

مقایسه الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی در جداسازی دگرسانی‌های منطقه پاریز، استان کرمان

پویان جواندل^۱، حسین حسینی^{۲*}، عباس مقصودی قره بلاغ^۳

۱- کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۰۹/۲۰، پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۰۷)

چکیده

یکی از روش‌های اکتشاف منابع معدنی، استفاده از نقشه‌های پتانسیل کانی‌زایی است. این نقشه‌ها عمدتاً با استفاده از تلفیق نقشه‌های نشانگر حاصل از داده‌های سنجش از دور، ژئوشیمی و ژئوفیزیک تهیه می‌شوند. نقشه‌های نشانگر حاصل از داده‌های سنجش از دور عمدتاً با توجه به پراکندگی دگرسانی‌های موجود در منطقه تهیه می‌شوند، به همین دلیل مشخص کردن نوع و پراکندگی دگرسانی‌های موجود در منطقه نقش مهمی را در تهیه نقشه‌های پتانسیل کانی‌زایی ایفا می‌کند و با توجه به استفاده روزافزون ذخایر مس پورفیری در صنعت و همچنین اهمیت مناطق دگرسانی مرتبط با کانسارهای پورفیری در اکتشاف این تیپ از کانسارها، در این مطالعه به بررسی روش‌های نقشه‌برداری و تفکیک مناطق دگرسانی با استفاده از الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی در ذخایر مس پورفیری پرداخته شد. تفکیک مناطق دگرسانی در ذخیره‌های معدنی با توجه به مقایسه بین نمودار طیفی آزمایشگاهی کانی‌های مشخصه مناطق دگرسانی، با نمودار طیفی آن‌ها که از تصاویر سنجنده‌ها به دست آمده است، انجام می‌شود. در این مطالعه از اطلاعات سنجنده استر برای کلاسه‌بندی و جداسازی مناطق دگرسانی استفاده شده است که پس از انجام پیش‌پردازش‌ها بر روی اطلاعات و تصاویر سنجنده، از روش‌های نسبت باندی و آنالیز مولفه‌های اصلی برای نمایش و مشخص کردن مناطق دگرسانی استفاده و بعد از مشخص کردن مناطق دگرسانی، از الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی برای جداسازی و طبقه‌بندی مناطق دگرسانی استفاده شد. از نتایج مربوط به روش نسبت باندی برای آموزش و طبقه‌بندی الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان با تابع هسته پایه شعاعی و الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی استفاده شد، سپس برای مقایسه دو مدل و طبقه‌بندی‌های انجام شده با الگوریتم‌ها، از نتایج روش آنالیز مولفه‌های اصلی استفاده شد. مقایسه انجام شده بین مدل‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی نشان داد که مدل تهیه شده با الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی دارای میزان مشابهت ۸۹ درصد و الگوریتم ماشین برداری پشتیبان دارای میزان مشابهت ۸۱ درصد است. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده، برای تهیه نقشه‌های نشانگر حاصل از دگرسانی‌های پروپلیتیک و آرژیلیک از مناطق مشخص شده به وسیله الگوریتم ماشین برداری پشتیبان و برای تهیه نقشه نشانگر حاصل از دگرسانی فیلیک از مناطق مشخص شده با الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی استفاده شد.

کلمات کلیدی

مس پورفیری، طبقه‌بندی و جداسازی، ماشین برداری پشتیبان، نقشه‌بردار زاویه طیفی، مناطق دگرسانی.

۱- مقدمه

منابع معدنی به عنوان اولین حلقه در زنجیره تولید نقش مهمی در توسعه، رشد و آبادانی یک کشور ایفا می‌کنند و زیربنای اقتصاد و صنعت را تشکیل می‌دهند. بشر از همان آغاز آفرینش خود و در طول تاریخ، بر حسب نیازمندی‌ها و شناخت، از مواد معدنی استفاده کرده است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که مواد معدنی پایه و اساس تمدن را تشکیل می‌دهند. از این رو اکتشافات معدنی به عنوان اولین قدم در راه استفاده از آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. به موازات تولید و پیشرفت علم، تکنولوژی و ابداعاتی چون سنجش از دور، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی، روش‌های سنتی اکتشاف معدنی جای خود را به روش‌های جدید سپرده است [۱-۴].

سنجش از دور دانش و فن جمع‌آوری اطلاعات از عوارض سطح زمین، بدون تماس فیزیکی با آن‌ها است. داده‌های سنجش از دور، توان زیادی برای شناخت نواحی دگرسان شده مرتبط با توده‌های کانسار و در نتیجه اکتشاف ذخایر معدنی دارند و به عنوان یک روش استاندارد در زمینه اکتشافات معدنی شناخته می‌شوند. داده‌های سنجش از دور به دلیل یکپارچه و وسیع بودن، تنوع طیفی، تهیه پوشش‌های تکراری و ارزان بودن، در مقایسه با روش‌های گردآوری اطلاعات، قابلیت‌های ویژه‌ای دارند که امروزه نخستین عامل در مطالعه سطح زمین و عوامل تشکیل‌دهنده آن محسوب می‌شوند. ماهیت رقومی داده‌ها موجب شده است که سیستم‌های کامپیوتری بتوانند این داده‌ها را به طور مستقیم استفاده کنند. دسترسی سریع به نقاط دور افتاده و دقت بالای آن‌ها از امتیازات خاص این فناوری محسوب می‌شود. تکنیک‌های سنجش از دور نقش مهمی را در تعیین محل نهشته‌های معدنی ایفا می‌کنند و به طور قابل توجهی هزینه‌های پی‌جویی اولیه و مطالعات نیمه‌تفصیلی را کاهش می‌دهند. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در هنگام‌سازی نقشه‌های زمین‌شناسی، بهبود کیفی نقشه‌ها و تهیه نقشه‌های موضوعی بسیار مفید است. سنجش از دور امروزه در علوم مختلف مانند زمین‌شناسی، باستان‌شناسی و محیط زیست کاربرد دارد. نسل جدید از سنجش از دور پیشرفته در چند دهه اخیر در اکتشاف مواد معدنی، اکتشاف ذخایر نفتی، محیط‌زیست و کشاورزی به کار گرفته شده است [۵].

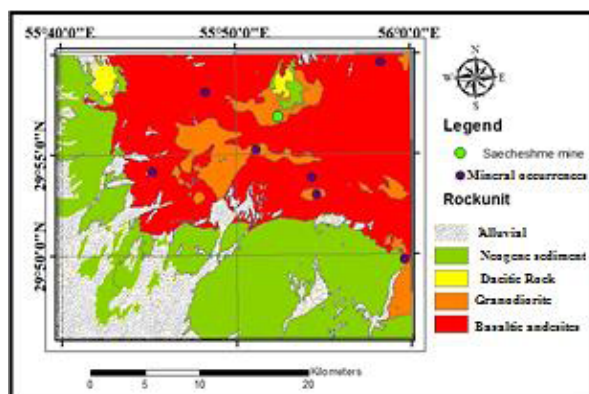
طبقه‌بندی داده‌ها فرآیندی است که در آن داده‌ها به یکسری از داده‌های با معنی تبدیل می‌شوند. روش طبقه‌بندی نظارت شده^۱ داده‌ها یکی از قدرتمندترین روش‌های طبقه‌بندی

است که با استفاده از نقاط آموزشی انجام می‌شود. الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت شده مانند الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی با استفاده از نقاط آموزشی تعیین شده قواعد مربوط به طبقه‌بندی را فراگرفته و ویژگی‌های مورد نیاز را طبقه‌بندی می‌کنند. روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده در اکثر مواقع برای داده‌های سنجش از دور استفاده می‌شوند. داده‌هایی که بر اساس ماهیت خود یک ویژگی و یا پراکندگی یک ماده خاص را در سطح زمین نشان می‌دهند به همین دلیل در این مطالعه از الگوریتم‌های طبقه‌بندی نام برده برای طبقه‌بندی داده‌های سنجش از دور به منظور مشخص شدن پراکندگی دگرسانی‌های مرتبط با کانسارهای مس پورفیری استفاده شده است [۶].

کانسارهای مس پورفیری به دلیل ذخیره زیاد و ناچیز بودن هزینه‌های بهره‌برداری اهمیت زیادی دارند. امروزه قسمت اعظم مس دنیا از کانسارهای مس پورفیری به دست می‌آید. یکی از روش‌های اکتشاف این نوع از ذخایر بارزسازی و تفکیک دگرسانی‌های این نوع از ذخایر و تاثیرات آن‌ها بر روی سطح با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های سنجش از دور است [۷].

سنجنده استر که بر روی پلانفرم Terra حمل می‌شود، یک سنجنده چندطیفی است که در دسامبر ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شده است. سنجنده ASTER بازتاب و انرژی الکترومغناطیس ساطع شده از سطح زمین را در ۱۴ باند ذخیره‌سازی می‌کند که ۳ باند آن در محدوده VNIR (۰.۸۶-۰.۵۲ میکرومتر) قرار دارند و توان تفکیک رادیومتری و مکانی آن‌ها به ترتیب برابر ۸ بیت و ۱۵ متر است، ۶ باند از ۱۴ باند سنجنده ASTER در بازه (۱.۶-۲.۴ میکرومتر) از امواج الکترومغناطیس قرار دارند و توان تفکیک رادیومتری ۸ بیت و توان تفکیک مکانی ۳۰ متر دارند و ۵ باند دیگر از این سنجنده در بازه ۸.۱۲۵-۱۶.۵ میکرومتر قرار دارند و توان تفکیک رادیومتری آن‌ها ۱۲ بیت و توان تفکیک مکانی آن‌ها ۹۰ متر است [۸-۱۲].

در این مطالعه هدف تفکیک و طبقه‌بندی دگرسانی‌های مرتبط با ذخایر مس پورفیری بر روی قسمتی از برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ پاریز با استفاده از دو الگوریتم یاد شده و مقایسه نتایج آن‌ها با استفاده از تصاویر مربوط به آنالیز مولفه‌های اصلی است. در بخش ابتدایی این مطالعه به تشریح موقعیت و شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و توضیح روش‌های پیش‌پردازش و پردازش انجام شده بر روی تصاویر سنجنده استر و همچنین روش‌های مورد استفاده برای طبقه‌بندی و



شکل ۱: زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

جداسازی دگرسانی‌ها پرداخته و در بخش‌های پایانی نتایج مربوط به روش‌های پردازش بر روی تصاویر سنجنده استر و نتایج مربوط به طبقه‌بندی مناطق دگرسانی ارائه شده است.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در کمربند ماگمایی ارومیه دختر (سهند- بزمان) در مرکز ایران قرار دارد که در این منطقه واحدهای وسیع درونی و بیرونی مرتبط به دوران‌های ترشیاری تا پلیوکواترنری در امتداد شمال غربی و جنوب شرقی رخمون دارند. مطالعات بسیاری بر روی کمربند ماگمایی ارومیه دختر انجام شده و مدل‌های بسیاری برای فروانش این کمربند پیشنهاد شده است که اغلب این فروانش را حاصل از بسته شدن دریای تتیس^۲ می‌دانند [۱۶-۱۳].

کانی‌زایی‌های عمده در کمربند ماگمایی ارومیه دختر در ۲ منطقه چهار گنبد (استان کرمان) در جنوب کمربند و منطقه سونگون در شمال غربی قرار دارد. عمده کانی‌سازی در این منطقه از نوع مس پورفیری همراه با گرانیتوئیدهای ائوسن-پلیوسن-کواترنری و سنگ‌های آتش‌فشانی است. هر دو منطقه یاد شده به عنوان مناطق اصلی کانی‌زایی در کمربند ارومیه دختر، شامل ذخایر و اندیس‌های مس پورفیری مانند معدن مس سرچشمه و مس چاه فیروزه است. اکثر واحدهای موجود در این منطقه تحت تاثیر دگرسانی‌های هیدروترمالی قرار گرفته‌اند که واحدهایی که در آن‌ها بیشترین دگرسانی اتفاق افتاده است، ریوداسیت‌های موجود در منطقه است. راستای انتشار ریوداسیت‌ها در منطقه عمدتاً شمال شرقی- جنوب غربی است. در منطقه یک همبستگی بسیار قوی بین مناطق دگرسانی و شکستگی‌های اصلی در منطقه وجود دارد، به همین دلیل تصور می‌شود که مناطق دگرسانی موجود در منطقه عمدتاً به وسیله شکستگی‌های اصلی کنترل می‌شوند. منطقه مورد مطالعه شامل ۸ کانی‌زایی مس پورفیری است که معدن مس سرچشمه و محل بقیه کانی‌زایی‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. شکل شماره ۱ نشان‌دهنده نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه است که در آن واحدهای زمین‌شناسی که با رنگ سفید مشخص شده‌اند، نشان‌دهنده رسوبات و آبرفت‌های جدید، واحدهای مشخص شده با رنگ سبز نشان‌دهنده رسوبات متعلق به نفوزن که عمدتاً تخته‌سنگ‌ها و سنگ‌ریزه‌های سنگ‌های آتش‌فشانی‌اند، واحدهای زرد رنگ نشان‌دهنده سنگ‌های داسیتی متعلق به دوران کواترنری، واحدهای نارنجی رنگ گرانودیوریت، کوارتزیدیوریت، دیوریت‌های

پورفیری و دایک‌های مونزونیتی و واحدهای مشخص شده با رنگ قرمز مربوط به آندزیت‌های بازالتی، پیروکلاستیک‌ها، تراکی بازالت و تراکی-آندزیت‌اند [۲۲-۱۷].

۳- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از تصاویر سنجنده استر سطح Level-1B برای مشخص کردن مناطق دگرسانی استفاده شده است که پس از انجام تصحیح Cross track Illumination، تصحیحات Log Residual و IAR Reflectance بر روی تصاویر انجام شده است [۳۳، ۲۳، ۱۲].

۴- روش‌های مورد استفاده

در این مطالعه از الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان^۳ و نقشه‌بردار زاویه طیفی^۴ برای طبقه‌بندی مناطق دگرسانی استفاده شده است که در ادامه در مورد روش‌های پردازش بر روی تصاویر سنجنده استر و الگوریتم ماشین برداری پشتیبان داده توضیح داده می‌شود.

۴-۱- نسبت بانندی

روش نسبت بانندی^۵ کاربردهای زیادی در زمینه‌های جداسازی و تفکیک واحدهای سنگی، کانی‌ها و تشخیص مناطق دگرسانی دارد. روش نسبت بانندی در حالت ساده شامل تقسیم مقادیر یک باند بر روی باند دیگر برای شناسایی و بارزسازی یک ماده و یک کانی خاص است که انتخاب باندها برای انجام عملیات بانندی بستگی به بازه‌های جذب ماده و یا کانی مورد نظر دارد [۲۳]. عمق جذب نسبی باندها^۶ نسبی است که در آن صورت کسر شامل باندهایی است که ماده و

۴-۴- نقشه بردار زاویه طیفی

نقشه بردار زاویه طیفی مشابهت بین دو طیف را به وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند. در واقع با تبدیل طیف‌ها به بردار در فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه طیفی بین دو بردار محاسبه می‌شود. نقشه بردار زاویه طیفی یک تخمین کیفی از حضور ویژگی جذب را می‌دهد که ممکن است در ارتباط با کانی‌شناسی باشد. مزیت اصلی این روش این است که یک روش سریع و آسان برای نقشه برداری شباهت طیفی طیف تصویر با طیف مرجع است که می‌تواند اثرات سایه را از بین ببرد. برای شناسایی کانی‌ها، استفاده از روش نقشه بردار زاویه طیفی در صورتی که با مقادیر زاویه طیفی پایین انجام شود، بسیار مفید است. در واقع هرچه مقدار زاویه بین صفر تا یک کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر است [۲۸].

۵- بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس تقسیم‌بندی جهانی که توسط سازمان ملل انجام گرفته است، اکتشاف شامل ۴ مرحله شناسایی^۱، پی‌جویی^۲، اکتشاف عمومی^{۱۱} و اکتشاف تفصیلی^{۱۲} است. یکی از سیستم‌های مورد استفاده در این ۴ مرحله، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. مهم‌ترین هدف GIS تلفیق داده‌های مکانی و ارزیابی نهایی آن‌ها است. سیستم اطلاعات جغرافیایی امکان استفاده از روش‌های مختلف ترکیب و تفسیر داده‌ها و به نقشه درآوردن متغیرهای جدید را فراهم می‌آورد که از آن‌ها می‌توان در تهیه نقشه‌های پتانسیل کانی‌زایی استفاده کرد و از نتایج به دست آمده در عملیات پی‌جویی و اکتشاف بهره گرفت. یکی از داده‌های مورد استفاده در تهیه نقشه‌های پتانسیل کانی‌زایی، داده‌های سنجش از دور است که با استفاده از این داده‌ها، نقشه دگرسانی‌های موجود در منطقه تهیه شده و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی با نقشه‌های حاصل از داده‌هایی همچون داده‌های ژئوشیمیایی و نظایر آن تلفیق و نقشه پتانسیل کانی‌زایی در سطح منطقه تهیه شده است. در این قسمت به نتایج مربوط به پردازش تصاویر و طبقه‌بندی مناطق دگرسانی با استفاده از دو روش ماشین برداری پشتیبان و نقشه بردار زاویه طیفی پرداخته می‌شود.

۵-۱- نسبت بانندی

برای مشخص کردن مناطق دگرسانی در منطقه مورد مطالعه از نسبت‌های بانندی زیر استفاده شده است.

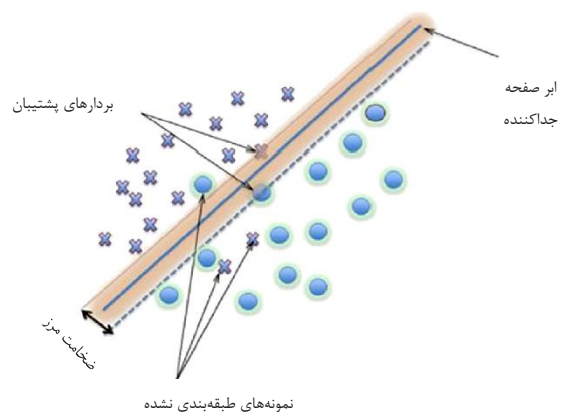
یا کانی مورد نظر در آن باندها بیشترین جذب را دارد و مخرج کسر شامل باندهایی است که کانی مورد نظر در آن‌ها کمترین مقدار جذب امواج الکترومغناطیس را دارد، این نسبت یک روش کارآمد برای شناسایی کانی‌های مرتبط با دگرسانی‌ها است [۲۳]. در این مطالعه از روش‌های نسبت بانندی و آنالیز مولفه‌های اصلی برای نمایش مناطق دگرسانی استفاده شده است.

۴-۲- آنالیز مولفه‌های اصلی

روش آنالیز مولفه‌های اصلی^۷ یکی از روش‌هایی است که در مطالعات زمین‌شناسی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴]. در روش آنالیز مولفه‌های اصلی اطلاعات موجود در تصاویر اولیه در تعداد باند خاصی که به آن‌ها مولفه‌های اصلی گفته می‌شود، فشرده می‌شوند. این عملیات فشرده‌سازی باعث کاهش ابعاد داده‌ها، از بین رفتن نویز در آخرین مولفه اصلی و در نتیجه بازسازی اطلاعات مدنظر در تصویر می‌شود [۲۴].

۴-۳- ماشین برداری پشتیبان

الگوریتم ماشین برداری پشتیبان یک روش طبقه‌بندی نظارت شده است که در سال ۱۹۹۵ توسط واپنیک^۸ توسعه یافته و به طور فزاینده در مطالعات زمین‌شناسی در حال استفاده است [۲۵]. هدف الگوریتم ماشین برداری پشتیبان، اختصاص هر یک از پیکسل‌ها به یک گروه و یا کلاس خاص بوسیله یک صفحه جداکننده است، به طوری که اختلاف هر یک از کلاس‌ها در بیشترین حالت باشد (شکل ۲). پیکسل‌هایی که بر روی مرز کلاس‌ها و یا گروه‌ها قرار می‌گیرند، بردار پشتیبان نام دارند که الگوریتم ماشین برداری پشتیبان به تعدادی نقاط آموزشی و یا تعلیمی نیازمند است [۲۶-۲۵].



شکل ۲: قاعده کلی طبقه‌بندی با الگوریتم ماشین برداری پشتیبان [۲۵]

جدول ۱: مقادیر بردارهای ویژه برای بارسازی دگرسانی آرژیلیک

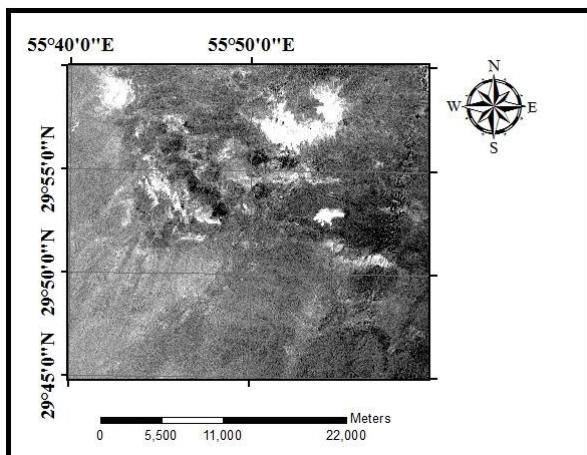
Band 7	Band 6	Band 4	Band 1	
-۰٫۵۰۱	-۰٫۵۳۲۰۷	-۰٫۵۳۹۱۱	-۰٫۴۱۸۶۵	PC 1
۰٫۱۹۸۴۶۹	۰٫۲۲۴۱۶	۰٫۲۹۸۱۵۴	-۰٫۹۰۶۳۵	PC 2
-۰٫۶۴۹۵۹	-۰٫۱۷۸۹	۰٫۷۳۶۸۲۱	۰٫۵۵۸۹۵	PC 3
۰٫۵۳۶۲۹	-۰٫۷۹۶۶۵	۰٫۲۷۸۴۹۵	۰٫۱۲۰۲۸	PC 4

$$RBD5 = ((B4+B6)/(B5))$$

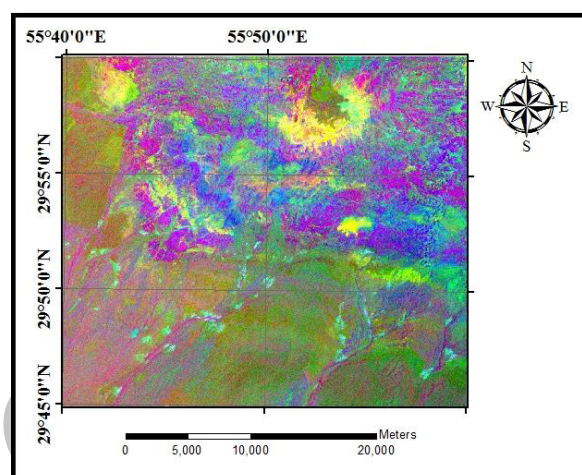
$$RBD6 = ((B5+B7)/(B6))$$

$$RBD8 = ((B7+B9)/(B8))$$

که ترکیب رنگی این سه نسبت به ترتیب $R=RBD6$ ، $G=RBD8$ و $B=RBD5$ باعث می‌شود که دگرسانی فیلیک به رنگ سبز، آرژیلیک به رنگ زرد و پروپلیتیک به رنگ بنفش دیده شود (شکل ۳) [۲۹].



شکل ۴: تصویر مولفه اصلی ۴ (پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده دگرسانی آرژیلیک است).



شکل ۳: ترکیب رنگی $R=RBD6$ ، $G=RBD8$ و $B=RBD5$ (دگرسانی فیلیک به رنگ سبز، آرژیلیک به رنگ زرد و پروپلیتیک به رنگ بنفش دیده می‌شود).

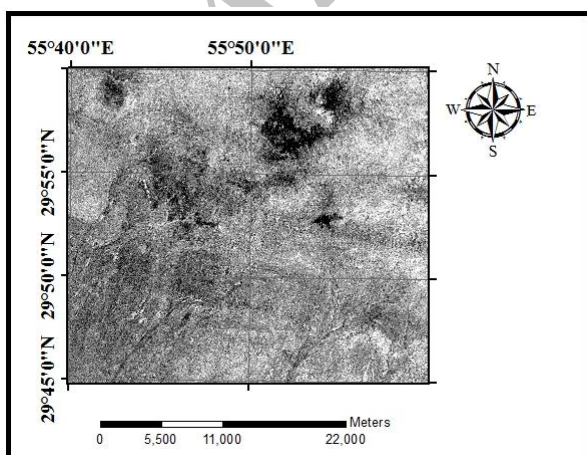
جدول ۲: مقادیر بردارهای ویژه برای بارسازی دگرسانی فیلیک

Band 6	Band 5	Band 3	Band 1	
۰٫۵۳۹۵۹۴	۰٫۵۰۵۲۱۷	۰٫۴۸۹۷۶	۰٫۴۶۲۳۰۸	PC 1
-۰٫۴۸۳۵۵	-۰٫۴۴۴۲۱	۰٫۶۷۶۸۱۳	۰٫۳۳۲۸۳	PC 2
۰٫۱۰۸۲۷۷	۰٫۱۰۳۷۲۹	۰٫۵۴۹۵۷۵	-۰٫۸۲۱۸۹	PC 3
۰٫۶۸۰۶۶۲	-۰٫۷۳۲۵۸	۰٫۰۰۵۱۷۹	۰٫۰۰۰۶۳۶	PC 4

۵-۲- آنالیز مولفه‌های اصلی

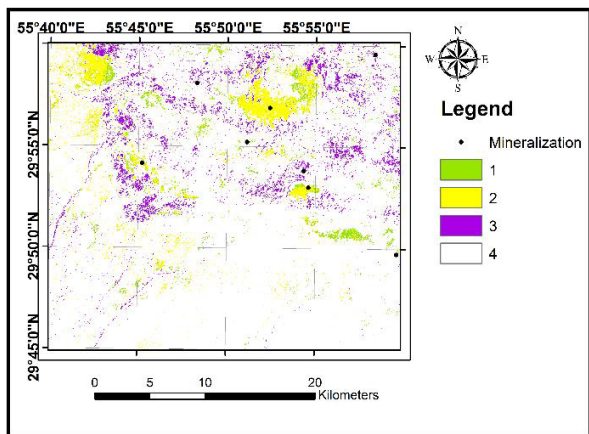
برای ساده‌سازی نتایج از حاصل آنالیز مولفه‌های اصلی، این روش در هر مرحله برای شناسایی مناطق دگرسانی بر روی ۴ باند انجام می‌شود [۳۰]. به همین منظور برای شناسایی دگرسانی آرژیلیک (کانی‌های آلونیت، کائولینیت) از باندهای ۱، ۴، ۶ و ۷ استفاده می‌شود که با توجه به بازه جذب و انعکاس این کانی‌ها و مقادیر بردارهای ویژه مربوط به این آنالیز در جدول ۱، مولفه اصلی ۴ نشان‌دهنده دگرسانی‌های آرژیلیک است که در شکل ۴ دگرسانی‌های آرژیلیک با پیکسل‌های روشن مشخص شده‌اند [۳۱].

برای شناسایی دگرسانی فیلیک (سرسیتیک) از باندهای ۱، ۳، ۵ و ۶ استفاده شده است که با توجه به مقادیر بردارهای ویژه یاد شده در جدول ۲ و بازه‌های جذب و انعکاس کانی‌های شاخص این دگرسانی، مولفه اصلی ۴ نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک است که پیکسل‌های تیره در شکل ۵ نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک است (شکل ۵) [۳۱].



شکل ۵: تصویر مولفه اصلی ۴ (پیکسل‌های تیره نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک است).

ماشین برداری پشتیبان در نظر گرفته شده است که انتخاب محل هر نقطه به صورت تصادفی و با نرم افزار Arcmap انجام شده است [۳۲-۳۴]. نتایج مربوط به طبقه‌بندی نظارت شده بر روی شکل ۳ با استفاده از الگوریتم ماشین برداری پشتیبان که از توابع پایه شعاعی^{۱۳} به عنوان تابع هسته^{۱۴} استفاده می‌کند، در شکل ۷ نمایش داده شده است. بهترین مقدار گاما در الگوریتم ماشین برداری پشتیبان برابر با ۰/۰۳۱۲۵۰ است. در شکل ۷ مناطق سبز مرتبط با دگرسانی فیلیک، مناطق زرد رنگ مرتبط با دگرسانی آرژیلیک و مناطق بنفش نیز مرتبط با دگرسانی پروپلیتیک است.



شکل ۷: جداسازی و تفکیک دگرسانی‌ها در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم ماشین برداری پشتیبان

۵-۴- نقشه بردار زاویه طیفی

برای جداسازی مناطق دگرسانی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی همانند الگوریتم ماشین برداری پشتیبان از ۸۰۰ نقطه آموزشی مطابق با نقاط آموزشی الگوریتم ماشین برداری پشتیبان در نرم افزار ENVI استفاده شده است که نتایج حاصل از این طبقه‌بندی در شکل ۸ نمایش داده شده است که در آن مناطق سبز مرتبط با دگرسانی فیلیک، مناطق زرد رنگ مرتبط با دگرسانی آرژیلیک و مناطق بنفش نیز مرتبط با دگرسانی پروپلیتیک است.

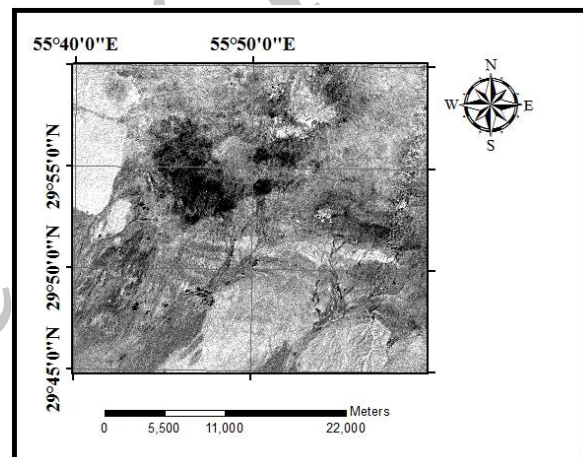
۵-۵- اعتبارسنجی نقشه‌های دگرسانی

برای انجام اعتبارسنجی نقشه‌های دگرسانی به صورت کیفی از هم‌پوشانی مناطق دگرسانی با توده‌های نفوذی و همچنین مطابقت با شکستگی‌های موجود در منطقه استفاده

برای شناسایی دگرسانی پروپلیتیک (کلریت و اپیدوت) از باندهای ۱، ۳، ۵ و ۸ استفاده شده است که با توجه به مقادیر بردارهای ویژه یاد شده در جدول ۳ و بازه‌های جذب و انعکاس کانی‌های شاخص این دگرسانی، مولفه اصلی ۴ نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک است (شکل ۶) [۳۱].

جدول ۳: مقادیر بردارهای ویژه برای بارزسازی دگرسانی پروپلیتیک

Band8	Band5	Band 3	Band 1	
۰/۵۴۰۰۹۶	۰/۵۰۱۴۲۳	۰/۴۹۱۱۰۵	۰/۴۶۴۴۲۱	PC 1
-۰/۵۰۰۶۱	-۰/۴۲۴۶۵	۰/۶۸۴۶۸۲	۰/۳۱۶۴۴۹	PC 2
۰/۱۱۵۲۷	۰/۱۱۴۸۹۹	۰/۵۳۸۰۳۸	-۰/۸۲۷۰۶	PC 3
۰/۶۶۶۶۳۱	-۰/۷۴۵۰۱	۰/۰۲۳۲۷۴	۰/۰۰۴۵۳۳	PC 4

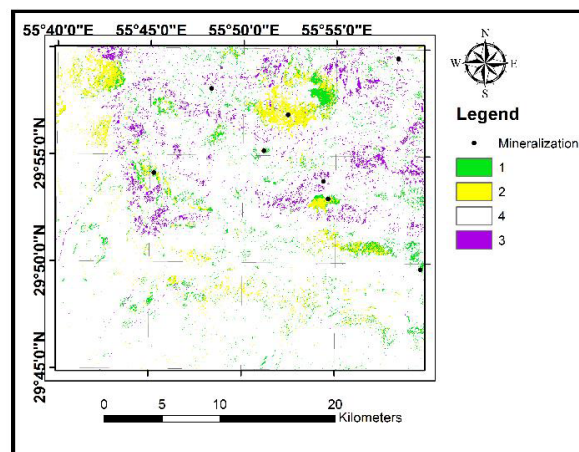


شکل ۶: تصویر مولفه اصلی ۴ (پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده دگرسانی پروپلیتیک است).

۵-۳- ماشین برداری پشتیبان

برای جداسازی مناطق دگرسانی در منطقه مورد مطالعه از الگوریتم ماشین برداری پشتیبان استفاده شده است. برای آموزش الگوریتم ماشین برداری پشتیبان از ۸۰۰ نقطه در تصویر مربوط به روش عمق جذب نسبی باندها (شکل ۳) استفاده شد و طبقه‌بندی بر روی این تصاویر انجام گرفت که بعد از انتخاب نقاط آموزشی و ساخت فایل رستری آموزشی با اندازه سلول ۳۰ متر، از نرم افزار Arcmap برای آموزش و انجام طبقه‌بندی با این الگوریتم استفاده شده است. به طور کل منطقه مورد مطالعه به چهار قسمت دگرسانی فیلیک، آرژیلیک، پروپلیتیک و مناطق دگرسان نشده تقسیم شده است. ۸۰۰ نقطه آموزشی به طور تصادفی برای آموزش مدل

اصلی بوده و الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی میزان شباهت بیشتری با نتایج آنالیز مولفه‌های اصلی داشته است. ماتریس سردرگمی محاسبه شده با استفاده از تصاویر آنالیز مولفه‌های اصلی برای الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی در جدول ۵ مشخص شده و میزان شباهت مدل با نتایج آنالیز مولفه‌های اصلی برابر ۸۹ درصد محاسبه شده است که مشاهده می‌شود، الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی در تفکیک دگرسانی‌های فیلیک عملکرد بهتری داشته و میزان شباهت آن بیشتر است ولی میزان شباهت آن در تفکیک دگرسانی‌های پروپلیتیک و مناطق دگرسان نشده با نتایج آنالیز مولفه‌های اصلی کمتر است. در جدول ۶ درصد مناطق تشخیص داده شده برای هر دگرسانی توسط الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه بردار زاویه طیفی و در جدول ۷ مشخصات الگوریتم ماشین برداری پشتیبان نشان داده شده است.



شکل ۸: جداسازی و تفکیک دگرسانی‌ها در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی

جدول ۴: ماتریس سردرگمی محاسبه شده برای الگوریتم ماشین برداری پشتیبان برحسب درصد

کلاس تخمین	کلاس واقعی	دگرسان نشده		
		پروپلیتیک	آرژیلیک	فیلیک
دگرسان نشده	۹۹,۸۹	۰,۱۱	۰	۰
پروپلیتیک	۵,۱۶	۹۲,۰۷	۰	۲,۷۷
آرژیلیک	۰	۲,۳۷	۹۷,۶۳	۰
فیلیک	۳۴,۲۸	۶,۸۸	۱۷	۴۱,۸۴

جدول ۵: ماتریس سردرگمی محاسبه شده برای الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی برحسب درصد

کلاس تخمین	کلاس واقعی	دگرسان نشده		
		پروپلیتیک	آرژیلیک	فیلیک
دگرسان نشده	۹۳,۸۸	۳,۳۸	۱,۳۷	۱,۳۷
پروپلیتیک	۲۸,۷	۷۱,۳۰	۰	۰
آرژیلیک	۰	۰	۹۷,۹۳	۲,۷
فیلیک	۱۰,۲	۰	۰	۸۹,۸

جدول ۶: درصد مناطق تحت پوشش هر دگرسانی در هر یک از الگوریتم‌ها

نوع الگوریتم	دگرسان نشده	پروپلیتیک	آرژیلیک	فیلیک
svm	۹۰,۲	۴,۱	۳,۸	۱,۹
sam	۹۱	۲,۶	۳,۳	۳,۱

شده است که نتایج هر دو الگوریتم، پیوستگی و هم‌پوشانی بسیار خوبی با توده‌های نفوذی و شکستگی‌های موجود در منطقه دارند، به طور مثال شکل ۸ رابطه بین مناطق دگرسانی تشخیص داده شده به وسیله الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی با توده‌های نفوذی را نشان می‌دهد [۳۵].

برای بررسی عملکرد الگوریتم ماشین برداری پشتیبان در طبقه‌بندی دگرسانی‌های منطقه به صورت کمی، از اطلاعات مربوط به پردازش تصاویر با روش آنالیز مولفه‌های اصلی استفاده شده است، بدین شکل که در پردازش‌های مربوط به آنالیز مولفه‌های اصلی، مناطقی که به عنوان مناطق دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک در نظر گرفته شده‌اند به عنوان داده‌های تست و برای بررسی عملکرد ماشین برداری پشتیبان در نظر گرفته شده‌اند. به طور کلی میزان شباهت کلاسه‌بندی انجام شده با استفاده از الگوریتم ماشین برداری پشتیبان با داده‌های تست مربوط به پردازش آنالیز مولفه‌های اصلی برابر ۸۱ درصد محاسبه شده است که ماتریس سردرگمی^{۱۵} که نشان‌دهنده درصد تعداد پیکسل‌های تشخیص داده شده درست برای هر کلاس است و بر اساس تصاویر آنالیز مولفه‌های اصلی محاسبه شده، در جدول ۴ ارایه شده است، که هر یک از مقادیر موجود در قطره‌های اصلی درصد هر کلاس در هر طبقه‌بندی را نشان می‌دهد [۳۵]. که با توجه به ماتریس سردرگمی الگوریتم ماشین برداری پشتیبان در تشخیص دگرسانی‌های فیلیک در منطقه دارای شباهت کمتری با نتایج آنالیز مولفه‌های

جدول ۷: مشخصات مدل ماشین برداری پشتیبان استفاده شده در طبقه‌بندی دگرسانی‌های منطقه

مقدار	پارامتر
تابع پایه شعاعی	تابع هسته
۰٫۰۳۱۲۵۰	γ
۳۲۷۶۸	C

۶- نتیجه‌گیری

یکی از ابزارهای مناسب در اکتشاف منابع معدنی استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی است. هدف اصلی از به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در تجزیه و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، دورسنجی، اکتشاف چکشی و در نهایت تلفیق داده‌ها است که به تصمیم‌گیری در مراحل بعدی عملیات پی‌جویی و دستیابی به مناطقی که از نظر پتانسیل معدنی امیدبخش است، کمک می‌کند. از مهم‌ترین کلیدهای اکتشافی کانسارهایی همچون کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال، مشخص کردن محل پراکندگی دگرسانی‌های مرتبط با این کانسارها است، در نتیجه مشخص کردن نوع و محل پراکندگی دگرسانی‌ها نقش بسیار مهمی در تهیه نقشه‌های پتانسیل کانی‌زایی و اکتشاف مناطق امیدبخش دارد.

در این مطالعه از تصاویر سنجنده ASTER و الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی برای جداسازی و طبقه‌بندی مناطق دگرسانی در منطقه‌ای در استان کرمان استفاده شده است. نتایج روش نسبت بانندی به عنوان داده‌های آموزشی برای آموزش هر دو الگوریتم و از نتایج مربوط به روش آنالیز مولفه‌های اصلی برای ارزیابی عملکرد و مقایسه الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی استفاده شده است.

دو الگوریتم ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی در تشخیص مناطق دگرسان نشده و دگرسانی‌های آرژیلیک در منطقه مورد مطالعه، نتایج تقریباً مشابه با یکدیگر دارند. با مقایسه و تست مدل‌های ساخته شده برای طبقه‌بندی و جداسازی دگرسانی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه به وسیله الگوریتم‌های ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی با تصاویر حاصل از پردازش آنالیز مولفه‌های اصلی، مشخص شد که مدل ساخته شده با استفاده از الگوریتم ماشین برداری پشتیبان با توجه به تعداد بالای پیکسل‌های اشتباه تشخیص داده شده برای دگرسانی فیلیک (جدول ۴) عملکرد چندان مناسبی در تشخیص این مناطق نداشته است و الگوریتم نقشه‌بردار زاویه

طیفی از شباهت بیشتری در تشخیص این مناطق دارد و میزان شباهت تشخیص داده شده برای دگرسانی‌های پروپلیتیک و مناطق دگرسان نشده در الگوریتم ماشین برداری پشتیبان با نتایج آنالیز مولفه‌های اصلی بیشتر است. در نهایت میزان مشابهت کلی محاسبه شده برای الگوریتم ماشین برداری پشتیبان برابر ۸۱ درصد و میزان مشابهت الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی برابر ۸۹ درصد محاسبه شد که در آخر با توجه به نتایج، نتیجه گرفته شد که برای تهیه نقشه‌های نشانگر حاصل از دگرسانی‌های پروپلیتیک و آرژیلیک از مناطق مشخص شده با الگوریتم ماشین برداری پشتیبان و برای تهیه نقشه نشانگر حاصل از دگرسانی فیلیک از مناطق مشخص شده با الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی استفاده شود.

استفاده از تصاویر مربوط به آنالیز مولفه‌های اصلی در این پژوهش صرفاً برای مقایسه دو الگوریتم ماشین برداری پشتیبان و نقشه‌بردار زاویه طیفی است و استفاده از این تصاویر به معنای دقیق و درست بودن نتایج آنالیز مولفه‌های اصلی نیست. کلاسه‌بندی و نتایج حاصل از این مطالعه با توجه به نقاط آموزشی و شرایط منطقه مورد مطالعه به دست آمده است و ممکن است برای مناطق دیگر و با توجه به داده‌های آموزشی دیگر متفاوت باشد. منظور از دقت هر یک از الگوریتم‌ها در جداسازی دگرسانی‌ها در این مطالعه، دقت الگوریتم با توجه به مینا قرار دادن تصاویر حاصل از آنالیز مولفه‌های اصلی است که با توجه به اینکه از تمامی روش‌های بارزسازی و مشخص کردن دگرسانی‌ها با استفاده از روش‌های سنجش از دور در این منطقه استفاده شد و با توجه به مطالعات قبلی انجام گرفته بر روی این منطقه، تصاویر حاصل از آنالیز مولفه‌های بیشترین همخوانی را با دگرسانی‌های موجود در منطقه داشته‌اند، ولی پیشنهاد می‌شود که برای بررسی دقت هر یک از الگوریتم‌ها از داده‌ها و نمونه‌های برداشت شده از منطقه استفاده شود.

۷- مراجع

- [1] Sillitoe, R. (2010). "Porphyry Copper Systems". *Economic Geology*, 105: 3-41.
- [2] Berger, B. R., Ayuso, R. A., Wynn, J. C., and Seal, R. R. (2008). "Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits". U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1321, p. 55.

[۳] علوی‌پناه، ک.؛ ۱۳۸۵؛ " کاربرد سنجش از دور در علوم زمین ". تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

- (*Shahr e Babak area, Kerman Province*). University of California, Los Angeles.
- [15] Abedi, M., Norouzi, G. -H., and Fathianpour, N. (2013). "Fuzzy outranking approach: A knowledge-driven method for mineral". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 556-567.
- [16] Abedi, M., Torabi, S., Norouzi, G. -H., Hamzeh, M., and Elyasi, G. -R. (2012). "PROMETHEE II: A knowledge-driven method for copper exploration". *Computers & Geosciences*, 46: 255-263.
- [17] Abedi, M., Norouzi, G. -H., and Bahroudi, A. (2012). "Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas". *Computers & Geosciences*, 46: 272-283.
- [18] Abedi, M., and Norouzi, G. -H. (2012). "Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for copper exploration". *Journal of Applied Geophysics*, 83: 35-45.
- [19] Abedi, M., Torabi, S., Norouzi, G. -H., and Hamzeh, M. (2012). "ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity mapping". *Journal of Applied Geophysics*, 87: 9-18.
- [20] Abedi, M., Norouzi, G. -H., and Fathianpour, N. (2015). "Mineral potential mapping in Central Iran using fuzzy ordered weighted averaging method". *Geophysical Prospecting*, 63: 461-477.
- [21] Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., and Mouthereau, F. (2005). "Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation". *International Journal of Earth Sciences*, 94: 401-419.
- [22] 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: 60-73.
- [23] Beiranvand pour, A., and Hashim, M. (2011). "Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran". *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1309-1323.
- [24] Gabr, S., Ghulam, A., and Kusky, T. (2010). "Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data". *Ore Geology Reviews*, 38: 59-69.
- [25] Abedi, M., Norouzi, G. -H., and Bahroudi, A. (2012). "Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas". *Computers & Geosciences*, 46: 272-283.
- [4] یوسفی‌زاده، ا.، نوروزی، غ.، دولتی، ف.، ضیایی، م.؛ ۱۳۹۱؛ "استفاده از روش‌های MF و LS-Fit جهت بارزسازی مناطق دگرسانی گرمابی مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه جبالبارز". *علوم زمین*.
- [5] Rowan, L. C., Schmidt, R. G., and Mars, J. C. (2006). "Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data". *Remote Sensing of Environment*, 104: 74-87.
- [6] Beiranvand Pour, A., and Hashim, M. (2012). "Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt, Iran". *Advances in Space Research*, 49: 753-769.
- [7] Di Tommaso, I., and Rubinstein, N. (2007). "Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina". *Ore Geology Reviews*, 32: 275-290.
- [8] Rowan, L. C., and Mars, J. (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): 350-366.
- [9] Mars, J. C., and Lawrence, R. C. (2010). "Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals". *Remote Sensing of Environment*, 114: 2011-2025.
- [10] Moghtaderi, A., Moore, F., and Mohammadzadeh, A. (2007). "The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran". *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 238-252.
- [11] Beiranvand Pour, A., and Hashim, M. (2014). "ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration". *springerplus*, 3: 1-19.
- [12] Ahmad, T., and Posht Kuhi, M. (1993). "Geochemistry and petrogenesis of Urumiah- Dokhtar volcanic belt around Nain and Rafsanjan areas: a preliminary study". Iranian Ministry of Mines (Report), Tehran.
- [13] Berberian, F., and Berberian, M. (1981). "Tectono-Plutonic Episodes in Iran. Zagros, Hindu Kush, Himalaya: Geodynamic Evolution". American Geophysical Union & Geological Society of America, 3: 5-32.
- [14] Hassanzadeh, J. (1993). "Metallogenic and Tectonomagmatic Events in the SE Sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran

the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas". Journal of Applied Remote Sensing, 10: 50-62.

[34] Mountrakis, G., Im, J., and Ogole, C. (2011). "Support vector machines in remote sensing: A review". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66: 247-259.

[35] Abedi, M., Gholami, A., and Nourozi, G. -H. (2013). "A stable downward continuation of airborne magnetic data: A case study for mineral prospectivity mapping in Central Iran". Computers & Geosciences, 52: 269-280.

[26] Zuo, R., and Carranza, E. M. (2011). "Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity". Computers & Geosciences, 37: 1967-1975.

[27] Yu, L., Porwal, A., Holden, E. -J., and Dentith, M. C. (2012). "Towards automatic lithological classification from remote sensing data using support vector machines". Computers & Geosciences, 45: 229-239.

[28] Honarmand, M., Ranjbar, H., and Shahabpour, J. (2011). "Application of Principal Component Analysis and Spectral Angle Mapper in the Mapping of Hydrothermal Alteration in the Jebal-Barez Area, Southeastern Iran". Resource Geology, 62: 119-139.

[29] Mars, J. C., and Rowan, L. C. (2006). "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". U.S. Geological Survey, 2(3): 161-186.

[30] Shahriari, H., Honarmand, M., and Ranjbar, H. (2015). "Comparison of multi-temporal ASTER images for hydrothermal alteration mapping using a fractal-aided SAM method". International Journal of Remote Sensing, 36(5): 1271-1289.

[31] Salimi, A., Ziaii, M., Hosseinjani Zadeh, M., Amiri, A., and Sadegh, K. (2015). "High performance of the support vector machine in classifying hyperspectral data using a limited dataset". International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMGE), 49(2): 253-268.

[32] YAJIMA, T. (2014). "ASTER Data Analysis Applied to Mineral Resource Exploration and Geological Mapping". Nagoya University, Nagoya, p. 20.

[33] Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L., and Bachaoui, E. (2016). "Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in

¹ Supervised

² Tethys ocean

³ Support vector machine

⁴ Spectral angle mapper

⁵ Band ratio

⁶ Relative absorption band depth(RBD)

⁷ Principal component analysis

⁸ Vapnik

⁹ Reconnaissance

¹⁰ Prospecting

¹¹ General exploration

¹² Detailed exploration

¹³ Radial basis function kernel

¹⁴ Kernel function

¹⁵ Confusion matrix