

## Original Article



Iranian  
Journal of Remote Sensing & GIS

## 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<sup>✉</sup>, 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](https://gisj.sbu.ac.ir/article_104453.html)

Received: 2023.12.27  
Accepted: 2024.04.06





# نقشه برداری کانی شناسی مرتبط با کان سار مس پورفیری با استفاده از تصاویر استر و سنتینل-۲ و شواهد صحرایی (مطالعه موردی: کان سار مس صاحب دیوان)

مهسا فهیمی، سیده نرگس ساداتی<sup>۱</sup>، غلامرضا احمدزاده

## سمت

گروه زمین شناسی، 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، توده های نفوذی با ترکیبی از گرانودیوریت و کوارتز دیوریت با سن الیگوسن به درون سنگ های آتشفشانی نفوذ کرده اند و در بخش های مرکزی اطراف روستای قره گل و جنوب غرب منطقه، در محدوده صاحب دیوان و دوست بیگلر، عامل دگرسانی گسترده گرمایی (کاتولینیت)، سیلیسی و آلونیتی در سنگ های لایتی ائوسن بالایی محسوب می شوند. پیشرفت های اخیر فناوری، در زمینه تفکیک طیفی/ مکانی داده های ماهواره ای در الگوریتم های طبقه بندی، فرصت ها و راه حل های جالب توجهی را برای نقشه برداری زمین شناسی ایجاد کرده است. در این تحقیق، بر این مبنا که هدف از کاوش ذخایر مس پورفیری سنگ های آذرین اسیدی تا حد واسط است که دگرسانی آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک گسترده ای در آنها رخ داده، توجه ویژه ای به دگرسانی آلونیتی، سیلیسی و اکسید آهن شده است.

**مواد و روش ها:** به منظور معرفی نمونه های آموزشی، پس از بررسی های زمین شناختی، سیزده نمونه از صاحب دیوان با روش XRD آنالیز شد. مناطقی که نماینده دگرسانی های اصلی بودند و پیکسل های مربوط به آنها در تصاویر ماهواره ای، با عنوان نمونه های آموزشی، برای روش های طیف پایه انتخاب شد. در مطالعه حاضر، مجموعه داده های MSI ماهواره های استر و سنتینل-۲A از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهورد، با نگرش ویژه به معدن صاحب دیوان بررسی شده اند. هدف اصلی این مطالعه ایجاد روشی جدید با در نظر گرفتن داده های سنجش از دور، به ویژه استر و سنتینل-۲، در شناسایی دگرسانی های مرتبط با ذخایر مس پورفیری است. این شناسایی بر اساس دو رویکرد انجام شد: شناسایی زون های دگرسانی گرمایی مرتبط با ذخایر مس پورفیری (از طریق کتابخانه طیفی) و شناسایی مستقیم زون های دگرسانی و کانی های مس دار (از طریق نمونه برداری مستقیم از محل کان سار و استفاده از آن به منزله پیکسل آموزشی). در منطقه مورد مطالعه، نتایج MNF از داده های استر و سنتینل-۲A استخراج و در طبقه بندی طیف پایه و با استفاده از کتابخانه طیفی نرم افزار و نمونه های آموزشی از مناطق دگرسان شده، به ترتیب از سه کانی کاتولینیت، موسکویت و کلریت به صورت شاخص هایی برای دگرسانی آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک استفاده شد.

**نتایج و بحث:** نتیجه جالب توجه به دست آمده، از این تحقیق، برجسته سازی دگرسانی در تصاویر استر معدن صاحب دیوان بود؛ این نکته گویای حضور هم زمان دگرسانی آرژیلیک و فیلیک 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 ویژگی های جذبی قدرتمندی در ناحیه VNIR نشان می دهند و این حسگر در شناسایی آنها موفق تر بوده است. پس از دریافت اطلاعات زمین شناختی و انجام دادن مطالعات XRD، روش های نقشه برداری کانی شناسی طیف پایه مانند BE، LSU، CEM استفاده شد؛ از بین آنها، روش BE بهترین نتیجه را برای جداسازی پیکسل های هدف، به ویژه در تشخیص انواع گوناگون تغییرات ذخایر مس پورفیری، در برداشت. این مسئله، با استفاده از پیکسل های آموزشی، روی تصاویر استر نشان داده شد. اگرچه تصاویر سنتینل، به دلیل وضوح طیفی پایین در محدوده فرسوخ کوتاه، نتایج رضایت بخشی برای کانی های رسی به دست ندادند، برای جداسازی کانی های حاوی آهن مانند هماتیت، ژاروسیت و گوتیت مطلوب بودند و با استفاده از ترکیب رنگی، نتیجه گرفته شد که وجود هماتیت و ژاروسیت را به طور هم زمان نشان می دهند.

## استناد:

فهیمی، م.، سادات، س.ن.، احمدزاده، غ.ر.،  
نقشه برداری کانی شناسی مرتبط با  
کان سار مس پورفیری با استفاده از  
تصاویر استر و سنتینل-۲ و شواهد  
صحرایی (مطالعه موردی: کان سار مس  
صاحب دیوان)، نشریه سنجش از دور و  
GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۲، تابستان  
۱۴۰۴: ۷۹-۹۸.

**نتیجه گیری:** نتایج بررسی توده های نفوذی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهورد رگه های سیلیسی و گسترش گسل ها و دگرشکلی ها نشان می دهد که به طور کلی، دگرسانی گسترده در بخش مرکزی (صلوات و نیازقلی- مشیران) و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه (صاحب دیوان و دوست بیگلر) شایان توجه است. محصولات حاصل از فرآوری با نقشه زمین شناسی منتشر شده از منطقه مورد مطالعه مقایسه و نشان داده شد که نقشه های حاصل با مدل زمین شناسی مفهومی کان سار مس پورفیری مطابقت دارند و دگرسانی ها به سنگ میزبان این نوع کان سار بازمی گردد.

**واژه های کلیدی:** مس پورفیری، طیف مینا، استر، سنتینل، صاحب دیوان.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: sadati\_sn@uma.ac.ir

شناسه دیجیتال مقالات: [https://gisj.sbu.ac.ir/article\\_104453.html](https://gisj.sbu.ac.ir/article_104453.html)



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/>.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، برای نمایش پتانسیل سنجنده چندطیفی 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 دگرسانی نشان می‌دهند که با دگرسانی پتاسیک در مرکز شروع می‌شود؛ درحالی‌که به سمت بیرون با انواع دگرسانی گرمابی فیلیک، 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 بارسازی 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<sup>۱</sup> و همکارانش (۲۰۱۴) استفاده از سنتینل-۲A MSI برای دورسنجی اکتشافی را ارزیابی، و توانایی‌های این سنجنده را با سنجنده استر در ماهواره ترا<sup>۲</sup> 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 ورف<sup>۳</sup> 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 داده‌اند. 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

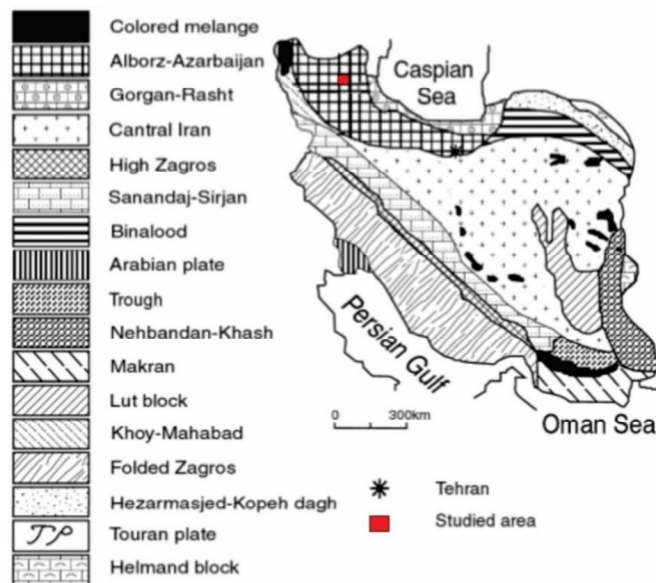
مجموعه داده‌های مورد تحلیل در این مطالعه یک تصویر سنیتینل-MSI2A در سطح پردازش L1C و یک تصویر استر در سطح پردازش L1T است که در تاریخ ۲۰۲۰/۸/۸ دریافت و از پایگاه اینترنتی earthexplorer دانلود شدند. این تصاویر به دلیل نداشتن ابر و پوشش گیاهی کمتر از ۱۰٪ در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند زیرا ویژگی‌های جذبی مهم مواد معدنی در فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ 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 سنیتینل (با قدرت تفکیک رادیومتریکی دوازده‌بیتی، عرض ۲۹۰ کیلومتری، ارتفاع خورشیدی ۶۶ درجه) و استر (با

استفاده از سنجش از دور در مطالعات زمین‌شناختی، دانشمندان بحث‌های بسیاری کرده‌اند (Atilah 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 سنجش 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 سنیتینل-۲A 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 سنیتینل 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. تقسیم بندی واحدهای زمین ساختی- 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 نرمالیز شده (NDVI) برای تهیه مجموعه ای از پیکسل ها، با پوشش گیاهی برای هر مجموعه داده محاسبه شد. از آنجا که برخی دگرسانی ها ابعاد نسبتاً کوچکی دارند، برای شناسایی آنها در تصاویر ماهواره ای، به وضوح تفکیک پذیری 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 پیش پردازش های لازم، با به کارگیری نمونه های آموزشی از منطقه صاحب دیوان، روش های طیف مینا برای نقشه برداری انواع دگرسانی در منطقه به کار رفت. برای انتخاب نمونه های آموزشی، با استفاده از نقشه زمین شناسی 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 نرم افزار 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 فرورسرخ نزدیک باند ۸ و باند ۱۰ که برای تشخیص ابر سیروس نازک استفاده می شود، کنار گذاشته شد زیرا پدیده های زمین شناختی، در طول موج این باندها، ویژگی های طیفی شاخصی در آشکارسازی دگرسانی ها نشان نمی دهند (Van der Werff & van der Meer, 2016).

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

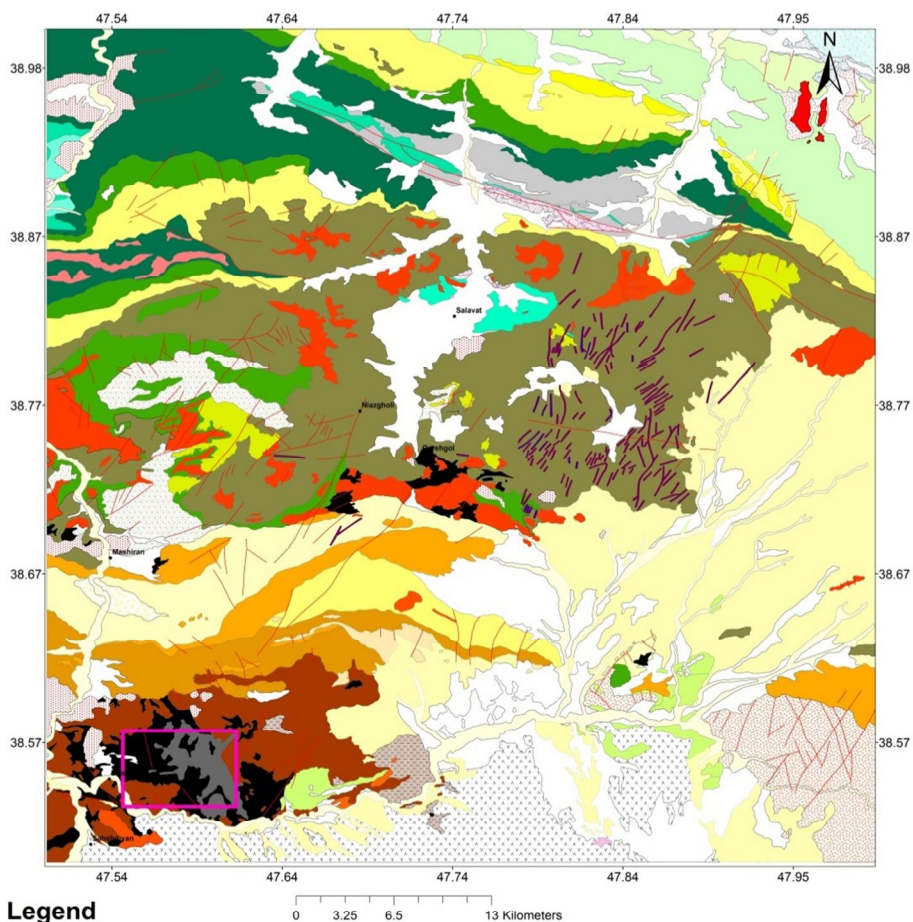
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- زمین‌شناسی منطقه‌ای

شناسایی واحدهای آذرین که دچار دگرسانی گرمایی شده‌اند، برای اکتشاف کان‌سارهای مس پورفیری حائز اهمیت است؛ از آن‌رو در شکل ۲، نقشه زمین‌شناسی منطقه براساس گسترش واحدهای آذرین درونی و بیرونی و دگرسانی‌های مرتبط با آن ترسیم شده است. بیش از نیمی از منطقه با رخ‌نمون سنگ‌های دوران سنوزوئیک پوشانده شده است؛ بخش بزرگی از آن از سنگ‌های آذرین، به همراه مقداری نهشته‌های آذرآواری، تشکیل شده که در ادامه، توضیح داده شده است.

اولین فعالیت‌های آتش‌فشانی پالئوسن، در محدوده مطالعاتی، با پیدایش برش‌های آتش‌فشانی واحد  $E^{br}$  آغاز می‌شود که ترکیب اصلی آن پیروکسن آندزیت و دارای سیمان توفی و هیالوکلاستی است. این واحد به تدریج روی واحدهای رسوبی تخریبی قبلی ( $E^c$  و  $E^{sl}$ ،  $P$ ،  $E^f$ ) قرار می‌گیرد و گاهی شواهد بیانگر آتش‌فشان زیردریایی است (Badakhshan Noghadeh, 2010). اندازه ذرات آن بین ۵/۵ تا ۲۰ سانتی‌متر متغیر است و به‌طور مکرر، با دایک‌های پیروکسن آندزیتی  $d^b$  و گاه تفریتی  $d^c$  قطع می‌شود. در این واحد سنگی، ظهور آنالسیم در برش با قطعات گدازه تفریتی موجب تفکیک آن به صورت واحد مستقلی با عنوان  $E^{am}$  شده است و با غلبه آنالسیم به صورت تفریت آنالسیم‌دار پورفیری یا آنالسیمیت، به صورت واحد  $E^e$  مشخص می‌شود (شکل ۳-الف)؛ طبق این شکل، در بخش‌های پایینی، با بخش پیروکسن آندزیت و آنالسیم در تناوب با گدازه و برش ولکانیکی آغاز و در ادامه، با گدازه آنالسیم‌دار و برش آنالسیم‌دار مشخص می‌شود و بخش بالایی آن برش آنالسیم‌دار همراه با سیمان هیالوکلاستیت و توف شیشه‌ای با مقادیر بالای آنالسیم خاتمه می‌یابد. یکی از مورفولوژی‌های منطقه رخ‌نمون سنگ‌های ولکانیکی زیردریایی با شکل‌های بالشی، با حداکثر قطر پنج متر، در محدوده نیازقلی-مشیران است (شکل ۳-ب) که ترکیب پیروکسن آندزیتی دارد ( $E^{bp}$ ) و برش‌های ولکانیکی قبلی را می‌پوشاند.

منطقه، به‌ویژه محدوده معدنی صاحب‌دیوان و زون‌های متفاوت دگرسانی انجام شد. همچنین از پدیده‌های گوناگون زمین‌شناختی، دگرسانی، خطواره‌ها و مواردی دیگر عکس برداری شد. طی عملیات صحرایی، سی نمونه دستی برداشت شد که پس از بررسی‌های اولیه و انتخاب بهترین نمونه‌ها از لحاظ دگرسانی، سیزده عدد از این نمونه‌ها تحلیل شد؛ این کار به‌منظور تعیین کانی‌شناسی و با استفاده از روش XRD در آزمایشگاه زرآزمای 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، به‌منزله نمونه آموزشی، در روش‌های طیف‌منا به کار رفت تا انواع پیکسل‌های متناظر با دگرسانی‌های عمده منطقه، از جمله آرژیلیک، فلیک، پروپیلیتیک، سیلیسی و آلونیتی شدن، طبقه‌بندی شود. روش‌های طیف‌منا اغلب از نوع روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده محسوب می‌شود. این روش‌ها معمولاً از طبقه‌بندی زیرپیکسل تشکیل شده است که با ازبین بردن پس زمینه، فراوانی هدف مورد نظر را برجسته می‌کند. این عملیات طیف هدف و موارد موجود در تصویر را مقایسه می‌کند؛ سپس به‌منظور پرهیز از هرگونه اشتباه بالقوه، مقدار هر پیکسل بررسی می‌شود. برای این منظور، از انواع روش‌های طبقه‌بندی تصویر، شامل BE و LSUU و CEM استفاده شد. در برخی روش‌ها، طیف‌های کتابخانه طیفی نرم‌افزار ENVI (IGCP1 و IGCP264) به کار رفت؛ این شیوه، برای استفاده در نواحی‌ای که اطلاعات اندکی از آنها در دست است، روش خوبی محسوب می‌شود اما برای دستیابی به طبقه‌بندی صحیح، شناسایی دقیق منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری از پیکسل‌های هدف و استفاده از داده نمونه آموزشی بسیار ضروری است. برای به‌کارگیری روش‌های پردازش تصویر، از نرم‌افزار Arc Map (نسخه ۱۰/۶) و نیز PCI Geomatica به‌صورت ابزارهای مکمل دورسنجی استفاده شد.



**Legend**

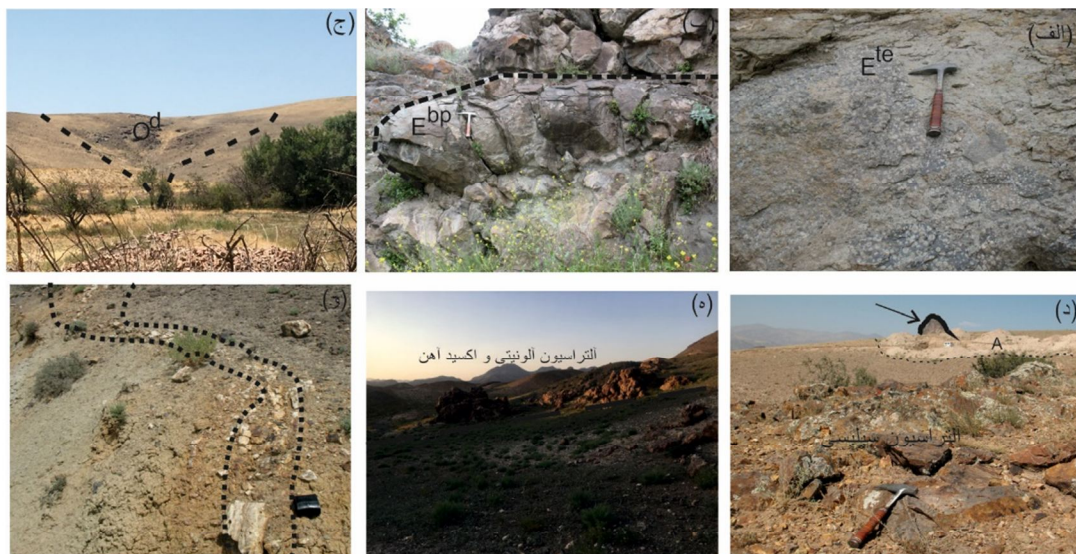
<p>Q<sup>1</sup> Young terraces and fans</p> <p>Q<sup>2</sup> Sabalan volcanosediments ,mainly: Tuff, ash,lahar,conglomerate</p> <p>Q<sup>3</sup> Old terraces :clay,sand,silt,locally gypsum and conglomerate</p> <p>P-Q Unconsolidated volcanogenic conglomerate</p> <p>Pj<sup>1</sup> Trachytic and dacitic domes</p> <p>O<sup>1</sup> Rhyolite Rhyodacite</p> <p>E<sup>12a</sup> Megaporphyritic latite and Andesitic lava flows</p> <p>E<sup>12b</sup> Dacite, Ignemberite</p> <p>E<sup>12c</sup> Andesite, Latite andesite</p> <p>E<sup>12d</sup> Porphyritic latite lava flows</p> <p>E<sup>12e</sup> Andesitebasalte, Basanite</p> <p>E<sup>12f</sup> Dacite, ignemberite, Trachyandesite</p> <p>E<sup>12g</sup> Megaporphyritic andesite and Andesitbasalt lava flows</p> <p>E<sup>12h</sup> Trachyandesite porphyry</p> <p>E<sup>12i</sup> Olivine basalt</p> <p>E<sup>12j</sup> Andesite porphyry</p> <p>E<sup>12k</sup> Submarine volcanic breccia Hyaloclastite</p> <p>E<sup>12l</sup> Sandstone, marl, conglomerate, breccia</p> <p>E<sup>12m</sup> Sandstone, marl, conglomerate, breccia</p> <p>E<sup>12n</sup> Trachyte, trachyandesite</p> <p>E<sup>12o</sup> Andesitic and tephritic pillow lavas</p> <p>E<sup>12p</sup> Tephritic breccia</p> <p>E<sup>12q</sup> Volcanic breccia with pyroxene Andesite and tephrite</p> <p>E<sup>12r</sup> Tephritic pillow lavas</p> <p>E<sup>12s</sup> Thin bedded tuffaceous sandstone, microconglomerate</p> <p>P-E Alternation of thin bedded sandstone, shale, siltstone</p> <p>K<sup>12</sup> Thin bedded marly and sandy limestone</p> <p>K<sup>11</sup> Andesite and Trachyandesitic lava flows with pillow structures</p> <p>K<sup>10</sup> Red brown pelagic limestone</p> <p>O<sup>m</sup> Ophyolitic melange, predotite, gabbro, diabase, schist, gniess</p> <p>Sr Serpentinite, listvenite</p> <p>Mt Sericite schist, chlorite Epidote schist, quartzite, Metadiabase</p> <p>Mb Marble</p>	<p>A Alunitized an kaolinized zone</p> <p>O<sup>1</sup> Nepheline syenite, Phonolite (oligocene?)</p> <p>O<sup>2</sup> Granodiorite, quartzdiortitic subvolcanic bodies (oligocene?)</p> <p>d<sup>1</sup> Andesite, Andesitebasaltic dykes</p> <p>d<sup>2</sup> Analcime tephrite, phonolitic dykes</p> <p>O Polygenic conglomerate.</p> <p>E<sup>m</sup> Alternation of thin bedded marl and sandstone</p> <p>E<sup>12</sup> Megaporphyry latite</p> <p>E<sup>12g</sup> Olivine gabbro</p> <p>E Alternation of shale, sandstone, marl , conglomerate</p> <p>• village</p> <p>— Fault</p>
--	---

شکل ۲. نقشه زمین شناسی از پراکندگی واحدهای سنگی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود (با تغییر، Babakhani & Hossein Khan Nazer, 1991) به همراه زون دگرسانی کانولینیتی و آلونیتی شده؛ موقعیت محدوده معدن مس صاحب دیوان 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 کلاک‌های 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  $PI^l$  با سن پلیوسن مشخص می‌شود. شروع دوران چهارم در برگه لاهرود احتمالاً با فعالیت‌های آتش‌فشانی پلیستوسن 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 ( $E^{te}$ ,  $E^{tr}$ ,  $E^{bp}$ ) 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.  $E^{alp}$  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 به‌دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناختی، تعیین تقدم و تأخر آنها قدری دشوار است. در نقاطی، این واحد به‌طور 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

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)<sup>۱</sup>

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 ۲۵٪ پیکسلی به ماده (الف) و ۲۵٪ به ماده (ب) و ۵۰٪ به ماده (ج)

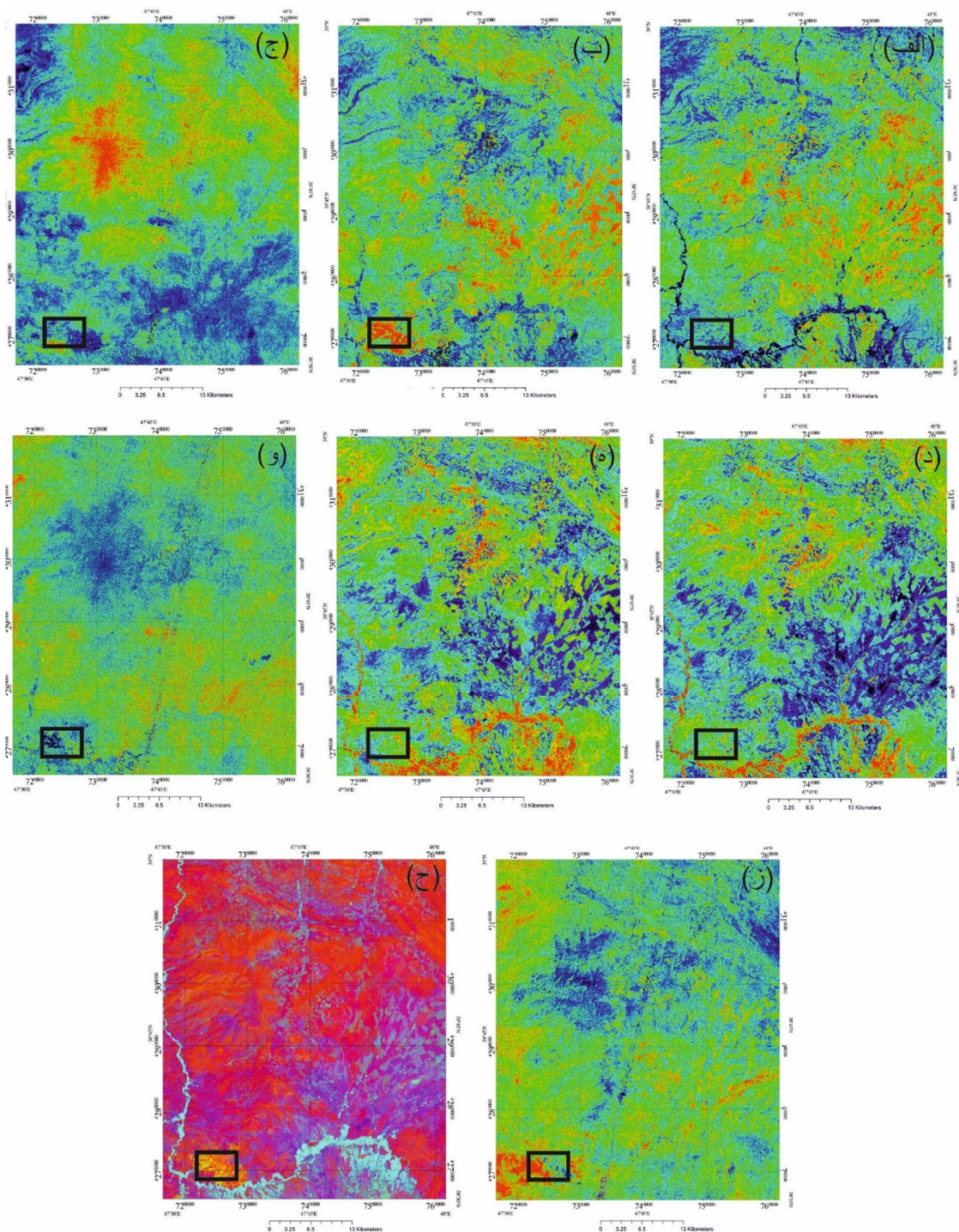
متعلق باشد، طیف این پیکسل میانگین وزنی ۲۵٪ ماده (الف) به علاوه ۲۵٪ ماده (ب) به علاوه ۵۰٪ ماده (ج) خواهد بود؛ بنابراین روش یادشده، هم از لحاظ تعداد و هم از لحاظ کیفیت، به داده ورودی و نیز توانایی کاربر در درک صحیح منطقه و رفتار طیفی وابستگی کامل دارد. طیف ورودی داده خروجی را دستخوش تغییر شدیدی می‌کند. 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)،

#### 1. Linear Spectral Unmixing

۴-۴- کمینه‌ساز انرژی محدودشده (CEM)<sup>۱</sup>  
 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 در مورد آنها، به حداقل می‌رسد. نیازی به نمونه‌های آموزشی نیست و از طریق 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 آرژیلیک، 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 آرژیلیک 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، فقط 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 به‌کاررفته 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 منطبق بر 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، منطبق بر 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 معدنی 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 در واقع، 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 جنوب‌غرب 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)؛ فیلیک (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، به ترتیب 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)<sup>۱</sup>**

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 مقدار 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 بارسازی پیکسل‌های هدف استفاده کردیم؛ تصاویر حاصل تفاوت چندانی را در مورد 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 نقشه برداری 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 بازدیدهای 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. آغستگی‌های 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. به‌علاوه، به‌منظور حصول نتیجه مطلوب، باید با دیگر پردازش‌ها، نقشه‌های زمین‌شناسی و بازدیدهای 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 بارسازی انواع کانی‌های رسی، از این تصاویر در این روش طیف‌مبنا استفاده نشده و به‌کارگیری 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.

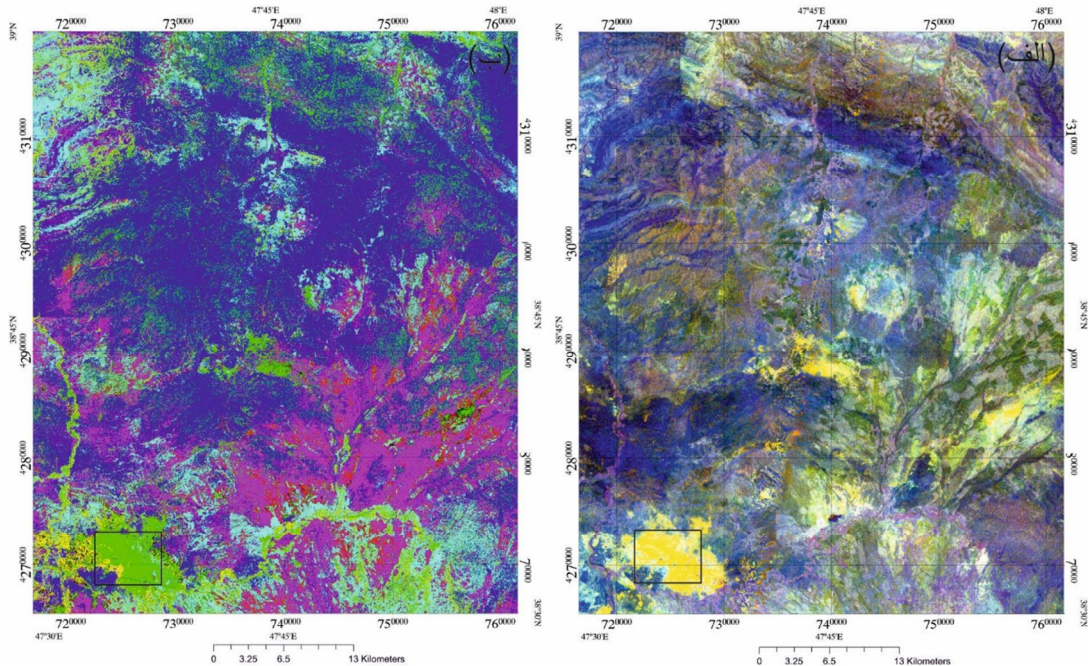
**۱-۶-۴- دگرسانی آرژیلیکی**

این نوع دگرسانی، در نقاط بسیاری، روی نقشه و طی بازدیدهای 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، به‌همراه 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، به‌ویژه در مجاورت

1. Binary Encoding

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

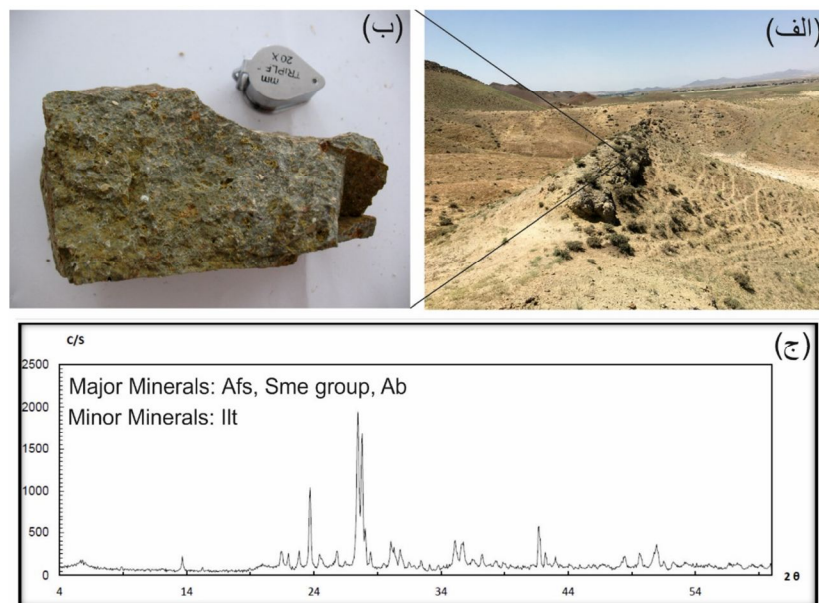
گسل ها و شکستگی ها دگرسانی آرژیلیکی شدن به وقوع می پیوندد؛ در این رخ داد، به دلیل فعالیت بیشتر یون پتاسیم و اسیدیته کمتر سیالات، کانی زایی رس در حد



شکل ۵. تصویر CEM کانی های شاخص آرژیلیک و فیلیک و پروپیلیتیک، به ترتیب در RGB. نواحی زرد در ناحیه معدنی صاحب دیوان حضور هم زمان دو دگرسانی آرژیلیک و فیلیک را نشان می دهد که با دگرسانی پروپیلیتیک، به رنگ سبز احاطه شده است (الف)؛ استخراج انواع دگرسانی ها با استفاده از روش واگرایی رمزگذاری باینری در نقشه ۱۰۰۰۰۰ لاهورد: دگرسانی آرژیلیک (قرمز)، فیلیک (سبز)، پروپیلیتیک (آبی)، سیلیسی (زرد)، آلونیتی و کائولینیتی شدن (فیروزه ای)، کلسیت (Ab) (سرخایی)، اکسید آهن (سیاه) (ب)؛ موقعیت معدن صاحب دیوان با کادر مشکی مشخص شده است

جدول ۱. فهرست نمونه های تحلیل شده با روش XRD در منطقه مورد مطالعه

نام نمونه	کانی های اصلی	کانی های فرعی	دگرسانی غالب
A-L-6A	آراگونیت	کلسیت	کربناتی
A-L-6B	آراگونیت	کلسیت، آلبیت	کربناتی
A-L-6C	فلدسپار پتاسیم، کانی های گروه اسمکتیت، آلبیت	میکا، ایلیت	آرژیلیک
A-L-8	کوارتز، پلاژیوکلاز، میکا، ایلیت	فلدسپار پتاسیم	فیلیک
A-L-23-Tr1	کوارتز	ژپیس، آاناتاز	سیلیسی
A-L-23-Tr2	کوارتز	ژپیس، آاناتاز	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	آلبیت، 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	آلبیت، کوارتز، کلسیت، کلریت	ایلیت، هماتیت و مقادیر جزئی فلدسپار پتاسیم	پروپیلیتیک



شکل ۶. نمایی از دایک تفریت آنالسیم دار پورفیری Ete و ایجاد دگرسانی گسترده آرژیلیکی دید به سمت جنوب غرب (الف)؛ نمونه دستی تفریت (ب)؛ نمودار XRD و حضور کانی های 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 گرفته اند و دگرسانی آرژیلیک پیشرفته در آنها مشاهده می شود (شکل های ۷-۷ تا ۷-۷ ی). در برخی نمونه ها نیز، در نتیجه چرخش سیالات آهن دار، حلقه ها و نوارهای رنگینی ایجاد شده است که به آن «لیزگانگ» گفته می شود. از لحاظ کانی شناختی، با توجه به مطالعات XRD، این نمونه ها از کریستوبالیت (Crs) و کائولینیت و آلونیت، به منزله کانی اصلی و گوتیت، به منزله کانی فرعی تشکیل شده اند (جدول ۱ و شکل های ۷-۷ ک تا ۷-۷ م).

#### ۳-۶-۴- دگرسانی فیلیک

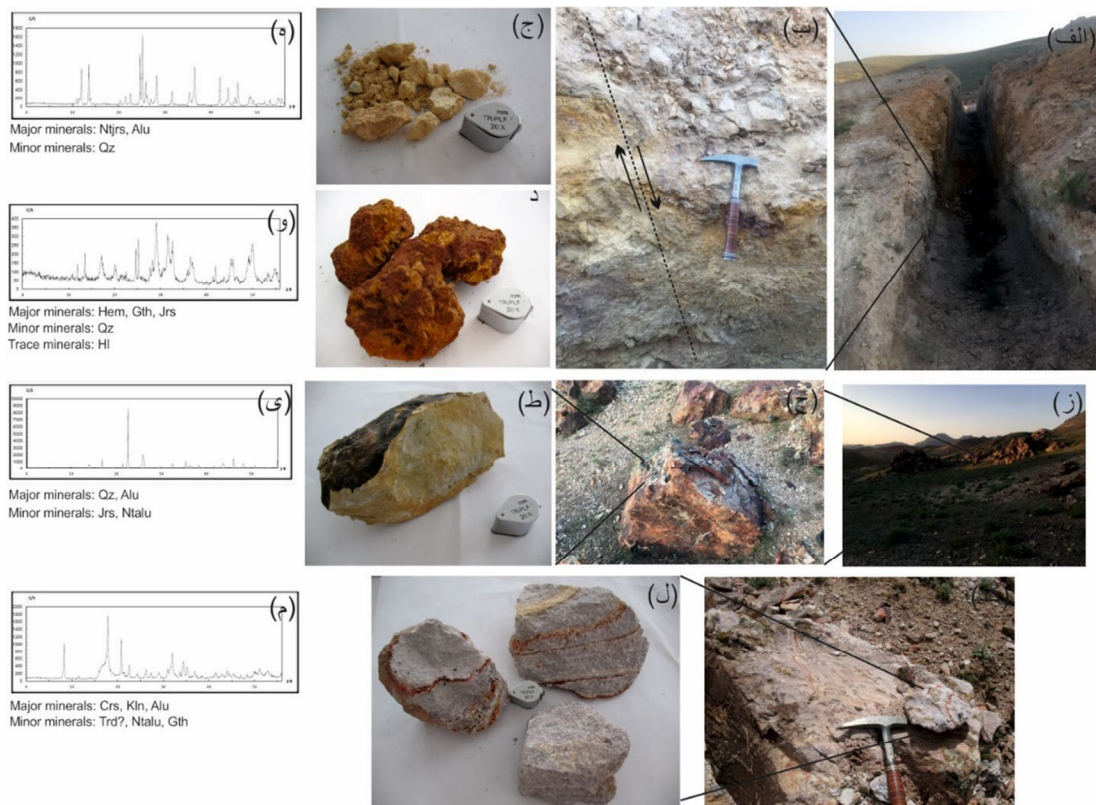
این نوع دگرسانی اغلب در نواحی کانه زایی شده و به ویژه، جنوب غرب منطقه مشاهده می شود و اغلب بر واحدهای نیمه عمیق، با جنس کوارتز دیوریتی تا کوارتز مونزونیتی، انطباق دارد (شکل های ۸-الف تا ۸-د). بافت استوک ورکی که معرف کان سارهای پورفیری است، در این سنگ ها به وضوح مشاهده می شود (شکل

این دگرسانی در برگه ۱۰۰۰۰۰ لاهرود، به ویژه در بخش جنوب غرب، گسترش چشمگیری دارد و اغلب در همراهی با بخش های سیلیسی شده یافت می شود. این نوع دگرسانی در اغلب واحدهای سنگی منطقه، از واحدهای آذرین خروجی تا آذرآواری و حتی نفوذی ها، مشاهده می شود. عملکرد آن اغلب مستقل از سنگ شناسی است و در شرایط زمین ساختی 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 کانی های سولفید و فراوانی بیشتر هماتیت، گوتیت و ژاروسیت در برخی نمونه ها شده است (شکل ۷-ج و ۷-د). مطالعات XRD نشان داده است که کانی های دگرسانی آرژیلیک پیشرفته، مانند ناتروژاروسیت (Ntjrs)، آلونیت، ژاروسیت و در برخی موارد، ژپس در نمونه های برداشت شده مشاهده می شود (جدول ۱ و شکل ۷-ه و شکل ۷-و).

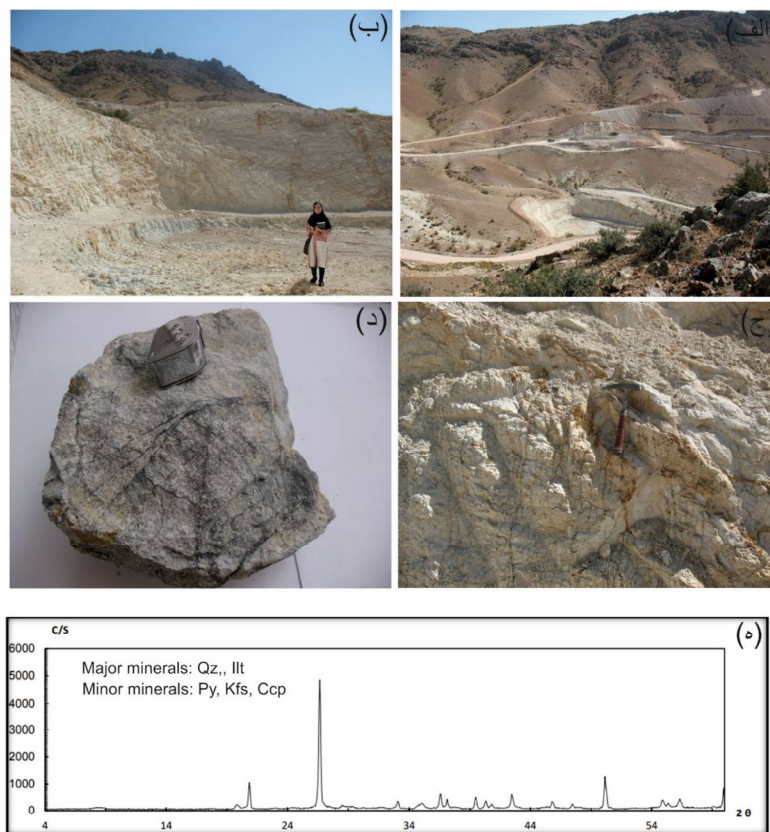
## ۴-۶-۴- دگرسانی پروپیلیتیک

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 بر اثر اکسید شدن پیریت ایجاد شده باشد.



شکل ۷. نمایی از ترانسه‌ای 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 ناتروژاروسیت، 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 (ح، 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

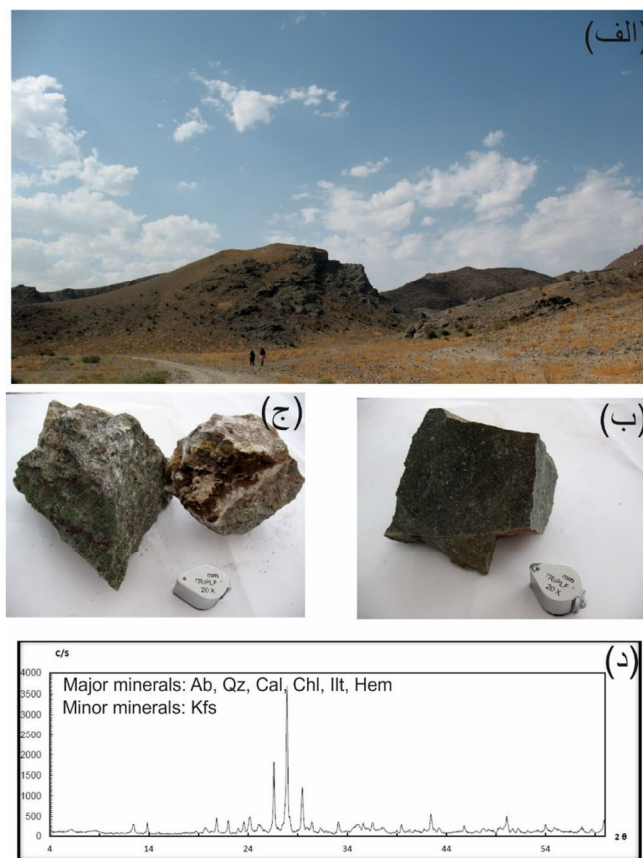
است (شکل ۱۰-ه). طبق مطالعات XRD، سیلیسی شدن و تشکیل کوارتز همراه با سایر دگرسانی‌ها نیز مشاهده می‌شود و مقادیر جزئی موسکویت و ایلیت نیز در نمونه‌ها به چشم می‌خورد (جدول ۱ و شکل‌های ۱۰-و و ۱۰-ز).

#### ۵- نتیجه‌گیری

بیشتر منطقه مورد مطالعه از سنگ‌های آتش‌فشانی اسیدی تا حدواسط دارای ترکیب آندزیتی و سن پالئوسن- ائوسن 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 مالاکیت به چشم می‌خورد (شکل ۱۰-د). در مواردی نیز، این دگرسانی به صورت کلاهک‌های سیلیسی در ارتفاعات دیده می‌شود که در واحد دگرسان‌شده کائولینیتی آلونیتی (A) قرار گرفته نفوذ ماگمایی، دارای ترکیب حدواسط با سن الیگوسن،

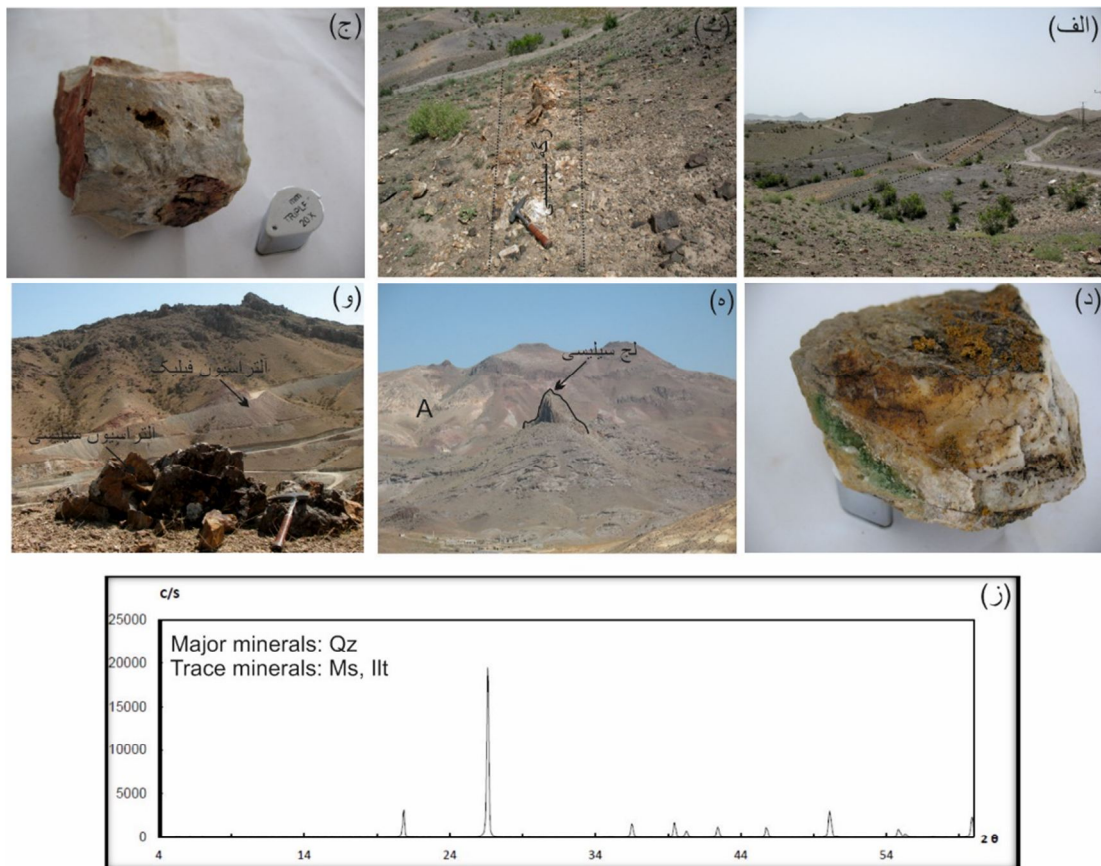




شکل ۹. نمایی از دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای ولکانیکی (الف)؛ نمونه دستی از دگرسانی پروپیلیتیک (ب، ج)؛ طیف XRD شامل کانی‌های اصلی آلبیت، کوآرتز، کلسیت، کلریت، ایلیت و هماتیت به همراه فلدسپار پتاسیم به‌منزله فاز فرعی (د) (حروف اختصاری برگرفته از: Whitney & Evans, 2010)

شناسایی مستقیم مناطق دگرسانی و مواد معدنی مس دار (با نمونه برداری مستقیم از محل کان سار و به کار بردن آن به‌منزله پیکسل آموزشی). از آنجاکه هدف این پژوهش اکتشاف کان سارهای مس پورفیری بود، به سنگ‌های آذرین اسیدی تا حدواسط که دگرسانی گسترده آرژیلیکی، فیلیکی و پروپیلیتیک 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 جالب توجهی 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 سنجنش از دور، به‌ویژه استر و سنتینل-۲ بوده است که به شناسایی دگرسانی‌های همراه با کان سارهای مس پورفیری بینجامد. این شناسایی براساس دو رویکرد انجام شد: شناسایی مناطق دگرسانی گرمایی مرتبط با کان سارهای مس پورفیری (از طریق کتابخانه طیفی) و



شکل ۱۰. نمایی از رخ نمون 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 دگرسان شده 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 دوست‌بیگلو) چشمگیر است. محصولات ناشی از پردازش، با نقشه زمین شناسی منتشر شده از منطقه مورد مطالعه، مقایسه شد و بنابر آن، مشخص شد که نقشه‌های به دست آمده با مدل زمین شناسی مفهومی کان سار مس پورفیری مطابقت دارد و دگرسانی‌ها مرتبط با توده‌های میزبان این تیپ کان سارهاست.

به وجود آورده است. از این رو پس از برداشت زمین شناختی و انجام دادن مطالعات XRD، روش‌های نقشه برداری کانی شناسی طیف مینا 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؛ به ویژه در تشخیص انواع دگرسانی‌های مرتبط با کان سارهای مس پورفیری. اگرچه تصاویر سنتینل، به دلیل قدرت تفکیک طیفی پایین در محدوده فرسرخ کوتاه، برای کانی‌های رسی نتایج رضایت بخشی در بر نداشت، در جداسازی کانی‌های حاوی آهن همچون هماتیت، ژاروسیت و گوتیت مطلوب بود و با استفاده از ترکیب رنگی، موجب نمایش منطقه معدنی صاحب دیوان 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 Noghadeh, 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 22-27<sup>th</sup>, <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/10.3390/0003-004X/10/0001-185\\$05.00/DOI:10.2138/am.2010.3371](https://doi.org/10.3390/0003-004X/10/0001-185$05.00/DOI:10.2138/am.2010.3371).

**This Page is Intentionally Left Blank**