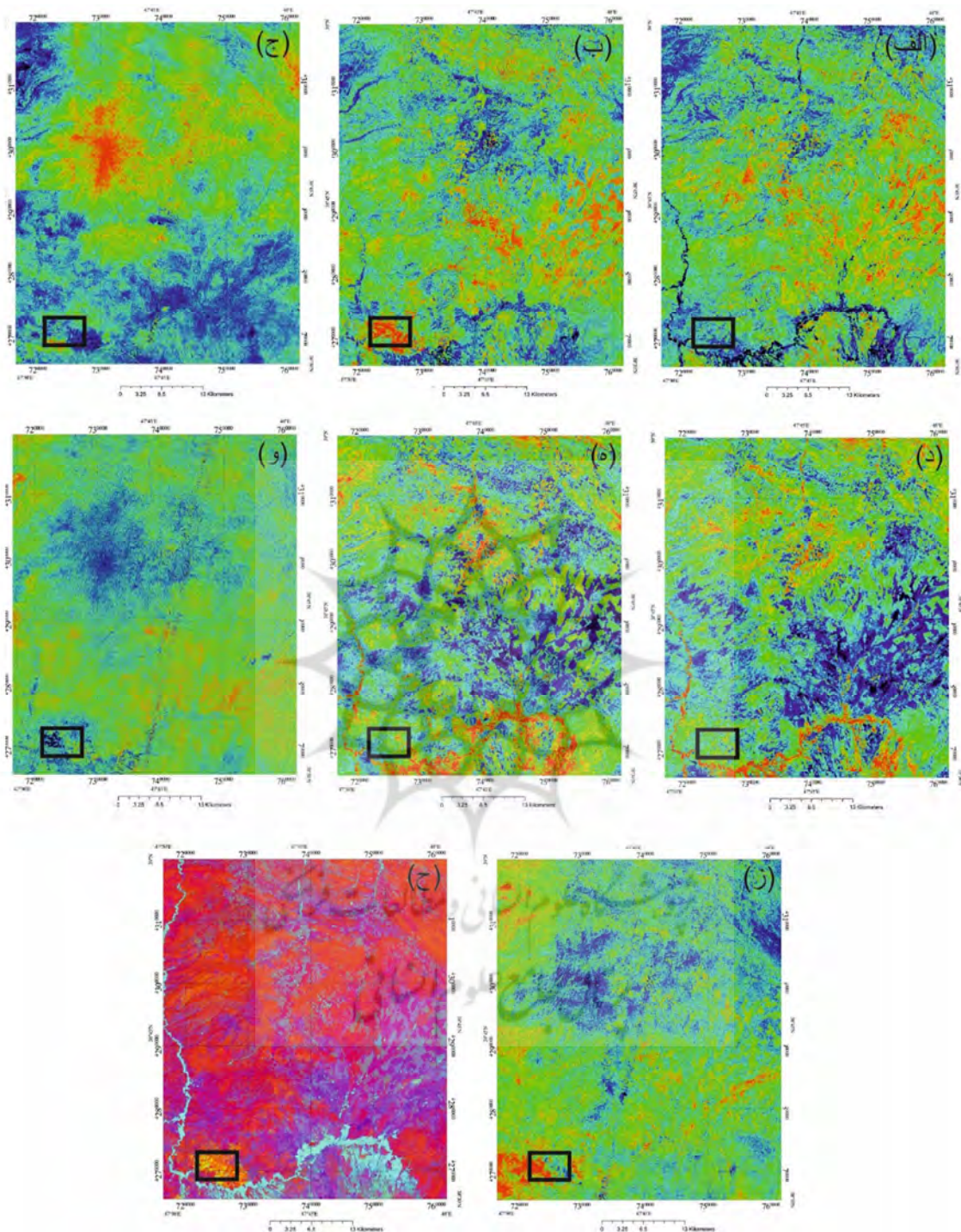
1. Linear Spectral Unmixing

۴-۴- کمینه‌ساز انرژی محدودشده (CEM)^۱

در این روش، با استفاده از یک فیلتر، برداری با جهت خاص بین بردارهای گوناگون در فضا شناسایی می‌شود و انرژی سایر بردارها، بدون داشتن هیچ‌گونه اطلاعاتی درمورد آنها، به حداقل می‌رسد. نیازی به نمونه‌های آموزشی نیست و ازطریق مقایسه طیف با کتابخانه طیفی نرم‌افزار ENVI می‌توان این کار را به راحتی انجام داد. این روش فقط به طیف هدف، برای انجام دادن محاسبات، نیاز دارد و با در اختیار داشتن اطلاعات درباره سیگنال مطلوب و مزاحم، اثر آنها را کمینه می‌کند. نتیجه خروجی تصویری سیاه‌وسفید است که در آن، پیکسل‌های هدف روشن است. برای این کار، داده ورودی حتماً باید از نوع MNF باشد و حتی اگر داده از این نوع نباشد، با اجرای این الگوریتم، ابتدا داده را تبدیل به MNF می‌کند تا باندها به مؤلفه تبدیل شود و فضای پردازش تغییر کند و سپس پردازش داده را انجام می‌دهد. در اینجا، از کتابخانه IGCP1 نرم‌افزار ENVI برای کانی‌های کائولینیت (Kln)، موسکویت و کلریت (Chl) به ترتیب به‌منزله شاخص دگرسانی آرژلیک، فلیک و پروپیلیتیک در تصاویر استر استفاده کردیم و نتیجه پردازش هر تصویر را به ترتیب در کانال‌های قرمز، سبز و آبی قرار دادیم. مطابق شکل ۵-الف، در ناحیه معدنی صاحب‌دیوان، پیکسل‌های زرد (ترکیب رنگ‌های قرمز و سبز) احتمال حضور غالب دو دگرسانی آرژلیک و فلیک را نشان می‌دهد که با رنگ سبز، یعنی شاخص دگرسانی پروپیلیتیک، احاطه شده است و با مدل مفهومی کان‌سارهای مس پورفیری مطابقت دارد. در این روش، از تصاویر سنتینل چشم‌پوشی شد زیرا، در محدوده فروسرخ کوتاه، دارای دو باند است. نتایج استفاده از این روش، در زمینه تفکیک انواع کانی‌های حاوی آهن، مانند هماتیت و ژاروسیت و گوتیت، رضایت‌بخش نبوده است.

تقریباً تمامی پیکسل‌های تصویر طبقه‌بندی شد (شکل ۴-الف و ۴-ز). همچنین باید توجه داشت که اگر تعداد داده‌های ورودی کمتر از تعداد باندهای به کاررفته در تصویر باشد، نتیجه مطلوب‌تری به دست می‌آید. به تعداد ورودی‌هایی که معرفی می‌کنیم، تصویرهای سیاه‌وسفید تولید می‌شود که در هر تصویر، پیکسل هدف روشن است. در این پژوهش برای نمایش بهتر هر خروجی، با استفاده از شیب رنگی با طیف‌های رنگین‌کمان، تصویر رنگی ایجاد شد؛ رنگ قرمز منطق‌بر نواحی دارای بیشترین فراوانی پیکسل‌های هدف، رنگ‌های نارنجی و زرد در اولویت‌های بعدی و رنگ‌هایی با تناژ سردتر (مانند سبز، آبی، نیلی و بنفش) به ترتیب، منطق‌بر فراوانی کمتر پیکسل‌های هدف‌اند. در منطقه مورد مطالعه، برای ترسیم نقشه‌های انواع دگرسانی‌های همراه با کان‌سارهای مس پورفیری، از تصاویر استر استفاده کردیم و با استفاده از طیف نمونه‌های آموزشی که برای هر دگرسانی به صورت مجزا به دست آمده است، پیکسل‌های هدف را برای دگرسانی‌های متفاوت بارزسازی کرده‌ایم. برای جداسازی دقیق‌تر کانه‌زایی‌های آهن، مانند هماتیت (Hem) و ژاروسیت (Jrt) و گوتیت (Gth)، از کتابخانه طیفی IGCP1 تصاویر سنتینل بهره بردیم که نتایج آن در تصویر ۴-ح نمایش داده شده است. در منطقه معدن صاحب‌دیوان، تصاویر بارزسازی هماتیت و ژاروسیت و گوتیت برای تصاویر سنتینل، به ترتیب در کانال رنگی قرمز، سبز و آبی قرار گرفته‌اند؛ با توجه به این نکته، مشاهده رنگ زرد که درواقع، ترکیبی از رنگ‌های قرمز و سبز است، حکایت از حضور هم‌زمان هماتیت و ژاروسیت دارد که در بسیاری از کان‌سارهای مس پورفیری مرسوم است. مقایسه تصاویر استر و سنتینل نشان می‌دهد که برای بارزسازی کانی‌های رسی، تصویر استر و برای آشکارسازی کانه‌زایی آهن، تصاویر سنتینل دقت بیشتری داشته است و گسترش آن، در محدوده معدنی صاحب‌دیوان در جنوب غرب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود، این حقیقت را اثبات می‌کند.

1. Constrained Energy Minimization



شکل ۴. انواع دگرسانی‌های استخراج‌شده از تصاویر استر منطقه مورد مطالعه، با استفاده از تکنیک LSU: دگرسانی آرژلیک (الف)؛ فلیک (ب)؛ پروپیلیتیک (ج)؛ سیلیسی شدن (د)؛ آلونیتی شدن (ه) کربناتی شدن (و)؛ اکسید آهن (ز)؛ انواع دگرسانی‌های اکسید آهن استخراج‌شده از تصاویر سنتینل (هماتیت، ژاروسیت گوتیت، به‌ترتیب در کانال قرمز و سبز و آبی) (ح). نواحی زرد حضور هم‌زمان هماتیت و ژاروسیت در ناحیه معدنی صاحب‌دیوان را نشان می‌دهد. موقعیت معدن صاحب‌دیوان با کادر مشکی مشخص شده است

۵-۴- رمزگذاری باینری (BE)^۱

این روش براساس طیف‌های بازتاب و جذب طیف مرجع است و درحقیقت، گونه‌ای رمزگذاری انجام می‌دهد؛ به طوری که در محدوده طیفی متفاوت، میانگین در نظر می‌گیرد و به پیکسل‌های با مقادیر بیشتر از میانگین، عدد یک و به پیکسل‌هایی با مقدار کمتر از میانگین، عدد صفر را اختصاص می‌دهد.

با توجه به اینکه هدف این پژوهش اکتشاف دگرسانی‌های همراه با کان‌سارهای مس پورفیری است، مطابق مطالب بخش‌های پیشین، از منحنی رفتار طیفی کانی‌های شاخص سه دگرسانی آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک (به ترتیب، کائولینیت، موسکویت و کلریت) برای بارزسازی پیکسل‌های هدف استفاده کردیم؛ تصاویر حاصل تفاوت چندانی را درمورد دگرسانی‌های متفاوت در ناحیه مورد مطالعه نشان نداد که احتمالاً به دلیل مخلوط بودن پیکسل‌ها و شباهت اندک طیف‌های آن با طیف‌های کتابخانه طیفی بود. از این‌رو منحنی رفتار طیفی را که از نمونه‌های آموزشی به دست آمده بود، برای نقشه‌برداری به کار بردیم. طبق آنچه در بخش زمین‌شناسی گفته شد، در طول چندین بازدید صحرایی، نمونه‌های متعددی از زون‌های دگرسانی مرتبط با کان‌سارهای مس پورفیری گرفته شد؛ بنابراین در اینجا، پس از شناسایی موقعیت هریک از دگرسانی‌ها در نقشه زمین‌شناسی منطقه و تصویر ماهواره‌ای، از آن به‌منزله طیف مرجع استفاده شد و با تفکیک انواع دگرسانی آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک، سیلیسی، آلونیتی، کلسیتی و اکسید آهن، نقشه جامعی شکل گرفت که دربردارنده تمامی این دگرسانی‌ها بود؛ به‌ویژه در محدوده معدن صاحب‌دیوان (شکل ۵-ب)، نواحی سبز دگرسانی فیلیک را در منطقه معدنی به خوبی تصویر می‌کند. این تصویر، با توجه به بازبیدهای صحرایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه، کاملاً بر واحد کوارتز دیوریتی میزبان کان‌سارهای مس پورفیری منطبق است و این دگرسانی، از اطراف، با دگرسانی آرژیلیک و پروپیلیتیک و سیلیسی احاطه شده که بر مدل مفهومی کان‌سارهای

مس پورفیری انطباق دارد. آغشتگی‌های اکسیدهای آهن به صورت پیکسل‌های سیاه در تصویر مشاهده می‌شود. همچنین در محدوده صلوات و نیازقلی-مشیران (بخش مرکزی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود)، دگرسانی‌های مشابهی با وسعت کمتر دیده می‌شود. در روش‌های طیف‌مبنا، هر قدر تجمع پیکسل‌ها بیشتر باشد، نتایج مطمئن‌ترند. به علاوه، به منظور حصول نتیجه مطلوب، باید با دیگر پردازش‌ها، نقشه‌های زمین‌شناسی و بازبیدهای صحرایی تطابق داشته باشند. در شکل ۵، نتایج پردازش تصاویر استر با استفاده از نمونه‌های آموزشی منطقه لاهرود به نمایش درآمده است. با توجه به قدرت تفکیک طیفی کمتر سنجنده سنتینل در بارزسازی انواع کانی‌های رسی، از این تصاویر در این روش طیف‌مبنا استفاده نشده و به کارگیری سنجنده استر منطقی‌تر بوده است.

۶-۴- انواع دگرسانی‌ها براساس مطالعات XRD

براساس مطالعات دورسنجی، حضور دگرسانی‌های مرتبط با کان‌سارهای مس پورفیری همانند دگرسانی آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک و اکسیدهای آهن در منطقه نمایان شده است و مطالعات XRD نیز صحت آنها را نشان می‌دهد (جدول ۱). در ادامه، این موارد را توضیح می‌دهیم.

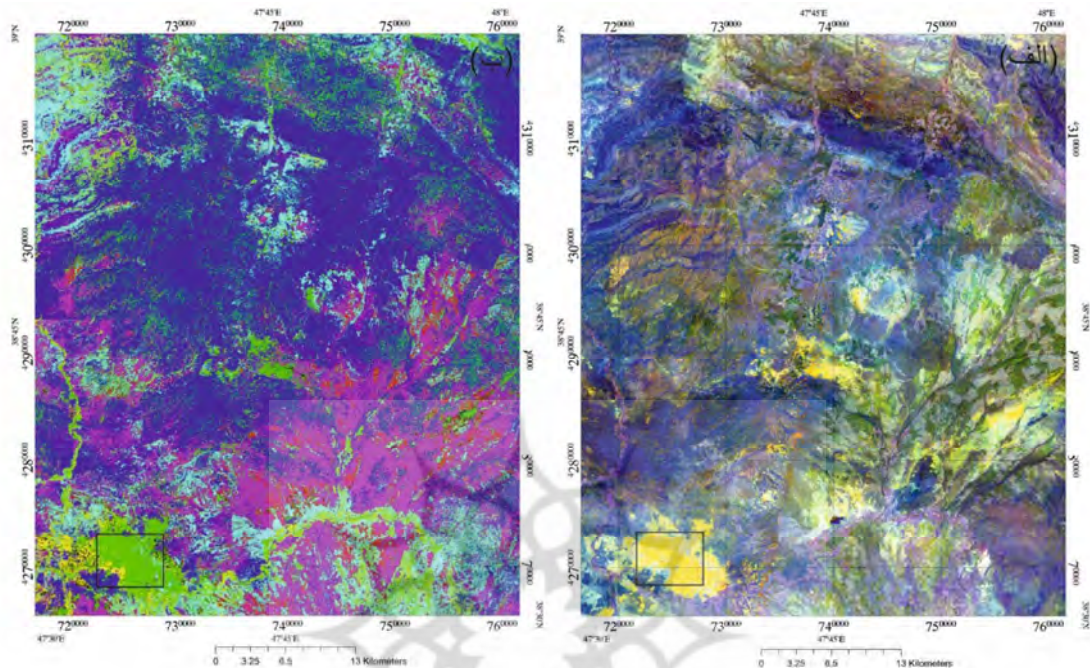
۱-۶-۴- دگرسانی آرژیلیکی

این نوع دگرسانی، در نقاط بسیاری، روی نقشه و طی بازبیدهای صحرایی مشاهده شد و همان‌طور که در شکل ۶-الف و ۶-ب دیده می‌شود، نفوذ توده‌های ولکانیکی و سیالات گرمایی وابسته به آن در تشکیل آنها نقش داشته است. نتایج مطالعات XRD حضور کائولینیت را در برخی نمونه‌ها، به همراه سایر کانی‌های رسی (اسمکتیت و ایلیت و موارد دیگر)، نشان می‌دهد (جدول ۱). گاه در سنگ‌های اسیدی دارای فلدسپار و شیشه آتش‌فشانی فراوان، در نتیجه چرخش سیالات گرمایی، به ویژه در مجاورت

1. Binary Encoding

ایلیت است و به تشکیل کائولینیت منجر نشده و از طرفی، این احتمال نیز وجود دارد که ایلیت، برآثر تبدیل اسمکتیت، تشکیل شده باشد (شکل ۶-ج).

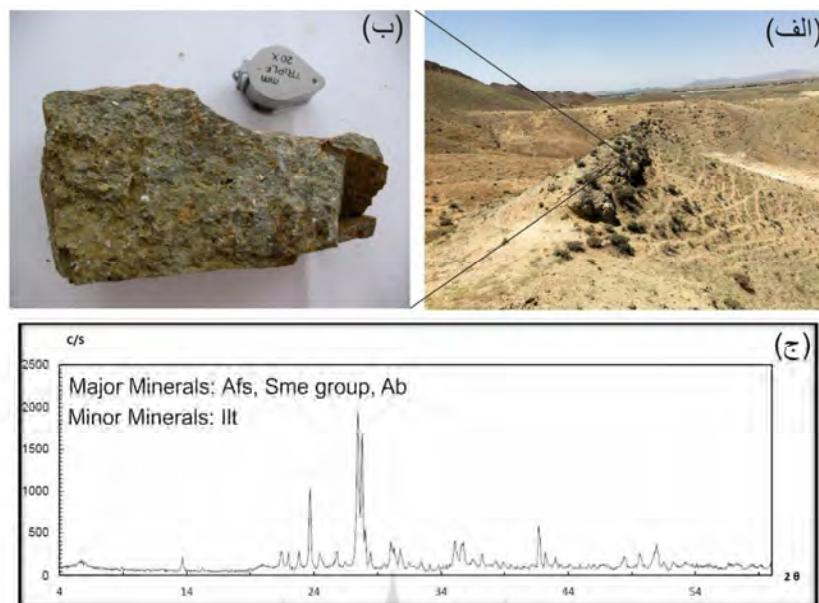
گسل‌ها و شکستگی‌ها دگرسانی آرژیلیکی شدن به وقوع می‌پیوندد؛ در این رخداد، به دلیل فعالیت بیشتر یون پتاسیم و اسیدیت کمتر سیالات، کانی‌زایی رس در حد



شکل ۵. تصویر CEM کانی‌های شاخص آرژیلیک و فیلک و پروپیلیتیک، به ترتیب در RGB. نواحی زرد در ناحیه معدنی صاحب‌دیوان حضور هم‌زمان دو دگرسانی آرژیلیک و فیلک را نشان می‌دهد که با دگرسانی پروپیلیتیک، به رنگ سبز احاطه شده است (الف)؛ استخراج انواع دگرسانی‌ها با استفاده از روش واگرایی رمزگذاری باینری در نقشه ۱۰۰۰۰۰ لاهرود: دگرسانی آرژیلیک (قرمز)، فیلک (سبز)، پروپیلیتیک (آبی)، سیلیسی (زرد)، آلونیتی و کائولینیتی شدن (فیروزه‌ای)، کلسیت (Ab) (سرخ‌ابی)، اکسید آهن (سیاه) (ب)؛ موقعیت معدن صاحب‌دیوان با کادر مشکی مشخص شده است

جدول ۱. فهرست نمونه‌های تحلیل‌شده با روش XRD در منطقه مورد مطالعه

نام نمونه	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی	دگرسانی غالب
A-L-6A	آراگونیت	کلسیت	کربناتی
A-L-6B	آراگونیت	کلسیت، آلپیت	کربناتی
A-L-6C	فلدسپار پتاسیم، کانی‌های گروه اسمکتیت، آلپیت	میکا، ایلیت	آرژیلیک
A-L-8	کوارتز، پلاژیوکلز، میکا، ایلیت	فلدسپار پتاسیم	فیلک
A-L-23-Tr1	کوارتز	ژپس، آناز	سیلیسی
A-L-23-Tr2	کوارتز	ژپس، آناز	سیلیسی
A-L-23-Tr3	ناتروژاروسیت، آلونیت	کوارتز	آرژیلیک پیشرفته
A-L-23-Tr4	هماتیت، گوتیت، ژاروسیت	کوارتز، مقادیر جزئی نمک	آرژیلیک پیشرفته و اکسید آهن
A-L-25	کوارتز، آلونیت	ژاروسیت، ناتروآلونیت	آرژیلیک پیشرفته
A-L-38	کوارتز	مقادیر جزئی موسکویت و ایلیت	سیلیسی
A-L-39	آلپیت، فلدسپار پتاسیم، کلریت، کوارتز	کائولینیت، کلسیت، هماتیت، مقادیر جزئی موسکویت و ایلیت	پروپیلیتیک و آرژیلیک
A-L-41	کریستوبالیت، کائولینیت، آلونیت	گوتیت	آرژیلیک پیشرفته
A-L-51	آلپیت، کوارتز، کلسیت، کلریت	ایلیت، هماتیت و مقادیر جزئی فلدسپار پتاسیم	پروپیلیتیک



شکل ۶. نمایی از دایک تغریت آنالسیم‌دار پورفیری Ete و ایجاد دگرسانی گسترده آرژیلیکی دید به سمت جنوب غرب (الف)؛ نمونه دستی تغریت (ب)؛ نمودار XRD و حضور کانی‌های اصلی فلدسپار سدیم و پتاسیم (Af)، گروه اسمکتیت (Sme group)، آلپیت (Ab) و کانی فرعی ایلیت (Illt) (ب) (حروف اختصاری برگرفته از: Whitney & Evans, 2010)

۲-۶-۴- دگرسانی آرژیلیکی پیشرفته

واحدهای توفی منطقه نیز، به دلیل تراوایی بیشتر، تحت تأثیر سیالات هیدروترمال قرار گرفته‌اند و دگرسانی آرژیلیک پیشرفته در آنها مشاهده می‌شود (شکل‌های ۷-۷ تا ۷-۷). در برخی نمونه‌ها نیز، در نتیجه چرخش سیالات آهن‌دار، حلقه‌ها و نوارهای رنگینی ایجاد شده است که به آن «لیزگانگ» گفته می‌شود. از لحاظ کانی‌شناختی، با توجه به مطالعات XRD، این نمونه‌ها از کریستوبالیت (Crs) و کائولینیت و آلونیت، به منزله کانی اصلی و گوتیت، به منزله کانی فرعی تشکیل شده‌اند (جدول ۱ و شکل‌های ۷-۷ ک تا ۷-۷ م).

۳-۶-۴- دگرسانی فیلیک

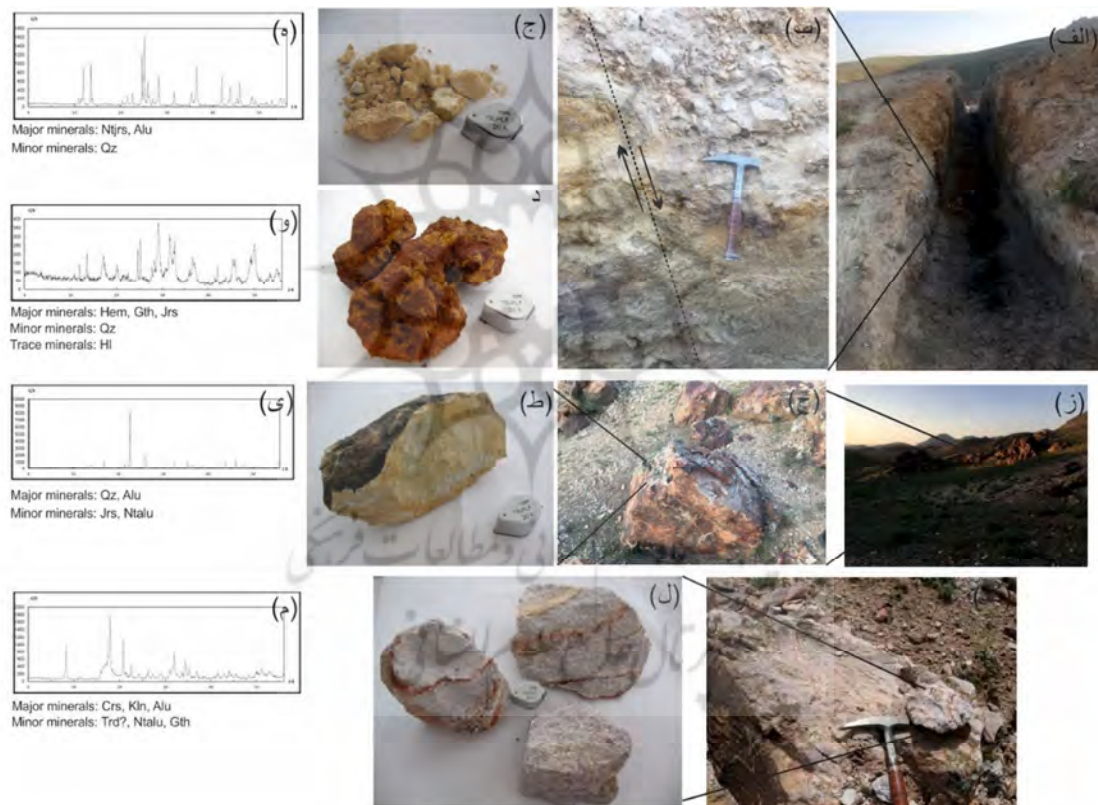
این نوع دگرسانی اغلب در نواحی کانه‌زایی شده و به ویژه، جنوب غرب منطقه مشاهده می‌شود و اغلب بر واحدهای نیمه عمیق، با جنس کوارتز دیوریتی تا کوارتز مونزونیتی، انطباق دارد (شکل‌های ۸-الف تا ۸-د). بافت استوک ورکی که معرف کان‌سارهای پورفیری است، در این سنگ‌ها به وضوح مشاهده می‌شود (شکل

این دگرسانی در برگه ۱۰۰۰۰۰ لاهرود، به ویژه در بخش جنوب غرب، گسترش چشمگیری دارد و اغلب در همراهی با بخش‌های سیلیسی شده یافت می‌شود. این نوع دگرسانی در اغلب واحدهای سنگی منطقه، از واحدهای آذرین خروجی تا آذرآواری و حتی نفوذی‌ها، مشاهده می‌شود. عملکرد آن اغلب مستقل از سنگ‌شناسی است و در شرایط زمین‌ساختی و هیدروترمالی تشکیل شده است (شکل ۷-الف و ۷-ب). پیشرفت این دگرسانی موجب ایجاد لج‌های سیلیسی در ارتفاعات شده است که در بخش دگرسانی سیلیسی، به آن خواهیم پرداخت. غلبه شرایط اکسیداسیون موجب تبدیل کانی‌های سولفید و فراوانی بیشتر همتایت، گوتیت و ژاروسیت در برخی نمونه‌ها شده است (شکل ۷-ج و ۷-د). مطالعات XRD نشان داده است که کانی‌های دگرسانی آرژیلیک پیشرفته، مانند ناتروژاروسیت (Ntjrs)، آلونیت، ژاروسیت و در برخی موارد، ژپس در نمونه‌های برداشت شده مشاهده می‌شود (جدول ۱ و شکل ۷-ه و شکل ۷-و).

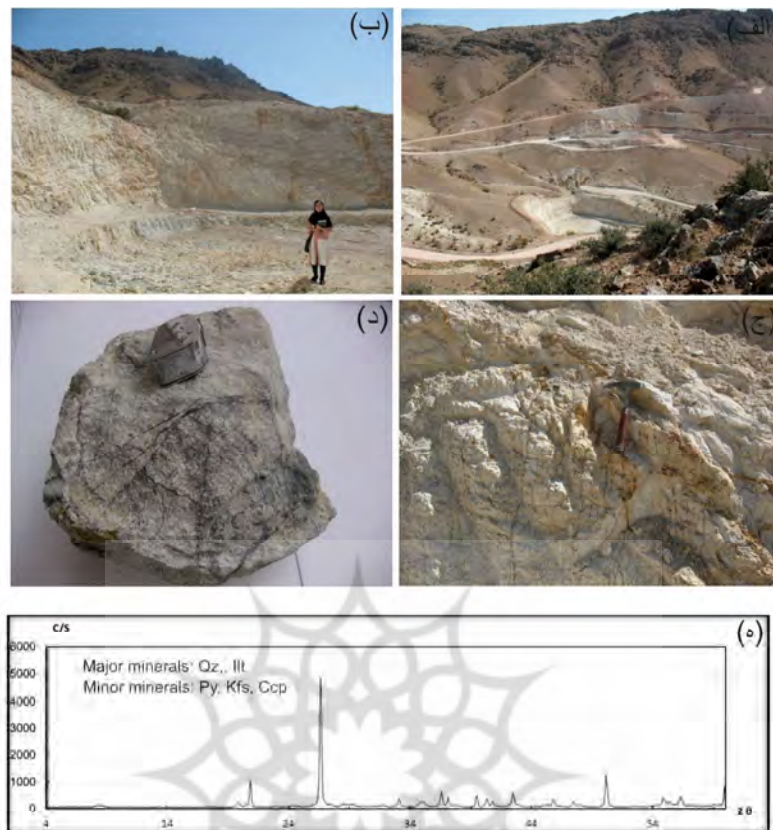
۴-۶-۴- دگرسانی پروپیلیتیک

گسترش این دگرسانی، در برگه نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰ لاهرود، به‌صورت موضعی است و اغلب دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک را احاطه می‌کند. همان‌گونه که مطالعات XRD نشان می‌دهد (جدول ۱)، حضور کانی‌های ثانویه کلریت و کربنات حاکی از وجود این دگرسانی است که با شدتی کم، اغلب در سنگ‌های ولکانیکی دارای ترکیب آندزیتی، به وقوع پیوسته و اغلب به خرج کانی‌های فرومنیزین (بیوتیت و پیروکسن) و پلاژیوکلاز تشکیل می‌شود (شکل ۹).

۸-د. در نتایج آنالیزهای XRD، کوارتز و ایلیت فاز اصلی را تشکیل داده است (شکل ۸-ه) و کانی‌های فلدسپار پلاژیوکلاز، پیریت (Py) و کالکوپیریت (Ccp) به‌صورت فاز فرعی مشاهده می‌شود. در مطالعات صحرایی، گاهی رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای به چشم می‌خورد؛ این رنگ نشانه حضور کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن است که احتمال دارد برآثر اکسید شدن پیریت ایجاد شده باشد.



شکل ۷. نمایی از ترانشه‌ای که برای نمونه‌برداری از زون دگرسانی حفر شده است، دید به‌سمت جنوب (الف)؛ گسل نرمالی که موجب جابه‌جایی واحد دگرسان شده است (ب)؛ نمونه دستی زون دگرسانی آرژیلیک پیشرفته (ج، د)؛ طیف XRD شامل کانی‌های اصلی ناتروآروسیت، آلونیت و کانی فرعی کوارتز (ه، و)؛ نمایی از دگرسانی آرژیلیک پیشرفته و سیلیسی شدن در واحدهای توفی (ز)؛ نمایی نزدیک از دگرسانی آرژیلیک پیشرفته و رگه‌های سیلیسی در واحد توفی دید به‌سمت شمال‌شرق (ج، ط)؛ طیف XRD حاوی کانی‌های اصلی کوارتز و آلونیت و کانی‌های فرعی ژاروسیت و ناتروآلونیت (Ntalu) (ی)؛ لیزگانگ در واحد توفی (ک)؛ نمونه دستی واحد توفی با دگرسانی آرژیلیک پیشرفته و لیزگانگ (ل)؛ طیف XRD حاوی کانی‌های اصلی کریستوبالیت، کائولینیت، آلونیت و کانی فرعی گوتیت که حلقه‌های لیزگانگ را تشکیل داده است (م) (حروف اختصاری برگرفته از: Whitney & Evans, 2010)



شکل ۸. نمای واحدهای کوارتز دیوریتی با دگرسانی فیلیک دید به سمت شمال (الف)؛ نمای نزدیک از دیواره معدن (ب)؛ حضور اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (ج)؛ نمایی از بافت استوک ورکی (د)؛ طیف XRD شامل کانی‌های اصلی کوارتز و ایلیت، با فازهای فرعی پیریت، فلدسپار پتاسیم (Kfs) و کالکوپیریت (ه) (حروف اختصاری برگرفته از: Whitney & Evans, 2010)

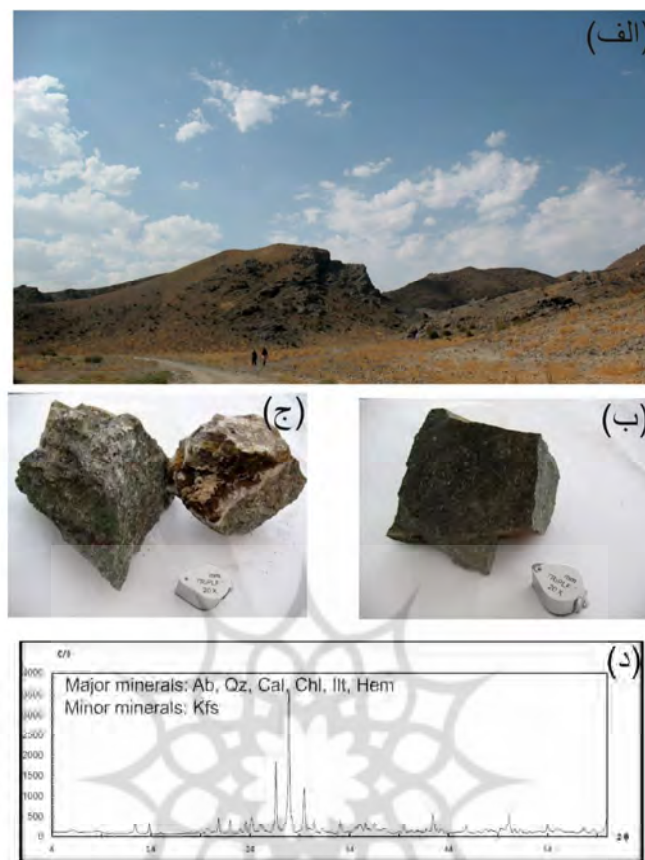
۵-۶-۴- دگرسانی سیلیسی

است (شکل ۱۰-ه). طبق مطالعات XRD، سیلیسی شدن و تشکیل کوارتز همراه با سایر دگرسانی‌ها نیز مشاهده می‌شود و مقادیر جزئی موسکوویت و ایلیت نیز در نمونه‌ها به چشم می‌خورد (جدول ۱ و شکل‌های ۱۰-و و ۱۰-ز).

۵- نتیجه‌گیری

بیشتر منطقه مورد مطالعه از سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی تا حدواسط دارای ترکیب آندزیتی و سن پالئوسن- اتوسن تشکیل شده است. به نظر می‌رسد

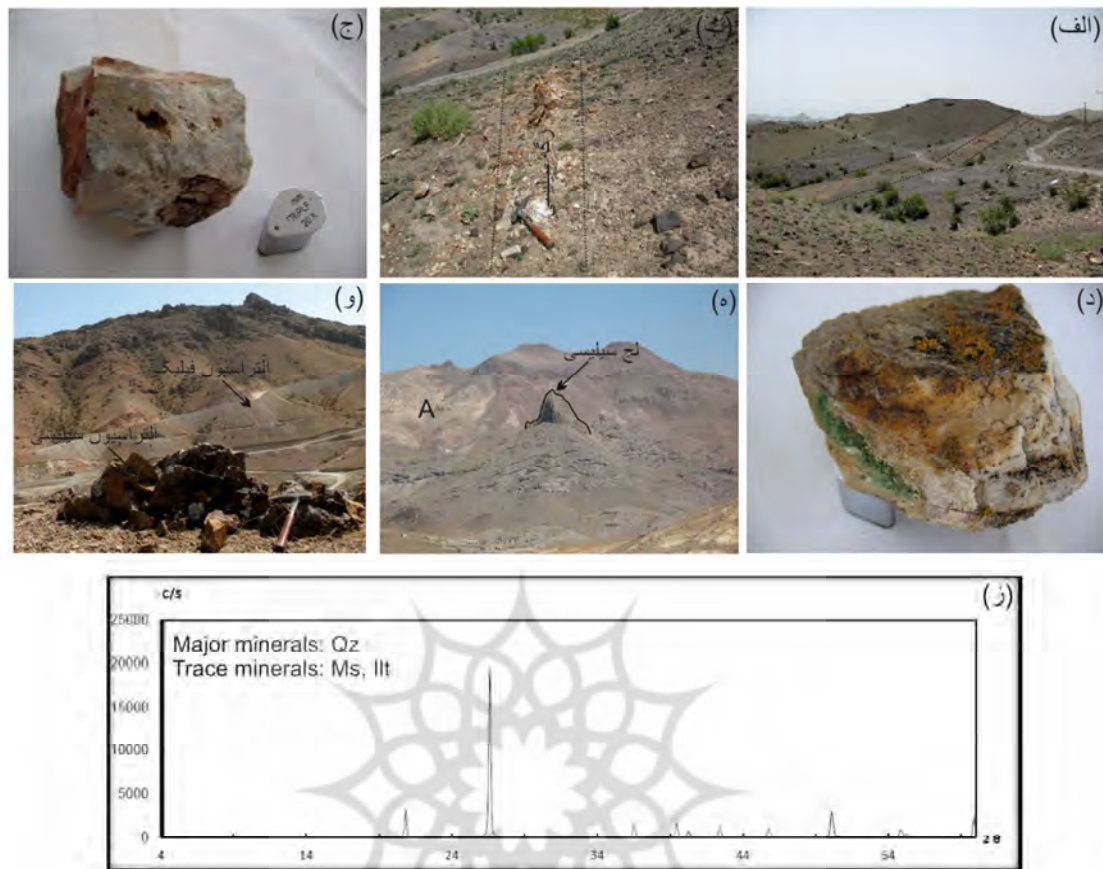
گسل‌های منطقه نقش مهمی در ایجاد این نوع دگرسانی دارند؛ این دگرسانی‌ها گاه به صورت خطی در امتداد گسل‌ها نمایان می‌شوند (شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب). در برخی نمونه‌ها، سیلیس بافت حفره‌ای نیز دارد (شکل ۱۰-ج). در برخی نمونه‌های سیلیسی، آثاری از کانه‌زایی ملاکیت به چشم می‌خورد (شکل ۱۰-د). در مواردی نیز، این دگرسانی به صورت کلاهک‌های سیلیسی در ارتفاعات دیده می‌شود که در واحد دگرسان‌شده کائولینیته آلونیتی (A) قرار گرفته نفوذ ماگمایی، دارای ترکیب حدواسط با سن الیگوسن،



شکل ۹. نمایی از دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای ولکانیکی (الف)؛ نمونه دستی از دگرسانی پروپیلیتیک (ب، ج)؛ طیف XRD شامل کانی‌های اصلی آلبیت، کوآرتز، کلسیت، کلریت، ایلیت و هماتیت به‌همراه فلدسپار پتاسیم به‌منزله فاز فرعی (د) (حروف اختصاری برگرفته از: Whitney & Evans, 2010)

شناسایی مستقیم مناطق دگرسانی و مواد معدنی مس‌دار (با نمونه‌برداری مستقیم از محل کان‌سار و به کار بردن آن به‌منزله پیکسل آموزشی). از آنجاکه هدف این پژوهش اکتشاف کان‌سارهای مس پورفیری بود، به سنگ‌های آذرین اسیدی تا حدواسط که دگرسانی گسترده آرژیلیکی، فیلیکی و پروپیلیتیکی در آنها رخ داده بود، و به‌ویژه دگرسانی آلونیتی، سیلیسی و اکسید آهن در منطقه مورد مطالعه، توجه شد. پیشرفت‌های تازه فناوری، در زمینه وضوح طیفی/ مکانی داده‌های ماهواره‌ای در الگوریتم‌های طبقه‌بندی، فرصت‌ها و راه‌حل‌های جالب‌توجهی برای نقشه‌برداری زمین‌شناسی

به درون سنگ‌های آتش‌فشانی موجب دگرسانی گسترده‌ای در برخی نواحی این منطقه شده است. در پژوهش حاضر، مجموعه داده استر و سنتینل-۲A MSI از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود، با نگرشی خاص به معدن صاحب‌دیوان، بررسی شده است. هدف اصلی این مطالعه ایجاد روشی جدید، با در نظر گرفتن داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه استر و سنتینل-۲ بوده است که به شناسایی دگرسانی‌های همراه با کان‌سارهای مس پورفیری بینجامد. این شناسایی براساس دو رویکرد انجام شد: شناسایی مناطق دگرسانی گرمایی مرتبط با کان‌سارهای مس پورفیری (از طریق کتابخانه طیفی) و



شکل ۱۰. نمایی از رخ‌نمون رگه سیلیسی در امتداد گسل دید به سمت غرب (الف)؛ نمای نزدیک از رگه سیلیسی (ب)؛ ساخت حفره‌ای در نمونه سیلیسی (ج)؛ کانه‌زایی مالاکیت در نمونه سیلیسی (د)؛ نمایی از گنبد سیلیسی و واحد دگرسان‌شده کائولینیتی، آلونیتی و نمایی نزدیک از دگرسانی سیلیسی (ه)؛ طیف XRD که شامل کانی‌های اصلی کوارتز و کانی‌های فرعی موسکویت و اپلیت است (ز)

که نشان از حضور هم‌زمان هماتیت و ژاروسیت دارد. نتایج بررسی توده‌های نفوذی برگه ۱۰۰۰۰۰ لاهرود، رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی، گسترش گسل‌ها و دگرسانی‌ها بیان می‌کند که در مجموع، دگرسانی گسترده در بخش مرکزی (صلوات و نیازقلی - مشیران) و جنوب غرب محدوده مطالعاتی (صاحب‌دیوان و دوست‌بیگللو) چشمگیر است. محصولات ناشی از پردازش، با نقشه زمین‌شناسی منتشرشده از منطقه مورد مطالعه، مقایسه شد و بنابر آن، مشخص شد که نقشه‌های به دست آمده با مدل زمین‌شناسی مفهومی کان‌سار مس پورفیری مطابقت دارد و دگرسانی‌ها مرتبط با توده‌های میزبان این تیپ کان‌سارهاست.

به وجود آورده است. از این‌رو پس از برداشت زمین‌شناختی و انجام دادن مطالعات XRD، روش‌های نقشه‌برداری کانی‌شناسی طیف‌مبنا همچون BE، LSU و CEM به کار رفت. از میان این شیوه‌ها، روش BE با استفاده از نمونه‌های آموزشی روی تصاویر استر، بهترین نتیجه را در جداسازی پیکسل‌های هدف داشت؛ به‌ویژه در تشخیص انواع دگرسانی‌های مرتبط با کان‌سارهای مس پورفیری. اگرچه تصاویر سنتینل، به دلیل قدرت تفکیک طیفی پایین در محدوده فروسرخ کوتاه، برای کانی‌های رسی نتایج رضایت‌بخشی دربرداشت، در جداسازی کانی‌های حاوی آهن همچون هماتیت، ژاروسیت و گوتیت مطلوب بود و با استفاده از ترکیب رنگی، موجب نمایش منطقه معدنی صاحب‌دیوان شد

۶- منابع

- Adiri, Z., Lhissou, R., Harti, A.E., Jellouli, A. & 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, 1368, PP. 3-15, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103332>.
- Aghanabati, A., 2004, **The Geology of Iran**, Geological Survey of Iran, Tehran, 586 P. (In Farsi). Atillah, E.I., Morjani, A. & Souhassou, M., 2019, **Use of the Sentinel-2A Multispectral Image for Litho-Structural and Alteration Mapping in Al Glo'a Map Sheet (1/50,000) (Bou Azzer-El Graara Inlier, Central Anti-Atlas, Morocco)**, Artificial Satellites, 54(3), PP. 73-96, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.037>.
- Babakhani, A. & Hossein Khan Nazer, N., 1991, **Geological Map of 1:100,000 Lahroud**, Geological Survey and Mineral Explorations of Iran.
- Badakhshan Noghaddeh, Z., 2010, **Economic Geology Study of the Saheb Divan-Dust Biglu Area with a Special Focus on Hydrothermal Alterations in the Region**, Master's Thesis, Payame Noor University of Tabriz.
- Bentahar, I. & Raji, M., 2020, **Comparison of Landsat OLI, ASTER, and Sentinel 2A Data in Lithological Mapping: A Case Study of Rich Area (Central High Atlas, Morocco)**, Advances in Space Research, 67(3), PP. 945-963, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.037>.
- Fahim Guilany, R., Shelhk Zakariaee, S.J., Darvishzadeh, A. & Vosoughi Abedini, M., 2019, **Volcanological and Geochemical Features of the Products of Sabalan's Last Eruption, NW Iran**, Petrological Journal, 10(1), PP. 125-146, <https://doi.org/10.22108/IJP.2019.115533.1119>.
- Javi Zadeh, S. & Ebrahimi, M., 2018, **Satellite Image Processing in Geology and Mining: With Practical Projects and Exercise Data**, Academic Publishing.
- Khaleghi, M., Ranjbar, H., Abedini, A., Calagari, AA., 2020, **Synergetic Use of the Sentinel-2, ASTER, and Landsat-8 Data for Hydrothermal Alteration and Iron Oxide Minerals Mapping in a Mine Scale**, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 198, PP. 311-328, <https://doi.org/10.13168/AGG.2020.0023>.
- Nabavi, M.H., 1976, **An Introduction to the Geology of Iran**, Geological Survey of Iran, <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.77066>.
- Soydan, H., Koz, A. & Şebnem Düzgün, H., 2021, **Secondary Iron Mineral Detection via Hyperspectral Unmixing Analysis with Sentinel-2 Imagery**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 101, PP. 2-10, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102343>.
- Van der Meer, F.D., Van der Werff, H.M. & Van Ruitenbeek, F.J.A., 2014, **Potential of ESA's Sentinel-2 for Geological Applications**, Remote Sensing of Environment, 148, PP. 124-133, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.022>.
- Van der Werff, H.M. & Van der Meer, F.D., 2016, **Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI Provide Data Continuity for Geological Remote Sensing**, Remote Sensing, 8(11), PP. 3-16, <https://doi.org/10.3390/rs8110883>.
- Van der Werff, H.M., Hewson, R. & Van der Meer, F.D., 2015, **Sentinel-2 for Mapping Iron Absorption Feature Parameters**, Remote Sensing, 7(10), PP. 12635-12653, <https://doi.org/10.3390/rs71012635>.
- Van der Werff, H.M., Hewson, R. & Van der Meer, F.D., 2018, **Use What Is There: What Can Sentinel-2 Do for Geological Remote Sensing?** In Proceedings of the IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia. Spain, Jul 22-27th, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519080>.
- Wenyan, G., Cheng, Q., Jing, L., Wang, F., Zhao, M. & Ding, H., 2020, **Assessment of the Capability of Sentinel-2 Imagery for Iron-Bearing Minerals Mapping: A Case Study in the Cuprite Area, Nevada**, Remote Sensing, 12(18), PP. 5-12, <https://doi.org/10.3390/rs12183028>.
- Whitney, D. & Evans, B., 2010, **Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals**, American Mineralogist, 95, PP. 185-187, [https://doi.org/10.0003-004X/10/0001-185\\$05.00/DOI:10.2138/am.2010.3371](https://doi.org/10.0003-004X/10/0001-185$05.00/DOI:10.2138/am.2010.3371).

This Page is Intentionally Left Blank



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی