



کاربرد داده‌های ابرطیفی PRISMA در بارزسازی دگرسانی‌های گرمابی با استفاده الگوریتم‌های پردازش تصویر پایه

مینا ابولی^۱، مهدی هنرمند^۲، رضا حسن زاده^۲، هادی شهریاری^۳، مهدیه حسینجان‌زاده^۲

^۱دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان؛ aboli.m614@gmail.com

^۲دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان؛ mehonarmand167@gmail.com

^۳دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان؛ shahriarihi@gmail.com

چکیده

شناسایی و نقشه‌برداری زون‌های دگرسانی گرمابی در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. به منظور بارزسازی این مناطق در بخش شمالی کمربند مس کرمان از تصاویر ابرطیفی ماهواره PRISMA با سطح پردازشی L2D استفاده گردید. بدین منظور با استفاده از روش‌های ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌های باندی و ترکیب مولفه‌های اصلی دگرسانی‌های فیلیک-آرژیلیک عمدتاً منطبق بر واحدهای دیوریت پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری و دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای تراکی آندزیت، تراکی بازالت و فلیش‌های شرق محدوده بارز شدند. مقایسه نتایج پردازش تصاویر ابرطیفی PRISMA با مطالعات صحرایی نشان داد، این تصاویر توانایی بیشتری در بارزسازی هاله دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک برای اکتشاف کانسارهای نوع پورفیری در بخش شمالی کمربند مس کرمان دارند.

واژه‌های کلیدی

تصاویر فراطیفی، کانی‌زایی مس، تصاویر ماهواره‌ای PRISMA، دگرسانی گرمابی



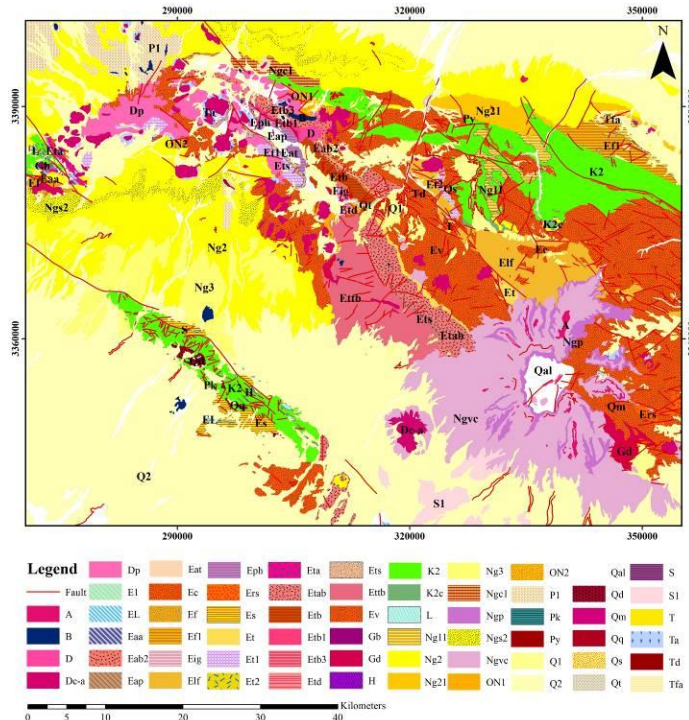
۱. مقدمه

امروزه ذخایر مس پورفیری جزو منابع اصلی تولید مس در جهان بوده و با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص، دگرسانی و ارتباط با سایر ساختارهای زمین‌شناسی، یک موقعیت یکتا و خاص داشته و این ویژگی‌ها سبب می‌شود که شناسایی، اکتشاف و بهره‌برداری از این کانسارها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار باشد [۱]. محدوده مورد مطالعه در کمربند مس کرمان بوده انواع مختلفی از دگرسانی در واحدهای سنگی این محدوده مشاهده می‌شود. با توجه به این مورد که کانی‌های دگرسانی در محدوده طول موجی فرورسرخ موج کوتاه یا SWIR سیمای جذبی خاصی از خود نشان می‌دهند، داده‌های سنجنش از دوری کاربرد بالایی در شناسایی آنها خواهند داشت [۲]. تصاویر ماهواره‌ای سنجنش از دور با توجه به قدرت تفکیک مکانی و طیفی که دارند، جهت نقشه‌برداری از مناطق دگرسانی گرمایی مرتبط با کانسارهای مس پورفیری مفید واقع می‌شوند.

در سال‌های اخیر داده‌های ماهواره‌ای ابرطیفی PRISMA که توسط آژانس فضایی ایتالیا در اختیار عموم قرار گرفته‌اند، توجه محققین زیادی در حوزه سنجنش از دور را به خود جلب نموده‌اند. از جمله مطالعات محدودی که در زمینه اکتشاف مواد معدنی با بکارگیری داده‌های ابرطیفی PRISMA صورت گرفته است، می‌توان به مطالعه‌ی Bedini و Chen (۲۰۲۰) که کاربرد تصاویر ابرطیفی PRISMA را برای اکتشافات معدنی در منطقه نوادا ایالات متحده آمریکا ارزیابی نمودند، اشاره کرد. آنها با استفاده از الگوریتم برآوردگر انسجام تطبیقی (Adaptive Coherence Estimator algorithm) این داده‌ها را تجزیه و تحلیل نموده و توزیع مکانی آلونیت، کائولینیت و مسکوویت را به دقت نقشه‌برداری کردند و در نتیجه مطالعه آنها مشخص شد داده‌های ابرطیفی PRISMA ابزار مفیدی برای پروژه‌های اکتشافی کانی‌ها در محیط‌های خشک و نیمه خشک هستند [۳]. Daniela Heller Pearlshtien و همکاران (۲۰۲۱) توانایی محصولات ابرطیفی PRISMA و حسگر ابرطیفی هوابرد AsiaFENIX 1k را برای نقشه‌برداری مواد معدنی و زمین‌شناسی مورد ارزیابی قرار دادند و طبق مطالعات صورت گرفته، قابلیت‌های دقیق PRISMA امکان تشخیص را نه تنها بر اساس موقعیت جغرافیایی بلکه بر اساس فراوانی محتوا فراهم می‌کند و این ماهواره داده‌های کالیبره شده خوبی را از نظر عملکرد طیفی و رادیومتری ارائه کرده است [۴]. همچنین Bedini و Chen (۲۰۲۲) مجدداً با استفاده از تصاویر ابرطیفی ماهواره‌ای PRISMA به مطالعه مناطق کانی‌سازی اقتصادی و شناسایی مناطق دگرسانی هیدروترمال در مرکز گرینلند شرقی پرداختند و نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد این داده‌ها پتانسیل بالایی در اکتشاف کانی‌سازی‌های اقتصادی دارند [۵]. با توجه به مطالعات صورت گرفته، در این مطالعه به بررسی و بارزسازی دگرسانی‌های موجود در منطقه شمال کمربند مس کرمان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای PRISMA و روش‌های مختلف پردازش تصویر ترکیب رنگی، نسبت بانندی و تحلیل مولفه اصلی پرداخته شده است.

۲. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه به لحاظ زمین‌شناسی و ساختاری در زون آتشفشانی- رسوبی، ارومیه- دختر واقع شده است. پیکره اصلی سنگی این منطقه از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و آذرآواری که توسط توده‌های نفوذی الیگومیوسن متعددی قطع شده‌اند، تشکیل یافته است. توده‌های نفوذی دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری سنگ‌های آتشفشانی با ترکیبات ریوداسیت تا آندزیت و تراکی بازالت را قطع نموده‌اند و موجب توسعه هاله‌های دگرسانی از نوع آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک در آنها شده است [۶]. کانی‌زایی مس پورفیری در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و از مهمترین کانسارهای شناخته شده در این محدوده می‌توان به میدوک، آبدر، سرنو، کدر، ایجو، گودکلواری و غیره اشاره نمود (شکل ۱، جدول ۱).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه شامل واحدهای (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دهج، انار، شهربابک و رباط [۷])

جدول ۱. خلاصه واحدهای سنگی نقشه زمین‌شناسی

Name	Lithology
Q	Quaternary; Dasht : gravel fans
P	Plio-pleistoc.; Conglomerate and sandstone of volcanic composition
Dc-a	Plio-pleistoc.; Hornblende- biotite andesite-Dacites and andesites
B	Plio-pleistoc.; Olivine-basalt
Ng	Neogene; Sandstones, microconglomerates with opal and halite
ON	Oligo-Miocene; Lower Red Beds Formation-Red sandstone and conglomerate
D	Eocene-Oligocene; Gabbro- doprite and diorite
Dp	Eocene-Oligocene; Diorite-porphyrite and quartz diorite-porphyrite
E	Eocene; Andesite-basaltc , albite- trachytic-Volcanic- sedimentary- formation
Gb	Cretaceous; Gabbro. minor pyroxenite and peridotite
K	Cretaceous; "Coloured melange" : spilitic agglomerates,diabases,basalts and chert
S	Cretaceous; Serpentinites

۳. مواد و روش‌ها

۱.۳. داده‌های مورد استفاده

ماهواره تصویربرداری فراطیفی PRISMA توسط آژانس فضایی ایتالیا در تاریخ ۲۲ مارس ۲۰۱۹ به فضا پرتاب شد [۸]. این داده‌های ماهواره‌ای توسط ۲۴۰ باند طیفی در محدوده طول موجی ۰.۴ تا ۲.۵ میکرومتر (۶۶ باند در محدوده طیفی مرئی تا مادون قرمز نزدیک و ۱۷۴ باند در محدوده فرورسرخ موج کوتاه) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر ارائه می‌شوند. این ماهواره علاوه بر باندهای مرئی، فرورسرخ نزدیک (VNIR) و فرورسرخ موج کوتاه، دارای باندهای پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی ۵ متر (۰.۴ تا ۰.۷ میکرومتر) می‌باشد. داده‌های ماهواره‌ای PRISMA توسط یک سنسور پوش بروم با طول تصویر ۳۰ کیلومتر، وضوح طیفی حدود ۱۲ نانومتر و ظرفیت ثبت روزانه ۲۲۳ تصویر معادل ۲۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع برداشت می‌شوند (جدول ۲).



جدول ۲. مشخصات فنی تصویر PRISMA [۹]

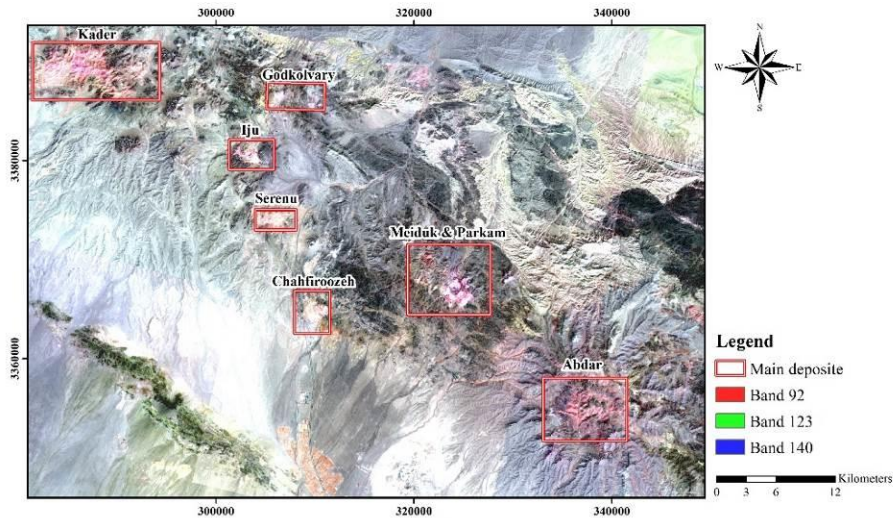
مشخصات اصلی تصویر PRISMA	
طول تصویر / میدان دید لحظه ای	۳۰ کیلومتر / ۲.۴۵ درجه
قدرت تفکیک مکانی	تصاویر فراطیفی : ۳۰ متر تصویر پانکروماتیک: ۵ متر
پیکسل فضایی	تصاویر فراطیفی : ۱۰۰۰ تصویر پانکروماتیک: ۶۰۰۰
محدوده طول موج	مرئی-فروسرخ نزدیک : ۴۰۰ - ۱۰۱۰ نانومتر فروسرخ موج کوتاه: ۹۲۰ - ۲۵۰۵ نانومتر
قدرت تفکیک طیفی	≥ ۱۲ نانومتر
تعداد باندهای طیفی	مرئی-فروسرخ نزدیک : ۶۶ فروسرخ موج کوتاه: ۱۷۴
قدرت تفکیک رادیومتری	۱۲ بیت
نسبت سیگنال به نویز مرئی-فروسرخ نزدیک	>200: 1 on 400 - 1000 nm >500:1 @ 650 nm
نسبت سیگنال به نویز فرسرخ موج کوتاه	>200: 1 on 1000 - 1750 nm >400:1 @ 1550 nm >100: 1 on 1950 - 2350 nm >200:1 @ 2100 nm
نسبت سیگنال به نویز پانکروماتیک	>240: 1
دقت رادیومتری مطلق	بیشتر از ۵ درصد

۲.۳. پیش پردازش و پردازش تصویر

در ابتدا به منظور بررسی دگرسانی‌های گرمایی محدوده، بایستی تاثیر عمق جذب محدوده‌های طیفی مربوط به بخار آب و اتمسفر را از داده‌ها حذف نمود تا در فرآیند پردازش‌های طیفی اختلال ایجاد نشود. سپس به منظور حذف اثر لیخند و کاهش نویز تصویر، روش تبدیل کسر حداقل نویز (MNF) بر روی دسته داده‌ها اعمال شد و اطلاعات باقیمانده با استفاده از الگوریتم Inverse MNF Transform به فضای اولیه بازگردانده شدند. به منظور کالیبره کردن داده‌ها تصحیح کالیبراسیون بازتاب نسبی متوسط داخلی (IARR) بر روی آن‌ها اعمال گردید. در این مطالعه از ترکیبات رنگی کاذب، نسبت‌های باندی و تحلیل مولفه اصلی جهت نمایش و بارسازی واحدهای دگرسانی استفاده شده است.

۴. بحث و نتایج

ایجاد و توسعه روش‌های نوین در بحث اکتشافات معدنی برای شناسایی دگرسانی‌ها، ساختارهای زمین‌شناسی و سایر عوامل موثر در کانی‌زایی یکی از اولویت‌های مطالعاتی با رویکرد جهانی می‌باشد. در این مطالعه، از ترکیب رنگی ۹۲، ۱۲۳ و ۱۴۰ برای ایجاد دید کلی از دگرسانی‌ها با استفاده از تصاویر فراطیفی PRISMA استفاده شده است (شکل ۲). استفاده از رنگ‌ها به‌عنوان یک روش ساده و کاربردی در پردازش تصاویر، برای نمایش تصاویر چند طیفی و فراطیفی و تفسیر آن‌ها بسیار موثر است. این روش امکان افزایش قدرت تشخیص و تفسیر واحدهای مختلف زمین‌شناسی را فراهم می‌کند و این امکان را به ما می‌دهد که چند باند را در یک تصویر نمایش دهیم و به‌وسیله آن، اطلاعات بیشتری را انتقال دهیم. براساس این ترکیب رنگی دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز در واحدهای سنگی فلیشی شمال شرق محدوده و آمیزه‌ی رنگین دیده می‌شود. دگرسانی فیلک و آرژیلیک نیز به رنگ صورتی کانسارهای شاخص محدوده بارز شده است.



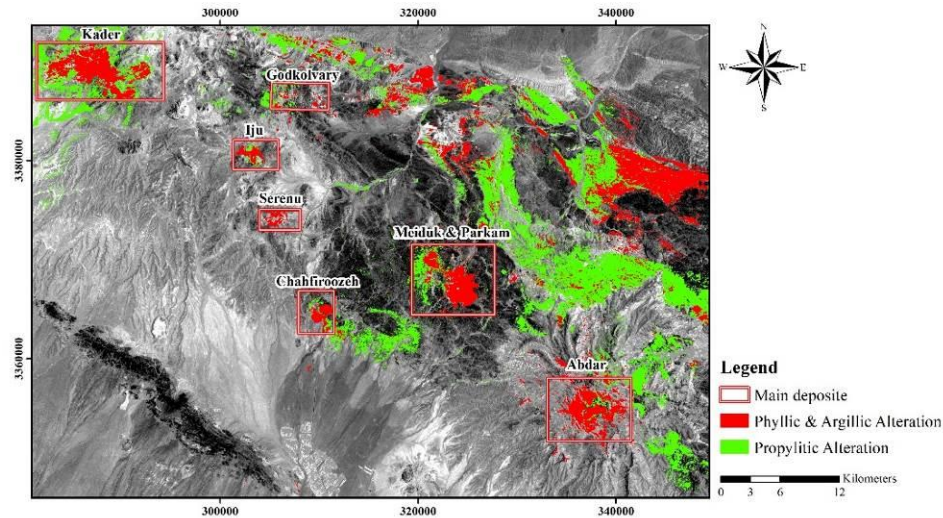
شکل ۲ تصویر ترکیب رنگی PRISMA باندهای ۹۲، ۱۲۳ و ۱۴۰.

روش نسبت بانندی یکی دیگر از ابزارهای پرکاربرد و ساده جهت بارزسازی واحدهای سنگی و دگرسانی و اکسیدهای آهن می‌باشد. پس از اعمال نسبت‌های بانندی مناطق هدف با پیکسل‌های روشن بارز می‌شوند.

جدول ۳. نسبت‌های بانندی استفاده شده در این تحقیق.

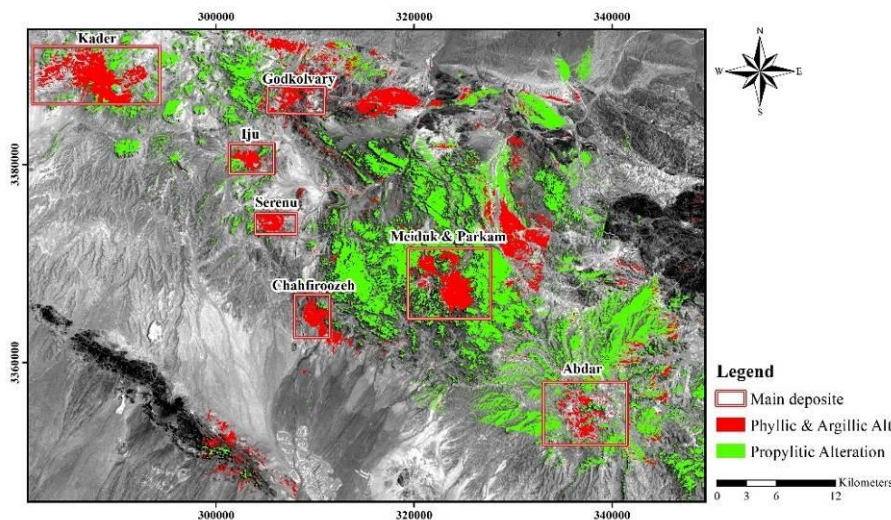
واحد بارز شده	نسبت بانندی	تصویر ماهواره‌ای
میگهای سفید (مانند ایلیت، مسکویت، پاراگونیت، brammalite، phengite، لپیدولیت، phengite) و اسمکتیت‌ها (مونتموریلونیت، beidellite)	Band115+ Band 126/ Band 123	Prisma
کربنات‌ها (مانند کلسیت، دولومیت) و سیلیکات‌های سه وجهی (به عنوان مثال، کلریت، اپیدوت، آمفیبول، تالک، Fe-Mg clays)	Band 139+ Band 144/ Band 142	Prisma

طبق جدول ۳ در تصویر PRISMA دو نسبت بانندی جهت بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک و فیلیک-آرژیلیک اعمال گردید. در این مطالعه جهت سهولت و نمایش بهتر در کنار یکدیگر، از روش برش چگالی برای نتایج نسبت بانندی تصویر PRISMA استفاده شده است. طبق شکل ۳ دگرسانی‌های فیلیک-آرژیلیک به رنگ قرمز در کانسارهای شاخص منطقه بارز شده است. دگرسانی پروپیلیتیک نیز منطبق بر واحدهای تراکی آندزیت و تراکی بازالت اطراف کانسارهای شاخص به رنگ سبز بارز شده است. در شمال شرق منطقه منطبق بر واحدهای فلیشی به دلیل تشابه طیفی سنگ‌ها با کانی‌های شاخص دگرسانی‌ها، دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک بارز شده است.



شکل ۳. تصویر مربوط به بارزسازی دگرسانی فیلیک-آرژیلیک و پروپیلیتیک از تصویر PRISMA.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی روشی موفق برای کاهش اثرات طیف‌های ترکیبی، جمع‌آوری و متراکم سازی اطلاعات، حذف اطلاعات زائد و جداسازی زون‌های دگرسان شده در مناطق با طیف‌های زمینی متنوع می‌باشد. در این مطالعه از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده گردید. در این روش همه باندهای تصویر در محاسبه آماری مورد استفاده قرار گرفتند و در ۱۰ مولفه دسته بندی شدند. پس از بررسی مؤلفه‌ها، PC2 به عنوان بهترین مؤلفه برای بارزسازی دگرسانی فیلیک-آرژیلیک (به رنگ قرمز در شکل ۴) و PC3 به عنوان بهترین مؤلفه برای بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک (به رنگ سبز در شکل ۴) انتخاب گردیده‌اند.

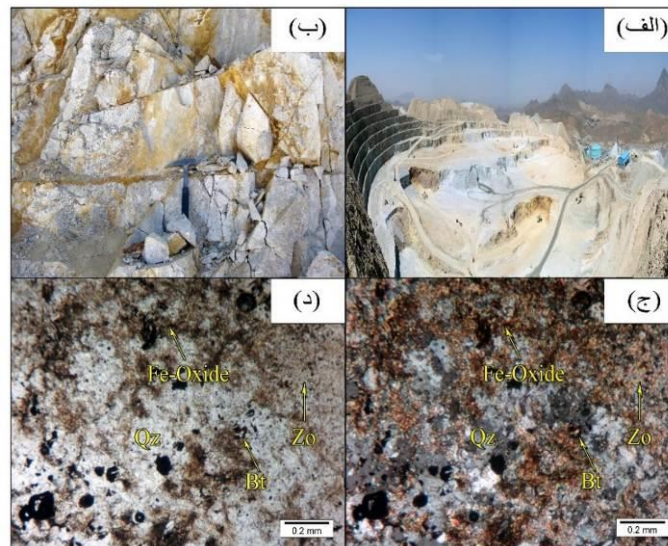


شکل ۴. تصویر مربوط به بارزسازی دگرسانی فیلیک-آرژیلیک و پروپیلیتیک با تحلیل مؤلفه اصلی تصویر PRISMA.

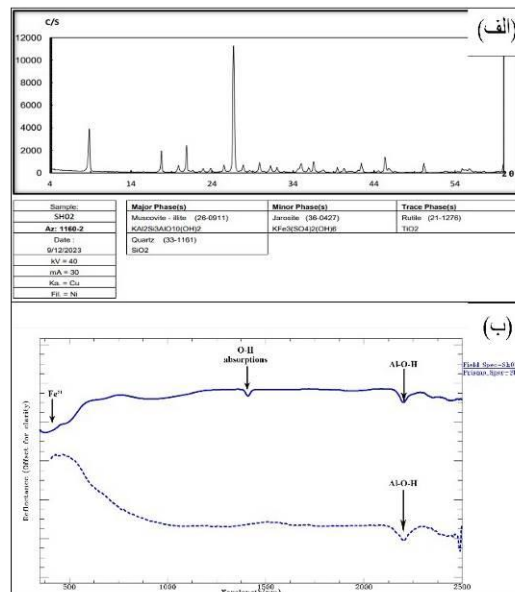
برای کسب اطلاعات از واحدهای زمین‌شناسی و دربرگیرنده کانسارهای مورد نظر و همچنین تطابق بارزسازی‌های انجام شده طی مطالعات دورسنجی، بازدیدهای صحرائی در منطقه مورد مطالعه از کانسارهای شاخص میدوک و کدر انجام گرفت. بازدیدهای صحرائی، بررسی مقاطع نازک، مطالعات طیف سنجی و آنالیز XRD نیز مبین وجود دگرسانی گرمایی به طور مشخص دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز روشن تا زیتونی است که به صورت خاص اپیدوتی و کلریتی شده‌اند و نیز دگرسانی فیلیک و آرژیلیک در بخش‌های میانی کانسارهای



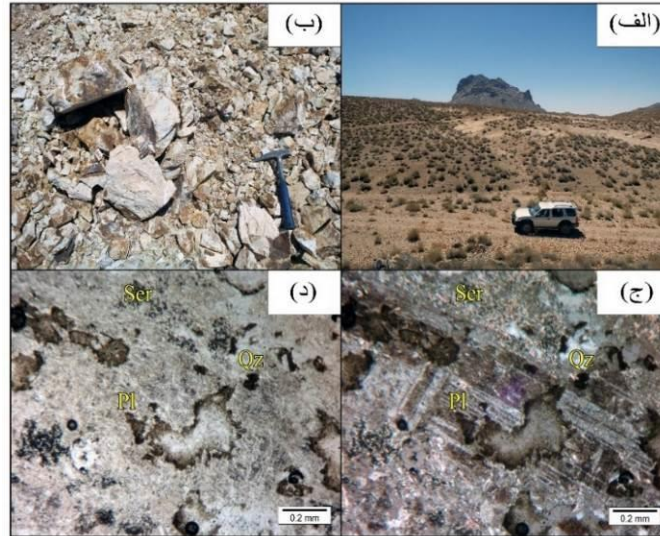
شاخص می‌باشد. افزون بر این در مقیاس میکروسکوپی نیز نتایجی چون سرسیتی شدن ارتوکلاز و پلاژیوکلاز همگی نشان‌دهنده و تأییدکننده تأثیر دگرسانی گرمایی در محدوده کانسار مورد مطالعه و انطباق نتایج به‌دست آمده از مطالعات دورسنجی و بازدیدهای صحرائی است. به طور کلی الگوی دگرسانی در محدوده کانسار مورد مطالعه نشان می‌دهد که دگرسانی پروپیلیتیک در بخش‌های شمال شرق و میانی منطقه و دگرسانی فیلیک و آرژیلیک در بخش‌های منطبق بر کانسارهای شناخته شده بیشتر مشاهده می‌شود (شکل ۵ و ۷). نتایج دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک در تصاویر بارز شده عمدتاً با یکدیگر همپوشانی داشته و با توجه به نتایج آنالیز XRD و همراه بودن کانی‌های هر دو دگرسانی در سنگ این موضوع قابل توجیه می‌باشد (شکل ۶ و ۸).



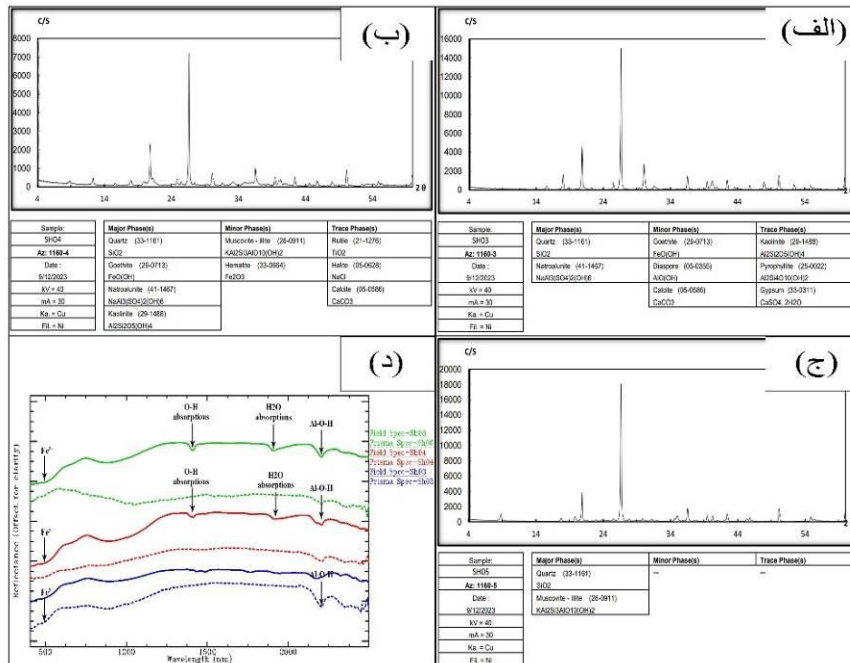
شکل ۵. الف) منظره ای از پیت معدن مس میدوک؛ ب) نمای نزدیک سنگ‌های منطقه که دچار دگرسانی فیلیک شده‌اند؛ ج) تصویر مقطع نازک XPL تهیه شده از نمونه‌های برداشت شده در پهنه دگرسانی فیلیک کانسار پرکام، حاوی کانی‌های کوارتز، Q، بیوتیت Bt و اکسید آهن Fe-Oxide؛ د) تصویر مقطع نازک PPL تهیه شده از نمونه‌های برداشت شده در پهنه دگرسانی فیلیک کانسار پرکام، حاوی کانی‌های کوارتز، Q، بیوتیت Bt و اکسید آهن Fe-Oxide.



شکل ۶. الف) نتیجه آنالیز XRD نمونه سنگی برداشت شده از منطقه میدوک؛ ب) طیف آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده دارای دگرسانی فیلیک و طیف تصویر PRISMA منطقه مطالعاتی میدوک.



شکل ۷. الف) منظره عمومی از دگرسانی فیلیک در کانسار کدر؛ ب) نمای نزدیک سنگ های منطقه که دچار دگرسانی فیلیک شده اند؛ ج) تصویر مقطع نازک XPL تهیه شده از نمونه های برداشت شده در پهنه دگرسانی فیلیک کانسار کدر، حاوی کانی های کوارتز Q، پلاژیوکلاز Pl و سریسیت Ser؛ د) تصویر مقطع نازک PPL تهیه شده از نمونه های برداشت شده در پهنه دگرسانی فیلیک کانسار کدر، حاوی کانی های کوارتز Q، پلاژیوکلاز Pl و سریسیت Ser.



شکل ۸. الف، ب، ج) نتیجه آنالیز XRD نمونه سنگی برداشت شده از منطقه کدر؛ د) طیف آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده دارای دگرسانی فیلیک و آرژیلیک و طیف تصویر PRISMA منطقه مطالعاتی.

۵. نتیجه‌گیری

منطقه‌ی مورد مطالعه در بخش شمالی کمربند مس کرمان (نوار فلززایی دهج-ساردوئیه) قرار دارد که از شمال غرب استان کرمان تا جنوب شرق آن امتداد یافته است. این نوار بیشترین حجم ماگماتیسم و کانه‌زایی مس کمربند ارومیه-دختر را به خود اختصاص می‌دهد و بیشتر سنگ‌های موجود در این کمربند ترکیبی حدواسط تا بازی دارند که در آن بیش از ۵۰ کانسار معدنی پورفیری و رگه‌های شناسایی



شده است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص، دگرسانی و ارتباط با سایر ساختارهای زمین‌شناسی، کانسارهای مس پورفیری یک موقعیت یکتا و خاص داشته و این ویژگی‌ها سبب می‌شود که شناسایی، اکتشاف و بهره‌برداری از این کانسارها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار باشد. در منطقه مورد مطالعه به دلیل فعال بودن فاز گرمایی و همچنین تاثیر عوامل جوی انواع مختلفی از دگرسانی در سنگ‌ها مشاهده می‌شود.

در این مطالعه با استفاده از تکنیک‌های پردازش مختلف با تصاویر ماهواره‌ای فراطیفی به بارزسازی مناطق دگرسانی گرمایی منطقه پرداخته شد. ابتدا با استفاده از روش ترکیب رنگی کاذب به تفکیک اولیه واحدهای دگرسانی فیلیک-آرژیلیک و پروپیلیتیک پرداخته شد. سپس با استفاده از نسبت‌های باندی و تحلیل مولفه اصلی واحدهای دگرسانی فیلیک-آرژیلیک و پروپیلیتیک به صورت دقیق‌تر بارز شدند. با استفاده از این روش‌ها مشخص شد دگرسانی‌های فیلیک-آرژیلیک عمدتاً منطبق بر واحدهای دیوریت پورفیری و کوارتز دیوریت پورفیری و دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای تراکی آندزیت، تراکی بازالت و فلیش‌های شرق محدوده بارز شده‌اند. در نهایت با تکیه بر نتایج حاصل از این مطالعه و با توجه به تطبیق موجود میان نتایج حاصل از پردازش‌های داده‌های ماهواره‌ای با نتایج حاصل از بررسی‌های صحرایی و مطالعات میکروسکوپی، و این نکته که بر خلاف سنجنده‌های چندطیفی در اینجا کانی‌های دگرسانی با دقت بسیار بالا و در نتیجه مناطق دگرسانی نیز با همین استدلال بسیار دقیق‌تر نقشه برداری شده‌اند، می‌توان در مناطق با زمین‌شناسی مشابه با استفاده از داده‌های ابرطیفی PRISMA مناطق دگرسانی مرتبط با کانی‌زایی را بارزسازی نمود و پردازش تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند راهنمای مناسبی جهت اکتشاف کانسارهای مس و مناطق دگرسانی‌های گرمایی مرتبط با این ذخائر ارزشمند باشد.

منابع

- [1] مهدی هنرمند،؛ ۱۳۹۰. مدلسازی پتانسیل معدنی کمریند فلزایی مس کرمان با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، رساله دکتری زمین‌شناسی گرایش زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [7] نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۰۰۰۰۰۰ دهج، رباط، انار و شهر بابک تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور.
- [2] Mars JC, Rowan LC. Regional mapping of phyllic-and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*. 2006 May 1;2(3):161-86.
- [3] Bedini, E. and J. Chen, "Application of PRISMA satellite hyperspectral imagery to mineral alteration mapping at Cuprite, Nevada, USA". *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v, 2020. 10(2): p. 87-9 .4
- [4] Heller Pearlshtien, D., et al., "PRISMA sensor evaluation: a case study of mineral mapping performance over Makhtesh Ramon, Israel". *International Journal of Remote Sensing*, 2021. 42(15): p. 5882-5914
- [5] Bedini, E. and J. Chen, "Prospection for economic mineralization using PRISMA satellite hyperspectral remote sensing imagery: an example from central East Greenland". *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v12, 2022. 3: p. 124-130 .
- [6] Alimohammadi, M., Alirezaei, S., & Kontak, D. J. (2015). Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo-Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews*, 70, 290-304.
- [8] Loizzo, R., et al. Prisma mission status and perspective. in *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2019. IEEE.
- [9] Guarini, R., et al. PRISMA hyperspectral mission products. in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2018. IEEE.