



Enhancement of hydrothermal alteration zones and their relationship with faults using satellite images in the Talahoueieh polymetallic deposit, north of Bam

Jalal Hassanshahi¹, Majid Ghaderi^{2*}, Hossein-Ali Tajeddin³

¹ Ph.D. student, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Article Info	Abstract
Keywords: ASTER, Sentinel-2, Band ratios, Hydrothermal alteration, Faults, Talahoueieh deposit	The Talahoueieh Cu-(Pb-Zn-Ag-Fe) deposit is located in the southeastern section of the Urumieh-Dokhtar magmatic belt, 25 km north of Bam. The study area is composed of volcanic, sedimentary, and pyroclastic units; the main structures in the area trend NNW-SSE and NW-SE. The hydrothermal alteration has developed along the main fractures. Argillic, propylitic, and advanced argillic alteration features are widespread in the region. ASTER and Sentinel-2 data were used to highlight hydrothermal alteration zones and geological structures, respectively. Selective Principal Component Analysis (PCA) and Relative Band Depth (RBD) algorithms in ENVI software were utilized to highlight hydrothermal alteration zones, while Geomatica 2016 software was employed to enhance existing geological structures. The clay alteration zones (argillic, phyllic, and advanced argillic) were prominent in one group due to the low spectral resolution of ASTER in the SWIR spectral range and are recognizable in yellow, and the propylitic alteration zone in light green in the image. Using the Sentinel-2 band 4 and field surveys, structures were extracted, which generally trend NW-SE. According to the collected data, there is a direct relationship between geological structures, alteration, and mineralization in the Talahoueieh area.

*Corresponding author: Majid Ghaderi

Email: mghaderi@modares.ac.ir

<https://doi.org/10.48306/jgrs.2025.535382.1019>

Received November 2024; Accepted December 2024

©2025 Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. This is an open article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Extended abstract

1. Introduction:

Hydrothermal alteration, which affects a much larger volume of rock than the ore body itself, provides an important target for mineral exploration. With 6 bands in the SWIR range, ASTER has been utilized to enhance hydrothermal alteration zones. Additionally, the Sentinel-2 sensor was used in this study, with its 10-meter spatial resolution in band 4, to enhance and map structural lineaments. Field observations, including mineralized, altered, and faulted zones, were integrated with satellite data to analyze spatial correlations between mineralization and structures. The purpose of this study is to determine the relationship between mineralization and structural elements of the region and to determine areas with high potential for deposit exploration. Results demonstrate a strong relationship between mineralization and tectonic structures, highlighting the role of structural controls in ore localization. This integrated approach provides an efficient framework for delineating areas with high mineral potential.

The Talahoueieh copper (lead, zinc, silver, and iron) deposit is located at the southern end of the Urumieh-Dokhtar magmatic belt, 25 km north of Bam. The regional geology comprises a complex suite of volcano-sedimentary and volcanic rocks from rhyolite to basalt and intrusive bodies from granite to gabbro. Tectonic analysis indicates dominant NNW–SSE and NW–SE trending faults with right-lateral and normal displacements, while minor NNE–SSW and NE–SW faults show left-lateral movement. Hydrothermal alteration, including argillic, silicic, and propylitic zones, developed around semi-deep intrusions and major fractures, with argillic alteration being the most widespread. Mineralization occurs as polymetallic veins and skarn-type iron, with copper as the main mineral (chalcopyrite, bornite, covellite, malachite, chrysocolla) and lead-zinc minerals (galena, sphalerite, cerussite, hemimorphite). These geological and structural features provide a framework for understanding mineralization patterns and exploration potential.

2. Results

The ASTER image was used to highlight the alteration zones. Additionally, the Sentinel-2 image and field structural impressions were used to prepare the region's structural map. The average internal relative reflectance (IARR) was used to remove atmospheric effects from the dataset. This study applied the basic image processing method of Relative Band Depth (RBD) and Principal Component Analysis to enhance the alteration zones. To enhance the faults, the Sentinel-2 satellite image band 4 was used due to its high spatial resolution and the LINE tool in Geomatica 2016 software. In addition, field controls were also carried out to verify the accuracy of the lineaments extracted from this software.

ASTER sensor data and the selective Principal Component Analysis (PCA) algorithm were used to highlight phyllic, argillic, and propylitic alteration zones. The phyllic zone, characterized by the index mineral sericite (or muscovite), exhibits reflectance in ASTER bands 4 and 7 due to the presence of Al-OH, and absorption in bands 6 and 9. Therefore, bands 4, 6, 7, and 9 were selected in the corresponding principal component. The argillic zone, with kaolinite as the index mineral, shows reflectance in bands 4 and 7 and absorption in bands 5 and 6, leading to the selection of bands 4, 5, 6, and 7. In the propylitic zone (characterized by chlorite, epidote, and calcite), bands 5 and 9 show reflectance, while bands 7 and 8 exhibit absorption; thus, bands 5, 7, 8, and 9 were selected for this alteration zone. Additionally, to enhance the alteration zones, the following band ratios were used: $(7+9)/8$ for the propylitic zone, $(5+7)/6$ for the phyllic zone, and $(4+7)/6$ for the argillic zone. Due to spectral similarities, phyllic and argillic zones cannot be distinguished from each other and appear in yellow,

while the propylitic zone appears green. Furthermore, three threshold levels were applied for lineament extraction, and the results were validated and refined through field surveys.

3. Conclusion

By implementing the image-based methods, including PCA and RBD on the ASTER dataset with 6 bands in the SWIR range, and the results obtained from each of the above techniques, it can be concluded that in the image-based method of selective PCA and RBD, the alterations of the region are well evident and recognizable. Additionally, by identifying the structural elements of the region automatically with Geomatica 2016 software and field surveys, it can be concluded that the spread of alteration types is controlled by the main faults. In areas where the fault density is higher, alteration increases, and the increase in fractures in the region is directly related to the increase in alteration. Areas with high fracture can be given higher priority as exploration areas, as the possibility of mineralization in those areas is higher. Field observations confirm the results obtained.

بارسازی زون‌های دگرسانی گرمابی و ارتباط آنها با گسل‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

در کانسار چندفلزی تlahوئیه، شمال بم

جلال حسن‌شاهی^۱، مجید قادری^{۲*}، حسینعلی تاج‌الدین^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^{۲*} استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده:

کانسار مس- (سرب، روی، نقره و آهن) تlahوئیه در بخش جنوب‌شرقی کمربند ماگمایی ارومیه- دختر و در ۲۵ کیلومتری شمال بم واقع شده است. محدوده مورد مطالعه از واحدهای آتشفشانی، رسوبی و آذرآواری تشکیل شده است و ساختارهای اصلی در محدوده دارای روند NW-SE و NNW-SSE می‌باشند. در امتداد ساختارهای اصلی، واحدهای دگرسانی گرمابی گسترش قابل توجهی دارند. گسترش دگرسانی‌ها در محدوده به ترتیب شامل دگرسانی‌های آرژیلیک، پروپیلیتیک و آرژیلیک پیشرفته است. از داده‌های سنجنده استر (ASTER) و الگوریتم‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی (Selective PCA) و عمق نسبی باند (RBD) در نرم‌افزار ENVI برای بارسازی زون‌های دگرسانی گرمابی و از داده سنتینل-۲ و نرم‌افزار Geomatica 2016 برای بارسازی ساختارهای زمین‌شناسی موجود استفاده شد. زون‌های دگرسانی آرژیلیک و فیلیک به دلیل عدم تفکیک توسط روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی و عمق نسبی باند، در یک گروه بارز شدند. با استفاده از باند ۴ سنجنده سنتینل-۲ و برداشت‌های صحرایی، ساختارهای زمین‌شناسی استخراج شدند که عموماً دارای روند NW-SE می‌باشند. با توجه به اطلاعات استخراج شده، ارتباط مستقیمی میان ساختارهای زمین‌شناسی، دگرسانی گرمابی و کانه‌زایی در محدوده تlahوئیه وجود دارد.

واژگان کلیدی: سنجنده استر (ASTER)، سنتینل-۲، نسبت باندی، دگرسانی گرمابی، گسل‌ها، کانسار تlahوئیه

۱- مقدمه

در بیشتر سامانه‌های گرمایی، دگرسانی چندین برابر حجم سنگ اثر می‌گذارد. بنابراین، دگرسانی هدف بسیار بزرگتری را برای شناسایی و نقشه‌برداری یک سامانه گرمایی نسبت به یک کانسار فراهم می‌نماید و معمولاً به عنوان شاخص نزدیکی به سنگ معدن در اکتشاف مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ridley, 2013). بسیاری از ذخایر معدنی، ویژگی‌های سطحی مانند دگرسانی گرمایی، گوسان، گسل‌ها و شکستگی‌ها را نشان می‌دهند و سنجش از دور، روشی استاندارد در اکتشافات معدنی است که امکان شناسایی چنین ویژگی‌هایی را با هزینه کمتر و در مدت زمان اندک فراهم می‌نماید (Aramesh Asl et al., 2015). دگرسانی در ذخایر گرمایی مانند کانسارهای مس پورفیری عموماً از یک مجموعه پروپیلیتیک که در حاشیه کانسار قرار دارد، از کانی‌هایی نظیر کلسیت، کلریت و اپیدوت تشکیل شده‌اند. زون آرژیلیک در قسمت‌های داخلی‌تر کانسار قرار دارد و از کانی‌هایی نظیر کائولینیت، دیکیت و مونتوریلونیت تشکیل شده است. زون‌های دگرسانی فیلیک (سریسیت و ایلیت)، آرژیلیک پیشرفته (آلونیت، پیروفیلیت) و پتاسیک (بیوتیت و ارتوکلاز) از دیگر زون‌های دگرسانی تشکیل‌دهنده کانسارهای گرمایی می‌باشند (Aramesh Asl et al., 2015). یک زون شسته شده که روی کانسارهای گرمایی ایجاد شده است، حاوی مقادیر مختلفی از هماتیت، لیمونیت، گوتیت و ژاروسیت است (Di Tommaso and Rubinstein, 2007). کانی‌های دگرسان شده، معمولاً ویژگی‌های جذب خاصی را در طیف الکترومغناطیسی فروسرخ موج کوتاه (SWIR) بروز می‌دهند که نشان‌دهنده قابلیت افزایش مواد معدنی از طریق مطالعات سنجش از دور است (Crosta et al., 2003). سنجنده استر (ASTER) یک رادیومتر چندطیفی پیشرفته است که بر روی ماهواره ترا (TERRA)، محصول مشترک سازمان فضایی ناسا و ژاپن نصب شده است. استر یک محدوده شامل ۱۴ باند طیفی از طول موج‌های مرئی تا فروسرخ گرمایی، با تفکیک مکانی، طیفی و رادیومتری بالا را پوشش می‌دهد. تصویربرداری در محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR) (0.52-0.86) میکرومتر، در ۳ باند با تفکیک مکانی ۱۵ متر، در محدوده فروسرخ موج کوتاه (SWIR) (1.6-2.43) میکرومتر، ۶ باند با تفکیک مکانی ۳۰ متر و فروسرخ گرمایی (TIR) (11.65-12.5) میکرومتر، ۵ باند با تفکیک مکانی ۹۰ متر صورت می‌پذیرد. با توجه به اینکه ASTER دارای ۶ باند در محدوده SWIR (ویژگی‌های جذبی و بازتابی کانی‌های رسی در این محدوده قرار دارند) است، از این سنجنده برای بارزسازی زون‌های دگرسانی رسی و همچنین از سنجنده سنتینل-۲ با توجه به توان تفکیک مکانی ۱۰ متر در باند ۴ به منظور بارزسازی خطواره‌ها در این مطالعه استفاده شده است. تعیین ارتباط کمی و کیفی میان نقاط معدنی شناخته شده با عناصر ساختاری، یکی از فاکتورهای مهم در برنامه اکتشافی است. با توجه به مشخص شدن ارتباط نزدیک کانه‌زایی با ساختارهای تکتونیکی، تعیین ارتباط در راستای شناخت هرچه بهتر و دقیق‌تر این ذخایر امری ضروری به نظر می‌آید (رنگزن و همکاران، ۱۳۸۶). زمین‌شناسان از ابتدا دریافته‌اند که خطواره‌ها بازتاب‌دهنده نواحی ضعف ساختاری یا جابه‌جایی‌های ژرف در پوسته زمین هستند. این ساختارهای خطی در تصاویر سنجش از دور یا عکس‌های هوایی معمولاً به صورت مرزها و شکستگی‌هایی ظاهر می‌شوند که تفاوت‌های ظریف در روشنایی یا بافت سطحی را ایجاد می‌کنند؛ به همین دلیل، تشخیص آنها در بسیاری از موارد نیازمند تفسیر دقیق است. از دیدگاه زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی، خطواره‌ها می‌توانند نشانگر یک یا چند پدیده زیر باشند. ۱-

¹ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Radiometer

² Lineaments

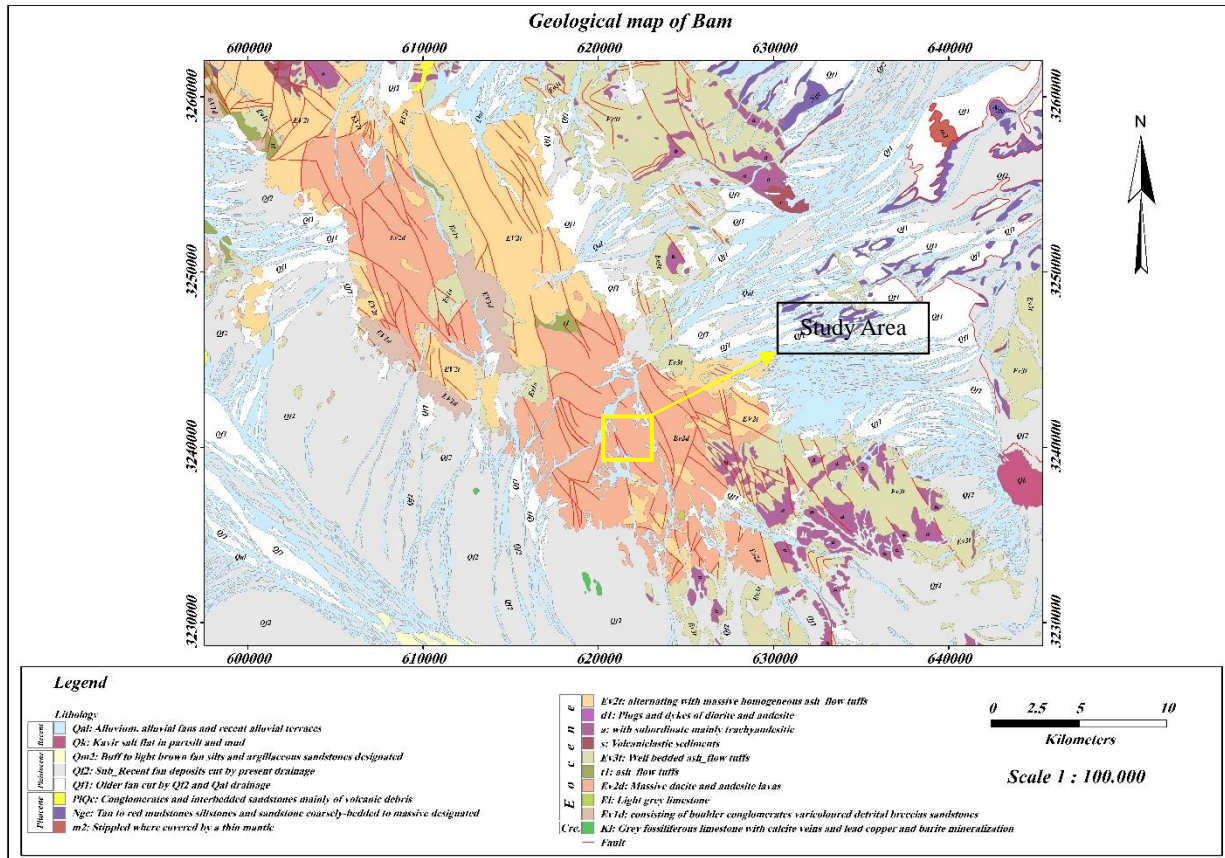
مسیر مستقیم جریان‌ها و دره‌ها: بسیاری از رودخانه‌ها و دره‌ها در امتداد شکستگی‌ها یا گسل‌های موجود در پوسته زمین شکل می‌گیرند. این راستاهای خطی در نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که جریان آب از مسیرهای ساختاری تبعیت می‌کند. ۲- فروافتادگی‌های خطی در سطح زمین: گسل‌های عمیق و پهنه‌های برشی می‌توانند موجب ایجاد فرونشست یا گودی‌های کشیده شوند. این فروافتادگی‌ها اغلب در تصاویر به صورت خطوط تیره یا روشن قابل مشاهده‌اند و بیانگر ساختارهای تکتونیکی هستند. ۳- تغییرات در رنگ یا بافت خاک (تن‌خاک): تغییرات در ترکیب کانی‌شناسی یا رطوبت خاک در امتداد ساختارهای زمین‌شناسی موجب ایجاد تفاوت‌های طیفی می‌شود که در تصاویر سنجش از دور به صورت نوارهای خطی ظاهر می‌گردند. ۴- تغییر در رشد پوشش گیاهی: وجود شکستگی‌ها یا گسل‌ها می‌تواند شرایط رطوبتی یا زهکشی را تغییر دهد و رشد گیاهان را در امتداد خاصی تشویق یا محدود کند. این تفاوت‌ها در عکس‌های هوایی یا تصاویر ماهواره‌ای به خوبی قابل مشاهده است. ۵- تفاوت در نوع پوشش گیاهی یا تغییر ارتفاع: تنوع گونه‌های گیاهی یا تغییر ارتفاع زمین در امتداد ساختارهای خطی نیز می‌تواند به تشخیص خطواره‌ها کمک کند؛ زیرا گونه‌های خاص ممکن است در ارتفاعات یا خاک‌های متفاوت رشد کنند. ۶- تغییرات ناگهانی در توپوگرافی: تغییرات شدید شیب یا شکست‌های ناگهانی در عوارض زمین، مانند دیواره‌های گسلی یا پرتگاه‌ها، اغلب نشانه وجود خطواره‌ها هستند. این تغییرات به‌ویژه در مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) و سایه‌زنی‌ها قابل مشاهده است (Hung et al., 2005). شناسایی خطواره‌ها از طریق داده‌های سنجش از دور با استفاده از دو تکنیک اصلی به دست می‌آید. اول، داده‌های خطی را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های بارزسازی تصویر (یکپارچه‌سازی تصویر، فیلتر تشخیص لبه جهت‌دار) بارز و یک نقشه خطواره را با استفاده از تکنیک‌های رقومی کردن دستی تولید کرد (Arlegui and Soriano, 1998; Suzen and Toprak, 1998). دوم، یک نقشه خطواره ممکن است با استفاده از نرم‌افزار و الگوریتم‌های کامپیوتری تولید شود (Burdick and Speirer, 1980; Karnieli et al., 1996; Baumgartner et al., 1999; Hung et al., 2002, 2003). هدف از انجام این مطالعه، تعیین ارتباط میان کانه‌زایی و عناصر ساختاری منطقه و تعیین مناطق دارای پتانسیل بالا با هدف اکتشاف مواد معدنی می‌باشد. در این راستا، از داده‌های مختلف نظیر برداشت‌های صحرایی مناطق دارای کانه‌زایی، دگرسانی و گسل‌ها و در نهایت از داده‌های ماهواره‌ای به جهت بارزسازی دگرسانی‌ها و گسل‌ها استفاده شده است.

۲- زمین‌شناسی

ایالت فلززایی ارومیه- دختر از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری دارای محدوده ترکیبی از ریولیت تا بازالت و همچنین توده‌های نفوذی با ترکیب گرانیت تا گابرو تشکیل شده است. براساس ویژگی‌های ماگمایی و کانی‌شناسی (به‌ویژه مس)، کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر را می‌توان به سه ناحیه جنوبی (کرمان)، مرکزی (تفت، انار و کاشان- قم) و شمالی (تفرش- تکاب) تقسیم نمود (Ghorbani, 2013). کمر بند مس کرمان در بخش جنوب‌شرق ایالت فلززایی ارومیه- دختر قرار دارد. این بخش، دارای پتانسیل بالای کانه‌زایی مس می‌باشد. در این کمر بند، رشته‌کوه‌های جبال بارز با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق کشیده شده‌اند. فعالیت آتشفشانی در این منطقه از کرتاسه پسین شروع شده و تا ائوسن میانی- پایانی ادامه داشته است (Valeh, 1972). توده‌های بزرگی از رخنمون‌های گرانیت و گرانودیوریت را می‌توان در جنوب و شرق منطقه یافت. علاوه بر این توده‌ها، گنبد‌های داسیت متعددی نیز در این منطقه شکل گرفته‌اند. این گنبد‌های داسیتی، سنگ‌های آتشفشانی را می‌پوشانند (Ghorbani,

(2013). نقشه برداری ناحیه‌ای کمر بند مس کرمان، الگوهای متمایز سنگ‌های آرژیلیک و فیلیک را نشان می‌دهد که می‌تواند با ویژگی‌های ساختاری منطقه‌ای و فرآیندهای تکتونیکی مرتبط باشد و در ارزیابی‌های کنایبی منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. این الگوهای ناحیه‌ای، تفاوت‌های قابل توجهی را از نظر اکسیدهای اصلی و محتویات عناصر کمیاب نشان می‌دهند که منعکس کننده تغییرات در ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی مناطق معدنی و گرمایی تغییر یافته است (Ziaii et al., 2019).

کانسار مس (سرب، روی، نقره و آهن) تلاه‌وئیه در بخش انتهایی کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر و در ۲۵ کیلومتری شمال بم واقع شده است. محدوده مورد مطالعه از نظر توپوگرافی از تپه‌ماهورها در قسمت مرکزی تا غرب و قسمت‌های مرتفع و کوهستانی در شرق و شمال شرق آن تشکیل شده است. واحدهای اصلی سنگ‌شناسی شامل واحدهای آتشفشانی- رسوبی، آتشفشانی و نفوذی می‌باشد، به طوری که اغلب محدوده مورد مطالعه را سنگ‌های آذرین تشکیل می‌دهد و واحدهای رسوبی (کنگلوما و آهک) گسترش چندانی ندارند (شکل ۱). از ویژگی‌های این منطقه، وجود توالی نسبتاً کاملی از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی و جایگیری توده‌های نفوذی در دوران سنوزوئیک است. بررسی این توالی‌های سنگی و تغییرات جانبی آنها نشان می‌دهد محدوده مورد مطالعه در این دوران (سنوزوئیک)، از نظر تکتونیکی بسیار فعال بوده و به دلیل نزدیکی با زون گسلی نابیند، فعالیت لرزه‌خیزی چشمگیری دارد. واحدهای آتشفشانی- رسوبی در حاشیه شمال و جنوب غرب محدوده قرار گرفته‌اند و شامل شیل توفی، کنگلوما و آهک می‌باشند. در قسمت‌های مرکزی محدوده، سنگ‌های آتشفشانی ایگنمبریت و آگلوما توسعه یافته‌اند و علاوه بر آن، واحدهای داسیت تا آندزیت اغلب به رنگ ارغوانی تا خاکستری تیره در قسمت‌های شمال، شمال شرق و شرق محدوده برونزدگی دارند و معمولاً ارتفاعات را پوشش داده‌اند. در قسمت‌های شمالی محدوده، در تماس با واحدهای آتشفشانی، بعضاً رخنمون‌هایی از توده نفوذی دیده می‌شود. از نظر تکتونیکی، روند اصلی گسل‌ها در محدوده مورد مطالعه NNW-SSE و NW-SE است. جهت جابجایی گسل‌های اصلی منطقه، امتدادلغز راستگرد با مؤلفه نرمال است. بخش دیگری از گسل‌های منطقه که نسبت به گسل‌های قبلی تعداد کمتری را شامل می‌شوند، دارای روند NNE-SSW و NE-SW می‌باشند. جهت جابجایی این گسل‌ها، امتدادلغز چپگرد است. دگرسانی منطقه در اطراف توده‌های نیمه عمیق و شکستگی‌های اصلی شکل گرفته است. با توجه به توده‌های نفوذی، روند زون دگرسانی، شمال غرب- جنوب شرق است. کانی‌سازی در محدوده کانسار تلاه‌وئیه به دو صورت رگه‌ای چندفلزی مس- سرب- روی در واحدهای آتشفشانی و اسکارن آهن (مگنتیت و هماتیت) در همبری توده نفوذی و آهک قابل شناسایی است. کانه‌زایی مس، مهمترین کانه‌زایی محدوده تلاه‌وئیه را تشکیل داده و به صورت رگه‌ای، رگه- رگچه‌ای، جانیشینی و پرکننده فضای خالی (به شکل ثانویه) در سنگ‌های توفی و ایگنمبریتی و گاهی داسیتی رخ داده است. کانی‌سازی مس دارای کانی‌شناسی کالکوپیریت، بورنیت، کوولیت، مالاکیت، کریزوکولا؛ سرب و روی به صورت کانی‌های گالن، اسفالریت، سروریت و همی مورفیت نیز در بخش‌هایی از محدوده تلاه‌وئیه قابل مشاهده است. براساس مطالعات صحرائی صورت گرفته در محدوده مورد مطالعه، دگرسانی‌های آرژیلیک، سیلیسی و پروپیلیتیک، گسترده‌ترین دگرسانی‌های منطقه هستند. در این میان، زون دگرسانی آرژیلیک از گسترش قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ بم (محدوده مورد مطالعه با کادر زرد رنگ بر روی نقشه مشخص شده است) (Eftekharijad, 1992)

۳- داده‌ها و روش‌ها

۳-۱- داده‌ها

در این مطالعه، به منظور بارزسازی زون‌های دگرسانی گرمایی، تصویر بدون پوشش ابر استر (ASTER) که در تاریخ ۱۸ جولای ۲۰۰۰ اخذ شده، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به منظور تهیه نقشه ساختاری منطقه از تصویر سنتینل-۲ که در تاریخ ۲۳ سپتامبر ۲۰۱۷ گرفته شد در برداشت‌های ساختاری صحرائی استفاده شده است. برای بهره‌گیری از داده‌های سنجنده استر، انجام پیش‌پردازش‌هایی مانند تصحیح جوی، ضروری است. در این مطالعه، از میانگین بازتاب نسبی داخلی (IARR) به منظور حذف اثرات جوی از مجموعه داده‌ها، استفاده شده است. در روش IARR نیازی به اطلاعات طیف‌نگاری صحرائی و مطالعات میدانی نیست و الگوریتم روش مذکور به صورت خطی بر روی همه ناهنجاری‌های بازتابی، اثری مشابه ایجاد می‌کند. این روش بر روی داده‌های به دست آمده از مناطق با اقلیم خشک و فاقد پوشش گیاهی، نتیجه مطلوبی در برخواهد داشت. در منطقه مورد مطالعه، به دلیل داشتن آب و هوای گرم و خشک و نداشتن پوشش گیاهی انبوه، از همین روش استفاده شده است. در این مطالعه، برای بارزسازی زون‌های دگرسانی از روش‌های پردازشی تصویر پایه عمق نسبی باند (Relative Band Depth) و

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis) استفاده شده است. در پردازش‌های تصویر پایه، بدون استفاده از طیف‌های مرجع، تصاویر پردازش می‌شوند.

۳-۲- تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی (Selective PCA)

از آنجایی که داده‌های چندطیفی، اغلب دارای همبستگی بالایی هستند، تحلیل مؤلفه اصلی برای تولید باندهای غیرهمبسته استفاده می‌شود. الگوریتم محورهای متعامدی را از میانگین داده‌ها می‌سازد و آن‌ها را می‌چرخاند تا بیشترین واریانس ممکن حاصل شود. به ازای هر باند ورودی یک PC خروجی است و اولین PC شامل بالاترین درصد از واریانس داده‌ها و PC دوم شامل بزرگترین واریانس داده‌ها بعد از PC اول و در آخرین PC نویزها حضور دارند، زیرا در PC آخر واریانس داده‌ها بسیار کوچک است که بیشتر به دلیل وجود نویز در داده‌های طیفی اصلی است (Richards, 1999). در روش PCA انتخابی، فقط تعدادی از باندهای سنجنده‌ی چندطیفی به‌عنوان باندهای ورودی انتخاب می‌شوند. این روش به کاهش ابعاد داده‌ها کمک می‌کند، در حالی که میزان اطلاعات از دست رفته در اجزای حذف‌شده را به حداقل می‌رساند (Chaves et al., 1982; Chavez et al., 1984). در این روش، باندهای ورودی براساس ویژگی‌های طیفی کانی‌های آبدار و سنگ‌های دگرسان شده انتخاب می‌شوند. در محدوده طول موجی ۱/۶۵ میکرومتر، سنگ‌های دگرسان شده دارای بالاترین بازتاب و در محدوده طول موجی ۲/۲ میکرومتر، کانی‌های آبدار دارای جذب قوی هستند (Kaufman, 1988). کانی‌های شاخص زون دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت، اپیدوت، کلسیت) به دلیل دارا بودن بنیان کربناتی و Fe-Mg(OH) در باند ۸ سنجنده ASTER جذب و در باندهای ۷ و ۹ سنجنده ASTER دارای بازتاب هستند. به همین دلیل، از باندهای ۵، ۷، ۸ و ۹ سنجنده ASTER برای آشکارسازی این زون دگرسانی استفاده شده است. کانی شاخص زون دگرسانی فیلیک، مسکوویت یا سریسیت ریزدانه است که به دلیل دارا بودن عامل هیدروکسیل و Al-OH در باندهای ۴ و ۷ سنجنده ASTER بازتاب و دارای یک جذب اصلی در باند ۶ و یک جذب ثانویه در باند ۹ است. در نتیجه، در PC انتخابی برای بارزسازی زون دگرسانی فیلیک از باندهای ۴، ۶، ۷ و ۹ سنجنده ASTER استفاده شده است. کانی شاخص زون دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت) از کانی‌های رسی است که به دلیل دارا بودن عامل هیدروکسیل و Al-OH در باندهای ۴ و ۷ بازتاب و در باندهای ۵ و ۶ سنجنده ASTER دارای جذب است. به همین دلیل، در PC انتخابی برای بارزسازی زون دگرسانی آرژیلیک از باندهای ۴، ۵، ۶ و ۷ سنجنده ASTER استفاده شده است.

۳-۳- عمق نسبی باند (Relative Band Depth)

یکی دیگر از روش‌های رایج در پردازش تصویر، روش عمق نسبی باند (Relative Band Depth) است. این روش، اثرات توپوگرافی و سایه‌ها را از میان برده و یک سری نویزها را افزایش و سری دیگر را کاهش می‌دهد. علاوه بر آن، اختلاف میان درجات روشنایی را آشکار کرده و مرزها را مشخص تر می‌نماید (Crowley et al., 1989). تصاویر نسبت ویژه‌ای برای نمایش تضاد طیفی سیمای جذبی در دورسنجی زمین‌شناختی به کار گرفته شده‌اند. در این روش، برای نمایش هر سیمای جذبی، مخرج کسر باندی است که نزدیکترین موقعیت به جذب را اشغال کرده و صورت کسر مجموع دو باند بازتابی مجاور آن می‌باشد.

برای مشخص کردن یک ماده مشخص نسبت‌گیری باندی این اجازه را می‌دهد که الگوریتم پردازش را وارد کرده و آن را بر روی تصویر اجرا نمائید. به‌طور کلی، نسبت‌گیری باندی، تکنیکی از پردازش است که اعداد روشنایی یک باند بر باند دیگر تقسیم می‌شود. از نسبت‌گیری باندی برای بارز نمودن تفاوت‌های میان باندها و کاهش دادن اثر توپوگرافی استفاده می‌شود. این تکنیک برای بارز نمودن مواد مشخصی استفاده می‌شود که در باندهای خام نمی‌توانند مشخص گردند (Rowan et al., 1977). برای آشکارسازی زون‌های دگرسانی از کانی‌های شاخص هر زون استفاده می‌شود. در زون دگرسانی پروپیلیتیک، کانی‌های کلریت، اپیدوت و کلسیت به‌دلیل جذب عمیقی که در باند ۸ سنجنده ASTER دارند و از طرفی دارای بازتاب در باندهای ۷ و ۹ می‌باشند، از نسبت باندی $(9+7)/8$ برای آشکارسازی این زون استفاده می‌شود. کائولینیت، کانی شاخص زون دگرسانی آرژیلیک در باندهای ۵ و ۶ سنجنده ASTER جذب و در باندهای ۴ و ۷ دارای بازتاب است. به همین دلیل، از نسبت باندی $(7+4)/5$ برای بارزسازی کانی‌های کائولینیت و مونتموریلونیت به عنوان زون دگرسانی آرژیلیک استفاده می‌شود. سریسیت کانی شاخص زون دگرسانی فیلیک در باند ۶ سنجنده ASTER، جذب و در باندهای ۵ و ۷، بازتاب دارد. در نتیجه، نسبت باندی $(7+5)/6$ برای بارزسازی زون دگرسانی فیلیک به‌کار گرفته شده است.

۳-۴- استخراج خطواره‌ها

برای بارزسازی گسل‌ها از باند ۴ تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به‌دلیل تفکیک مکانی بالا (۱۰ متر) و ابزار LINE نرم‌افزار Geomatica 2016 استفاده شده است. این ابزار، عناصر خطی موجود در تصویر را مشخص و آن را به‌صورت یک فایل برداری ذخیره می‌کند. پارامترهای پردازشی که باید حد آستانه‌ای (جدول ۱) آنها را در نرم‌افزار Geomatica 2016 مشخص نمود در زیر آمده است:

- **RADI (Filter Radius)** شعاع فیلتر: اندازه کرنل گوسین را تعیین می‌کند. هر چه مقدار شعاع فیلتر بزرگتر باشد، مقدار نویز در نتایج آشکارسازی خطواره‌ها کمتر است.
- **GTHR (Edge Gradient Threshold)** حد آستانه‌ای شیب خطواره‌ها: مقدار حد آستانه‌ای شیب تصویر به‌وسیله پارامتر GTHR تعریف می‌شود. این مقدار باید در محدوده بین صفر تا ۲۵۵ باشد. مقادیر متفاوت می‌تواند ارزیابی شود و یکی از مناسب‌ترین آنها انتخاب گردد.
- **FTHR (Line Fitting Threshold)** حد آستانه‌ای پر کردن خط: چشم‌پوشی برای پر کردن خطواره‌های منحنی تعریف می‌شود. این مقدار براساس تعداد پیکسل تعیین می‌شود و خطواره‌های تکه‌تکه‌ای که فاصله آنها کمتر از حد آستانه‌ای باشد به‌هم متصل می‌شوند.
- **LTHR (Curve Length Threshold)** حد آستانه‌ای طول منحنی: حداقل طول یک خط (براساس پیکسل) است تا نرم‌افزار آن را به عنوان یک خطواره مشخص کند.
- **ATHR (Angular Difference Threshold)** حد آستانه‌ای تفاوت زاویه‌ای: بیشینه زاویه بین دو بردار به‌منظور اتصال دو خطواره به یکدیگر است.

- DTHR (Linking Distance Threshold) حد آستانه‌ای فاصله پیوند: بیشینه فاصله میان دو بردار به‌منظور اتصال دو خطواره به یکدیگر است.

جدول ۱. حد آستانه‌ای تعیین شده در نرم‌افزار Geomatica 2016 برای بارسازی عناصر ساختاری در محدوده مورد مطالعه

حدود آستانه‌ای تعیین شده	
Filter Radius (Pixels)	50
Edge Gradient Threshold	80
Curve Length Threshold (Pixels)	30
Line Fitting Error Threshold (Pixels)	3
Angular Difference Threshold (Degrees)	30
Linking Distance Threshold (Pixels)	20
Filter Radius (Pixels)	50
Edge Gradient Threshold	100
Curve Length Threshold (Pixels)	30
Line Fitting Error Threshold (Pixels)	3
Angular Difference Threshold (Degrees)	30
Linking Distance Threshold (Pixels)	20
Filter Radius (Pixels)	50
Edge Gradient Threshold	120
Curve Length Threshold (Pixels)	30
Line Fitting Error Threshold (Pixels)	3
Angular Difference Threshold (Degrees)	30
Linking Distance Threshold (Pixels)	20

علاوه بر این، به‌منظور صحت‌سنجی خطواره‌های استخراج شده از این نرم‌افزار، کنترل‌های صحرائی نیز انجام شده است. شناسایی عناصر ساختاری به‌ویژه گسل‌ها و ارتباط آنها با توده نفوذی در مناطق متأثر از فعالیت‌های ماگمایی، راهنمای مناسبی در شناسایی و اکتشاف مواد معدنی است، زیرا محل برخورد گسل‌ها می‌تواند ناحیه مناسبی جهت نفوذ ماگما و کانه‌زایی باشد. در این مطالعه، لایه‌های اطلاعاتی دگرسانی‌ها به‌وسیله نرم‌افزار ENVI استخراج شده و شکستگی‌ها در سامانه GIS گردآوری شدند. با انطباق دادن لایه‌های دگرسانی و گسل‌ها در نرم‌افزار GIS، ارتباط میان شکستگی‌ها و دگرسانی‌ها مشخص گردید.

4- نتایج و بحث

در تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی، انتخاب باندها براساس شاخص‌های جذبی و بازتابی کانی‌ها در محدوده VNIR و SWIR است. بدین منظور، برای بارزسازی زون‌های دگرسانی، از باندهای طیفی که کانی‌های شاخص دگرسانی در آن محدوده جذب یا بازتاب دارند، استفاده شده است.

• زون دگرسانی فیلیک

کانی شاخص زون دگرسانی فیلیک (مسکوویت یا سریسیت ریزدانه) از کانی‌های رسی است که به دلیل دارا بودن عامل هیدروکسیدی و Al-OH در باندهای ۴ و ۷ بازتاب و در باندهای ۶ و ۹ سنجنده ASTER دارای جذب است. در PC انتخابی برای بارزسازی زون دگرسانی فیلیک از باندهای ۴، ۶، ۷ و ۹ ASTER استفاده شده است. در بارگذاری‌های ویژه‌بردارهای مربوط به PCA در PC 1 مربوط به تصویر آلبدو است و از آن در بارزسازی دگرسانی‌ها نمی‌توان استفاده نمود. PC 2 بالاترین بارگذاری ویژه‌بردارها مربوط به باند ۷ (باند بازتاب) است و زون دگرسانی فیلیک با پیکسل‌های روشن بارز می‌شود. همچنین در PC 3 در باند ۹ (باند جذب) بارگذاری بالایی از ویژه‌بردار وجود دارد و زون دگرسانی فیلیک به صورت پیکسل‌های تیره بارز خواهد شد (جدول ۲). از PC 2 برای بارزسازی زون دگرسانی فیلیک استفاده شده است (شکل ۲ الف).

جدول ۲. بارگذاری‌های ویژه‌بردارهای مربوط به زون دگرسانی فیلیک

Eigenvector	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Band 4	0.61	0.46	0.49	0.39
Band 6	0.72	-0.45	-0.06	-0.51
Band 7	-0.08	-0.75	0.42	0.48
Band 9	-0.29	0.08	0.75	-0.58

• زون دگرسانی آرژیلیک

کانی شاخص زون دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت) از کانی‌های رسی است که به دلیل دارا بودن عامل هیدروکسیدی و Al-OH در باندهای ۴ و ۷ ASTER دارای بازتاب و در باندهای ۵ و ۶ ASTER دارای جذب است. به همین دلیل، در PC انتخابی برای بارزسازی زون دگرسانی آرژیلیک از باندهای ۴، ۶، ۷ و ۹ ASTER استفاده شده است. در بارگذاری‌های ویژه‌بردارهای مربوط به PCA در PC 2، باند ۷ دارای بارگذاری بالا در باند بازتاب می‌باشد. با توجه به علامت ویژه‌بردارها در باند اشاره شده، زون دگرسانی آرژیلیک به صورت پیکسل‌های روشن بارز می‌شود. PC 1 تصویر آلبدو است و در بارزسازی زون‌های دگرسانی از آن نمی‌توان استفاده کرد. همچنین در PC 4 به دلیل افزایش نویز، زون دگرسانی آرژیلیک به خوبی قابل تشخیص نمی‌باشد (جدول ۳). از PC 2 برای بارزسازی زون دگرسانی آرژیلیک استفاده شده است (شکل ۲ ب).

جدول ۳. بارگذاری‌های ویژه‌بردارهای مربوط به زون دگرسانی آرژیلیک

Eigenvector	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Band 4	0.60	0.45	0.44	0.48
Band 5	0.74	-0.26	-0.60	-0.11
Band 6	0.20	0.41	0.22	-0.85
Band 7	0.21	-0.74	0.61	-0.14

• زون دگرسانی پروپیلیتیک

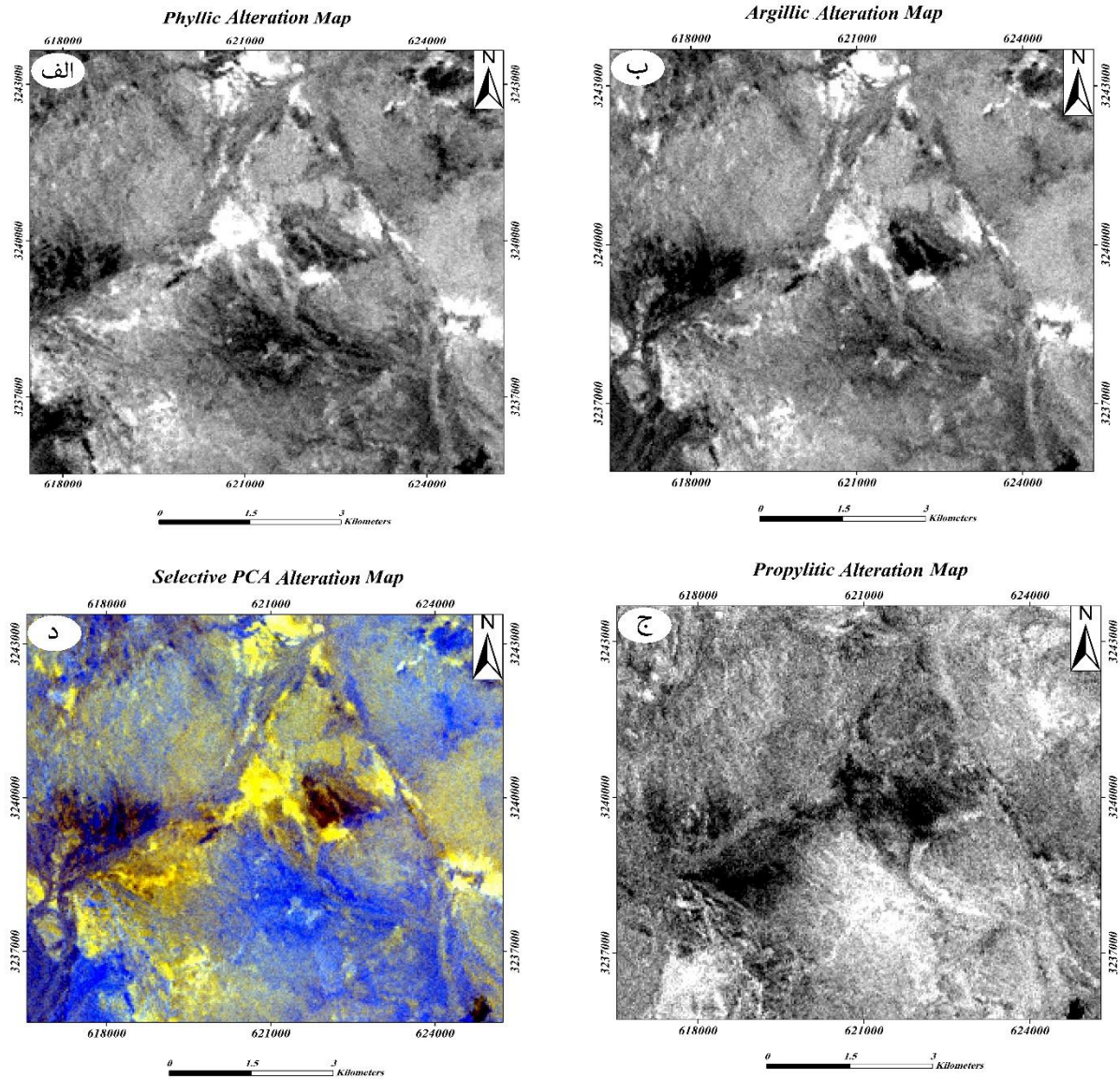
کانی‌های شاخص زون دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت، اپیدوت، کلسیت) به دلیل دارا بودن بنیان کربناتی و Fe-Mg(OH) در باند ۷ و ۸ سنجنده ASTER جذب و در باندهای ۵ و ۹ سنجنده ASTER دارای بازتاب هستند. باندهای انتخابی ۵ و ۷ و ۸ و ۹ برای آشکارسازی زون دگرسانی پروپیلیتیک استفاده شده است. در بارگذاری‌های ویژه‌بردارهای مربوط به PCA در PC1 تصویر آلبو است و برای بارزسازی دگرسانی استفاده نمی‌شود. در PC 3 با توجه به مقدار ویژه‌بردار در باندهای بازتابی، زون دگرسانی پروپیلیتیک به صورت پیکسل‌های تیره بارز می‌شود. بدین منظور، زون دگرسانی به خوبی بارز نمی‌شود. همچنین در PC4 با توجه به مقدار بالای ویژه‌بردار در باند جاذب (باند ۸)، زون دگرسانی پروپیلیتیک به صورت پیکسل‌های تیره بارز می‌شود، اما به دلیل افزایش نویز در این PC زون دگرسانی پروپیلیتیک به خوبی قابل تشخیص نمی‌باشد (جدول ۴). از PC3 برای بارزسازی زون دگرسانی پروپیلیتیک استفاده شده است (شکل ۲ ج).

جدول ۴. بارگذاری‌های ویژه‌بردارهای مربوط به زون دگرسانی پروپیلیتیک

Eigenvector	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Band 5	-0.50	-0.53	-0.53	-0.42
Band 7	-0.73	-0.10	0.33	0.58
Band 8	0.36	-0.37	-0.51	0.68
Band 9	0.27	-0.75	0.58	-0.11

با بررسی نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی بر روی داده‌های ASTER می‌توان نتیجه گرفت که با اجرای این روش بر روی این دسته داده، به دلیل حضور ۶ باند در محدوده SWIR، زون‌های دگرسانی به خوبی بارز می‌شوند، اما به دلیل شباهت طیفی که میان کانی‌های رسی (در اینجا سریسیت و کائولینیت) دیده می‌شود، امکان تفکیک زون دگرسانی فیلیک از آرژیلیک وجود ندارد و به همین دلیل، در یک گروه بارز می‌شوند. در شکل ۲ د، تصویر رنگی دروغین که از مؤلفه‌های اصلی انتخابی و بدون تغییر ایجاد شده است، امکان تفکیک زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک به دلیل شباهت‌های طیفی کانی‌شناسی که دارند، وجود ندارد و به همین دلیل، به رنگ زرد قابل تشخیص می‌باشند. زون دگرسانی پروپیلیتیک نیز به رنگ قهوه‌ای در تصویر دیده می‌شود. دلیل رنگ قهوه‌ای در این تصویر، تداخل طیف‌های کانی‌شناسی رسی (کائولینیت، سریسیت) با پروپیلیتیک

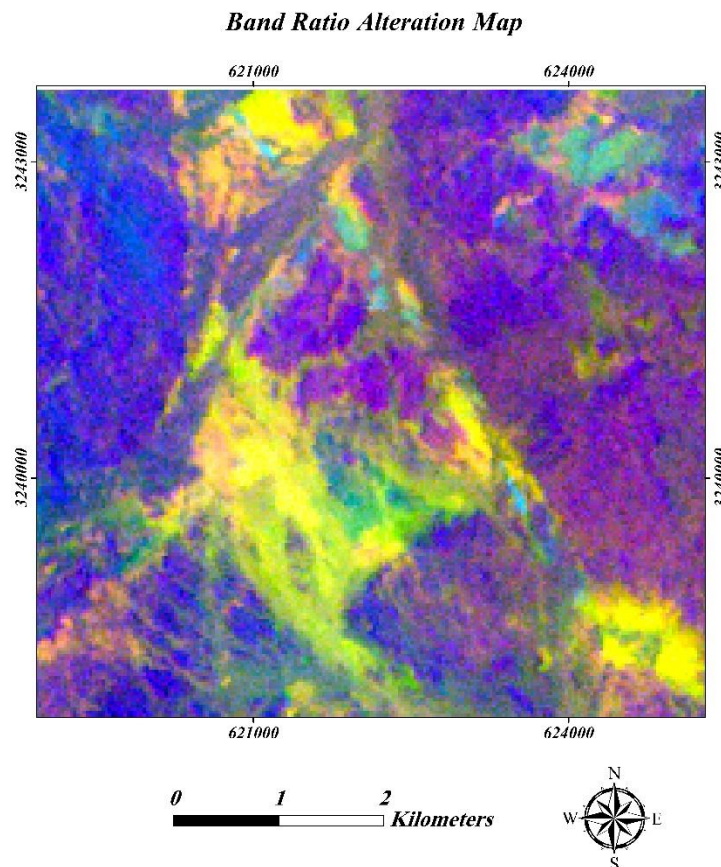
(کلسیت، کلریت، اپیدوت) است. به عبارت دیگر، پیکسل‌های تصویر از طیف‌های کانی‌شناسی شاخص تشکیل نشده و دارای اختلاط می‌باشد.



شکل ۲. بارزسازی زون‌های دگرسانی به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی در محدوده مورد مطالعه: الف، ب) زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک با پیکسل‌های روشن و رنگ سفید قابل تشخیص است. ج) زون دگرسانی پروپیلیتیک با پیکسل‌های تیره و رنگ سیاه دیده می‌شود. د) تصویر رنگی دروغین از زون‌های دگرسانی بارز شده؛ در این تصویر زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک به رنگ زرد و زون دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ قهوه‌ای قابل تشخیص می‌باشند.

برای آشکارسازی زون‌های دگرسانی با استفاده از الگوریتم عمق نسبی باند، از کانی‌های شاخص مربوط به هر زون دگرسانی استفاده می‌شود. برای بارزسازی زون دگرسانی پروپیلیتیک از نسبت باندهی $8/(9+7)$ ASTER، برای بارزسازی زون دگرسانی

فیلیک از نسبت بانندی $(\gamma+5)/6$ ASTER و برای بارزسازی زون دگرسانی آرژیلیک از نسبت بانندی $(\gamma+4)/6$ ASTER استفاده شده است. زون‌های دگرسانی آرژیلیک و فیلیک بارز شده به رنگ زرد و زون دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز می‌باشد (شکل ۳). به دلیل شباهت طیفی که در میان کانی‌های رسی (سریسیت و کائولینیت) وجود دارد، این الگوریتم قادر به جداسازی زون دگرسانی فیلیک از آرژیلیک نشد و این دو زون در یک گروه بارز شدند. در ترکیب رنگی دروغین، زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک دارای همپوشانی هستند و با رنگ زرد نشان داده شده‌اند. زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک در بخش‌های مرکزی و جنوب‌غرب تصویر (در ترکیب رنگی دروغین به رنگ زرد) و زون دگرسانی پروپیلیتیک نیز (در ترکیب رنگی دروغین به رنگ سبز) در بخش‌های مرکزی و جنوب‌غرب محدوده گسترش بیشتری دارند.



شکل ۳. ترکیب رنگی دروغین از زون‌های دگرسانی بارز شده در محدوده مورد مطالعه؛ در این تصویر، زون‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک به رنگ زرد و زون دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز قابل تشخیص است.

برای استخراج خطواره‌ها به روش خودکار از چندین حدود آستانه‌ای و تصویر سنجنده سنتینل-۲ (باند ۴) استفاده شده است. باند ۴ سنجنده سنتینل-۲ دارای توان تفکیک مکانی ۱۰ متر و در شناسایی و بارزسازی خطواره‌ها دارای دقت بالاتر نسبت به سنجنده استر است. به منظور افزایش دقت در استخراج خطواره‌ها از سه حد آستانه‌ای استفاده شده که در هر سه حد آستانه‌ای، خطواره‌های استخراج شده به روش خودکار کاملاً بر هم منطبق بوده‌اند. در جدول ۱، حدود آستانه‌ای برای استخراج خطواره‌ها و

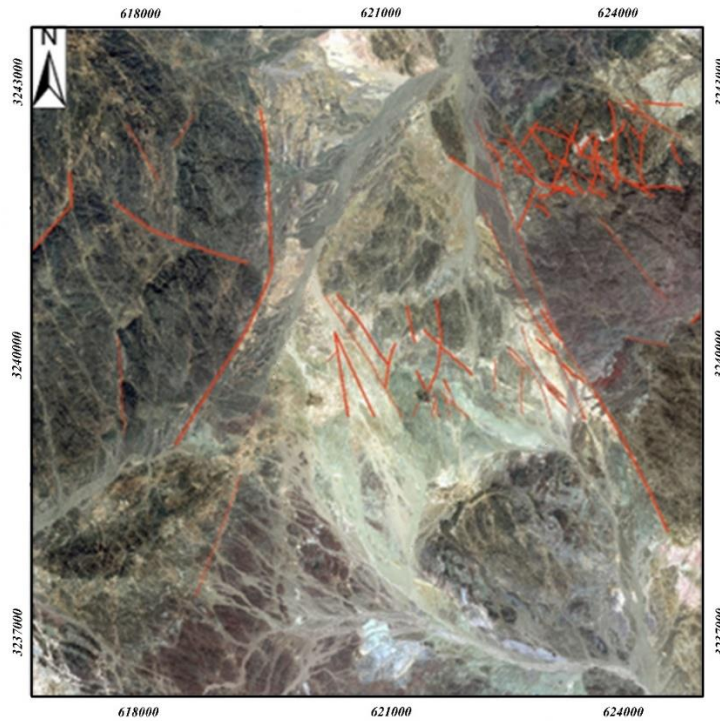
در شکل ۴، خطواره‌های استخراج شده به روش خودکار از نرم‌افزار Geomatica 2016 نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است تصحیحات گسل‌های استخراج شده از نرم‌افزار با استفاده از برداشت‌های صحرایی به‌منظور صحت‌سنجی و افزایش دقت اطلاعات انجام گردیده است.

شکل ۵ ارتباط میان دگرسانی‌های بارز شده با روش نسبت بانندی و شکستگی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این شکل ارتباط میان شکستگی‌ها و دگرسانی‌ها به‌خوبی قابل تشخیص است و مناطق با شکستگی بالا دارای گسترش بیشتر دگرسانی می‌باشد.

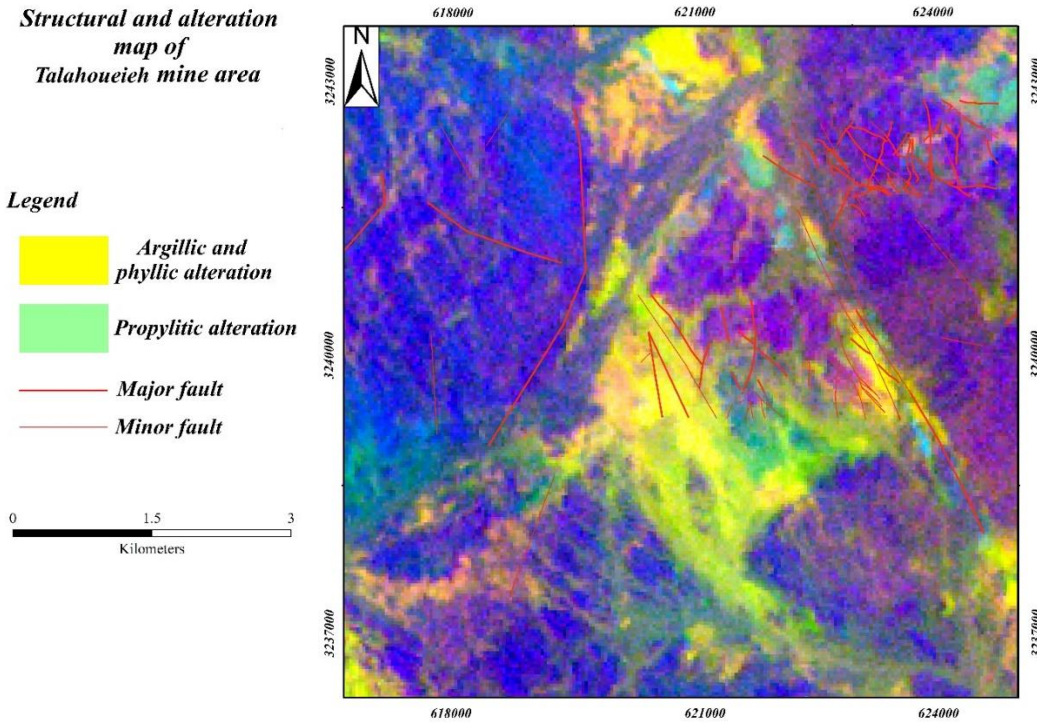
Structural map of Talahouieih mine area

Legend

- Major fault
- Minor fault



شکل ۴. تلفیقی از استخراج عناصر ساختاری منطقه با استفاده از نرم‌افزار Geomatica 2016 و برداشت صحرایی گسل‌ها.



شکل ۵. ارتباط میان دگرسانی‌های بارز شده با روش نسبت بانندی و شکستگی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه.

5- نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر، بارزسازی و تفکیک زون‌های دگرسانی و تعیین ارتباط آنها با عناصر ساختاری در منطقه تلاه‌وئیه است. پس از شناخت و مطالعه دقیق ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص هر زون، هر کدام از این کانی‌ها باید به‌طور جداگانه تحت پردازش پیشرفته مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. با اجرای روش‌های تصویرپایه شامل PCA و RBD بر روی دسته داده ASTER با داشتن ۶ باند در محدوده SWIR (ویژگی‌های جذبی و بازتابی کانی‌های رسی در این محدوده قرار دارند) و نتایج حاصل از هر یک از روش‌های فوق می‌توان چنین نتیجه گرفت که در روش تصویرپایه PCA انتخابی و عمق نسبی باند (RBD) دگرسانی‌های منطقه به‌خوبی بارز و قابل تشخیص هستند. اما با توجه به شباهت‌های طیفی که میان کانی‌های رسی وجود دارد، کانی‌های شاخص دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک (سریسیت و کائولینیت) از یکدیگر قابل تفکیک نیستند. همچنین، با مشخص شدن عناصر ساختاری منطقه به روش خودکار توسط نرم‌افزار Geomatica 2016 و برداشت‌های صحرائی می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که گسترش دگرسانی‌ها توسط گسل‌های اصلی کنترل شده و به‌نظر می‌رسد پراکندگی آنها تابعی از گسل‌های اصلی منطقه باشد. محل دگرسانی‌های مهم موجود در منطقه (فیلیک و آرژیلیک) با شکستگی‌ها ارتباط مکانی نزدیکی دارد. آبراهه‌های اصلی می‌توانند به عنوان گسل‌های اصلی شناسایی شوند و در قسمت‌هایی که تراکم گسل بالاتر رود، دگرسانی افزایش پیدا می‌کند و افزایش شکستگی‌ها در منطقه با افزایش دگرسانی رابطه مستقیم دارد. مناطقی با شکستگی بالا را می‌توان به عنوان مناطق اکتشافی، اولویت بالاتری داد که امکان کانه‌زایی در آن مناطق بالاتر است.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از رساله دکتری نویسنده اول در دانشگاه تربیت مدرس است. نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس و نیز از شرکت معدنی ایکو به جهت فراهم آوردن امکان این مطالعه سپاسگزاری می‌نمایند. از نقطه‌نظرات ارزشمند داوران گرامی که موجب بهبود مقاله گردید تشکر می‌گردد.

منابع:

- رنگزن، ک.، زراسوندی، ع.، مهرابی، ع.، تعیین ارتباط بین کانه‌زایی مس و عناصر ساختاری به‌منظور تعیین مناطق با پتانسیل مناسب با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS. مطالعه موردی منطقه شهر بابک، استان کرمان، مجله علوم دانشگاه شهید چمران، ش. ۱۷، قسمت ب، ۱۳۸۶.
- Abrams, M., Tsu, H., Hulley, G., Iwao, K., Pieri, D., Cudahy, T., Kargel, J. (2015) The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 38, 292–301.
- Arlegui, L.E., Soriano, M.A. (1998) Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain). *International Journal of Remote Sensing* 19(16), 3169–3185.
- Aramesh Asl, R., Afzal, P., Adib, A., Yasrebi, A.B. (2015) Application of multifractal modeling for the identification of alteration zones and major faults based on ETM+ multispectral data. *Arabian Journal of Geosciences* 8(5), 2997–3006.
- Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H. (1999) Automatic road extraction based on multi-scale grouping and context. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65, 777–785.
- Burdick, R.G., Speirer, R.A. (1980) Development of a method to detect geologic faults and other linear features from LANDSAT images, U.S. Bureau of Mines Report Inv., 8413:74.
- Chavez, P.S., Berlin, G.L., Sowers, L.B. (1982) Statistical Method for Selecting Landsat MSS Ratio. *Applied Photographic Engineering I*, 23–30.
- Chavez, P.S., Guphill, S.C., Bowell, J. (1984) Image Processing Techniques for Thematic Mapper Data. *Proceedings of the 50th Annual ASP-ACSM Symposium, American Society of Photogrammetry, Washington D.C.*, p. 728–743.
- Crosta, A.P., DE Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C. (2003) Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing* 10(21), 4233–4240.
- Crowley, J.K., Brickey, D.W., Rowan, L.C. (1989) Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: Mineral discrimination using relative absorption band-depth images. *Remote Sensing of Environment* 29, 121–134.
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N. (2007) Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 32(1-2), 275–290.
- Eftekharnejad, J. (1992) Geological map of Bam, scale 1:100,000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Hung, L.Q., Dinh, N.Q., Batelaan, O., Tam, V.T., Lagrou, D. (2002) Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La-NW Vietnam). *Journal of Cave and Karst Studies* 64(1), 23–33.
- Ghorbani, M. (2013) *The Economic Geology of Iran: Mineral Deposits and Natural Resources*. Springer, 450 p.

- Hung, L.Q., Batelaan, O. (2003) Environmental geological remote sensing and GIS analysis of tropical karst areas in Vietnam, Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Toulouse, France, 21-25 July 2003, v. IV, 2964–2966.
- Hung, L.Q., Batelaan, O., De Smedt, F. (2005) Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology, v. 5983. SPIE.
- Tommaso, I.D., Rubinstein, N. (2007) Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. Ore Geology Reviews 32(2), 275–290.
- Kaufman, H. (1988) Mineral exploration along the Aqaba-Levanat structure by use of TM data, Concepts, processing and results. International Journal of Remote Sensing 9(10-11), 1630–1658.
- Karnieli, A., Meisels, A., Fisher, L., Arkin, Y. (1996) Automatic extraction of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough Transform, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 62, 525-531.
- Richards, J.A. (1999) Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 240 p.
- Ridley, J. (2013) Ore Deposit Geology. Cambridge University Press.
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H., Ashley, R.P. (1977) Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images. Geophysics 42(3), 522–535.
- Suzen, M.L., Toprak, V. (1998) Filtering of satellite images in geological lineament analyses: An application to a fault zone in Central Turkey. International Journal of Remote Sensing 19, 1101–1114.
- Valeh, N. (1972) Geological map of Iran sheet 7647: Jebal Barez. Geological Survey of Iran, Tehran, Offset Press Incorporated.
- Ziiai, M., Safari, S., Timkin, T., Voroshilov, V., Yakich, T. (2019) Identification of geochemical anomalies of the Porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: A case study, Jebal-Barez area, Iran. Journal of Geochemical Exploration 199, 16–30.