

(مقاله پژوهشی)

بارزسازی مناطق دگرسان شده با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصاویر ASTER در منطقه معدن فیروزه نیشابور

زهره مختاری^{۱*}، عالیہ سیفی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

۲- گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
(دریافت: آبان ۱۳۹۹، پذیرش: فروردین ۱۴۰۰)

چکیده

معدن فیروزه نیشابور در یک توالی آتشفشانی - رسوبی ترشیری مربوط به زون بینالود در شمال شرق ایران واقع شده است. بر اساس مطالعات صحرایی - آزمایشگاهی، واحدهای سنگی آندزیت، تراکی آندزیت، تراکیت و پیروکلاستیک متعلق به ائوسن مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. دگرسانی‌های سیلیسی، سریستی، آرژیلی و گوسان اغلب این سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. توالی‌های شدیداً خردشده و دگرسان شده از واحدهای آندزیتی، تراکی آندزیت و تراکیت میزبان اصلی رگه‌ها، رگچه‌ها و دانه‌های باکیفیت و کمیت بالا از فیروزه هستند؛ بنابراین، شناسایی و نقشه‌برداری کانی‌های شاخص دگرسانی‌های گرمابی با استفاده از دورسنجی داده‌های ماهواره‌ای استر می‌تواند به عنوان ابزاری مقرون به صرفه و قابل استفاده برای شناسایی و پی‌جویی کانی‌زایی فیروزه در نظر گرفته شود. در این پژوهش بارزسازی زون‌های دگرسانی گرمابی با استفاده از تکنیک‌های تصاویر رنگی کاذب (RGB)، نسبت بانندی (BR)، نسبت گیری باند جذب نسبی (RBD)، پالایش تطبیقی (MF) و نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) روی تصاویر استر صورت گرفته است. بر اساس پردازش‌های انجام‌شده و مطالعات صحرایی، زون‌های دگرسانی گرمابی را می‌توان به پنج گروه تقسیم کرد: زون‌های سیلیسی - گوسان، سریستیک، پروپیلیتک، آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته. الگوریتم MF به‌وضوح پهنه‌های دگرسانی گوسان در منطقه مورد مطالعه را بارز نمود. علاوه بر این روش SAM نیز برای شناسایی زون‌های دگرسانی سریستیک، پروپیلیتک، آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته نتایج بهتری را نشان داد و از این رو می‌تواند زمین‌شناسان را برای یافتن اندیس‌های جدید از کانی‌زایی فیروزه در مناطق دیگر پیش از بررسی‌های میدانی دقیق و پرهزینه کمک کند.

کلمات کلیدی

دگرسانی گرمابی، استر، معدن فیروزه، سنجش از دور، نیشابور

۱- مقدمه

سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی روش‌های نوینی هستند که امروزه به‌صورت یک ابزار ارزشمند برای تشخیص ذخایر معدنی یا جدا کردن مناطق مستعد کانه‌زایی از سایر مناطق به کار می‌روند، از این‌رو نقش مهمی در تعیین موقعیت ذخایر با دقت و سرعت بالا و همچنین کاهش هزینه‌های پی‌جویی و اکتشاف دارند [۲،۱]. تصاویر ماهواره‌ای به خاطر پوشش منطقه‌ای وسیع، چند طیفی و چند زمانی می‌توانند در شناسایی کمربندها و مکان‌های کانی‌زایی و همچنین مطالعه‌ی مناطق صعب‌العبور و غیرقابل‌دسترس به کار روند [۴،۳،۱]. در برنامه‌های اکتشافی با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور، بیشترین تمرکز و توجه بر روی ذخایر پورفیری و اپی‌ترمال بوده است. کانی‌سازی کانسارهای فلزی در مدل‌های پورفیری و اپی‌ترمال ارتباط نزدیکی با فعالیت‌های گرمایی دارند و اغلب همراه با هاله‌های دگرسانی می‌باشند [۷،۶،۵]. البته بنا به نوع و سطح فرسایش ممکن است که همه این زون‌های دگرسان در سطح زمین یافت نشوند. پدیده‌های دگرسانی به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم اکتشافی در عملیات صحرایی شناخته می‌شوند. این پدیده‌ها، شامل تغییرات کانی‌شناسی و شیمیایی هستند که تحت تأثیر آب‌های ماگمایی یا گرمایی در سنگ‌ها ایجاد می‌شود. دگرسانی‌ها در اغلب ذخایر ماگمایی و گرمایی همراه و قابل‌مشاهده هستند. مهم‌ترین عوامل در نوع دگرسانی رخ‌داده در یک واحد سنگی و کانی‌سازی احتمالی در یک محیط زمین‌شناسی، شیمی محلول گرمایی نظیر pH و Eh، نوع مواد محلول، میزان آب و نظایر آن و شرایط فیزیکوشیمیایی محیط نظیر جنس سنگ میزبان، نفوذپذیری، عمق، دمای محیط، جوشش و نظایر آن می‌باشند [۹،۸،۵]. میزان تأثیر گسل‌ها و شکستگی‌ها بر دگرسانی و کانی‌سازی در سنگ‌ها به میزان زیادی به جنس سنگ وابسته است. پردازش تصاویر ماهواره‌ای، بررسی رویدادهای ساختاری و نقش شکستگی‌ها در گردش محلول‌های گرمایی در محیط همراه با مطالعات میکروسکوپی از دگرسانی موجود در سنگ‌های منطقه مهم‌ترین عواملی هستند که منجر به درک بهتر و تولید اطلاعات دقیق‌تری از تأثیر محلول گرمایی در یک محیط زمین‌شناسی خاص و کانی‌سازی همراه می‌شوند [۱۰،۸،۵].

ترکیب پیچیده هیدروفسفات مس و آلومینیم با فرمول شیمیایی $\text{CuAl}_5(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ است که در نتیجه تجزیه و تخریب سنگ‌های دارای سیلیکات و فسفات آلومینیم واجد سولفور مس در طبیعت به وجود می‌آید. این کانی بسته به مقدار مس، جایگزین شده و وجود ناخالصی‌های آهن و منگنز به رنگ‌های مختلف از جمله آبی آسمانی، آبی مایل به سبز، آبی نیلی و سبز مایل به خاکستری دیده‌شده و جزء سنگ‌های قیمتی طبقه‌بندی می‌شود. برخی از پژوهشگران بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی خود در منطقه، معدن فیروزه نیشابور را مربوط به کانی‌سازی مس پورفیری در عمق دانسته‌اند [۱۲،۱۱]. اما مطالعات جدیدتر این معدن را نخستین کانی‌سازی مس - طلا - اورانیوم - عناصر نادر خاکی سبک نوع IOCG در ایران می‌دانند [۱۳]. همچنین پژوهش‌ها نشان داده است که میدان تنش حاکم بر سنگ‌های آتشفشانی معدن فیروزه از زمان ائوسن تاکنون تقریباً هموزن بوده و دو رژیم تکتونیکی، کششی محض تا امتداد لغز - کششی در منطقه شناسایی شده است. هندسه ساختارهای شکننده در ناحیه گویای قرارگیری محدوده معدن فیروزه در یک زون تغییر شکل گسترده است و ساختارهای شکننده موجود در منطقه به‌خوبی با الگوی ساختاری ریدل سازگاری دارد [۱۴]. اگر در چنین نقاطی سنگ‌های نفوذپذیر مناسبی وجود داشته باشد، شدت دگرسانی بیشتر شده و احتمال کانی‌سازی نیز وجود دارد. محل برخورد بین سنگ‌های نفوذپذیر و سنگ‌های نفوذناپذیر نیز مکان مناسبی برای تجمع محلول‌های کانه‌دار، دگرسانی و کانی‌سازی است. مهم‌ترین واحدهای سنگی محدوده معدن فیروزه شامل گدازه و پیروکلاستیک‌های آندزیتی - داسیتی با سن ائوسن هستند که متحمل دگرسانی شدیدی شده‌اند. دگرسانی‌های سیلیسی، سریستیک، آرژیلیک و گوسان از مهم‌ترین دگرسانی رخ‌داده در این واحدهای سنگی می‌باشند که از این‌بین دگرسانی‌های آرژیلیک و سیلیسی بیشترین ارتباط با کانی‌سازی را دارند. وسعت دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی این منطقه قابل‌توجه است. گسل‌ها و شکستگی‌ها و نحوه بروز و رخداد آن‌ها بر شدت و گسترش واحدهای دگرسانی در منطقه مورد مطالعه اثر مستقیم دارند. نسل‌های مختلف کانی‌زایی در معدن فیروزه نشان می‌دهد که فضای خالی حاصل از سیستم شکستگی طی

چند مرحله توسط سیالات مورد هجوم قرار گرفته است. نظر به شرایط خاص زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه و اهمیت معدنکاری فیروزه به عنوان مهم‌ترین گوهر ایران از یک طرف و همچنین نقش قابل ملاحظه‌ای این سنگ قیمتی در اشتغال، پی‌جویی برای اکتشافات بیشتر فیروزه از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو شناخت و مطالعه پهنه‌های دگرسانی در این مناطق می‌تواند جهت عملیات اکتشافی در مقیاس ناحیه‌ای بسیار مفید واقع شود. با پردازش داده‌های ماهواره‌ای به منظور تهیه نقشه کانی‌های معرف زون‌های دگرسانی و کانی‌سازی می‌توان در کمترین زمان و با صرف کمترین هزینه، محل‌های مناسب برای تشکیل کانی‌سازی‌ها را مشخص نمود. برای دستیابی با الگوی مناسب انواع پهنه‌های دگرسانی در منطقه مورد مطالعه ابتدا به بررسی نتایج حاصل از مهم‌ترین روش‌های کاربردی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای استر پرداخته و سپس نتایج مطالعات پتروگرافی در خصوص این پهنه‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و دگرسانی در

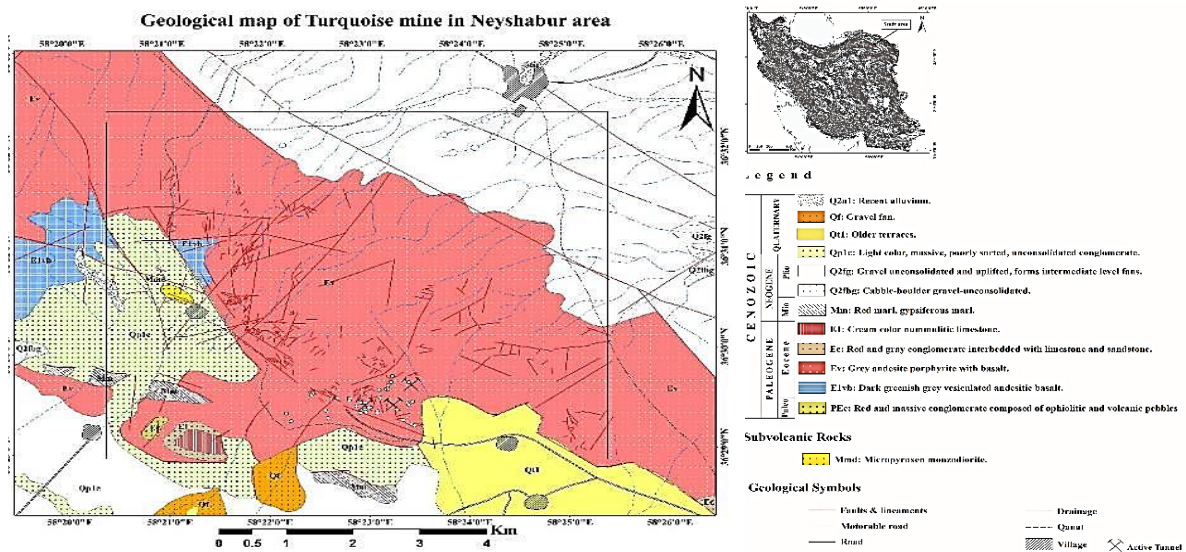
منطقه مورد مطالعه

معدن فیروزه نیشابور در کمان ماگمایی قاره‌ای سنوزوئیک شمال منطقه افیولیتی سبزوار که روند شمال غربی - جنوب شرقی دارد، واقع شده است. نوار آتشفشانی جنوب قوچان ماهیت غالباً کالک‌آلکال داشته و سن آن از جنوب (در مجاورت نوار افیولیتی سبزوار) به سوی شمال (در جنوب قوچان) از آئوسن تا پلیو-پلیستوسن تغییر می‌کند. عرض این کمر بند ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر از شمال سبزوار تا جنوب قوچان و طول آن ۲۰۰ کیلومتر از فرومد تا نیشابور ادامه داشته و آن را دنباله شرقی رشته‌کوه‌های بینالود دانسته‌اند [۱۶، ۱۵]. به لحاظ زمین‌شناسی ساختاری این معدن در زون ساختاری البرز شرقی و در زیر پهنه بینالود واقع است. پهنه بینالود با روند شمال غرب - جنوب شرق بین صفحه‌های توران در شمال و خردقاره ایران مرکزی و پهنه سبزوار در جنوب قرار گرفته است. موقعیت این معدن را می‌توان در گوشه شمال شرقی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد [۱۷] دنبال کرد. برخی محققین معتقد هستند که کمر بند آتشفشانی جنوب قوچان

احتمالاً ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس حوضه سبزوار در اواخر کرتاسه - پالئوسن در زون فرورانش حاشیه قاره با شیب به سوی شمال است [۱۸، ۱۶]. گرچه این فرورانش از اوایل آئوسن آغاز شده، به دلیلی تداوم فرورانش پوسته اقیانوسی به درون گشته و هضم آن، آخرین فرآورده‌های ماگمایی آن تا پلیو پلیستوسن نیز فوران داشته‌اند. در نگاه کلان این پهنه از واحدهای رسوبی کربناته و تخریبی تشکیل شده است [۱۹، ۱۷]. بر پایه مطالعات صحرایی - آزمایشگاهی واحدهای سنگی محدوده معدن فیروزه نیشابور را به سه بخش سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه عمیق و انواع مختلف برش می‌توان تقسیم کرد. سنگ‌های آذرین بیرونی که بیشترین گسترش در منطقه را دارند با عنوان کمر بند آتشفشانی قوچان شناخته می‌شوند. این سنگ‌ها با روند شمال غرب - جنوب شرق از مرکز منطقه عبور می‌کنند و در بخش شمالی خود شامل واحدهای آذرآواری و گنبدی‌های تراکی آندزیتی، آندزیتی، تراکیتی، تراکی داسیتی، داسیتی و ریوداسیتی به سن پلیو پلیستوسن هستند که روی واحدهای اولیوین بازالتی آئوسن تا میوسن زیرین قرار گرفته‌اند [۱۶، ۱۵]. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی معدن فیروزه و مناطق اطراف را نشان می‌دهد. مهم‌ترین واحدهای سنگی محدوده معدن فیروزه شامل گدازه و پیروکلاستیک‌های آندزیتی - داسیتی با سن آئوسن‌اند که حاوی میزان بالایی از فسفر به صورت کانی آپاتیت در خود می‌باشند. سنگ‌های مذکور به سبب نفوذ توده‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب دیوریت پورفیری تا سینیت پورفیری (گرانیتوئیدهای سری مگنتیت) متحمل دگرسانی شدیدی شده‌اند. وسعت دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی این منطقه قابل توجه است. این دگرسانی‌ها شامل چهار زون اصلی سیلیسی، سریستیک، آرژلیک و پروپیلیتیک می‌باشند که زون‌های سیلیسی و آرژلیک به ترتیب بیشترین و کمترین وسعت دگرسانی‌های منطقه را تشکیل می‌دهند. پتروگرافی نمونه‌های برداشت شده از داخل تونل نیز حاکی از آن است که سنگ میزبان فیروزه بیشتر از نوع تراکیت، لاتیت، تراکی آندزیت تا تراکی بازالت و توده نفوذی نیمه عمیق سینیتی تا مونزوسینیتی می‌باشند. کانی‌سازی در این سنگ‌ها به شکل‌های افشان، استوک ورک و برش هیدروترمالی دیده می‌شود که کانی‌های اولیه شامل پیریت، مگنتیت، اسپیکولاریت، کالکوپیریت و بورنیت هستند و کانی‌های

گرفته‌اند. این واحدها بانفوذ توده‌های دیوریت پورفیری در محدوده کانسار فیروزه مواجه شده‌اند که سن پس از ائوسن به آن‌ها نسبت داده شده است [۱۷].

ثانویه شامل فیروزه، کالکوزیت، کوولیت و اکسیدهای آهن می‌باشند. سن واحد آندزیتی میزبان کانسار فیروزه را با توجه به موقعیت چینه شناختی آن ائوسن میانی در نظر



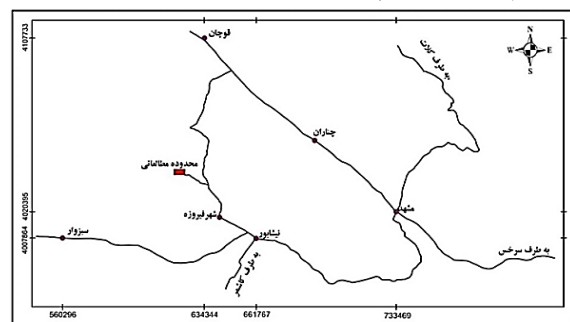
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه معدن فیروزه به همراه موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده (برگرفته از برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان آباد و مشکان) [۱۷، ۱۹] با تغییرات

۳- مشخصات سنجنده استر و کاربرد آن در شناسایی کانی‌های دگرسان شده

طیف‌سنج بازتابی و گرمایی فضاگرد پیشرفته یا همان ASTER توسط ماهواره ترا در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب و تصویربرداری آن در مارس ۲۰۰۰ آغاز شد [۲۰]. این طیف‌سنج یکی از بهترین و موفق‌ترین سنجنده‌ها برای شناسایی مناطق دگرسان شده مرتبط با توده‌های کانسار، نقشه‌برداری واحدهای سنگی، چینه‌شناسی، نقشه‌برداری و بارزسازی خطواره‌های بزرگ و روندهای ساختاری در طول نواحی که احتمال کانسارسازی وجود دارد و تهیه اطلاعات زمین‌شناسی پایه است [۲۱]. استر یک سنجنده فوق طیفی است که عرض تصویربرداری آن ۱۱ کیلومتر است و به صورت فریم‌های استاندارد ۶۰ در ۶۰ کیلومتر قابل‌دسترسی می‌باشد [۲۲]. این سنجنده ۱۴ باند با دامنه طول‌موجی بین ۵۲ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر (از محدوده مرئی طیف امواج الکترومغناطیس تا مادون قرمز حرارتی) را در بر می‌گیرد. این باندها در سه محدوده طیفی مرئی مادون قرمز نزدیک (VNIR)، مادون قرمز کوتاه (SWIR) و مادون قرمز حرارتی (TIR) منابع مهمی از داده‌ها را برای نقشه‌برداری اهداف مختلف زمین‌شناسی و اکتشافی فراهم آورده‌اند. امواج VNIR شامل باندهای ۱، ۲ و ۳ و بین ۰/۸۶ - ۰/۵۲

۲-۲- موقعیت معدن فیروزه نیشابور

معدن فیروزه نیشابور در بخشی از پهنه‌ی البرز شرقی موسوم به پهنه‌ی بینالود در شمال شرق ایران و در ۵۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان نیشابور واقع شده و به‌عنوان شاخص‌ترین معدن گوهرسنگ ایران دارای شهرت جهانی است. دسترسی به معدن فیروزه از طریق دو راه اصلی امکان‌پذیر است. مسیر اول: مشهد - نیشابور - شهر فیروزه به مسافت ۱۶۰ کیلومتر که اصلی‌ترین راه دست‌یابی به معدن محسوب می‌شود. مسیر دوم: از طریق جاده مشهد به قوچان پس از طی مسافت ۱۱۰ کیلومتر به جاده ترانزیت سبزوار - خوشاب - قوچان رسیده و سپس با ۸۰ کیلومتر حرکت به سمت جنوب به روستای معدن (معدن بالا و معدن پایین) خواهیم رسید (شکل ۲).



شکل ۲- راه‌های دسترسی به معدن فیروزه نیشابور

محدوده SWIR و بالا بودن قدرت تفکیک طیفی استر، این سنجنده در شناسایی سنگ‌ها و کانی‌های مختلف سطح زمین بسیار توانا است [۲۱]. جدول ۱ مشخصات طیفی باندهای سنجنده استر را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات اصلی سنجنده استر [۲۶]

دامنه‌ی طیفی (میکرومتر)	شماره باند	زیرمجموعه
۰.۵۲۰-۰.۶۰۰	۱	VNIR
۰.۶۳۰-۰.۶۹۰	۲	
۰.۷۸۰-۰.۸۶۰	۳N	
۰.۷۸۰-۰.۸۶۱	۳B	
۱.۶۰۰-۱.۷۰۰	۴	SWIR
۲.۱۴۵-۲.۱۸۵	۵	
۲.۱۸۵-۲.۲۲۵	۶	
۲.۲۳۵-۲.۲۸۵	۷	
۲.۲۹۵-۲.۳۶۵	۸	TIR
۲.۳۶۵-۲.۴۳۰	۹	
۸.۱۲۵-۸.۴۷۵	۱۰	
۸.۴۷۵-۸.۸۲۵	۱۱	
۸.۹۲۵-۹.۲۷۵	۱۲	وضوح مکانی ۹۰ متر
۱۰.۲۵۰-۱۰.۹۵۰	۱۳	
۱۰.۶۵۰-۱۰.۹۵۰	۱۴	

۳-۱- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره‌ای ممکن است پس‌ازاینکه امواج از خورشید به سطح زمین تابیده می‌شوند، هنگام انعکاس به دلایل متعدد از جمله گردوغبار، مه و وضعیت توپوگرافی منطقه در زمان ثبت، وضوح طیفی کافی نداشته باشند. علاوه بر این متأثر از وضعیت ماهواره، سنجنده، یا در هنگام ثبت داده‌ها و انتقال اطلاعات و غیره نیز ممکن است داده‌ها دارای خطاهای مختلف توپوگرافی، هندسی، رادیومتری و اتمسفری شوند. از این‌رو به‌منظور دریافت اطلاعات صحیح از تصاویر ماهواره‌ای نیاز است تا پیش‌پردازش‌های رادیومتری و هندسی روی تصاویر خام انجام شود.

داده‌های استر به‌صورت معمول در دو سطح 1a و 1b در قالب فایل‌های HDF ارائه می‌شود. داده‌های سطح 1T دارای مختصات اولیه در سیستم UTM هستند و با مدار ماهواره هم‌راستا شده و جابجایی بین باندها در تلسکوپ SWIR رفع شده است. الگوریتم‌هایی مانند تصحیحات رادیومتری و ژئومتری، ضرایب تصحیح cross-talk (الگوریتم تکمیلی است که تأثیر بازتاب نور باند ۴ روی باندهای ۵-۹ را از بین می‌برد) و ضرایب تبدیل نسبی مورد نیاز برای استر سطح

میکرومتر با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر، SWIR شامل باندهای ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ و بین ۲/۴۳ - ۱/۶۰ میکرومتر و با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و TIR شامل باندهای ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در محدوده بین ۸/۱۲۵-۱۱/۶۵ میکرومتر با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر هستند [۲۳، ۲۲، ۲۱]. سه باند VNIR منبع مهمی برای شناسایی فلزات انتقالی به‌ویژه آهن هستند. در ۶ باند SWIR کانی‌های کربناتی، هیدرات‌ها و هیدروکسیدها جذب مولکولی مشخصی دارند و لذا برای بارزسازی آن‌ها بسیار مناسب هستند، داده‌های حرارتی (TIR) ماهواره ASTER تنها داده حرارتی چند طیفی در نوع خود است که در بارزسازی کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ همچون کوارتز و فلدسپات و نیز دگرسانی‌های گرمایی سیلیسی بسیار مفیدند [۲۴]. مهم‌ترین طول‌موج برای شناسایی سنگ‌ها و کانی‌های مختلف سطح زمین، محدوده طیفی ۱/۵ تا ۲/۵ میکرومتر است. این محدوده طیفی شش باند امواج SWIR یا همان مادون‌قرمز کوتاه را شامل می‌شود که مهم‌ترین محدوده برای شناسایی کانی‌های رسی است [۲۲، ۲۰].

یون هیدروکسیل در این کانی‌ها باعث ایجاد جذب اساسی ارتعاشی در محدوده ۲/۱۶ - ۲/۳۶ میکرومتر و هارمونیک در ۱/۴۴ می‌شود. هر دو اشکال بنیادی و هارمونیک با اشکال مشاهده‌شده در مولکول‌های آب تداخل دارند اما زمانی که مولکول‌های هیدروکسیل با آلومینیوم و منیزیم به‌صورت (Al-OH) و (Mg-OH) ترکیب شوند (رس‌ها و سیلیکات‌های آبدار)، چندین جذب شدید در محدوده ۲/۱ - ۲/۴ میکرومتر نشان می‌دهند. اگر گروه هیدروکسیل با آلومینیوم (Al-OH) ترکیب شود محدوده جذب در ۲/۲ میکرومتر قرار می‌گیرد و در ترکیب با منیزیم (Mg-OH) جذب در ۲/۳ میکرومتر اتفاق می‌افتد. در کانی‌هایی مانند کائولینیت که هر دو پیوند (Al-OH) و (Mg-OH) وجود دارد، جذب شدیدی در ۲/۳ میکرومتر و ضعیف‌تری در ۲/۲ میکرومتر دیده می‌شود، ولی در مونت‌موریونیت و موسکویت به دلیل حضور (Mg-OH) فقط دارای یک باند جذب در ۲/۳ میکرومتر هستند. جانشینی آهن به جای آلومینیوم و منیزیم در ساختمان رس‌ها باعث جذب شدید باندهای (Al-OH) (۲/۲ میکرومتر) و یا (Mg-OH) (۲/۳ میکرومتر) و افزایش باندهای الکترونی آهن در محدوده ۰/۴ - ۱ میکرومتر می‌شود [۲۵]. لذا با توجه به تغییرات بسیار شدید منحنی بازتاب طیفی کانی‌ها در

۴-۲- نسبت باندی^۱

نسبت باندی یکی از روش‌های رایج در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که طی آن پیکسل‌های یک تصویر یا باند طیفی به پیکسل‌های متناظر آن تصویر یا باند دیگر بر اساس خصوصیات طیفی کانی موردنظر (جذب و بازتاب) تقسیم می‌شود [۴،۳]. این تکنیک اختلاف بین درج‌ات روشنایی را آشکار کرده و با از بین بردن اثرات توپوگرافی و سایه‌ها و کاهش یکسری از نویزها مرزها را مشخص‌تر می‌سازد.

برای مشخص کردن مناطق دگرسانی با توجه به ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص در هر نوع دگرسانی، می‌توان نسبت باندی را تعریف کرد [۳۲]. نتایج حاصل از به‌کارگیری نسبت باندی، تصویری به‌صورت سیاه و سفیدند که به‌تنهایی ملاک و مقیاس مناسبی برای تعیین نواحی هدف در منطقه مورد مطالعه نمی‌باشند، بلکه تنها مشخص‌کننده مناطقی هستند که بیشترین احتمال حضور ماده معدنی مورد نظر یا به‌طور کلی اهداف جستجو در آن‌ها است. این تصاویر را می‌توان با استفاده از ترکیب رنگی کاذب (RGB) باهم ادغام و تصویری تولید کرد که تفسیر و نتیجه‌گیری بر اساس آن‌ها قابل‌اعتماد و کاربردی‌تر باشد.

۴-۳- نسبت‌گیری باند جذب نسبی RBD

روش نسبت‌گیری باند جذب نسبی یا همان RBD توسط کراولی و همکاران ۱۹۸۹ [۳۳] ارائه شد و از شیوه‌های مفید برای بارزسازی پدیده‌ها در پردازش تصاویر محسوب می‌شوند. در این روش برای نمایش هر سیمای جذبی، مخرج کسر، باندی است که نزدیک‌ترین موقعیت به حداقل جذب را اشغال کرده و صورت کسر مجموع دو باند بازتابی مجاور آن را تشکیل می‌دهند [۳۴].

این مهم در رابطه (۱) به‌صورت خلاصه نشان داده شده است. سه نسبت مختلف را می‌توان بسط داده و با رنگ‌های آبی، سبز و سرخ به‌عنوان یک تصویر RGB نمایش داد. این نسبت‌ها بر اساس رفتار طیفی هر کانی یا بنیان شاخص ارائه می‌شوند. جدول ۲ ترکیب‌های باندی مهم برای بارزسازی پهنه‌های دگرسانی در اندیس‌های اکتشافی را نشان می‌دهد.

$$RBD = (Band A + Band C) / Band B \quad (1)$$

1A و 1B روی استر سطح 1T انجام شده است و نیازی نیست که کاربر آن‌ها را انجام دهد. تصحیح توپوگرافی، هندسی و جوی روی تصاویر استر در منطقه مطالعاتی معدن فیروزه انجام گرفته است. تصحیح هندسی در این تصاویر با استفاده از تصاویر Google Earth و نقاط کنترلی از روش تصویر به تصویر صورت گرفت. تصحیح جوی روی این تصاویر نیز با استفاده از روش IARR در نرم‌افزار ENVI [۲۸،۲۷] صورت گرفت.

۴- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

همان‌گونه که پیش‌ازاین نیز مطرح گردید، تصاویر سنجنده ASTER در سه دامنه طیفی مشخص باقدرت تفکیک مکانی متمایز در دسترس می‌باشند که در راستای پهنه‌بندی و بارزسازی مناطق دگرسانی در مطالعات اکتشافی از آن بهره‌برداری می‌شود. روش‌های پردازش مورد استفاده در این نوشتار نیز شامل تصاویر رنگی کاذب (RGB)، نسبت باندی (Band Ratio)، نسبت‌گیری باند جذب نسبی (RBD)، پالایش تطبیقی (MF) و نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) بودند که هر یک در ادامه توضیح داده خواهند شد. در روش‌های SAM و MF برای نمودار طیف مرجع از طیف‌های استخراج‌شده از پیکسل‌های خالص تصویر استر استفاده شد.

۴-۱- ترکیب رنگی کاذب RGB

در مطالعات دورسنجی ترکیب رنگی تصاویر به‌طور گسترده‌ای به کار می‌روند. در یک سامانه تصویر چند باندی متداول در نبود باند آبی، می‌توان تصاویر رنگی را با استفاده از باندهای مادون‌قرمز نزدیک، سرخ و سبز در ترکیبی که به‌عنوان ترکیب رنگی کاذب می‌شناسیم، تولید کرد [۲۹]. زمانی که سه تصویر سیاه و سفید را به‌صورت RGB باهم ترکیب می‌کنیم، تصویر جدیدی حاصل می‌شود که می‌توان با آن دید و تفسیر بهتری از پدیده‌های سطحی به نمایش گذاشت [۳۰]. تحلیل‌های تجربی نشان داده است که برای مشاهده مناطق دگرسان شده، یکی از بهترین ترکیب‌های رنگی کاذب در اغلب کانسارها، ترکیب $RGB=468$ است [۳۲،۳۱]. در این ترکیب رنگی اغلب مناطق دگرسان شده با رنگ صورتی نمایش داده می‌شوند.

$$a = \cos^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2)^{1/2} (\sum_{i=1}^{nb} r_i^2)^{1/2}} \right] \quad (2)$$

در این رابطه nb تعداد باندها، t_i طیف تصویر منطقه مطالعاتی و r_i طیف مرجع می‌باشد [۴۰، ۳۹]. طیف مرجع شامل طیف کتابخانه‌های طیفی، طیف آزمایشگاهی، طیف صحرایی و همین‌طور طیف استخراج‌شده از پیکسل‌های خالص تصویر می‌شود [۴۱]. در این تحقیق از طیف‌های استخراج‌شده از پیکسل‌های خالص تصویر به‌عنوان داده مرجع استفاده شد. خروجی روش SAM، تخمینی کیفی از مشابهت طیف مورد نظر با هر طیف مرجع ارائه می‌دهد. در خروجی حاصل از این روش، پیکسل روشن‌تر معادل زاویه بزرگ‌تر و نشان از اختلاف بیشتر طیف مورد مطالعه با طیف مرجع و پیکسل تاریک‌تر معادل زاویه کوچک‌تر و نماد مشابهت بیشتر طیف‌ها است. در ادامه نحوه استخراج طیف خالص از پیکسل‌های تصویر استر برای شناسایی مناطق دگرسانی در دو روش MF و SAM آورده شده است.

۴-۶- استخراج طیف خالص از پیکسل‌های تصویر استر برای شناسایی مناطق دگرسانی

در هر پیکسل از تصاویر ماهواره‌ای به‌طور معمول مواد مختلفی شامل آب، گیاهان و انواع مواد زمینی وجود دارند. در مباحث مربوط به مواد زمینی و مخصوصاً در رابطه با کانی‌ها، به‌ندرت می‌توان پیکسلی یافت که ۱۰۰ درصد آن از یک نوع کانی تشکیل شده باشد، چرا که کانی‌ها برحسب شرایط تشکیل آن‌ها عمدتاً به‌صورت مجموعه کانی‌ها در سطح زمین حضور دارند. لذا به دلایلی که ذکر گردید جداسازی طیف خالص از پیکسل‌های تصویر کار آسانی نیست. در این تحقیق برای استخراج طیف خالص از پیکسل‌های تصویر استر ابتدا با استفاده از روش انتقال کسر حداقل نوفه MNF ابعاد اصلی اطلاعات تصویر تعیین گردید تا نوفه موجود در اطلاعات جداسازی شده و نیازهای محاسباتی برای پردازش بعدی کاهش یابد. سپس به‌منظور جداسازی خالص‌ترین پیکسل‌ها در تصویر چندطیفی استر از روش شاخص خلوص پیکسل PPI استفاده گردید [۴۲]. با توجه به پیکسل‌های روشن در تصویر حاصل از شاخص خلوص پیکسل و میزان شباهت طیف تصویر با طیف بازنویسی شده کتابخانه طیفی USGS، طیف‌های مورد نظر برای هر دگرسانی استخراج شد. لازم به ذکر می‌باشد که

جدول ۲- ترکیب‌های باندی مهم برای بارزسازی پهنه‌های دگرسانی [۳۵، ۳۴]

ترکیب باندی	کانی‌های شاخص دگرسانی	نوع دگرسانی
(Band 4+Band 6)/Band 5	کائولینیت، مونت مورینیت	دگرسانی آرژلیک
(Band 7+Band 4)/Band 6	سریسیت، کوارتز	دگرسانی سریستیک
(Band 9+Band 7)/Band 8	کلریت، اپیدوت، کلسیت	دگرسانی پروپلیتیک

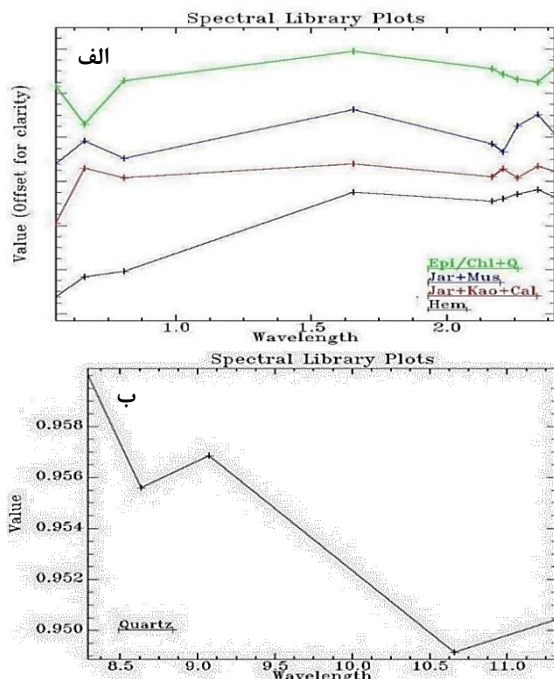
۴-۴- پالایش تطبیقی^۲

یکی دیگر از روش‌های مهم پردازش تصاویر ماهواره‌ای، روش پالایش تطبیقی (MF) است. در این روش با استفاده از Endmemberهای تعریف‌شده توسط کاربر، پاسخ طیف‌های خالص معلوم را افزایش داده و مانع پاسخ زمینه می‌شود. این روش وسیله‌ای سریع برای شناسایی مواد خاص بر اساس تطبیق اعضای انتهایی منحنی بازتاب طیفی با طیف تصویر می‌باشد [۳۶]. این الگوریتم باهدف یافتن میزان فراوانی هر عضو تعریف‌شده در تصویر، از تجزیه اختلاط طیفی استفاده می‌کند [۳۶، ۳۷]. از ویژگی‌های اصلی این روش می‌توان به طبقه‌بندی بهتر عوارضی اشاره کرد که تصویر پراکنده بوده و در روش‌های معمول طبقه‌بندی در کلاس‌های دیگر تلفیق می‌شوند.

۴-۵- نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)

الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی یا SAM اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط کروز و همکاران به‌کاربرده شد [۳۸]. روشی کارا برای مقایسه طیف تصاویر مورد مطالعه در منطقه هدف نسبت به یک طیف مشخص یا استاندارد (کتابخانه‌ای) است. این الگوریتم بر این فرض استوار است که هر پیکسل از تصاویر سنجش از دوری می‌تواند منحصر به یک کلاس از پوشش‌های زمینی باشد. درواقع در این روش با تبدیل طیف‌ها به بردار در فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه طیفی بین دو بردار محاسبه می‌شود. در این روش زاویه کوچک‌تر تطابق بیشتری نسبت به طیف مرجع نشان می‌دهد. همچنین پیکسل‌های دارای زاویه خیلی بزرگ‌تر از حداکثر زاویه آستانه تعیین‌شده، طبقه‌بندی نمی‌شوند. زاویه طیفی با استفاده از رابطه (۲) بین طیف تصویر (t) و طیف مرجع (r) محاسبه می‌شود.

کانی‌های اپیدوت و کلریت نیز در ۲/۳۵ میکرومتر (مطابق باند ۸ سنجنده استر) به دلیل بنیان‌های Mg-O-H دارای ویژگی‌های جذبی هستند [۴۴،۳۴]. کوارتز هیدروترمال ویژگی‌های طیفی در ۸/۶۵، ۸/۵ و ۸/۹ میکرومتر دارد که بر باندهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲ استر منطبق است [۴۸] (شکل ۴-ب).



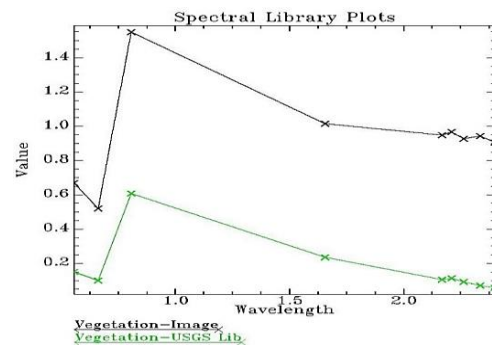
شکل ۴- الف: طیف‌های استخراج‌شده از پیکسل‌های تصویر استر برای شناسایی مناطق دگرسانی، ب: طیف کوارتز استخراج‌شده از باندهای محدوده TIR سنجنده استر

۵- یافته‌های تحقیق

۵-۱- نتایج حاصل از روش ترکیب رنگی کاذب (RGB)

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، بر مبنای تحلیل‌های تجربی یکی از بهترین ترکیب رنگ‌های کاذب برای مشاهده مناطق دگرسان شده در اغلب کانسارها ترکیب RGB=468 است [۳۱،۳۰]. تصویر به‌دست‌آمده بر اساس ترکیب رنگی RGB:468 مربوط به منطقه معدن فیروزه در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل نهشته‌های آبرفتی کواترن به رنگ‌های خاکستری، خاکستری تیره، کرمی و سفید مشاهده می‌شوند (Q در شکل ۵). تنوع رنگ موجود در این واحدها ناشی از تفاوت در منشأ و ترکیب آن‌ها است. سنگ‌های رسوبی را می‌توان از روی بافت‌های حاصل از زهکشی و لایه‌بندی آن‌ها تشخیص داد (بخش‌هایی در شمال شرق و جنوب غرب

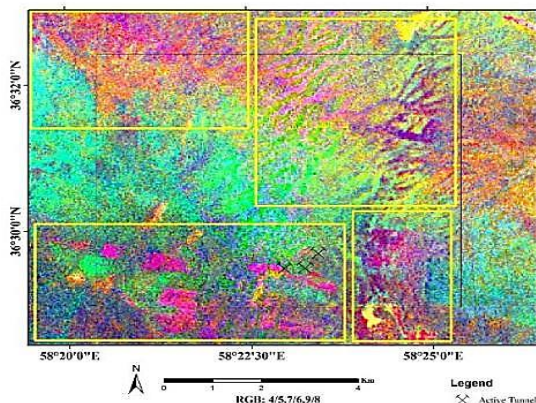
طیف گیاه استخراج‌شده از تصویر استر با طیف گیاه کتابخانه طیفی USGS کاملاً مطابقت دارد (شکل ۳).



شکل ۳- طیف گیاه استخراج‌شده از تصویر استر به همراه طیف بازنویسی شده کتابخانه طیفی بر اساس باندهای محدوده SWIR و NVIR استر

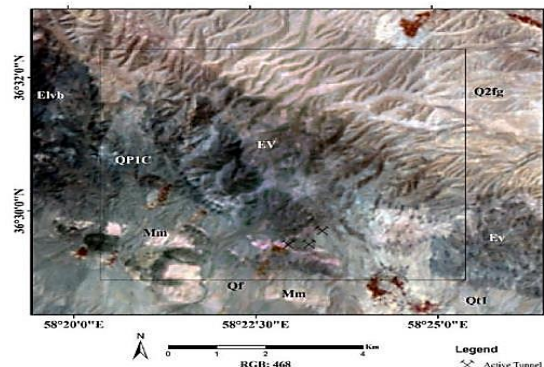
همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد معمولاً کانی‌های با شرایط تشکیل یکسان از نظر فیزیکوشیمیایی، همراه باهم دیده می‌شوند. در طیف‌های استخراج‌شده از پیکسل‌های تصویر نیز شاهد وجود طیف مخلوط دو یا چند کانی هستیم که برای تشخیص کانی‌های موجود در هر طیف از جذب‌های شاخص هر کانی استفاده می‌نماییم. ویژگی‌های جذبی کانی هماتیت در ۰/۴۸۰ و ۰/۸۷۲ میکرومتر به دلیل وجود آهن فریک و ۱/۸۸۵ میکرومتر به دلیل ارتعاش بنیان‌های OH وجود دارد [۴۳]. در کانی کائولینیت دو ویژگی جذبی در ۲/۱۶ و ۲/۲۰ میکرومتر (منطبق بر باندهای ۵ و ۶ سنجنده استر) مرتبط با ارتعاش Al-OH وجود دارد. کانی‌های مسکویت، مونتموریلونیت و ایلیت در ۲/۲۰ میکرومتر (منطبق بر باند ۶ سنجنده استر) دارای ویژگی جذبی مرتبط با Al-OH هستند. کانی آلونیت نیز در ۲/۱۶ میکرومتر (مطابق با باند ۵ سنجنده استر) دارای جذب اصلی بوده و در ۱/۷ و ۲/۳۲ میکرومتر (مطابق با باندهای ۴ و ۸ سنجنده استر) جذب ضعیف‌تر نشان می‌دهد [۴۳-۴۵]. کانی ژاروسیت به دلیل انتقالات الکترونی آهن فریک و ارتعاشات بنیان‌های Fe-OH در ۰/۴۳۶ و ۲/۲۶۵ میکرومتر (مطابق با باند ۷ سنجنده استر) ویژگی جذبی نشان می‌دهد (شکل ۴-الف) [۴۳،۴۶]. در ساختمان آمورف سیلیس اپالی و کلسدون ادخال آب وجود دارد که باعث ایجاد ویژگی جذبی در محدوده ۲/۲۶ - ۲/۲۲ میکرومتر (منطبق بر باندهای ۶ و ۷ سنجنده استر) طیف اپال و کلسدونی می‌شود [۴۷]. کانی کلسیت در ۲/۳۳ میکرومتر (مطابق با باند ۸ سنجنده استر) به دلیل بنیان‌های CO₃ دارای ویژگی جذبی است [۳۴].

آرژلیک، از کانی‌های شاخص این دگرسانی‌ها با استفاده از نمودارهای استاندارد آن‌ها استفاده شده است. بر مبنای مطالب گفته‌شده در این خصوص چنین برمی‌آید که دگرسانی گرمابی به‌ویژه آلونیت با به‌کارگیری نسبت باندی ۴/۵، بارز می‌شود. همچنین مطابق نمودار طیف انعکاسی کانی‌های شاخص دگرسانی آرژلیک، این کانی‌ها دارای تابش در محدوده باندهای ۴ و ۷ و جذب در محدوده باندهای ۶ و ۹ می‌باشند. از این‌رو برای آشکارسازی کانی‌های رسی با توجه به خصوصیات طیفی آن‌ها می‌توان از نسبت‌های باندی ۴/۹، ۷/۹، ۴/۶، ۷/۶، سنجنده ASTER استفاده نمود [۳۵، ۳۴] که در این پژوهش از نسبت باندی ۷/۶ استفاده شده است. برای بارزسازی مناطق دارای دگرسانی پروپلیتیک، بر مبنای طیف انعکاسی استاندارد کانی‌های شاخص این دگرسانی (کلریت) در باندهای ۹ و ۷ دارای تابش و در باند ۸ به دلیل وجود پیوند Mg-OH دارای جذب هستند. از این‌رو نسبت باندی ۹/۸ برای بارزسازی این مناطق مناسب تشخیص داده شد. همان‌طور که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، با استفاده از روش ترکیب رنگی کاذب (RGB)، نیز می‌توان تصاویری تولید کرد که تفسیر و نتیجه‌گیری بر اساس آن‌ها قابل‌اعتماد و کاربردی‌تر باشد. شکل ۶ تصویر رنگی حاصل از نسبت‌های باندی در مورد دگرسانی‌های مشاهده‌شده در منطقه معدن فیروزه است. در این تصویر مناطق مشخص‌شده دگرسانی پروپلیتیک با رنگ سبز تا کرم، دگرسانی‌های فلیک با رنگ صورتی تا بنفش و آرژلیک با نارنجی به نمایش درآورده شده‌اند. مناطقی که با رنگ سرخابی نیز بارز شده‌اند نشان‌دهنده واحدهای سنگی آغشته به هر دو دگرسانی آرژلیک و پروپلیتیک است.



شکل ۶- ترکیب رنگی RGB=4/5,7/6,9/8 منطقه معدن فیروزه که مناطق دگرسان شده در آن مشخص شده‌اند.

محدوده مورد مطالعه). خواص طیفی این سنگ‌ها در ارتباط با منشأ آن‌ها است. چنین تصاویری می‌توانند نمونه‌برداری‌های ژئوشیمیایی اکتشافی از رسوبات را جهت‌دهی کنند. سنگ‌های آذرین بیرونی (آندزیت، تراکیت، تراکی آندزیت، آندزیت بازالت) که در تصویر با علائم EV و Elvb نشان داده شده‌اند، به رنگ‌های سیاه، خاکستری، سبز، بنفش و زرد دیده می‌شوند. رنگ‌های زرد و سفید و صورتی در این سنگ‌ها در نتیجه دگرسانی‌های موجود حاصل شده است. رنگ‌های تیره نیز به علت حضور کانی‌های مافیک در آن‌ها است. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، برخی از مناطق صورتی‌رنگ که نشان‌دهنده رخداد دگرسانی در منطقه معدن فیروزه است، منطبق بر سه تونل فعال فعلی این معدن می‌باشد.



شکل ۵- ترکیب رنگی RGB=468 منطقه معدن فیروزه که بر روی آن برخی واحدهای زمین‌شناسی مشخص شده‌اند. (توضیحات بیشتر در متن ارائه شده است)

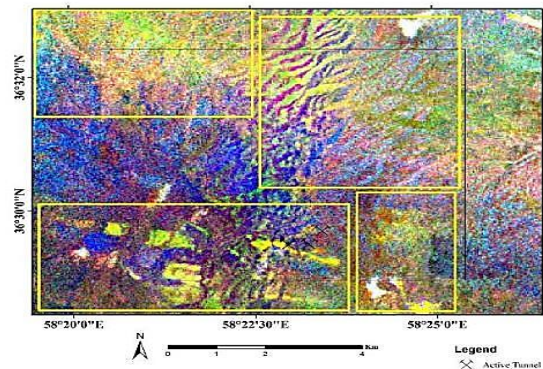
۵-۲- نتایج حاصل از روش نسبت‌گیری باندی^۳

چگونگی انتخاب باندهای مورد نظر برای نسبت‌گیری باندی بدین‌صورت است که با توجه به شکل طیف بازتابی مربوط به هر کانی، باندهایی که شامل بیشترین و کمترین میزان بازتاب توسط کانی یا سنگ مورد نظر باشند را بر هم تقسیم می‌کنند. در تصویر حاصل نقاط یا پیکسل‌های به رنگ روشن، پیکسل‌های هدف هستند. از آنجاکه تصاویر حاصله تک باندی هستند می‌توان با نسبت دادن یکی از رنگ‌های اصلی سرخ - سبز - آبی (RGB)، به هر تصویر حاصل از نسبت باندی یک ترکیب رنگی دروغین برای بررسی بهتر به دست آورد. با توجه به مشخصات طیفی کانی‌های شاخص در هر نوع دگرسانی برای مشخص کردن این مناطق، می‌توان نسبت‌های باندی را تعریف کرد. از این‌رو برای آشکارسازی دگرسانی‌های پروپلیتیک، فلیک و

۳-۵- نتایج حاصل از روش نسبت گیری باند جذب

نسبی RBD

برای استفاده از این روش در بارزسازی مناطق دگرسان شده نسبت‌های باندی که در جدول ۲ ذکر شده، به کار گرفته شده است. بر این اساس نسبت باندی $(b4+b6)/b5$ برای بارزسازی کانی‌های شاخص دگرسانی آرژیلیک، نسبت باندی $(b7+b4)/b6$ برای بارزسازی کانی‌های شاخص دگرسانی سریستیک و نسبت باندی $(b9+b7)/b8$ برای بارزسازی کانی‌های شاخص دگرسانی پروپلیتیک استفاده شده است [۳۵، ۳۴]. از نسبت‌های مذکور نیز ترکیب رنگی کاذب ایجاد شد. شکل ۷ تصویر رنگی حاصل از RBD در منطقه مورد مطالعه است که مناطق دارای دگرسانی در آن به صورت پیکسل‌های با رنگ سبز، سبز و نارنجی بارز شده‌اند.

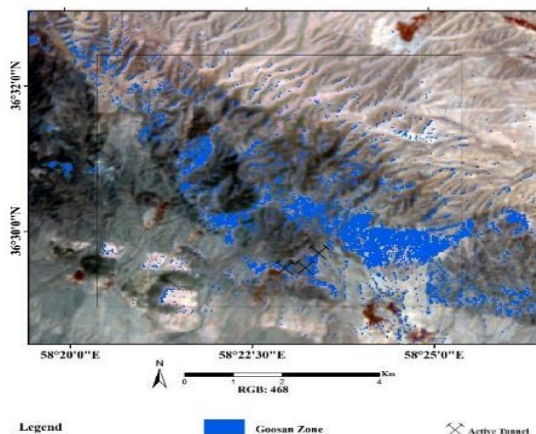


شکل ۷- مناطق حاوی دگرسانی بر اساس روش RBD که در آن به صورت پیکسل‌های با رنگ سبز، زرد، نارنجی و کرم‌رنگ قابل مشاهده هستند.

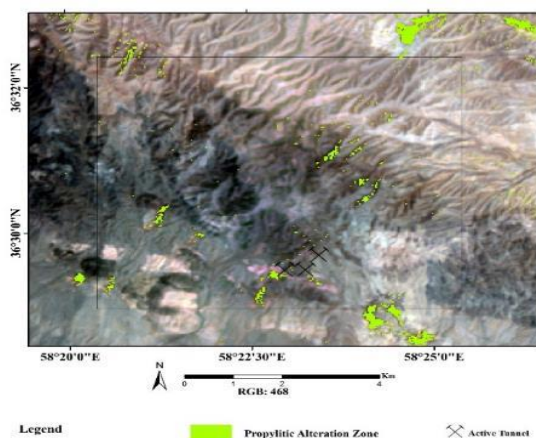
۴-۵- نتایج حاصل از روش پالایش تطبیقی (MF)

در روش MF، پس از اعمال تصحیحات اتمسفری بر تصویر خام هریک از فریم‌ها و Resample کردن منحنی طیفی هر یک از کانی‌های شاخص با اعمال الگوریتم موجود تصویری به دست می‌آید که در آن نقاط هدف به رنگ سفید دیده می‌شوند. تصویر حاصل، معیاری است در تعیین میزان آستانه که به وسیله آن می‌توان اهداف مدنظر را بارز نمود. از مزیت‌های آستانه‌گذاری این است که می‌توان با قرار دادن طیف کانی مختص یک نوع دگرسانی خاص به عنوان ورودی، سایر مناطق مشابه به این طیف را از زمینه جدا نمود (مناطق هدف به رنگ سفید و مناطق زمینه به رنگ سیاه). تصاویر حاصله نیز با استفاده از طبقه‌بندی نظارت‌نشده با دو کلاس طبقه‌بندی می‌شوند تا لایه‌ی باینری به ارزش ۱ برای

مناطق مورد نظر ایجاد شود. تصویر حاصل از این روش طبقه‌بندی دارای مناطق تک‌پیکسل می‌باشد لذا یک فیلتر Max-Min متناسب با میزان و پراکندگی مناطق تک پیکسل اعمال می‌گردد تا حاصل کار به بردار تبدیل شده و برای فرآیند تلفیق و آشکارسازی مناطق پتانسیل‌دار به کار گرفته شود [۴۹، ۳۷]. شکل‌های ۸ تا ۱۱ تصاویر حاصل از اعمال الگوریتم MF برای شناسایی و بارزسازی دگرسانی‌های گوسان، پروپلیتیک (کانی‌های اپیدوت و کلریت که شاخص این دگرسانی هستند)، آرژیلیک و سریستیک در منطقه معدن فیروزه است. مکان‌های هدف در هریک از شکل‌های مورد نظر که در ادامه آمده است، با پیکسل‌های مشخص بارز شده‌اند. شکل ۱۲ نیز پراکندگی کلی از دگرسانی‌های موجود در منطقه به دست آمده از روش MF به همراه گسل‌های موجود را نشان می‌دهد.



شکل ۸- پراکندگی مناطق دگرسانی گوسان با استفاده از روش MF در منطقه معدن فیروزه

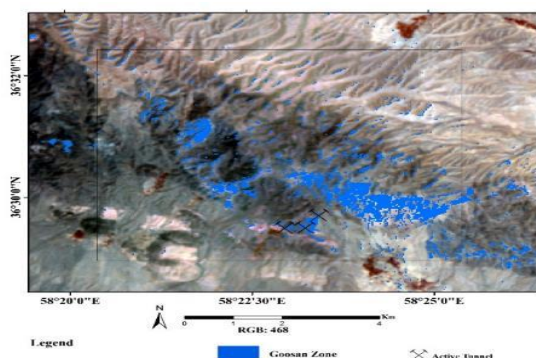


شکل ۹- پراکندگی مناطق با دگرسانی پروپلیتیک با استفاده از روش MF در منطقه معدن فیروزه

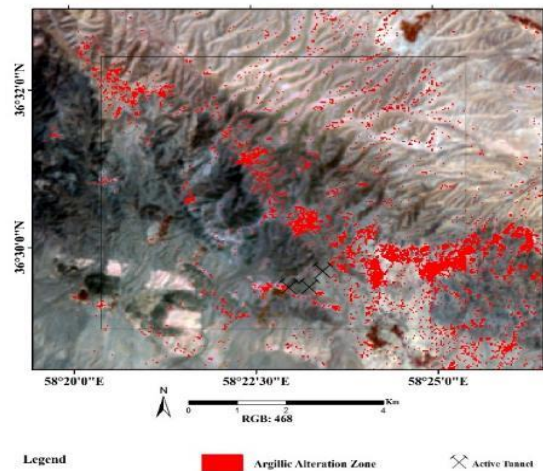
۵-۵- نتایج حاصل از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)

در منطقه مورد مطالعه برای اعمال الگوریتم SAM ابتدا کانی‌های شاخص هر زون دگرسانی انتخاب شد بدین صورت که کانی‌های کلریت و اپیدوت به عنوان کانی‌های شاخص زون دگرسانی پروپلیتیک، کائولینیت، ژاروسیت و کلسیت به عنوان کانی‌های شاخص زون دگرسانی آرژیلیک، موسکویت و ژاروسیت به عنوان کانی‌های شاخص زون دگرسانی سریستیک، کوارتز به عنوان کانی شاخص زون دگرسانی سیلیسی و در نهایت هماتیت به عنوان کانی ثانویه زون گوسان انتخاب گردیدند. برای طیف مرجع نیز از طیف‌های استخراج شده از پیکسل‌های خالص تصویر استر استفاده گردید. نتایج حاصل از اعمال روش SAM با نقشه‌ی زمین‌شناسی و دگرسانی منطقه مقایسه گردید. با استفاده از این نتایج مشخص شد که دگرسانی سیلیسی به طور پراکنده و به مقدار زیاد در منطقه وجود دارد. دگرسانی آرژیلیک عمدتاً در نواحی شمالی و مقداری در جنوب خصوصاً بخش جنوب شرقی گسترده است. این دگرسانی‌ها در نواحی جنوب غرب معدن فیروزه نیز مشاهده می‌شود.

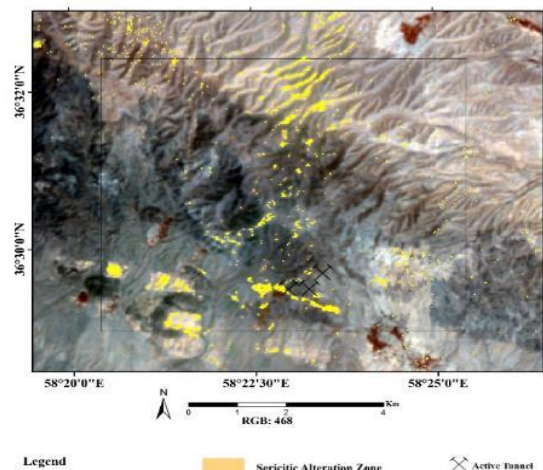
دگرسانی پروپلیتیک، کربناتی و گوسان به طور شدید در منطقه، خصوصاً در کمربند شمال غرب - جنوب شرق نمود دارد. شکل‌های شماره ۱۳ تا ۱۶ تصاویر حاصل از اعمال الگوریتم SAM برای شناسایی و بارسازی پهنه‌های دگرسانی گوسان، پروپلیتیک، آرژیلیک پیشرفته و متوسط و سریستیک در منطقه معدن فیروزه را نشان می‌دهند. شکل ۱۷ نیز پراکندگی کلی از دگرسانی‌های موجود در منطقه به دست آمده از روش SAM به همراه گسل‌های موجود را به نمایش درآورده است.



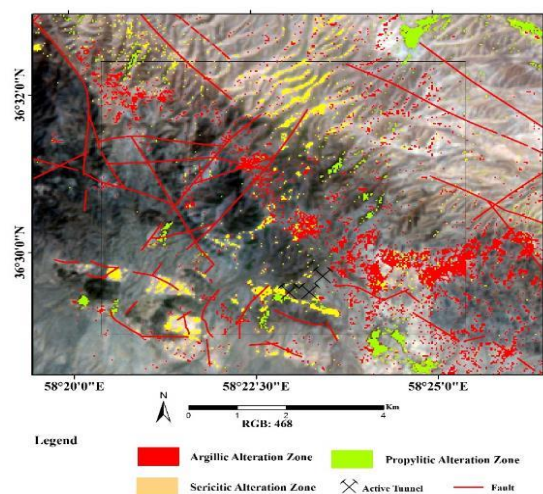
شکل ۱۳- پراکندگی مناطق دگرسانی گوسان با استفاده از روش SAM در منطقه معدن فیروزه



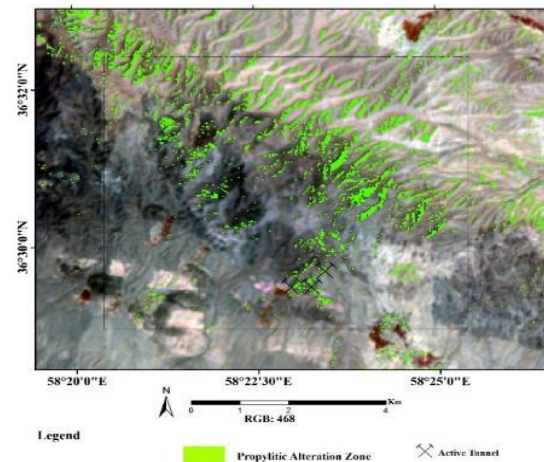
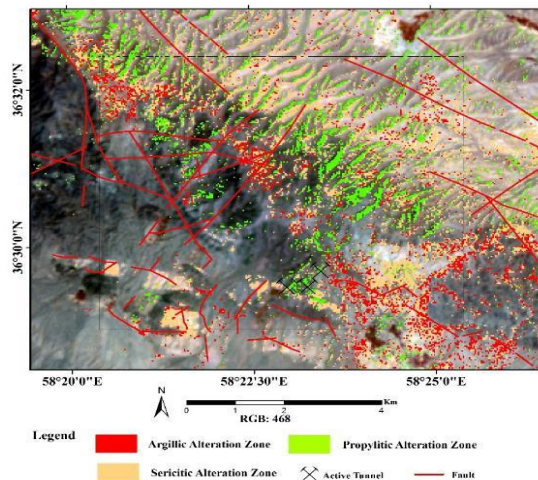
شکل ۱۰- پراکندگی مناطق با دگرسانی آرژیلیک با استفاده از روش MF در منطقه معدن فیروزه



شکل ۱۱- پراکندگی مناطق با دگرسانی سریستیک با استفاده از روش MF در منطقه معدن فیروزه



شکل ۱۲- پراکندگی پهنه‌های مختلف دگرسانی با استفاده از روش MF در منطقه معدن فیروزه



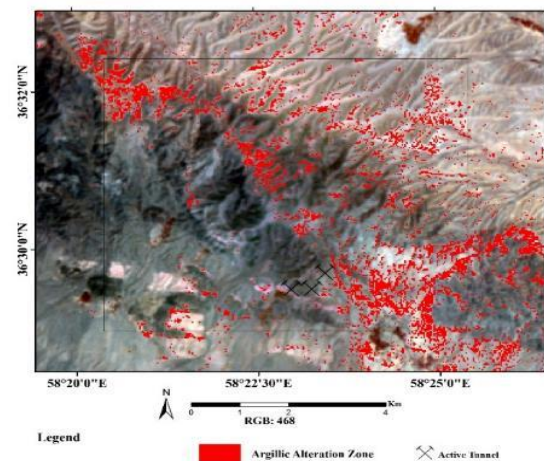
شکل ۱۴- پراکندگی مناطق دگرسانی پروپلیتیک با استفاده از روش SAM در منطقه معدن فیروزه

شکل ۱۵- پراکندگی پهنه‌های مختلف دگرسانی با استفاده از روش SAM در منطقه معدن فیروزه

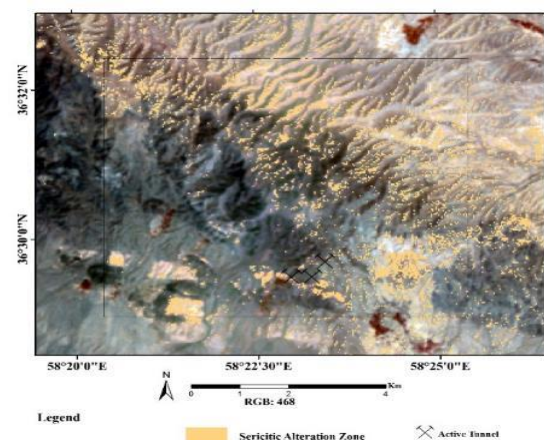
۶- مطالعات صحرایی و پتروگرافی

در این تحقیق با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصویر بر روی داده‌های سنجنده استر پهنه‌های مختلف دگرسانی در منطقه معدن فیروزه شناسایی و از یکدیگر تفکیک شد. به منظور بررسی میزان درستی تفکیک و شناسایی روش‌های مورد استفاده، پهنه‌های دگرسانی بارز شده در مطالعات صحرایی و پتروگرافی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌برداری از واحدهای مختلف سنگی در اطراف معدن فیروزه، صورت گرفته است و از حدود بیش از ۱۰۰ نمونه برداشت شده، ۵۰ مقطع نازک تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. جدول ۳ خلاصه‌ای از پتروگرافی برخی از مقاطع مطالعه شده در این منطقه را نشان می‌دهد. موقعیت تمام نقاط برداشت شده نیز در نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱) پلات شده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، دگرسانی غالب در این منطقه دگرسانی سیلیسی است که تقریباً کل منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد، بخش اعظم این دگرسانی منطبق بر پهنه دگرسانی گوسان است. دگرسانی‌های سریستیک و آرژیلیک و پروپلیتیک نیز رتبه‌های بعدی از نظر پراکندگی در واحدهای سنگی منطقه را به خود اختصاص داده‌اند.

دگرسانی سیلیسی بیشتر در بخش‌های شمال غربی و شمال شرقی تونل‌های فعال معدن فیروزه گسترش دارند. واحدهای سنگی منطقه به دلیل رخداد این دگرسانی ظاهری خشن و صخره‌ساز به خود گرفته‌اند. کانی اصلی این دگرسانی کوارتز ثانویه است که هم به صورت پراکنده و هم



شکل ۱۵- پراکندگی مناطق دگرسانی آرژیلیک با استفاده از روش SAM در منطقه معدن فیروزه



شکل ۱۶- پراکندگی مناطق دگرسانی سریستیک با استفاده از روش SAM در منطقه معدن فیروزه

به صورت رگچه‌ای در متن سنگ قابل مشاهده است. کانی‌های فرعی از جمله کانی‌های رسی و کربنات نیز در سنگ‌هایی که متحمل این دگرسانی شده‌اند، قابل مشاهده است (شکل ۱۸ الف، ب). دگرسانی سربستیک از جمله پهنه‌های دگرسانی در منطقه است که به نسبت از گسترش قابل توجهی برخوردار است و می‌توان گفت در اکثر واحدهای سنگی منطقه قابل مشاهده است. پراکندگی این دگرسانی با دگرسانی آرژیلیک انطباق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد رخداد اصلی این زون دگرسانی در واحدهای سنگی اطراف تونل‌های فعال معدن، غرب و جنوب غرب این تونل‌ها و همچنین شمال غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارد. بروزند این دگرسانی در منطقه به رنگ قهوه‌ای، خاکستری تا زرد روشن (در نتیجه تبدیل پیریت به لیمونیت) است. ضمن مطالعه مقاطع نازک کانی‌های سربستیت، کوارتز و پیریت که محصولات اصلی این نوع دگرسانی می‌باشند، به راحتی قابل تشخیص هستند (شکل ۱۸ ج، د). دگرسانی آرژیلیک در واقع کوچک‌ترین پهنه دگرسانی مشاهده شده در منطقه معدن فیروزه است که گسترش آن با توجه به موقعیت تونل‌های فعال معدن فیروزه، در بخش‌های جنوب غربی، شمال غربی و شرق معدن در واحدهای سنگی آندزیتی، تراکی آندزیت و تراکیت دیده می‌شود. واحدهای سنگی مناطق مذکور به دلیل رخداد این دگرسانی دارای رنگ

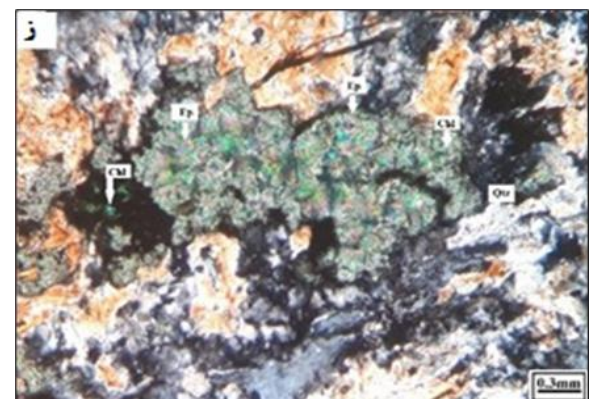
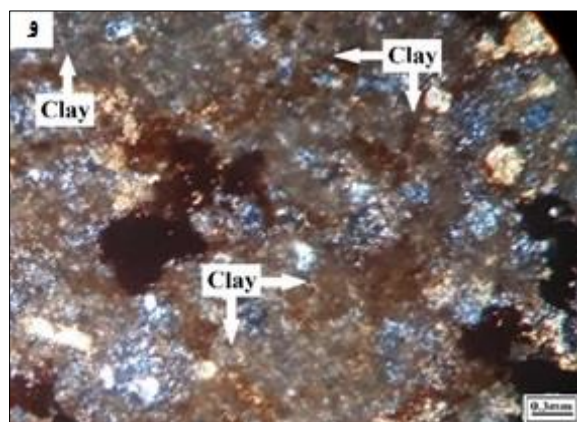
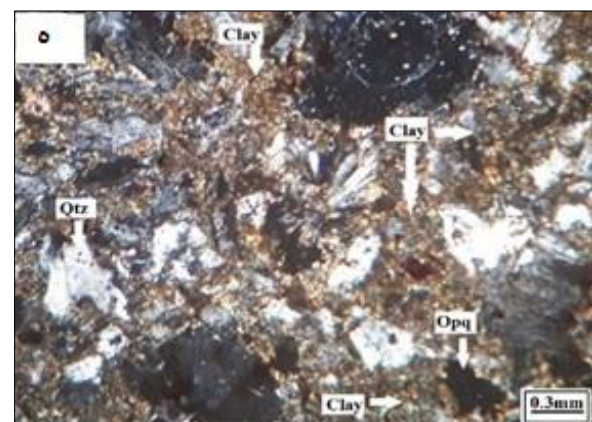
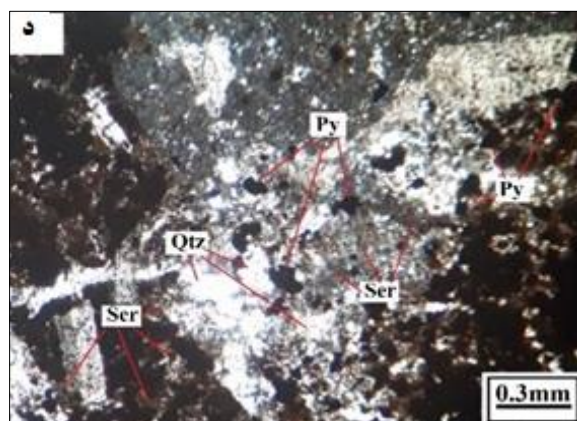
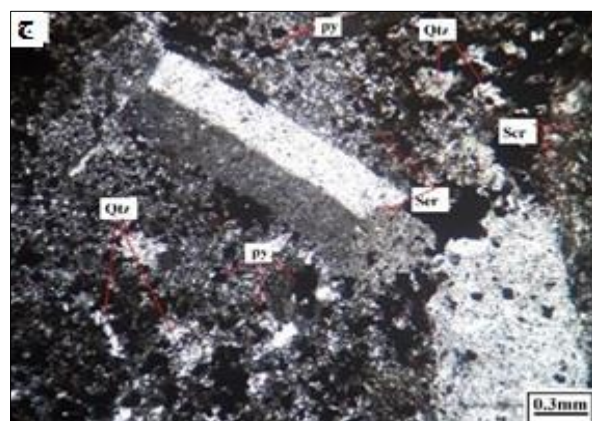
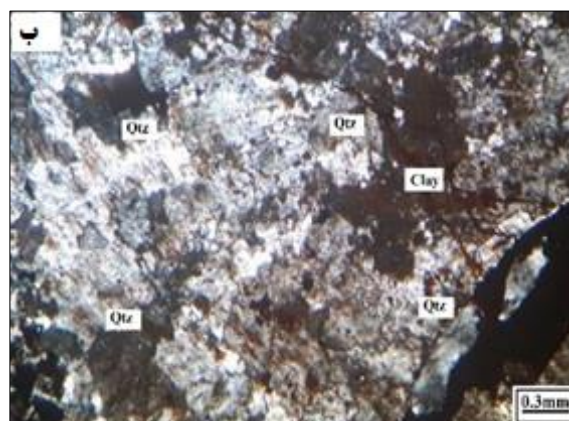
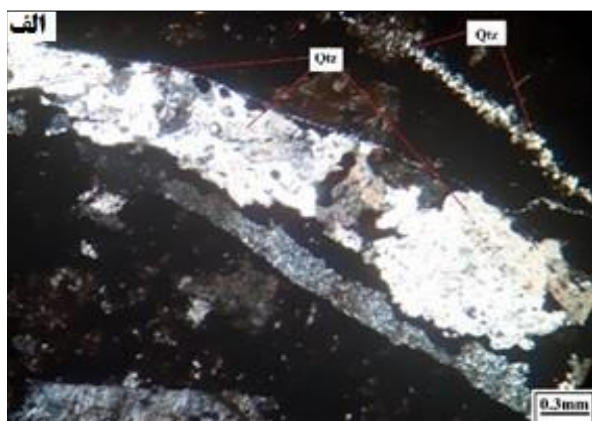
روشن و ظاهری تپه‌ماهوری هستند. بر اثر این دگرسانی کانی‌های آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی از جمله کائولینیت، مونت‌موریونیت و ایلیت تبدیل می‌شوند. کانی‌های رسی گاه به صورت رگچه‌ای و گاه به صورت پراکنده در زمینه اصلی سنگ قابل مشاهده هستند. کانی‌های فرعی در مقاطع مربوط به این دگرسانی شامل موسکویت، کوارتز و ژاروسیت است. (شکل ۱۸ ه، و). در بخش‌هایی که شدت این دگرسانی بسیار بالا است (اطراف تونل‌های معدن غرب آن) کانی‌های تشکیل دهنده سنگ در مقطع میکروسکوپی قابل تشخیص نیست. دگرسانی پروپیلیتیک بیشتر در اطراف تونل‌های فعال معدن گسترش دارد و علاوه بر این در بخش غرب و جنوب غرب این تونل‌ها و همچنین شمال شرق منطقه مورد مطالعه نیز از گسترش خوبی برخوردار است. رنگ واحدهای سنگی در این زون دگرسانی به نسبت دیگر زون‌ها خاکستری تا تیره بوده و ظاهری صخره‌ساز دارند. واحدهای سنگی آندزیتی بیشتر تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند. مطالعات صحرایی، پروپیلیتی شدن به‌ویژه از نوع کلریتی شدن در اطراف تونل‌های معدن و بخش غربی آن را تأیید می‌کند. در اغلب مقاطع نازک مطالعه شده از این دگرسانی، کلریت به مقدار زیاد و کلسیت به مقدار کمتر تشکیل شده است. اپیدوت نیز به مقدار کمتر در کنار کلریت قابل مشاهده است.

جدول ۳- موقعیت، پتروگرافی و دگرسانی برخی نمونه‌های برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

نام سنگ	دگرسانی غالب	پتروگرافی	موقعیت		شماره
			طول	عرض	
هورنبلند تراکیت	اکسید آهن	هورنبلند، پلاژیوکلاز، کوارتز	۶۲۴۳۲۲/۵۱۲۴	۴۰۳۹۲۱۲/۸۲۵۵	۱
تراکیت	پروپیلیتیک	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، اپیدوت	۶۲۴۳۲۲/۵۱۲۴	۴۰۳۹۲۱۲/۸۲۵۵	۲
آندزیت	اکسید آهن - کربناتی	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، هورنبلند، کوارتز، کانی اپک	۶۲۴۳۳۱/۴۷۸۷	۴۰۳۹۲۱۲/۳۳۸۲	۳
آندزیت	پروپیلیتیک	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، اپیدوت و کلریت	۶۲۴۰۸۴/۸۹۹۸	۴۰۳۹۴۳۳/۷۸۴۱	۴
تراکیت	سیلیسی - سربستیک	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، ژاروسیت	۶۲۴۰۳۶/۱۸۷۶	۴۰۳۹۱۵۲/۳۰۲۹	۵
آندزیت	پروپیلیتیک	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، اپیدوت و کلریت	۶۲۴۰۴۴/۳۹۱۲	۴۰۳۹۱۸۷/۵۵۷	۶
دیوریت	آرژیلیک شدید	کانیهای رسی - تورمالین	۶۲۳۹۳۵/۲۱۲۵	۴۰۳۹۲۵۱/۶۳۷۵	۷
لانیت	سیلیسی - کربناتی	کوارتز، آلکالی فلدسپار، کانیهای کربناته	۶۲۳۹۳۵/۲۱۲۵	۴۰۳۹۲۵۱/۶۳۷۵	۸
دیوریت پورفیری	آرژیلیک شدید	کانی های رسی، قالب آلکالی فلدسپار	۶۲۳۶۲۱/۶۱۹۴	۴۰۳۹۳۹۱/۹۹۹۱	۹
آندزیت	سیلیسی - آرژیلیک	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، کانی های رسی	۶۲۳۶۲۰/۶۴۰۵	۴۰۳۹۴۲۵/۵۸۰۱	۱۰
توف آندزیتی	سیلیسی - سربستیک	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، ژاروسیت، کانی رسی	۶۲۳۶۲۴/۶۴۸	۴۰۳۹۴۲۳/۷۸۸۳	۱۱

ادامه جدول ۳- موقعیت، پتروگرافی و دگرسانی نمونه‌های برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

شماره	موقعیت		پتروگرافی	دگرسانی غالب	نام سنگ
	عرض	طول			
۱۲	۴۰۳۹۳۳۶,۰۵۴۸	۶۲۳۸۰۴,۰۹۲۳	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، ژاروسیت، اکسید آهن	سریستیک	توف آندزیتی
۱۳	۴۰۳۹۳۴۱,۴۵۵۱	۶۲۳۷۹۳,۸۱۱۴	کانی‌های رسی - اکسید آهن	آرژیلیک شدید	آندزیت
۱۴	۴۰۳۹۳۳۲,۱۶۰۹	۶۲۳۸۵۴,۹۱۶۷	آلکالی فلدسپار - کانی‌های رسی	آرژیلیک شدید	تراکیت
۱۵	۴۰۳۹۱۶۲,۸۰۸	۶۲۳۸۶۶,۳۰۷۱	کانی‌های رسی - فلدسپار	آرژیلیک شدید	دیوریت
۱۶	۴۰۳۹۵۹۲,۸۴۴۴	۶۲۴۱۹۷,۵۲۵۲	کانی‌های رسی - هورنبلند	آرژیلیک شدید	آندزیت
۱۷	۴۰۳۹۵۹۲,۸۴۴۴	۶۲۴۱۷۲,۲۰۰۹	کوارتز، پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی	سیلیسی	توف ریولیتی
۱۸	۴۰۳۹۵۹۲,۸۴۴۴	۶۲۴۱۷۲,۲۰۰۹	فلدسپار سانیدین، کوارتز، کانی‌های رسی	سیلیسی - سریستیک	تراکیت
۱۹	۴۰۳۹۵۹۲,۸۴۴۴	۶۲۴۱۷۲,۲۰۰۹	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، فیروزه، کوارتز، ژاروسیت	سریستیک - آرژیلیک	تراکیت
۲۰	۴۰۳۹۵۹۳,۲۰۲۵	۶۲۴۱۹۷,۰۸۱۶	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، فیروزه	سیلیسی - آرژیلیک	تراکیت
۲۱	۴۰۳۹۶۵۴,۸۳۲۱	۶۲۴۱۹۶,۱۹۴۳	کوارتز، اکسید آهن، کانی‌های رسی، آلکالی فلدسپار	اکسید آهن - سیلیسی	آذرآوری
۲۲	۴۰۳۹۶۵۴,۸۳۲۱	۶۲۴۱۹۶,۱۹۴۳	پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، کوارتز، اکسید آهن	سیلیسی	توف آندزیتی
۲۳	۴۰۳۹۱۵۵,۷۱۸	۶۲۳۷۸۰,۲۹۹۸	پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، ژاروسیت، کوارتز، اکسید آهن	سیلیسی - اکسید آهن	توف آندزیتی
۲۴	۴۰۳۹۱۵۵,۷۱۸	۶۲۳۷۸۰,۲۹۹۸	پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی، اکسید آهن	آرژیلیک - اکسید آهن	آندزیت
۲۵	۴۰۳۹۱۵۵,۷۱۸	۶۲۳۷۸۰,۲۹۹۸	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز (رگچه‌ای و پراکنده)	سیلیسی	توف ریولیتی
۲۶	۴۰۳۹۱۵۵,۷۱۸	۶۲۳۷۸۰,۲۹۹۸	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی، کوارتز	سیلیسی - آرژیلیک	تراکیت
۲۷	۴۰۳۹۱۵۵,۷۱۸	۶۲۳۷۸۰,۲۹۹۸	پلاژیوکلاز، اکسید آهن، کانی‌های رسی	اکسید آهن - آرژیلیک	آندزیت
۲۸	۴۰۳۹۲۱۸,۴۱۸۵	۶۲۳۸۵۴,۰۶۰۸	آلکالی فلدسپار، کوارتز، کانی‌های رسی، اکسید آهن	سیلیسی - آرژیلیک	تراکیت
۲۹	۴۰۳۹۲۴۹,۹۵۱۲	۶۲۳۹۰۳,۶۳۰۵	آلکالی فلدسپار، کوارتز، پلاژیوکلاز	سیلیسی	تراکیت
۳۰	۴۰۳۹۲۴۹,۹۹۷۶	۶۲۳۹۰۶,۸۶۵۱	آلکالی فلدسپار، کوارتز، کانی‌های رسی، اکسید آهن	سیلیسی - اکسید آهن	تراکیت
۳۱	۴۰۳۸۹۴۰,۱۶۳	۶۲۴۵۵۵,۶۷۷	پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، کوارتز، اپیدوت و ژاروسیت	پروپیلیتیک - سریستیک	آندزیت
۳۲	۴۰۳۹۷۱۸,۷۲۳	۶۲۴۵۰۹,۴۲۶	پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، کوارتز، اپیدوت و کانی اپک	پروپیلیتیک - سریستیک	آندزیت
۳۳	۴۰۳۹۸۳۴,۳۵۱	۶۲۴۲۶۲,۷۵۴	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، اپیدوت و کلریت	پروپیلیتیک	آندزیت
۳۴	۴۰۳۹۷۱۸,۷۲۳	۶۲۴۴۴,۲۱۶/۹	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، اپیدوت و کربنات	پروپیلیتیک - کربناتی	آندزیت
۳۵	۴۰۳۹۰۲۴,۹۵۶	۶۲۴۴۲۴,۶۳۳	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، کلریت، ژاروسیت	سریستیک - پروپیلیتیک	تراکیت
۳۶	۴۰۳۸۹۱۷,۰۳۷	۶۲۴۵۹۴,۲۲	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، اپیدوت	پروپیلیتیک	آندزیت
۳۷	۴۰۳۹۴۳۰,۷۹۳	۶۲۳۴۳۱,۱۷۸	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، ژاروسیت، اکسید آهن	سریستیک - سیلیسی	توف آندزیتی
۳۸	۴۰۳۹۵۷۲,۰۷۹	۶۲۴۰۶۴,۵۲۹	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، کانی‌های رسی	سریستیک - آرژیلیک	آندزیت
۳۹	۴۰۳۹۳۶۲,۵۸۶	۶۲۴۵۷۱,۲۰۹	پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، کوارتز، ژاروسیت	سریستیک	دیوریت
۴۰	۴۰۳۹۱۴۳,۳۴۹	۶۲۲۶۸۰,۹۰۲	آلکالی فلدسپار، پلاژیوکلاز، کوارتز، ژاروسیت	سریستیک	تراکیت



شکل ۱۸- الف: رخداد کانی‌های ثانویه کوارتز به صورت رگچه‌ای در متن سنگ شاخص دگرسانی سیلیسی، ب: کانی‌های کوارتز ثانویه به صورت پراکنده در سنگ شاخص دگرسانی سیلیسی، ج و د: کانی‌های کوارتز، سرسیت و پیریت شاخص دگرسانی سرستیک در سنگ‌های آندزیتی، ه و و: کانی‌های رسی حاصل از دگرسانی شدید آلکالی فلدسپارها، به همراه کانی‌های اپک و کوارتز شاخص دگرسانی آرژلیک، ز: کانی‌های اپیدوت و کلریت حاصل از دگرسانی در سنگ‌های آندزیتی شاخص دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه معدن فیروزه (علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از [۵۰])

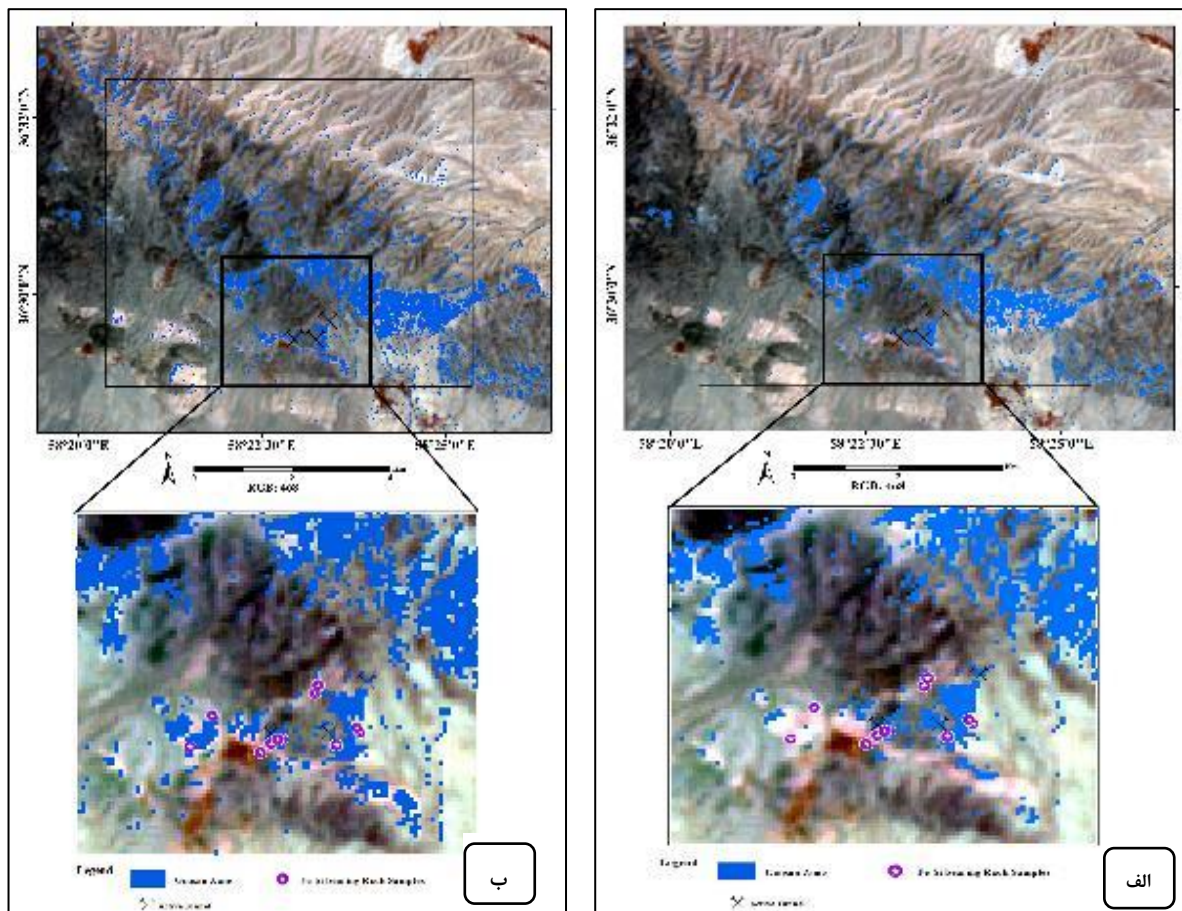
۷- بحث

ماگماتیسیم کالکوالکانال بر جای گذاشته شده در شمال شرق ایران پس از همگرایی بلوک لوت و اورازیا طی ائوسن، در نتیجه حرکات امتداد لغز طی این برخورد متحمل دگرشکلی‌های و شکستگی‌های گسترده‌ای شده است. به عبارت دیگر منشأ گسل‌ها و شکستگی‌ها در این حوضه را می‌توان با حوادث تکتونیکی عظیم ناشی از برخورد بین بلوک لوت و اورازیا توضیح داد [۵۱]. مطالعات پیشین در منطقه معدن فیروزه هموزن بودن میدان تنش حاکم بر سنگ‌های آتشفشانی آن از زمان ائوسن تاکنون را مشخص کرده است. همچنین دو رژیم تکتونیکی، کششی محض تا امتداد لغز - کششی در این منطقه شناسایی شده است. هندسه ساختارهای شکننده در ناحیه نیز گویای قرارگیری محدوده معدن فیروزه در یک زون تغییر شکل گسترده است [۱۴]. در چنین مناطقی اگر سنگ‌های نفوذپذیر در منطقه وجود داشته باشند، شدت دگرسانی افزایش می‌یابد و احتمال کانی‌سازی نیز وجود دارد. محل برخورد بین سنگ‌های نفوذپذیر و سنگ‌های نفوذناپذیر نیز مکان مناسبی برای تجمع محلول‌های کانه‌دار، دگرسانی و کانی‌سازی است. سازوکارهای دگرسانی، معمولاً رابطه بسیار نزدیک با فرآیندهای کانی‌سازی گرمایی دارند و در واقع بخشی از آن هستند. تفکیک زون‌های مختلف دگرسانی در یک منطقه و مطالعه آن‌ها، کمک شایانی به شناخت پتانسیل کانی‌سازی می‌نماید [۵]. خردشدگی بسیار بالا در منطقه معدن فیروزه بستر مناسبی برای عبور و مرور سیالات در سنگ‌های ماگمایی بر جای نهاده شده را فراهم نموده و دگرسانی‌های گسترده‌ای را پایه‌گذاری کرده است. علاوه بر این طی مطالعات صحرایی مشخص شد گسل‌ها و شکستگی‌ها و نحوه بروز و رخداد آن‌ها بر شدت و گسترش واحدهای دگرسانی در منطقه مورد مطالعه اثر مستقیم دارند. چراکه توسعه این ساختارها در برقراری و هدایت چرخه‌های هیدروترمال از اهمیت بالایی برخوردار است. فضاهای خالی ایجاد شده در نتیجه ساختارهای گسلی می‌تواند محلی برای نهشت سیالات کانه‌زا باشد. نسل‌های مختلف کانی‌زایی در معدن فیروزه نشان می‌دهد که فضای خالی حاصل از سیستم شکستگی طی چند مرحله توسط سیالات مورد هجوم قرار گرفته است. علاوه بر این مطالعات گسترده صحرایی در نتیجه بررسی تمام تونل‌های فعال

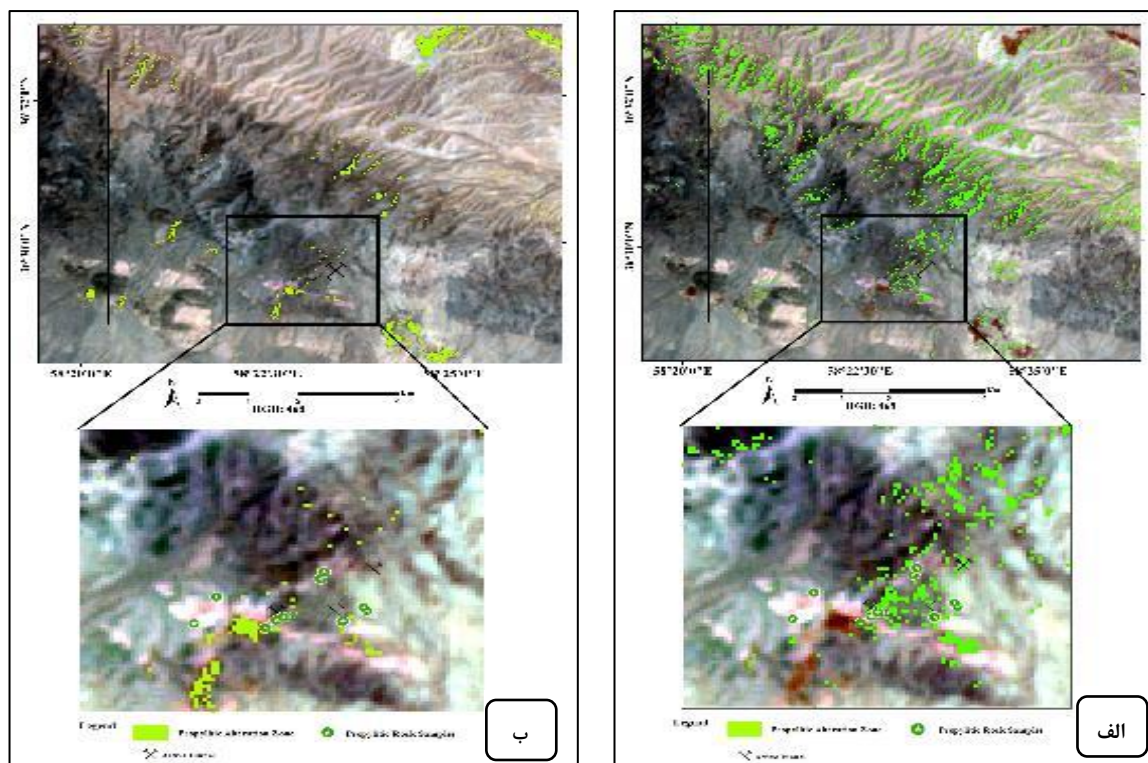
زیرزمینی در این معدن تا عمق ۹۵ متری و تونل‌های قدیمی استخراجی این معدن در سطح زمین همگی حاکی از این مطلب است که رگه‌ها و دانه‌های فیروزه تمام فازهای کانی‌زایی پیشین راه قطع کرده است. در نتیجه این چنین استنباط می‌شود که تشکیل فیروزه آخرین مرحله کانه‌زایی در این منطقه بوده است. بررسی مراحل مختلف تشکیل فیروزه نیز حاکی از این مطلب است که اسیدسولفوریک حاصل از واکنش آب‌های جوی با سولفیدهای فلزی (پیریت و کالکوپیریت) باعث تشکیل سولفات‌های آهن و مس می‌شود. سنگ‌های منطقه نیز از میزان بالای فسفر به صورت کانی آپاتیت برخوردارند لذا تأثیر اسیدسولفوریک بر کانی آپاتیت باعث ایجاد اسید فسفریک می‌شود. این اسید در نهایت بر سولفات‌های مس تأثیر می‌گذارد و از تأثیر محلول حاوی مس و فسفر بر آلونیت‌ها کانی فیروزه به صورت تدریجی و از حاشیه به سمت مرکز گره‌های آلومین دار به‌ویژه آلونیت‌ها تشکیل می‌شود؛ بنابراین فیروزه به عنوان یک کانی ثانویه تحت تأثیر محلول‌های اسیدی در طی دگرسانی و اکسیداسیون کانی‌های اولیه تشکیل شده که مس در ساختار این کانی از سولفیدهای مس اولیه مانند کالکوپیریت، آلومینیم از فلدسپارها و فسفات از آپاتیت منشأ گرفته است. از این رو با توجه به گستردگی ماگماتیسیم صورت گرفته در منطقه از یک سو و شدت بالای دگرسانی و خردشدگی رخ داده در برخی از توالی‌های سنگی حاوی کانه‌زایی از سوی دیگر، شناسایی و بارزسازی این مناطق می‌تواند راهنمای بسیار مهمی برای اکتشافات بعدی فیروزه در منطقه به حساب آید. طی مطالعات دورسنجی و صحرایی صورت گرفته در این پژوهش برای شناسایی مناطق دگرسان شده و مناطق امیدبخش برای اکتشافات بعدی فیروزه، مشخص شد که دگرسانی‌های سیلیسی، سریستیک، آرژلیک و پروپلیتیک مهم‌ترین دگرسانی‌های رخ داده در منطقه هستند. تفکیک و جداسازی پهنه‌های دگرسانی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف پردازش تصویر چون RBD, RGB, Band Ratio و MF صورت گرفت. پس از آن نیز به منظور افزایش دقت در نتایج حاصل شده از مطالعات صحرایی و مقاطع نازک میکروسکوپی استفاده گردید. نتایج بارزسازی حاصل از الگوریتم‌های نسبت بانندی و RBD نشان داد که شدت دگرسانی در چندین بخش از منطقه مورد مطالعه قابل توجه بوده و با پیکسل‌های به رنگ‌های مختلف از سبز، زرد،

حاصل از بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی و همچنین موقعیت نقاط مقاطع نازک تهیه‌شده از نمونه‌هایی که این دگرسانی را به‌خوبی در خود نشان می‌دادند، مشخص شد که بارزسازی پهنه دگرسانی گوسان با روش MF از دقت بالاتری برخوردار است (شکل ۱۹ الف و ب). بررسی نقشه بارزسازی شده برای پهنه دگرسانی پروپیلیتیک در روش MF در تطابق کمی با نقشه حاصل از روش SAM است. مطالعات صحرایی نیز حاکی از این مطلب است که برونداد حاصل از کاربرد الگوریتم MF در بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک تنها برای برخی از مناطق پاسخ مناسب داده است و نتایج حاصل از روش SAM برای این دگرسانی از دقت بالاتری برخوردار است. با توجه به شکل ۲۰، مناطق حاوی دگرسانی پروپیلیتیک علاوه بر اطراف تونل‌های اصلی استخراجی، در بخش‌هایی از شمال، شمال غرب و شمال شرق منطقه نیز به میزان زیادی گسترش دارند که در تطابق با یافته‌های صحرایی نیز می‌باشد.

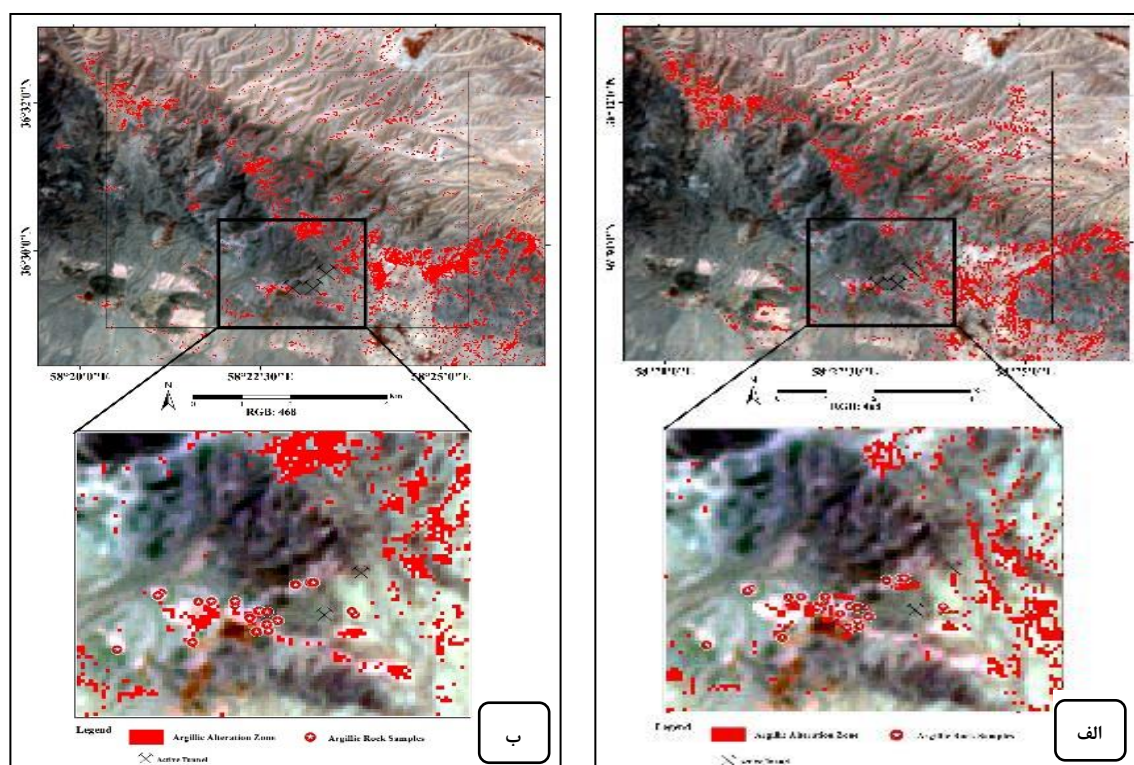
نارنجی و کرم‌رنگ مشخص‌شده‌اند (شکل‌های ۶ و ۷). بیشترین گسترش دگرسانی در منطقه معدن فیروزه مربوط به پهنه دگرسانی سلیسی است. دگرسانی سلیسی بسیاری از واحدهای سنگی منطقه را تحت تأثیر خود قرار داده و تقریباً منطبق بر زون دگرسانی گوسان است. زون گوسان متشکل از انواع اکسید و هیدرواکسیدهای آهن از جمله هماتیت و ژاروسیت است که با دو روش MF و SAM بارزسازی شده است (شکل‌های ۸ و ۱۳). پهنه‌های دگرسانی گوسان در منطقه مورد مطالعه روند شمال غرب – جنوب شرق دارند و در اغلب موارد این کلاک‌های آهنی روی پهنه دگرسانی سربستیک قرار گرفته به‌طوری‌که رنگ سرخ به‌جامانده از اکسیداسیون پیریت به اکسید و هیدرواکسیدهای آهن را می‌توان در بیشتر رخنمون‌های دگرسانی سربستیک منطقه و در مقاطع نازک مطالعه شده نیز مشاهده کرد. با بررسی نتایج حاصل از بارزسازی اکسید آهن در دو روش MF و SAM و مقایسه این الگوها با نتایج



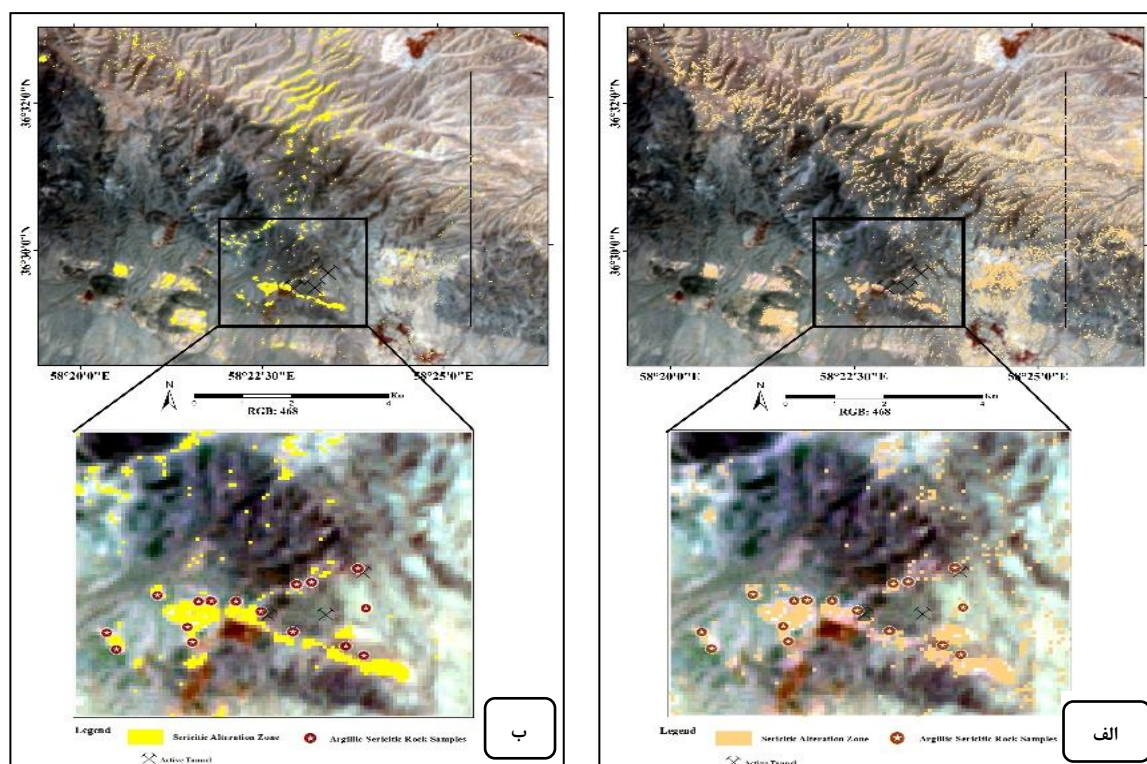
شکل ۱۹- مقایسه نتایج حاصل مطالعات صحرایی و نتایج حاصل از بارزسازی دگرسانی اکسید آهن در منطقه مورد مطالعه
الف: روش SAM، ب: روش MF



شکل ۲۰- مقایسه نتایج حاصل مطالعات صحرایی و نتایج حاصل از بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه مورد مطالعه
الف: روش SAM، ب: روش MF



شکل ۲۱- مقایسه نتایج حاصل مطالعات صحرایی و نتایج حاصل از بارزسازی آرژیلیک در منطقه مورد مطالعه
الف: روش SAM، ب: روش MF



شکل ۲۲- مقایسه نتایج حاصل مطالعات صحرایی و نتایج حاصل از بارزسازی دگرسانی سربستیک در منطقه مورد مطالعه
الف: روش SAM، ب: روش MF

۸- نتایج

مورد مطالعه نیز این مهم را تأیید می‌کند. همچنین بررسی نتایج حاصل از پردازش تصاویر استر و انطباق آن با نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی نشان داد که بارزسازی پهنه دگرسانی پروپیلیتیک و آرژیلیک نیز با روش SAM از دقت بالاتری برخوردار است. شایان‌ذکر است که پهنه دگرسانی آرژیلیک در منطقه مورد مطالعه بیشترین ارتباط با کانی-زایی را دارد. نقشه‌های حاصل از بارزسازی پهنه دگرسانی سربستیک نیز در هر دو روش MF و SAM تقریباً با یکدیگر منطبق است. در مجموع نتایج و تصاویر به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر استر مؤید این مطلب است که روش‌های به‌کاررفته در تفکیک و تعیین پهنه‌های دگرسان شده در منطقه معدن فیروزه دارای نتایج قابل قبولی است. در بارزسازی کانی‌های آهن‌دار از جمله اکسید و هیدرواکسیدهای آهن در پهنه دگرسانی گوسان، روش MF از دقت بیشتری برخوردار هستند اما در بارزسازی سایر پهنه‌های دگرسانی در این پژوهش روش SAM، نسبت به سایر روش‌های به کار گرفته‌شده روشی بهینه و مؤثر معرفی می‌شود. دقت بالا در این روش به دلیل شباهت اعضای مرجع با یکدیگر و کم بودن اختلاف طیفی در سطح زیر پیکسل است. مناطق بارز شده دارای بیشترین شدت

در مطالعات میدانی، پهنه‌های مختلف دگرسانی به‌عنوان مهم‌ترین کلید اکتشافی شناخته می‌شوند. این پدیده‌ها شامل تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی هستند که متأثر از سیالات گرمایی و ماگمایی در سنگ‌های میزبان رخ می‌دهند. مطالعات صورت گرفته در منطقه اکتشافی معدن فیروزه نشان داد که سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه عمیق به‌شدت تحت تأثیر دگرسانی‌های گوسان، سیلیسی، سربستیک، آرژیلیک و کربناتی قرار گرفته‌اند که در این میان پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک و سربستیک بیشترین ارتباط را با کانی‌سازی دارد. نتایج بارزسازی حاصل از الگوریتم‌های Band Ratio، RGB، RBD، MF و SAM نیز نشان داد که شدت دگرسانی در چندین بخش از منطقه مورد مطالعه قابل توجه است. پهنه دگرسانی سیلیسی بیشترین گسترش دگرسانی در منطقه معدن فیروزه را به خود اختصاص داده است که این پهنه منطبق بر پهنه گوسان می‌باشد و روند شمال غرب - جنوب شرق دارد. برونداد نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم MF در بارزسازی پهنه دگرسانی گوسان نسبت به روش SAM از دقت بالاتری برخوردار بود که مطالعات صحرایی در منطقه

- [9] Richards, J.P. (2005). Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits. Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective, 1, pp.7-25.
- [10] Pour, A.B., Hashim, M. and van Genderen, J. (2013). Detection of hydrothermal alteration zones in a tropical region using satellite remote sensing data: Bau goldfield, Sarawak, Malaysia. Ore Geology Reviews, 54, pp.181-196.
- [11] Issakhanian V., Espahbod M.R., Nemat L., "Geological investigation of Radiometric material in the vicinity of the Neyshabur turquoise mine," Geol. Surv. Iran, (1973) 16 p .
- [12] Espahbod M.R., "Le district minier de la mine de turquoise de kuh-e-madan (Neyshabur, Iran:(mineralisation set caracteristiques geologiques, geochimiques et metallogeniques de l'uranium, du cuivre et du molybdenes", Theses (Diplome de docteur-ingénieur), Université de Nancy I. Nancy, France (1976).
- [13] Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Sfandiarpour, A. and Mohammadnejad, H. (2011). Neyshabour turquoise mine: The first Cu-Au-U-REE mineralization of IOCG type in Iran. Journal of Economic Geology, 2(3):193-216. (in Persian).
- [14] Eslami, S., (2012), Structural Analysis of Neyshabour Turquoise Mineral Area, Unpublished M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian).
- [15] Baumann, A., Spies, O. and Lensch, G. (1983). Strontium isotopic composition of post-ophiolitic Tertiary volcanics between Kashmar, Sabzevar and Quchan/NE Iran. Geodynamic project (geotraverse) in Iran, Final report, Geological Survey of Iran Report no.51.
- [16] Spies, O., Lensch, G. and Mihm, A., 1983. Geochemistry of the post-ophiolitic Tertiary volcanics between Sabzevar and Quchan/NE-Iran. Geodynamic project (geotraverse) in Iran, Final report. Geological Survey of Iran. Report no.51.
- [17] Akrami, M.A., Askari, A (2000). Geological map of SoltanAbad, 1:100,000 Series 7662. Tehran: Geological Survey of Iran.
- [18] Ghasemi-Nejad, E., Sabbaghiyan, H. and Mosaddegh, H. (2012). Palaeobiogeographic implications of late Bajocian-late Callovian (Middle Jurassic) dinoflagellate cysts from the Central Alborz Mountains, northern Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 43(1), pp.1-10.
- [19] Amini, B., Kannazer, N.H. (2000). Geological map of SoltanAbad, 1:100,000 Series 7563. Tehran: Geological Survey of Iran.
- [20] Yamaguchi, Y., Kahle, A.B., Tsu, H., Kawakami, T. and Pniel, M. (1998). Overview of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 36(4), pp.1062-1071.

دگرسانی (شکل ۱۷) با استفاده از این روش می‌تواند جهت مطالعات دقیق‌تر اکتشافی برای معدن سنگ قیمتی فیروزه در این منطقه مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از زحمات داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود موجب ارتقاء مطالب علمی این مقاله شدند، تشکر و قدردانی نمایند. همچنین تلاش‌های ارزنده سردبیر و هیئت تحریریه محترم نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن در راستای نشر دستاوردهای پژوهشی محققان شایسته تقدیر است که بدین وسیله از این بزرگواران نیز تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Moretti, S. and Righini, G. (2013). Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa. Arabian Journal of Geosciences, 6(11), pp.4529-4546.
- [2] Gupta, R.P. (2003). Remote Sensing Geology. Heidelberg, Springer.
- [3] Honarmand, M., Ranjbar, H. and Shahabpour, J. (2011). Application of Spectral Analysis in Mapping Hydrothermal Alteration of the Northwestern Part of the Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Iran. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, Vol. 22(3), pp. 221-238.
- [4] Ranjbar, H. and Honarmand, M. (2004). Integration and analysis of airborne geophysical and ETM+ data for exploration of porphyry type deposits in the Central Iranian Volcanic Belt using fuzzy classification. International Journal of Remote Sensing, 25(21), pp.4729-4741.
- [5] Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes associated with meteorite impacts. In Hydrothermal processes and mineral systems (pp. 1097-1130). Springer, Dordrecht.
- [6] Amos, B.J. and Greenbaum, D. (1989). Alteration detection using TM imagery the effects of supergene weathering in an arid climate. International Journal of Remote Sensing, 10(3), pp.515-527.
- [7] Drury, S.A. and Hunt, G.A. (1989). Geological uses of remotely-sensed reflected and emitted data of lateritized Archaean terrain in Western Australia. International Journal of Remote Sensing, 10(3), pp.475-497.
- [8] Richards, J.P. (2011). Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. Ore Geology Reviews, 40(1), pp.1-26.

relative absorption band-depth images. *Remote Sensing of Environment*, 29(2), pp.121-134.

[34] Rowan, L.C. and Mars, J.C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote sensing of Environment*, 84(3), pp.350-366.

[35] Rowan, L. C., Goetz, A.F.h., and Ashley, R. P. (1977). Discrimination of hydrothermally altered rocks and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. *Geophysics*, v. 42, p. 522-535.

[36] Bedini, E. (2011). Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data. *Advances in Space Research*, 47(1), pp.60-73.

[37] Harsanyi, J.C., Farrand, W. and Chang, C.I. (1994). April. Detection of subpixel spectral signatures in hyperspectral image sequences. In *Annual Meeting, Proceedings of American Society of Photogrammetry & Remote Sensing* (pp. 236-247).

[38] Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J. and Goetz, A.F.H. (1993). August. The spectral image processing system (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 283, No. 1, pp. 192-201). American Institute of Physics.

[39] Malekzadeh, A., Karimpour, M.H., Stern, C. R. and Mazaheri, S.A. (2009). Hydrothermal Alteration Mapping in SW Birjand, Iran, Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Image Processing. *Journal of Applied Sciences*, v. 9, p. 829-842.

[40] Yuhas, R.H., Goetz, A.F. and Boardman, J.W. (1992). Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm. In *Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, JPL Publication, v. 1, p. 147- 149.

[41] Shahriari, H., Ranjbar, H., Honarmand, M. and Carranza, E.J.M. (2014). Selection of less biased threshold angles for SAM classification using the real value-area fractal technique. *Resource Geology*, 64(4), pp.301-315.

[42] Research Systems Inc., ENVI User's Guide, ENVI Version 4.1, 2004, pp.1150

[43] Seifi, A., Hosseinjanizadeh, M., Ranjbar, H. and Honarmand, M. (2017). Investigation acid mine drainage minerals using spectral characteristics and satellite images processing of Landsat- 8, a case study: Darrehzar mine, Kerman Province, Iran, V. 43, P. 31-43.

[44] Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M. H., Velasco Roldan, F. and Yusta, I. (2014). Mineral Exploration and Alteration Zone Mapping Using Mixture Tuned Matched Filtering Approach on ASTER Data at the Central Part of Dehaj-Sarduiyeh Copper Belt, SE Iran, *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, Vol. 7, No. 1, 284-289.

[45] Van der Meer, F., Hecker, C., Van Ruitenbeek, F., Van der Werff, H., De Wijkerslooth, C. and Wechsler, C. (2014). Geologic remote sensing for geothermal

[21] Whitney, P.R. and Olmsted, J.F. (1998). Rare earth element metasomatism in hydrothermal systems: The Willsboro-Lewis wollastonite ores, New York, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(17), pp.2965-2977.

[22] Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote sensing*, 21(5), pp.847-859.

[23] Fujisada, H., Iwasaki, A., and Hara, S. (2001). ASTER stereo system performance. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering* 4540, Toulouse, p: 39-49.

[24] Crosta, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F. and 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*, 24(21), pp.4233-4240.

[25] Gupta. R.P., 1991, *Remote sensing geology*, Springer- Verlag, Heidelberg

[26] [26]. Abrams, M., Hook, S. and Ramachandran, B. (2002). *Aster user handbook: advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer*. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2(2002.135).

[27] Kruse, F.A., 1988. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern grapevine mountains, Nevada, and California. *Remote Sensing of Environment*, 24(1), pp.31-51.

[28] Ben-Dor, E. and Kruse, F.A., 1994. The relationship between the size of spatial subsets of GER 63 channel scanner data and the quality of the Internal Average Relative Reflectance (IARR) atmospheric correction technique. *Remote Sensing*, 15(3), pp.683-690.

[29] Di Tommaso, I. and Rubinstein, N. (2007). Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2), pp.275-290.

[30] Jun, L., Songwei, C., Duanyou, L., Bin, W., Shuo, L. and Liming, Z. (2008). Research on false color image composite and enhancement methods based on ratio images, the international archives of the photogrammetry. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37, pp. 1151-1154.

[31] Azizi, H., Tarverdi, M.A. and Akbarpour, A. (2010). Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanzan, northern Iran. *Advances in Space Research*, 46(1), pp.99-109.

[32] Boloki, M. and Poormirzaee, M. (2010). Using ASTER image processing for hydrothermal alteration and key alteration minerals mapping. *Journal of Latest Trends on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology*, 1, pp.77-82.

[33] Crowley, J.K., Brickey, D.W. and Rowan, L.C. (1989). Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: mineral discrimination using

Remote Sensing and Digital Image Processing, seventeenth ed. Springer Science, Business Media Dordrecht.

[49] Boardman, J.W., Kruse, F.A. and Green, R.O., 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. summaries, Proceedings of the Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, 23–26 January, Pasadena, California, JPL Publication 95:23-26.

[50] Whitney, D.L. and Evans, B.W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. American mineralogist, Vol. 95, pp. 185-187.

[51] Sengör, A.M.C. (1984). The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia. Geological Society of America, Special Paper 195, pp. 8.

exploration: A review, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. V. 33, p. 255–269.

[46] Zabcic, N. (2008). Derivation of surface pH-values based on mineral abundances over pyrite mining areas with airborne hyperspectral data (Hymap) of Sotiel-Migollas mine complex, Spain. M.S dissertation, University of Alberta, Edmonton, Alberta.

[47] Calvin, W.M., Littlefield, E.F. and Kratt, C. (2015). Remote sensing of geothermal-related minerals for resource exploration in Nevada, Geothermics v. 53, p. 517–526.

[48] Kuenzer, C. and Dech, S. (2013). Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications,

¹ Band Ratio

² Matched Filtering

³ Band Ratio