

مقایسه بین روش پالایش تطبیقی و نقشه برداری زاویه طیفی در تصاویر ماهواره ای استر برای بارزسازی پهنه های دگرسانی، مطالعه موردی: معدن فیروزه نیشابور

زهرا مختاری^{۱*}، عالیه سیفی^۲، مهدیه حسینجانی زاده^۲

^۱گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران Zahra.mokhtari@neyshabur.ac.ir

^۲گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

a.seifi@student.kgut.ac.ir, m.hosseinjanizadeh@kgut.ac.ir

چکیده

معدن فیروزه نیشابور در یک توالی آتشفشانی-رسوبی ترشیری مربوط به زون بینالود در شمال شرق ایران واقع شده است. مهم‌ترین واحدهای سنگی در این منطقه عبارتند از آندزیت، تراکی آندزیت، تراکیت و پیروکلاستیک که از نظر سنی متعلق به ائوسن هستند. اغلب واحدهای آندزیتی، تراکی آندزیت و تراکیت که تحت تأثیر دگرسانی‌های گرمایی قرار گرفته‌اند، میزبان اصلی رگه‌ها، رگچه‌ها و دانه‌های با کیفیت و کمیت بالا از فیروزه هستند. در این پژوهش بارزسازی زون‌های دگرسانی گرمایی با استفاده از روش‌های پالایش تطبیقی (MF) و نقشه بردار زاویه طیفی (SAM) روی تصاویر استر صورت گرفته است. براساس پردازش‌های انجام شده و مطالعات صحرائی، زون‌های دگرسانی گرمایی را می‌توان به پنج گروه تقسیم کرد: زون‌های سیلیسی - گوسان، سریستیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته. الگوریتم MF به وضوح پهنه‌های دگرسانی گوسان در منطقه مورد مطالعه را بارز نمود. علاوه بر این روش SAM نیز برای شناسایی زون‌های دگرسانی سریستیک، پروپیلیتیک، 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.

کلیدواژه‌ها: دگرسانی گرمایی، استر، معدن فیروزه، پالایش تطبیقی، نقشه برداری زاویه طیفی

مقدمه

پردازش تصاویر ماهواره ای و استفاده از تکنیک‌های دورسنجی، نقش مهمی در تعیین موقعیت ذخایر با دقت و سرعت بالا و کاهش هزینه‌های پی‌جویی و اکتشاف دارند (Ciampalini et al., 2013; Seifi et al., 2021). این 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 غیرقابل دسترس به کار روند (Honarmand et al., 2011; Ranjbar & Honarmand, 2004). از آنجا که زونهای

دگرسانی سوپرژن و هیپوژن و همچنین زونهای سطحی هوازدگی در ذخایر کانیایی بعضاً از وسعت قابل توجهی برخوردار هستند، جهت نقشه برداری با استفاده از داده‌های چند طیفی تصاویر ماهواره‌ای بسیار مناسب‌اند (Seifi et al., 2021). فعالیت‌های گرمایی و اثرات آن از جمله تغییرات شیمیایی و کانی شناسی بر روی سنگها را بطور مستقیم نمی‌توان روی نقشه زمین‌شناسی نشان داد، اما با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و انتخاب روش‌های مناسب پردازش تصویر، می‌توان برخی از کانی‌های همراه با آنها را تشخیص داد (Gupta, 2003; Ranjbar & Honarmand, 2004). از این رو شناخت مناطق دگرسانی و زون‌بندی آنها می‌تواند جهت عملیات اکتشافی در مقیاس ناحیه‌ای، از طریق فناوری سنجش از دور بسیار مفید باشد.

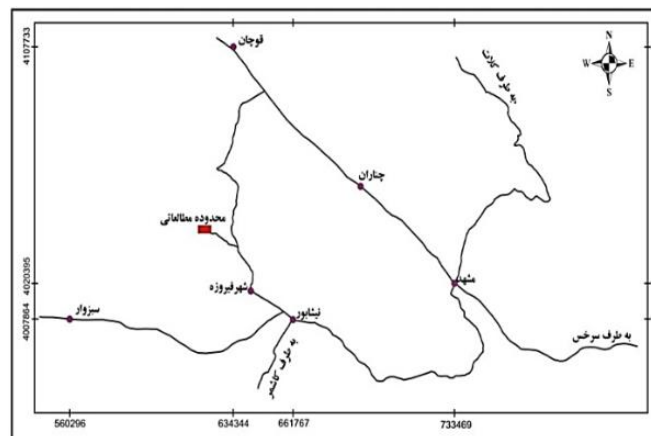
فیروزه یک کانی ثانویه کمیاب از گروه فسفات‌ها و یک نوع ترکیب پیچیده هیدروفسفات مس و آلومینیم با فرمول شیمیایی $Cu Al_5(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 4H_2O$ است که در نتیجه تجزیه و تخریب سنگ‌های دارای سیلیکات و فسفات آلومینیم واجد سولفور مس در طبیعت بوجود می‌آید. این کانی بسته به مقدار مس، جایگزین شده و وجود ناخالصی‌های آهن و منگنز به رنگ‌های مختلف از جمله آبی آسمانی، آبی مایل به سبز، آبی نیلی و سبز مایل به خاکستری دیده شده و جزء سنگهای قیمتی طبقه‌بندی می‌شود. 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 رخ داده در این واحدهای سنگی می‌باشند که از این بین دگرسانی‌های آرژیلیک و سیلیسی بیشترین ارتباط با کانی‌سازی را دارند. وسعت دگرسانی در سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی این منطقه قابل توجه 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.

بدون تردید معادن به عنوان زیربنای توسعه صنعتی و اقتصادی از اهمیت قابل ملاحظه‌ای در توسعه پایدار کشور برخوردار می‌باشند. در این میان معدن فیروزه نیشابور نه تنها از لحاظ معدنی بلکه از لحاظ اعتبار جهانی خود و به عنوان یک سرمایه باستانی اهمیت دوچندانی یافته است. بنابراین با در نظر گرفتن این مهم، و اهمیت معدنکاری فیروزه به عنوان مهمترین گوهر ایران 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. در این مطالعه برای دستیابی به الگوی مناسب انواع پهنه‌های دگرسانی در منطقه، ابتدا به بررسی نتایج حاصل از دو روش مهم و کاربردی پردازش تصاویر ماهواره‌ای استر پرداخته و سپس نتایج مطالعات صحرایی و پتروگرافی با آن تطبیق داده شده است. روش‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل روش پالایش تطبیقی (Matched Filtering) و نقشه بردار زاویه طیفی (Spectral Angle Mapper) است.

موقعیت و زمین شناسی منطقه معدن فیروزه

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 به عنوان شاخص‌ترین معدن گوهرسنگ ایران دارای شهرت جهانی است. دسترسی به معدن فیروزه از طریق دو راه اصلی امکان پذیر است. ۱- مسیر مشهد- نیشابور- شهر فیروزه به مسافت ۱۶۰ کیلومتر که اصلی‌ترین راه دستیابی به

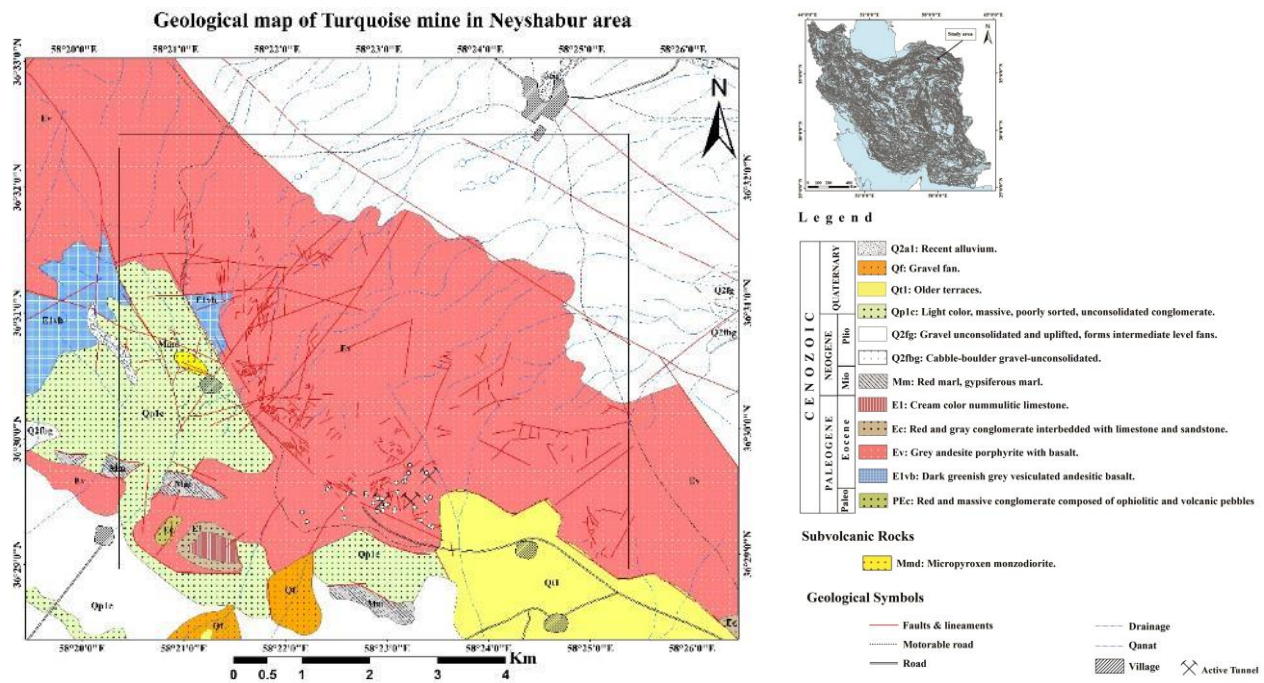
معدن محسوب می‌شود و ۲- از طریق جاده مشهد به قوچان پس از طی مسافت ۱۱۰ کیلومتر به جاده ترانزیت سبزوار- خوشاب- قوچان رسیده و سپس با ۸۰ کیلومتر حرکت به سمت جنوب به روستای معدن (معدن بالا و معدن پایین) خواهیم رسید (شکل ۱). به لحاظ زمین‌شناسی، موقعیت معدن فیروزه را می‌توان در گوشه شمال‌شرقی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان‌آباد (Akrami & Askari, 2000) دنبال کرد. برپایه مطالعات صحرایی-آزمایشگاهی واحدهای سنگی محدوده معدن فیروزه نیشابور را به سه بخش سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق 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 گنبد‌های تراکی آندزیتی، آندزیتی، تراکیتی، تراکی داسیتی، داسیتی و ریوداسیتی به سن پلیو- پلیستوسن هستند که روی واحدهای اولیوین بازالتی ائوسن تا میوسن زیرین قرار گرفته‌اند (Baumann et al, 1983; Spies et al., 1983).



شکل ۱- راه‌های دسترسی به معدن فیروزه نیشابور

شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی معدن فیروزه و مناطق اطراف را نشان می‌دهد. مهم‌ترین واحدهای سنگی محدوده معدن فیروزه شامل گدازه و پیروکلاستیک‌های آندزیتی- داسیتی با سن ائوسن‌اند 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، آرژیلیک و پروپیلیتیک می‌باشند که زون‌های سیلیسی و آرژیلیک 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 مونوزسینیتی 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 ثانویه شامل فیروزه، کالکوزیت، کولیت و اکسیدهای آهن می‌باشند. سن واحد آندزیتی میزبان کانسار فیروزه را با توجه به موقعیت چینه‌شناختی آن ائوسن میانی در نظر

گرفته‌اند. این واحدها با نفوذ توده‌های دیوریت پورفیری در محدوده کانسار فیروزه مواجه شده‌اند که سن پس از ائوسن به آنها نسبت داده شده است (Akrami & Askari, 2000).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه معدن فیروزه به همراه موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده (برگرفته از برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ سلطان آباد و مسکن Akrami & Askari, 2000; Amini & Kannazer., 2000) با اعمال تغییرات

روش تحقیق

استر یک سنجنده فوق طیفی است که عرض تصویر برداری آن ۱۱ کیلومتر است و به صورت فریم‌های استاندارد ۶۰ در ۶۰ کیلومتر قابل دسترس می‌باشد (Abrams, 2000). این سنجنده ۱۴ باند با دامنه طول موجی بین ۰.۵۲ 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. جدول ۱ مشخصات طیفی باندهای سنجنده استر از جمله دامنه ی طیفی و قدرت تفکیک مکانی را نشان می‌دهد. سه باند VNIR منبع مهمی برای شناسایی فلزات انتقالی به ویژه 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 تشکیل دهنده سنگ همچون کوارتز و فلدسپات و نیز دگرسانی‌های گرمابی سیلیسی بسیار مفیدند (Crosta et al., 2003).

به منظور دریافت اطلاعات صحیح از تصاویر ماهواره‌ای نیاز است تا پیش پردازش‌های رادیومتری و هندسی روی تصاویر خام انجام شود. داده‌های استر به صورت 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 هم راستا^۱ 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 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 نیز با استفاده از روش IARR در نرم افزار ENVI (Kruse, 1988; Ben-Dor & Kruse, 1994) صورت گرفت.

جدول ۱- مشخصات اصلی سنجنده استر (Abrams, 2002)

دامنه ی طیفی (میکرومتر)	شماره باند	زیرمجموعه
۰/۵۲۰-۰/۶۰۰	۱	VNIR وضوح مکانی ۱۵ متر
۰/۶۳۰-۰/۶۹۰	۲	
۰/۷۸۰-۰/۸۶۰	۳N	
۰/۷۸۰-۰/۸۶۱	۳B	
۱/۶۰۰-۱/۷۰۰	۴	SWIR وضوح مکانی ۳۰ متر
۲/۱۴۵-۲/۱۸۵	۵	
۲/۱۸۵-۲/۲۲۵	۶	
۲/۲۳۵-۲/۲۸۵	۷	
۲/۲۹۵-۲/۳۶۵	۸	
۲/۳۶۵-۲/۴۳۰	۹	
۸/۱۲۵-۸/۴۷۵	۱۰	TIR وضوح مکانی ۹۰ متر
۸/۴۷۵-۸/۸۲۵	۱۱	
۸/۹۲۵-۹/۲۷۵	۱۲	
۱۰/۲۵۰-۱۰/۹۵۰	۱۳	
۱۰/۶۵۰-۱۰/۹۵۰	۱۴	

یکی از روش‌های مهم پردازش تصاویر ماهواره‌ای، روش پالایش تطبیقی (MF) است. در این روش با استفاده از Endmember های تعریف شده 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 (Bedini, 2011). این الگوریتم با هدف یافتن میزان فراوانی هر عضو تعریف شده در تصویر، از تجزیه اختلاط طیفی استفاده می‌کند (Harsanyi et al.,

¹Pass-oriented

(Bedini, 2011; 1994). 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.

الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی یا SAM نیز از دیگر روش‌های مهم پردازش تصویر است که اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط کروزر و همکاران به کار برده شد (Kruse et al., 1993). 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. در واقع 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 تعیین شده، طبقه‌بندی نمی‌شوند. زاویه طیفی با استفاده از رابطه ۱ بین طیف تصویر (t) و طیف مرجع (r) محاسبه می‌شود.

$$a = \text{Cos}^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2)^{1/2} (\sum_{i=1}^{nb} r_i^2)^{1/2}} \right] \quad \text{رابطه ۱-}$$

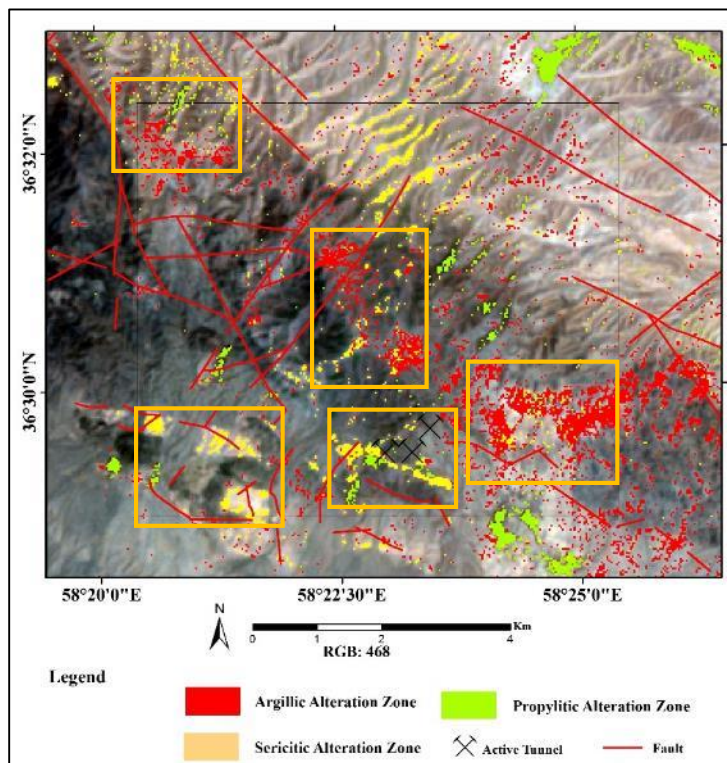
در این رابطه nb تعداد باندها، t_i طیف تصویر منطقه مطالعاتی، و r_i طیف مرجع می‌باشد (Yuhas et al., 1992). طیف مرجع شامل طیف کتابخانه‌های طیفی، طیف آزمایشگاهی، طیف صحرایی و همینطور طیف استخراج شده از پیکسل‌های خالص تصویر می‌شود (Shahriari et al., 2014). در این تحقیق از طیف‌های استخراج شده از پیکسل‌های خالص تصویر به عنوان 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 می‌باشد.

در روش‌های SAM و MF برای نمودار طیف مرجع از طیف‌های استخراج شده از پیکسل‌های خالص تصویر استر استفاده شده است.

بحث و بررسی نتایج

در روش MF، پس از اعمال تصحیحات اتمسفری بر تصویر خام هر یک 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 بوسیله آن می‌توان اهداف مد نظر 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 نظارت نشده 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

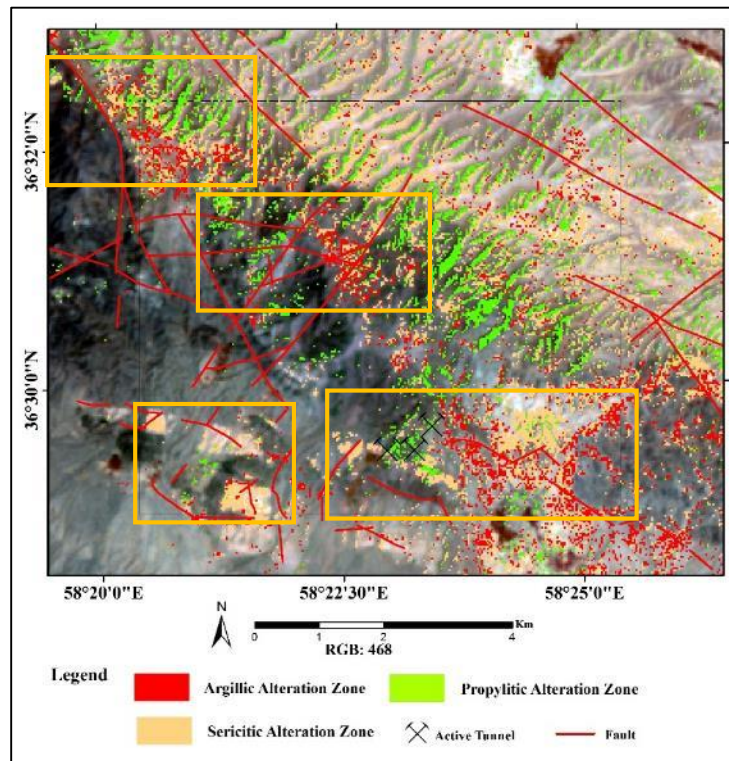
تک‌پیکسل می‌باشد لذا یک فیلتر Max-Min متناسب با میزان و پراکندگی مناطق تک‌پیکسل اعمال می‌گردد تا حاصل کار به بردار تبدیل شده و برای فرآیند تلفیق و آشکار سازی مناطق پتانسیل‌دار به کار گرفته شود (Boardman, 1995; Harsanyi et al., 1994). شکل ۳ تصاویر حاصل از اعمال الگوریتم MF برای شناسایی و بارزسازی دگرسانی‌های گوسان، پروپلیتیک (کانی‌های اپیدوت و کلریت که شاخص این دگرسانی هستند)، آرژیلیک و سریستیک در منطقه معدن فیروزه است. مکان‌های هدف در هر یک از شکل‌های مورد نظر که در ادامه آمده است، با پیکسل‌های مشخص بارز شده‌اند.



شکل ۳- پراکندگی پهنه‌های مختلف دگرسانی با استفاده از روش MF در منطقه معدن فیروزه

برای اعمال الگوریتم SAM در منطقه مورد مطالعه نیز 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، موسکوبیت و ژاروسیت به عنوان کانی‌های شاخص زون دگرسانی سریستیک، کوارتز به عنوان کانی شاخص زون دگرسانی سیلیسی و در نهایت همتایت 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 پراکندگی دگرسانی‌های 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. شکل شماره ۴ تصویر حاصل از

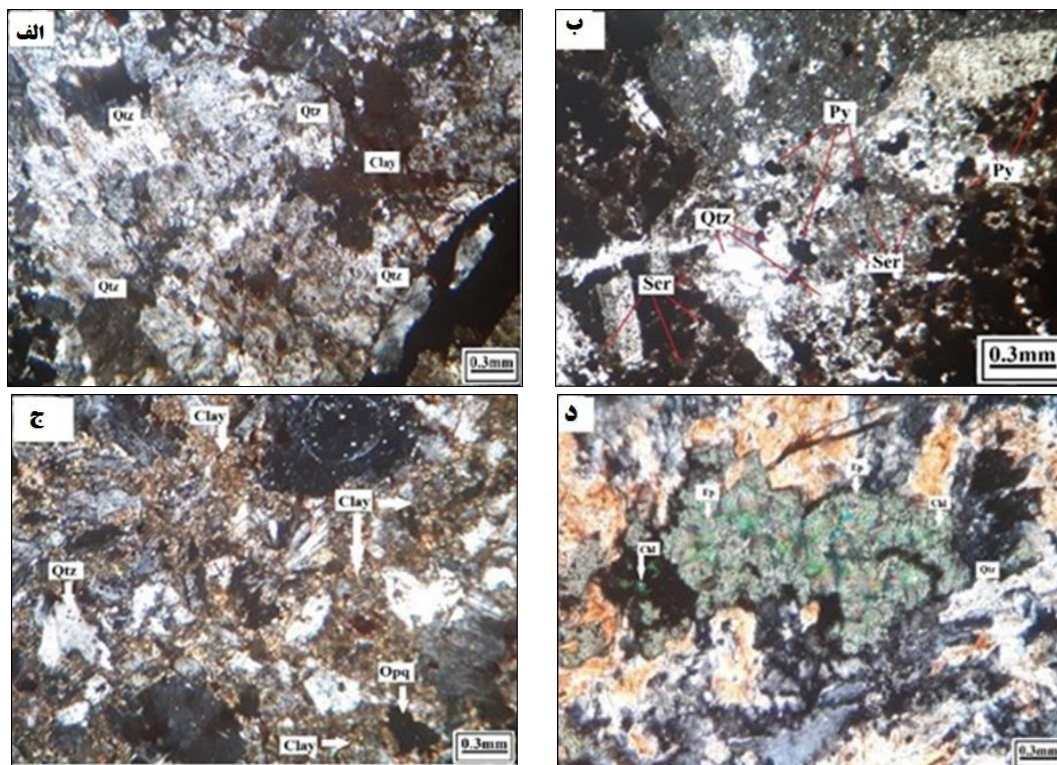
اعمال الگوریتم SAM برای شناسایی و بارزسازی پهنه‌های دگرسانی گوسان، پروپلیتیک، آرژیلیک پیشرفته و متوسط و سریستیک در منطقه معدن فیروزه را نشان می‌دهند.



شکل ۴- پراکندگی پهنه‌های مختلف دگرسانی با استفاده از روش SAM در منطقه معدن فیروزه

پس از استفاده از روش‌های SAM و MF برای پردازش تصویر بر روی داده‌های سنجنده استر پهنه‌های مختلف دگرسانی در منطقه معدن فیروزه شناسایی و از یکدیگر تفکیک شد. در مرحله بعد 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. مطالعات صورت گرفته در منطقه معدن فیروزه نشان داد که سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق به شدت تحت تأثیر دگرسانی‌های گوسان، سیلیسی، سریستیک، آرژیلیک و کربناتی قرار گرفته‌اند که در این میان پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک و سریستیک بیشترین ارتباط را با کانی‌سازی دارد. انجام مطالعات صحرایی، نمونه برداری از واحدهای سنگی مختلف، تهیه و مطالعه مقاطع نازک از آنها مشخص نمود که 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. با بررسی نتایج حاصل از بارزسازی اکسید آهن در دو روش MF و SAM، و مقایسه این الگوها با نتایج حاصل از بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی و همچنین موقعیت نقاط مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌هایی که این دگرسانی را به خوبی در خود نشان می‌دادند، مشخص شد که بارزسازی پهنه دگرسانی گوسان با روش MF از دقت بالاتری برخوردار است. دگرسانی‌های سریستیک و آرژیلیک و پروپلیتیک نیز رتبه‌های بعدی از نظر پراکندگی در واحدهای سنگی منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. دگرسانی آرژیلیک بیشتر تراکیت‌ها و دیوریت‌های منطقه چه در سطح و چه در اعماق تونل‌ها را تحت تأثیر خود قرار داده است. با مقایسه نقشه‌های به تصویر درآمده برای بارزسازی این پهنه دگرسانی از روش SAM و MF و همچنین موقعیت مقاطع نازک با

نمونه‌های دستی با دگرسانی شاخص آرژیلیک مشخص می‌شود که بارزسازی این پهنه دگرسانی نیز با استفاده از روش SAM موفق‌تر بوده است. نقشه‌های حاصل از بارزسازی دگرسانی سربستیک در هر دور روش MF و SAM تقریباً با یکدیگر منطبق است. بررسی نقشه بارزسازی شده برای پهنه دگرسانی پروپیلیتیک در روش MF در تطابق کمی با نقشه حاصل از روش SAM است. مطالعات صحرائی 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. شکل ۵ تصویر میکروسکوپی از مقاطع نازک مورد مطالعه از منطقه معدن فیروزه را نشان می‌دهد.



شکل ۵- الف: رخداد کانی‌های ثانویه کوارتز به صورت رگچه‌ای در متن سنگ شاخص دگرسانی سیلیسی، ب: کانی‌های کوارتز، سربست و پیریت شاخص دگرسانی سربستیک در سنگهای آندزیتی، ج: کانی‌های رسی حاصل از دگرسانی شدید آلکالی فلدسپارها، به همراه کانی‌های اپک و کوارتز شاخص دگرسانی آرژیلیک، د: کانی‌های اپیدوت و کلریت حاصل از دگرسانی در سنگ‌های آندزیتی شاخص دگرسانی پروپیلیتیک در منطقه معدن فیروزه (علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney, 2010).

نتیجه‌گیری

مطالعات صورت گرفته در منطقه معدن فیروزه نشان داد که سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق به شدت تحت تأثیر دگرسانی‌های گوسان، سیلیسی، سربستیک، آرژیلیک و کربناتی قرار گرفته اند که در این میان پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک و

سریستیک بیشترین ارتباط را با کانی‌سازی دارد. نتایج و تصاویر به دست آمده از پردازش تصاویر استر نیز موید این مطلب است که روش‌های به کار رفته در تفکیک و تعیین پهنه‌های دگرسان شده در منطقه معدن فیروزه دارای نتایج قابل قبولی است. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که استفاده از روش MF در بارزسازی کانی‌های آهن دار از جمله اکسید و هیدرواکسیدهای آهن نسبت به روش SAM از دقت بالاتری برخوردار است که مطالعات صحرائی در منطقه 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. نقشه‌های حاصل از بارزسازی پهنه دگرسانی سریستیک نیز در هر دو روش MF و SAM تقریباً با یکدیگر منطبق است. در مجموع با توجه به بررسی نتایج حاصل از پردازش تصاویر استر و انطباق آن با مطالعات صحرائی، و ارتباط پهنه دگرسانی آرژیلیک با کانی‌زایی فیروزه، روش نقشه برداری زاویه طیفی SAM نسبت به MF روشی مطمئن تر جهت بارزسازی پهنه‌های دگرسانی در منطقه معدن فیروزه نیشابور معرفی می‌گردد. 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 دگرسانی با استفاده از این روش می‌تواند جهت مطالعات دقیق‌تر اکتشافی برای معدن سنگ قیمتی فیروزه در این منطقه مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

1. 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
2. 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).
3. Akrami, M.A., Askari, A (2000). Geological map of SoltanAbad, 1:100,000 Series 7662. Tehran: Geological Survey of Iran.
4. Amini, B., Kannazer, N.H. (2000). Geological map of SoltanAbad, 1:100,000 Series 7563. Tehran: Geological Survey of Iran.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. Gupta, R.P. (2003). *Remote Sensing Geology*. Heidelberg, Springer.
12. 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.
13. 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).
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Seifi, A., Esmaily, A., Mokhtari, Z. (2021). A new hybrid method for epithermal gold exploration using multi-sensor satellite data in Sistan and Baluchestan Province (Iran). *Ore Geology Reviews*, Volume 138, November 2021, 104357.
18. 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.
19. 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.
20. Whitney, D.L. and Evans, B.W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, Vol. 95, pp. 185-187.
21. 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.

Comparison between matched filtering (MF) method and spectral angle mapper (SAM) in Aster satellite images for detection of alteration zones, case study: Neyshabour Turquoise mine

Zahra Mokhtari, Aliyeh Seifi, Mahdiah Hosseinjanizadeh

Abstract

The Neyshabour turquoise mine is hosted by a Tertiary volcano-sedimentary sequence that belongs to the Binaloud zone, in northeastern Iran. Andesite, trachyandesite, trachyte lavas and pyroclastic rock units of the Eocene are among the most important lithologies in the study area. The hydrothermally altered part of andesite, trachyandesite, and trachyte units are the main hosts of high quantity and quality veins, veinlets for turquoise. In this research, recognition of hydrothermal altered rocks was carried out using matched filtering (MF) and spectral angle mapper (SAM) on the digital subset ASTER data. According to the outcome of these processing and field studies, hydrothermal alteration zones could be classified into five groups: silicic-gossan, serisitic, propylitic, advanced argillic and argillic zones. The MF algorithm shows very clearly the gossan altered zones in the study area. Moreover, the results indicate that SAM method is promising for identifying serisitic, propylitic, advanced argillic and argillic zones and can assist exploration geologists to find new prospects of turquoise mineralization in the other regions before costly detailed ground investigations.

Keywords: Hydrothermal Alteration, ASTER, Turquoise mine, Matched Filtering, Spectral Angle Mapper.