

اکتشاف نواحی دارای مس در منطقه قزل‌دانش شهرستان خوی با استفاده از تصاویر هایپر یون

مهدی بلواسی* - کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تبریز
صیاد اصغری سراسکانرود- استادیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه
بتول زینالی- استادیار گروه اقلیم‌شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی
سعیده صاحبی وایقان- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۰۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۱/۲۲

چکیده

در سال‌های اخیر با رشد سریع فناوری سنجش از دور در زمینه سنجنده‌های ابرطیفی، افزایش قابلیت تصویربرداری در صدها باند فراهم شده است. به منظور شناسایی و اکتشاف کانی‌های هر منطقه با بهره‌گیری از رفتارهای طیفی منحصر به فرد کانی‌ها، آشکارسازی طیفی به وسیله این نوع از سنجنده‌ها که روشی نو محسوب می‌شود، در اکتشاف معدن و زمین‌شناسی استفاده شده است. بنابراین، در این تحقیق از تصاویر هایپر یون^۱ ماهواره EO-1 برای شناسایی نواحی دارای مس در منطقه قزل‌دانش شهرستان خوی واقع در شمال غرب ایران استفاده شد. در این پژوهش، پس از پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصویر، کانی‌های مس در منطقه پژوهش که در عملیات میدانی در تحقیقات پیشین استخراج شده بود، مشخص شد. سپس برای تطبیق امضای طیفی این کانی‌ها با امضای طیفی موجود در کتابخانه طیفی USGS از نمونه‌گیری مجدد استفاده شد. در نهایت، با به‌کارگیری الگوریتم‌های SAM و SID نقشه‌ها استخراج و با نقشه‌های موجود مقایسه شد. نتایج نشان داد که کارایی الگوریتم SAM با صحت کلی ۸۵ درصد و ضریب کاپای ۸۰ درصد از الگوریتم SID با صحت کلی ۷۶ درصد و ضریب کاپای ۶۸ درصد بیشتر است. همچنین، می‌توان از تصاویر ابرطیفی هایپر یون با استفاده از الگوریتم SAM در شناسایی نواحی دارای فلز مس استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: سنجش از دور ابرطیفی، نقشه‌برداری زاویه‌ای طیفی، واگرایی اطلاعات طیفی، هایپر یون.

مقدمه

استفاده از فناوری دورسنجی و به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای اغلب موجب کاهش هزینه و افزایش دقت و سرعت می‌شود (علوی‌پناه، ۱۳۹۲: ۲۱). استفاده از این فناوری در چند دهه اخیر به‌مثابه یکی از مهم‌ترین ابزارهای کسب اطلاعات، توجه بسیاری از کارشناسان و متخصصان علوم مختلف را به‌خود جلب کرده است؛ از جمله این علوم می‌توان به زمین‌شناسی، معدن، محیط‌زیست، هواشناسی و کشاورزی اشاره کرد. کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در بررسی و ارزیابی

* E- mail: belvasi1@yahoo.com

منابع زمینی و بهره‌برداری بهینه از آنها بسیار مؤثر است (گوون و همکاران، ۲۰۰۷: ۵۹۰). دستیابی به داده‌های فراطیفی یکی از تحولات مهم و اساسی در فناوری سنجنش از دور است که طی سال‌های اخیر از جنبه‌های مختلف سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، پیشرفت شایان توجهی داشته است (ناگندرا و روکینی، ۲۰۰۸: ۳۴۰).

علم سنجنش از دور با بهره‌گیری از رفتارهای طیفی منحصربه‌فرد کانی‌ها روشی جدید در اکتشاف معدن و زمین‌شناسی است که امروزه از آن استفاده می‌شود (کورز و همکاران، ۲۰۰۳: ۴۱). از ویژگی‌های عمده و مهمی که سبب به‌کارگیری فناوری سنجنش از دور در اکتشاف مواد معدنی شده، این است که با کمک آن می‌توان کانی‌ها و عناصر ویژه‌ای را شناسایی کرد که با مواد معدنی مخصوصی همراهاند و این امر کمک بزرگی در اکتشاف کانی‌هاست (وین‌سنت، ۱۹۹۷: ۱۲۱). پیشرفت سنجنش از دور و پیدایش سنجنش از دور فراطیفی، امکان دریافت تصاویر دارای قابلیت و توانایی طیفی بسیار زیاد و دسترسی به اطلاعات وسیع‌تر و دقیق‌تر را در این زمینه فراهم ساخته است. در سنجنش از دور فراطیفی، اندازه‌گیری بازتابش پدیده‌های سطح زمین در باندهای بسیار باریک با پهنای طیفی ۰/۱ میکرومتر در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۲/۵ میکرون امکان‌پذیر است. وجود باندهای طیفی باریک و فراوان تصاویر فراطیفی، امکان پژوهش‌های زمین‌شناختی و شناسایی کانی‌های منطقه را با نتایج بهتری فراهم می‌سازد (کورز و همکاران، ۲۰۰۳: ۴۱). سنجنده‌های جدید مانند هایپریون، قابلیت‌های جدیدی را در مدیریت و تهیه نقشه‌های خصوصیات بیوفیزیکی و بیوشیمی فراهم ساخته است (آمر و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۲۱). نقشه‌های موجود پراکندگی کانی‌ها به‌طور معمول به روش‌های سنتی تهیه شده است؛ در این پژوهش، سعی بر این است که از قابلیت‌های فناوری سنجنش از دور در تهیه این نقشه‌ها بهره گرفته شود.

برای این منظور، شریفی (۱۳۸۷) از تصاویر AVIRIS و اعمال الگوریتم‌های ^۱SVM, ^۲MF, ^۳NN, ^۴BE, ^۵SAM, ^۶SFF, ^۷MLE برای تهیه نقشه کانی‌شناسی منطقه کوپریت استفاده کرد. اعضای مرجع به‌کاررفته در این تحقیق از کتابخانه‌های طیفی USGS, JPL, JHU و اعضای مرجع حاصل از اعمال الگوریتم‌های ^۸VCA, ^۹PPI بود. نتایج این تحقیق نشان داد که اعضای کتابخانه ملی USGS دارای بهترین و کامل‌ترین امضای طیفی است. نقشه‌های حاصل از روش SAM دارای صحت ۹۷ درصد بود. همچنین، الگوریتم MLE، بهترین طبقه‌بندی‌کننده شناخته شد. اکبری و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی الگوریتم‌های مختلف آشکارسازی طیفی بام‌های دارای پوشش خاص روی تصاویر فراطیفی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که روش‌های ^{۱۰}SCS و SAM در بین اندازه‌گیری‌های قطعی و روش‌های

1. Support Vector Machines
2. Matched Filtering
3. Neural Network
4. Bayesian Simple Classification
5. Spectral angular mapper
6. Spectral feature fitting
7. Maximum Likelihood Estimation
8. Vertex Component Analysis
9. Pixel Purity index
10. Spectral Correlation Similarity

CMFM^۱ و CEM در میان اندازه‌گیری احتمالی دارای بهترین دقت است. ارغوانیان و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از الگوریتم‌های SAM و LSU^۲ به شناسایی نواحی دارای طلا در منطقه مشکین‌شهر واقع در شمال غرب ایران با استفاده از تصاویر هایپریون پرداختند. بهرام‌بیگی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از روش‌های SAM و PCA به استخراج سنگ‌های کائولینی با تصاویر ابرطیفی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که روش SAM با دقت بهتری این تفکیک را انجام می‌دهد.

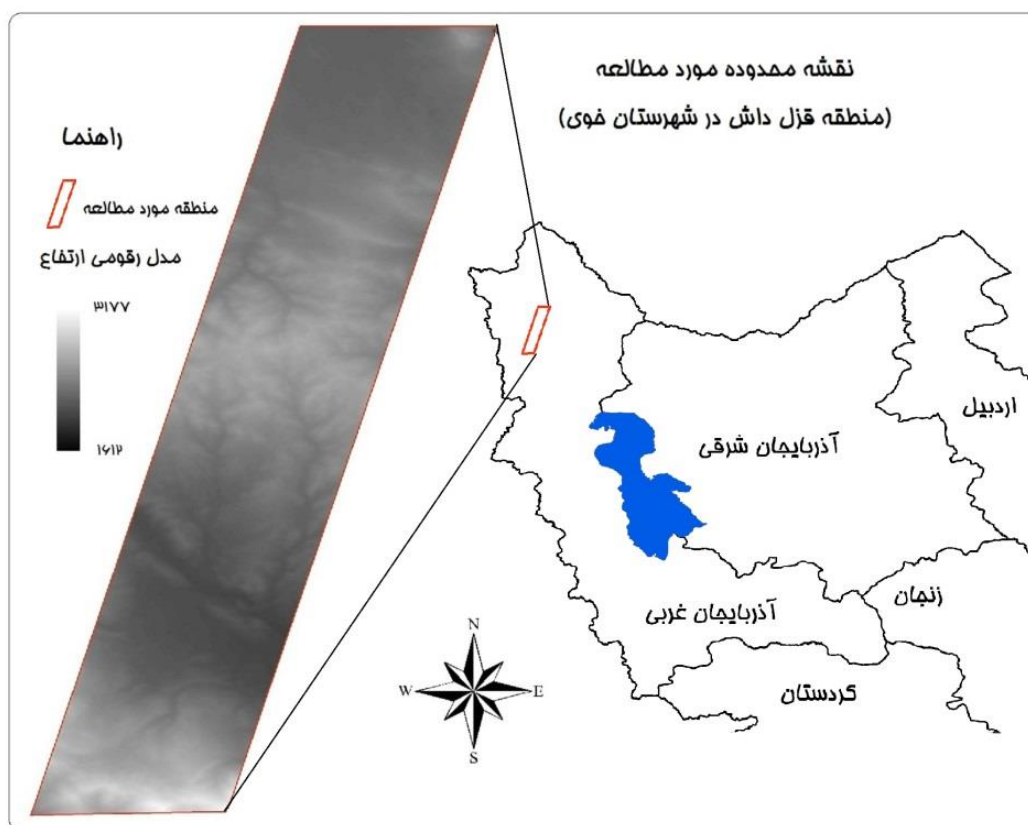
لی و همکاران (۲۰۱۴) به منظور شناسایی منابع معدنی مبتنی بر پردازش داده مینا، در منطقه‌ای در غرب چین تصاویر ASTER را با استفاده از الگوریتم SAM به کار گرفتند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های مبتنی بر داده‌های ASTER ایزاری قدرتمند برای استفاده در منابع معدنی کوچک است. آمر و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از تصاویر سنجنده ASTER و تصاویر راداری سنجنده PALSAR، منطقه‌ای در صحرای مرکزی مصر را بررسی و از روش‌های SAM و SID^۳ برای طبقه‌بندی زون‌های دگرسانی مرتبط با طلا استفاده کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که این روش‌ها قابلیت‌های مناسبی برای طبقه‌بندی زون‌های دگرسانی دارد. بیرانوندپور و همکاران (۲۰۱۱) برای آشکارسازی نهشته‌های مس پروفیری با استفاده از تصاویر ماهواره EO-1 از نسبت‌گیری و روش‌های پردازشی استفاده کردند. نتایج این تحقیق از دقت زیاد آشکارسازی زون‌های دگرسانی با تصاویر استفاده‌شده حکایت دارد. برنارد و همکاران (۲۰۰۵) از تصاویر هایپریون و ترکیبی از تصاویر ASTER و ALI برای تهیه نقشه کانی‌شناسی منطقه شیلی-بولیوی استفاده کردند؛ ابتدا برای شناسایی اعضای مرجع، الگوریتم‌های PCA^۴، MNF^۵، PPI و LSU را روی تصاویر اعمال کردند. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها بر روی داده‌ها مشخص ساخت که در وهله نخست، الگوریتم SAM در جداسازی کانی‌ها و به‌خصوص هماتیت و آلونیت، بهتر از الگوریتم LSU عمل می‌کند. و دوم اینکه کارایی داده‌های هایپریون با داشتن نسبت سیگنال به نویز کم و قابلیت تفکیک طیفی زیاد، در مقایسه با داده‌های ASTER و ALI با نسبت سیگنال به نویز زیاد و قابلیت تفکیک طیفی کم، برای نقشه‌کشی کانی‌ها اندکی بهتر است. چانگ و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهشی از الگوریتم‌های SAM و SID و همچنین ترکیب آنها، از تصاویر AVIRIS برای آشکارسازی طیفی استفاده کردند. فری و همکاران (۲۰۰۷) روش‌های طبقه‌بندی بر اساس پیکسل شامل روش اندازه‌گیری زاویه طیفی و بیشترین شباهت و همچنین روش تجزیه طیفی، به طبقه‌بندی تصویر AVIRIS مربوط به یک منطقه کشاورزی پرداختند.

در این پژوهش، تصاویر هایپریون با در نظر گرفتن نتایج کار محققان پیشین، روش‌های نشان‌دهنده زاویه طیفی و واگرایی اطلاعات طیفی، برای شناسایی مناطق دارای مس در منطقه قزل‌داش شهرستان خوی به کار رفته است.

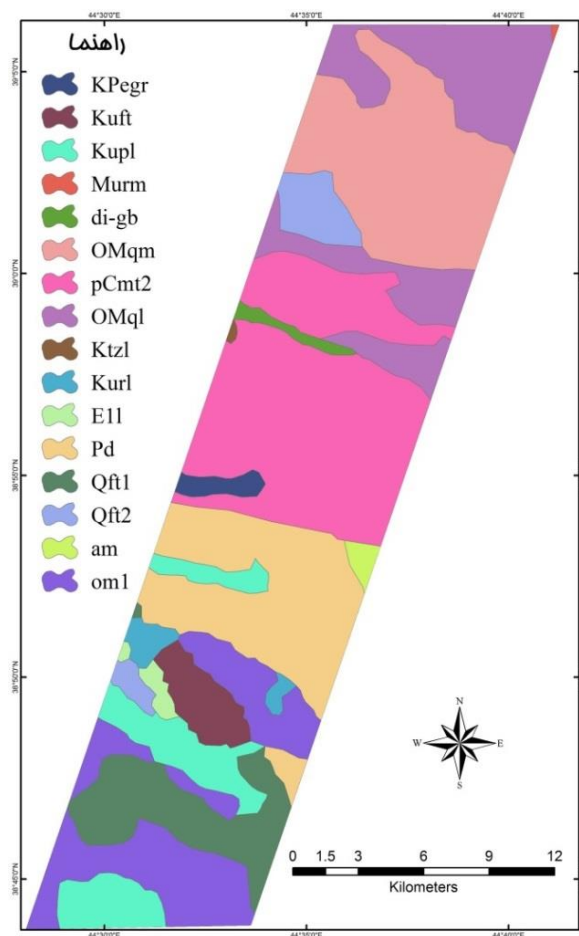
1. Covariance-based Matched Filter Distance
2. Linear Spectral Unmixing
3. Spectral Information Divergence
4. Principal component analyst
5. Minimum/maximum noise fraction

منطقه پژوهش

منطقه قزل‌داش با طول جغرافیایی $41^{\circ} 44' - 41^{\circ} 28' 44''$ و عرض جغرافیایی $39^{\circ} 06' - 38^{\circ} 43' 38''$ در ۶۸ کیلومتری شمال غربی شهر خوی در استان آذربایجان غربی قرار دارد (شکل ۱). عمده‌ترین تشکیلات منطقه توده‌های سنگی سکانس افیولیتی شامل سنگ‌های الترامافیک (دونیت و هارزبورگیت)، بازالت‌های بالشی، دایک‌های دیبازی، توده‌های نفوذی گابرویی دیوریتی و میکروگابرویی همراه با آهک‌های پلاژیک و چرت رادیولاریت‌های کرتاسه فوقانی است که در مجموع پوسته اقیانوسی نئوتتیس را در کرتاسه پسین تشکیل می‌دهد. عملکرد نیروهای ناشی از نزدیک شدن بلوک‌های ایران و عربستان، موجب بسته شدن اقیانوس نئوتتیس، چین‌خوردگی دگرگونی و دگرگونی نهشته‌های رسوبی - آتشفشانی حوضه اقیانوسی و روراندگی قطعاتی از آن بر روی پوسته قاره‌ای مجاور شده است. عملکرد بعدی گسل‌های راندگی موجب بال‌آمدن و ظهور مجموعه‌های افیولیتی و توده‌های مسی و سولفاید همراه در سطح زمین شده است (بشارتی، ۱۳۹۰: ۴۶).



شکل ۱. موقعیت منطقه پژوهش



شکل ۲. نقشه لیتولوژی منطقه پژوهش

شرح علایم نقشه لیتولوژی: KPegr: گرانیت؛ Kuft: فلیش توریدیتی؛ Kupl: آهک پلاژیک گلوبوترونکانادار؛ Murm: مارن و مارن ژپس‌دار با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ؛ di-gb: گابرو-دیوریت، دیوریت و ترانجمیت؛ OMqm: مارن با میان‌لایه‌های سنگ‌آهک؛ OMql: سنگ‌آهک ریفی توده‌ای تا ضخیم‌لایه؛ pCmt2: سنگ‌های با درجه کم دگرگونی؛ Ktzt: سنگ‌آهک اربیتولین‌دار ضخیم‌لایه تا توده‌ای؛ Kurl: آهک پلاژیک تفکیک‌نشده و چرت رادیولاری؛ E11: آهک پلاژیک و بیومتریکی جلبکی و متریکی؛ Pd: پریدوتیت شامل هارزبورژیت، دونیت، لرزولیت و وبستریت؛ Qft1: ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی مرتفع؛ Qft2: ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم‌ارتفاع؛ am: آمفیبولیت؛ om1: تجمع تکتونیزه از پریدوتیت، گابرو، دیوریت، دیاباز و گدازه‌بازالتی.

مواد و روش‌ها

داده‌های استفاده‌شده

تصویر ماهواره‌ای EO-1 سنجنده هایپریون

تصویر ماهواره‌ای استفاده‌شده در این تحقیق، مربوط به سنجنده هایپریون ماهواره EO-1 در تاریخ ۲۱ ژانویه ۲۰۱۰ با

۲۴۲ باند طیفی است که از کل باندهای تصویر، تعداد ۸۱ باند طیفی در طول پردازش سطح B1 به مقدار صفر تنظیم شد و ۱۹ باند طیفی نیز به دلیل وجود نویز زیاد و نواری شدن شدید حذف و در نهایت، ۱۴۲ باند به منظور پردازش انتخاب شد. اندازه پیکسل تصویر این ماهواره ۳۰ متر است و محدوده‌ای با عرض ۶/۶ کیلومتر و طول ۱۸۵ کیلومتر در جهت عمود بر حرکت ماهواره را پوشش می‌دهد.

تصویر ماهواره‌ای لندست

تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ سنجنده ETM+ به صورت اورتو به منظور تصحیح هندسی تصاویر هایپریون تصویر باند ۸ سنجنده ETM+ گرفته شده در روز ۱۶ January ۲۰۱۰ استفاده شده که دارای اندازه پیکسل ۱۵ متر است و منطقه‌ای به عرض ۱۸۵ کیلومتر را تصویربرداری می‌کند.

پیش پردازش داده‌های ماهواره‌ای

عملیات پیش پردازش لازم برای آماده سازی داده‌ها شامل دو مرحله کلی تصحیح رادیومتریک و تصحیح هندسی است. یکی از تصحیح‌های لازم برای داده‌های هایپریون، تصحیح اثر انحنای طیفی در تصویر است که بر اثر فناوری تصویربرداری پوش بروم^۱ به وجود آمده، در تمام داده‌های هایپریون وجود دارد (سیدین و همکاران، ۱۳۹۳: ۶۵). در این نوع سنجنده‌ها، با تغییر موقعیت در جهت عمود بر مسیر پرواز، طول موج مرکزی یک باند در قالب الگوی نموداری نرمی تغییر می‌کند (اکتاروزمن، ۲۰۰۸: ۸۶). این اثر در ناحیه مادون قرمز نزدیک- مرئی، تغییرات شدیدتری به لحاظ طیفی نسبت به ناحیه مادون قرمز کوتاه ایجاد می‌کند. برای باندهای مادون قرمز نزدیک- مرئی، این جابه‌جایی بین ۲/۶ تا ۳/۵ نانومتر و برای باندهای مادون قرمز کوتاه، کمتر از ۱ نانومتر است که به همین دلیل، در بسیاری از تحقیقات، تنها به تصحیح اثر انحنای طیفی در محدوده مادون قرمز نزدیک- مرئی اکتفا می‌شود. تصحیح این خطا به روش تعدیل میانگین ستون در فضای رادیانس در نرم افزار ENVI انجام گرفت. در این روش، برای هر باند منفرد داده‌های هایپریون، مقدار میانگین هر ستون برابر با مقدار میانگین باند گذاشته می‌شود (گودنوق و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۳۲۱). نوارهای عمودی^۲ از دیگر خطاهای موجود در تصاویر هایپریون است که برطرف کردن آنها با استفاده از نرم افزار ENVI انجام گرفت.

داده‌های تصویر که به صورت عدد رقومی^۳ بود، ابتدا به رادیانس و سپس به بازتابندگی^۴ تبدیل شد. مقادیر رقومی محصولات سطح ۱ هایپریون، رادیانس‌های ۱۶ بیتی بود. باندهای VNIR^۵ دارای ضریب مقیاس ۴۰ است و باندهای SWIR^۶ ضریب مقیاس ۸۰ دارد (در واحد $\mu\text{m}^2/\text{Wm}^2\text{Sr}^1$)؛ بنابراین مطابق رابطه^۱، مقادیر رادیانس برای باندهای این تصویر تصحیح شد:

1. Push broom
2. Vertical strip correction
3. Digital Number
4. Reflectance
5. Visible-near infrared
6. Short wave infrared

$$VNIRL = Digital\ Number / ۴۰$$

$$SWIRL = Digital\ Number / ۸۰$$

رابطه ۱

تصحیح اتمسفری سبب تبدیل مقادیر رادیانس به مقادیر انعکاس در پیکسل می‌شود. اطلاعات انعکاس در مقایسه با رادیانس مطلوبیت بیشتری دارد؛ چراکه اطلاعات انعکاسی در همه‌جای دنیا به‌طور نسبی مشابه است و به خصوصیات هر ماده بستگی دارد؛ در حالی که اطلاعات رادیانس متفاوت بوده، از طریق شاخص‌های گوناگون اتمسفر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تصحیح جوی تصویر هایپریون و تبدیل رادیانس به بازتابندگی، به کمک الگوی تصحیح اتمسفری FLAASH^۱ در نرم‌افزار ENVI انجام گرفت.

پس از تصحیح رادیومتریک، تصحیح هندسی نیز روی تصاویر انجام گرفت. برای تصحیح هندسی تصاویر از نقاط کنترل زمینی همچون تقاطع جاده‌ها و راه‌ها که در هر دو تصویر ماهواره‌ای هایپریون و لندست به‌طور واضح نمایان بود استفاده شد، پس از انجام این دو مرحله تصاویر برای انجام دادن روش‌های تحقیق آماده شدند.

روش‌های استفاده‌شده

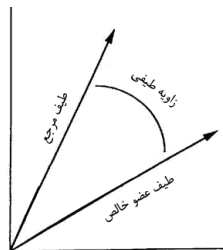
نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)^۲

نقشه‌بردار زاویه طیفی روش خودکار جبری‌ای است که شباهت طیف را میان طیف هر پیکسل و طیف مرجع محاسبه می‌کند. شباهت میان این دو طیف، زاویه میانگین آن دو محسوب می‌شود. در این روش، هر طیف متناظر با برداری در فضایی با ابعاد مساوی با تعداد باندها در نظر گرفته می‌شود. این روش به روشنایی پیکسل حساس نیست (شکل ۳). الگوریتم نشان‌دهنده زاویه طیفی، شباهت میان یک طیف عضو خالص t و یک طیف مرجع r برای n باند را از آرک کسینوس^۳ ضرب نقطه‌ای دو طیف، به‌صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$A = \sum_{i=1}^n t_i / \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 \sum_{i=1}^n r_i^2}$$

رابطه ۲

بنابراین، خروجی آن برای هر پیکسل، فاصله زاویه‌ای بین دو طیف است که با واحد رادیان بیان می‌شود و از 0 تا $\frac{\pi}{2}$ تغییر می‌کند؛ از این‌رو طیفی که کمترین زاویه را با عضو خالص داشته باشد، شبیه‌ترین طیف خواهد بود (پری و روبرت، ۲۰۰۰: ۲۳۴).



شکل ۳. زاویه بین بردار طیف عضو خالص و بردار طیف مرجع

1. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
2. Spectral angular mapper
3. Arc Cos

این شیوه اندازه شباهت طیف هر پیکسل را بدون تجزیه، با طیف عضوهای خالص شناسایی شده از تصویر می‌سجد و خروجی آن، تصاویر چندلایه‌ای است که rule نامیده می‌شود. این تصاویر بهترین هماهنگی را میان طیف عضو خالص و طیف مرجع در هر پیکسل نشان می‌دهد. پیکسل‌های تیره‌تر در تصاویر rule، زاویه کوچک‌تر را نشان می‌دهد؛ به این معنا که طیف آن پیکسل‌ها شباهت بیشتری به عضوهای طیفی دارد و بالعکس. بنابراین، در این روش طبقه‌بندی، پیکسل‌های کاملاً تیره منطبق با عضوهای خالص تصویر است (میر و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۹۶).

واگرایی اطلاعات طیفی (SID)

واگرایی اطلاعات طیفی روشی احتمالاتی است که تشابه طیفی بین دو بردار پیکسل را بر اساس اختلاف توزیع احتمال به‌دست‌آمده از امضای طیفی آنها اندازه‌گیری می‌کند. در واگرایی کوچک‌تر، احتمال مشابه بودن پیکسل‌ها بیشتر است. پیکسل‌های با اندازه‌گیری بیشتر از آستانه پیشینه اختلاف مشخص طبقه‌بندی شده نیست. بر این اساس، داریم (چانگ، ۲۰۰۳: ۲۱۷):

$$A = \sum_{l=1}^L p_l \log \left(\frac{p_l}{q_l} \right) + \sum_{l=1}^L q_l \log \left(\frac{p_l}{q_l} \right)$$

$$p_l = \frac{S_{il}}{\sum_{k=1}^L S_{ik}}$$

$$q_l = \frac{S_{jl}}{\sum_{k=1}^L S_{jk}}$$

رابطه ۳

در این رابطه، p_l و q_l به ترتیب احتمال مؤلفه طیفی، S_{il} و S_{jl} مربوط به دو بردار پیکسل r_i و r_j و L بعد بردار است. در این روش، برای داشتن تصویری در بازه صفر تا یک، لازم است مقدار به‌دست‌آمده را نرمال کرد.

طیف‌های مرجع کتابخانه‌ای

یکی از راه‌های تعیین عضوها، استخراج آنها از کتابخانه‌های طیفی است و نمونه آن کتابخانه‌ای است که اغلب برای کاربردهای زمین‌شناسی به کار برده می‌شود. این کتابخانه شامل طیف عضوهایی است که در آزمایشگاه یا با عملیات میدانی به‌دست آمده است. استفاده از کتابخانه طیفی برای تجزیه و تحلیل‌های طیفی در مناطق معدنی بسیار مناسب است. البته اگر انجام دادن تحقیقات میدانی در لحظه تصویربرداری مقدور نباشد، باید کتابخانه طیفی بسیار بزرگی در اختیار داشت. مسئله بسیار مهم‌تر این است که تصویر و کتابخانه‌های طیفی باید با هم واسنجی شوند تا اثرهای ناشی از جابه‌جایی‌های احتمالی سنجنده، اثرهای جوی و مقدار روشنایی به حد کافی تعدیل شود. پس از اینکه ضرایب تصحیح تعیین شد، به‌طور معمول تصویر به گونه‌ای تبدیل می‌شود که با کتابخانه طیفی هماهنگ باشد. همچنین، عضوهای طیفی مرجع در کتابخانه، قابلیت تبدیل به عضوهای تصویر را دارد. در سال‌های اخیر، کتابخانه‌های طیفی در درجه اول

برای شناسایی ترکیبات موجود در تصویر استفاده می‌شود (لوسیانو، ۱۹۹۸: ۱۳۳)؛ البته نیازی نیست که الزاماً ماده خالص متناسب با عضوهای انتخابی در تصویر موجود باشد و تنها کافی است که طیف انتخاب‌شده مربوط به یک ماده مشخص و شناخته‌شده در منطقه بررسی شده باشد تا بتوان آن را به راحتی شناسایی کرد. در این پژوهش از داده‌های موجود در کتابخانه طیفی USGS استفاده شده است.

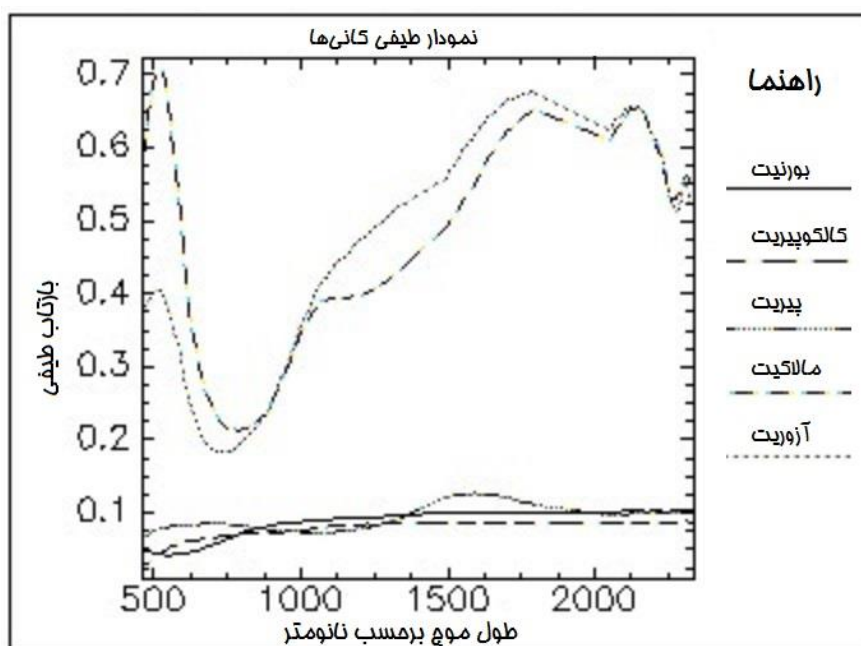
یافته‌های پژوهش

در این تحقیق، ابتدا کانی‌هایی مشخص شد که بررسی آنها در پژوهش‌های پیشین سازمان زمین‌شناسی کشور برای تهیه بانک اطلاعاتی داده‌های ژئوشیمیایی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خوی و سازمان صنایع و معادن آذربایجان غربی برای طرح اکتشاف نیمه‌تفصیلی مس در منطقه قزل‌داش خوی انجام گرفته بود؛ این منطقه ذخیره کانی‌شناسی ساده‌ای داشته، به‌طور عمده از کانی‌های کالکوپیریت^۱، پیریت^۲ (گزارش طرح اکتشاف نیمه‌تفصیلی مس در منطقه قزل‌داش خوی) و کانی‌های کالکوپیریت، پیریت، بورنیت^۳ و کانی‌های ثانویه مانند مالاکیت^۴ و آزوریت^۵ (سازمان زمین‌شناسی کشور) تشکیل شده است. سپس برای تطبیق طیف ناشناس از کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۶ استفاده شد. با توجه به اینکه طیف کانی‌های موجود در کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا به‌صورت پیوسته است، این داده‌ها را به‌صورت خام نمی‌توان برای مقایسه با طیف حاصل از تصاویر منطقه استفاده کرد؛ زیرا طیف حاصل از تصاویر منطقه به‌صورت گسسته است؛ به‌عبارت دیگر، با توجه به اینکه تعداد باندهای سنجنده و تصویر محدود بوده، در موقعیت‌های مشخصی از طیف الکترومغناطیس با پهنای مشخص قرار دارد، باید از کتابخانه طیفی نیز یک طیف مشاهده‌شده را با سنجنده بازتولید کرد که به این فرایند نمونه‌برداری مجدد^۷ می‌گویند. برای ۵ کانی یادشده امضای طیفی برای داده‌های ابرطیفی هایپریون با ۱۴۲ باند طیفی نمونه‌برداری مجدد استفاده شد (شکل ۴). در این تحقیق، نمونه‌برداری مجدد با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه‌ها از داده‌های پیوسته کتابخانه طیفی مرجع انجام گرفت؛ زیرا در این روش، درجه روشنایی پیکسل‌های محاسبه‌شده تغییر کمتری نسبت به دیگر روش‌ها می‌کند (علوی‌پناه، ۱۳۹۲: ۱۴۱). مزیت این روش آن است داده‌های اصلی کمتر از بین می‌روند.

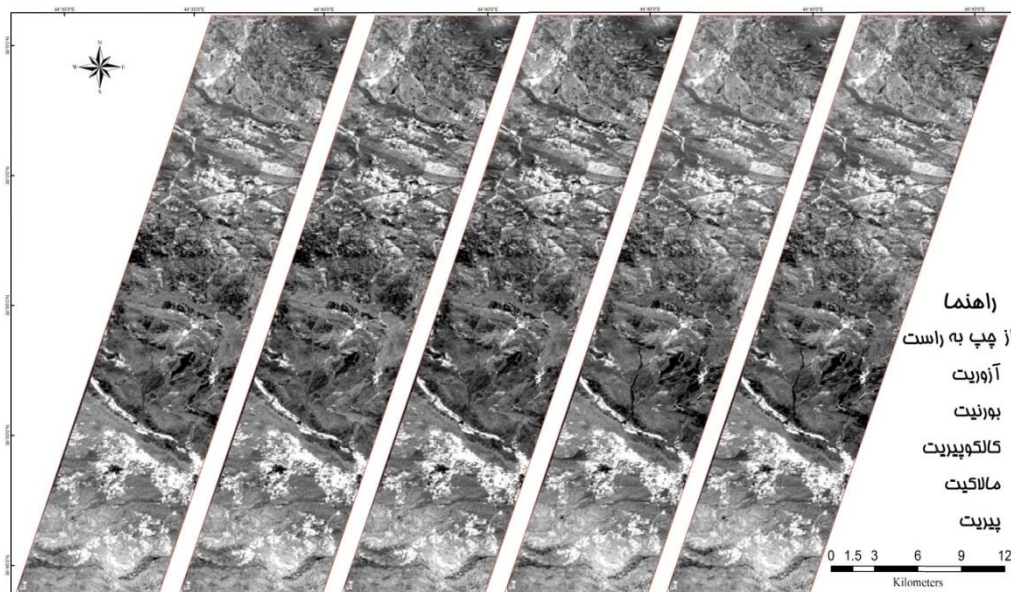
پس از اجرای الگوریتم SAM و SID، با استفاده از امضای طیفی کتابخانه طیفی USGS و طیف‌های تصاویر هایپریون با هدف آشکارسازی کانی‌ها، تصاویر چندلایه‌ای rule استخراج شد؛ این تصاویر بهترین هماهنگی را میان طیف عضو خالص و طیف مرجع در هر پیکسل نشان می‌دهد. پیکسل‌های تیره‌تر در تصاویر rule، زاویه کوچک‌تر را نشان می‌دهد؛ به این معنا که طیف آن پیکسل‌ها شباهت بیشتری به عضوهای طیفی دارد و بالعکس. بنابراین، در این

1. Chalcopyrite
2. Pyrite
3. Bornite
4. Malachite
5. Azurite
6. USGS: United States Geological Survey
7. Resampling

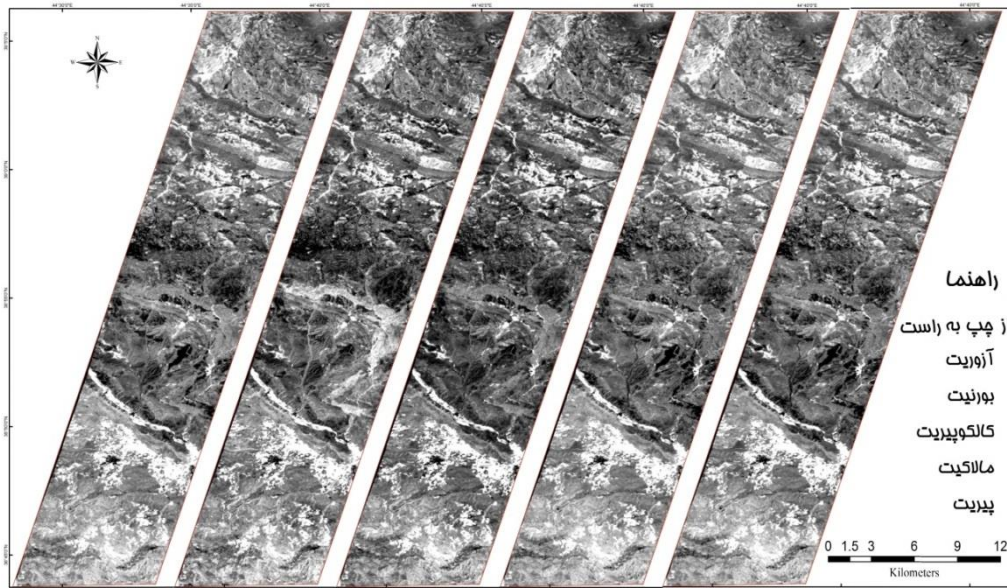
روش طبقه‌بندی، پیکسل‌های کاملاً تیره منطبق با عضوهای خالص تصویر است (شکل ۵ و ۶). در ادامه، نقشه طبقه‌بندی تمام کانی‌های منطقه تهیه شد (شکل ۷). در این تصویر، هر پیکسل فقط به یک کانی اختصاص یافته است؛ آنکه فراوانی بیشتری نسبت به بقیه در داخل پیکسل دارد. نتایج این دو نقشه نشان می‌دهد که در هر دو روش کانی‌های کالکوپیریت، پیریت، بورنیت به ترتیب بیشترین مقدار را دارد؛ ولی مقدار آنها در دو الگوریتم با هم متفاوت است. کانی‌های ثانویه مانند مالاکیت و آزوریت در این نقشه‌ها به صورت بسیار جزئی قابل مشاهده است.



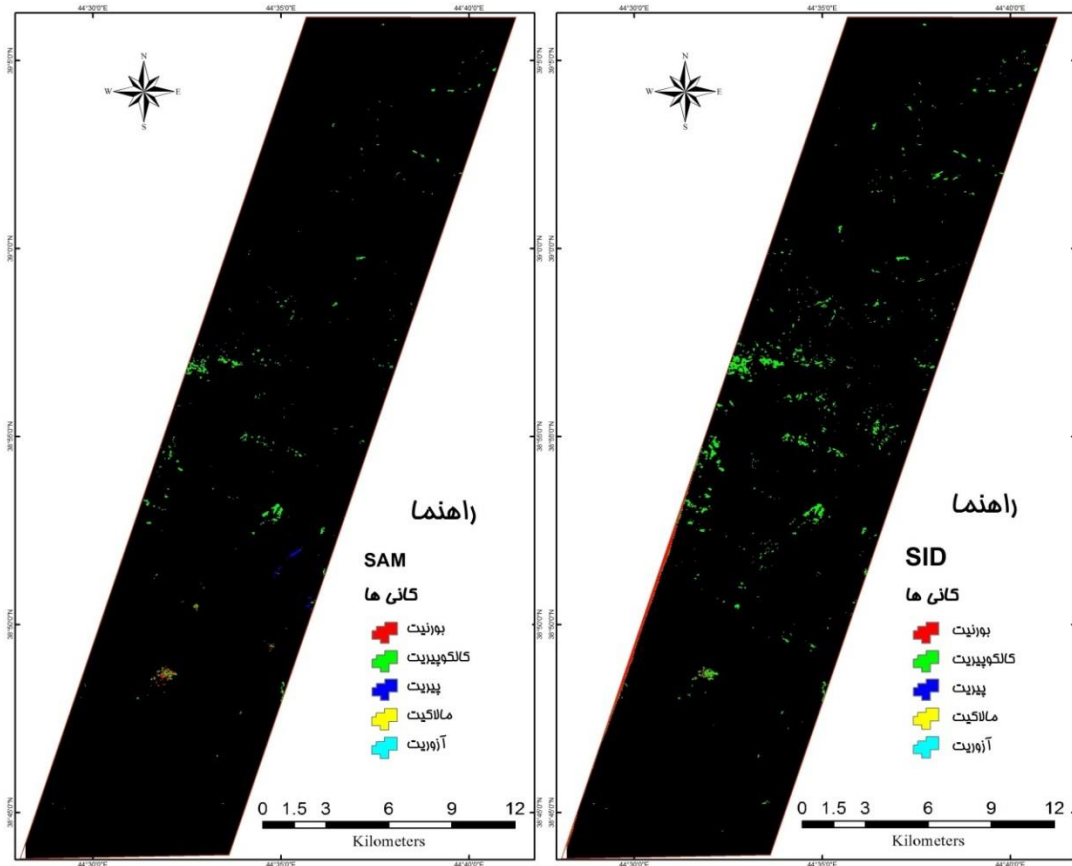
شکل ۴. امضای طیفی کانی‌ها موجود در کتابخانه طیفی USGS



شکل ۵. تصاویر rule به ترتیب از چپ به راست کانی‌های آزوریت، بورنیت، کالکوپیریت، مالاکیت، پیریت در روش SAM



شکل ۶. تصاویر rule به ترتیب از چپ به راست کانی‌های آزوریت، بورنیت، کالکوپیریت، مالاکیت، پیریت در روش SID



شکل ۷. نقشه حاصل از الگوریتم SAM و SID

ارزیابی نتایج طبقه‌بندی^۱

راه‌های مختلفی برای بررسی ارزیابی نتایج طبقه‌بندی وجود دارد. متداول‌ترین روش برای ارزیابی کمی صحت طبقه‌بندی، انتخاب تعدادی پیکسل نمونه معلوم و مقایسه کلاس آنها با نتایج طبقه‌بندی است که این داده‌های معلوم را واقعیت زمینی^۲ یا داده‌های مرجع^۳ می‌نامند (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۱: ۲۳۳). در این پژوهش، نتایج ارزیابی به صورت صحت کلی^۴ و ضریب کاپا^۵ عرضه شده است؛ برای این منظور ابتدا تعداد ۲۹۷ پیکسل به عنوان نمونه از روش نمونه‌گیری ساده انتخاب و سپس ماتریس خطا^۶ تشکیل شد. در ماتریس خطا، داده‌های زمینی به صورت ستون‌ها و داده‌های مربوط به نتایج طبقه‌بندی به صورت سطرها نشان داده می‌شود (جدول ۱ و ۲). صحت کلی عبارت است از نسبت پیکسل‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند به کل پیکسل‌های معلوم و بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود (ویلا و همکاران ۲۰۱۱: ۴۸۶۹)؛ در این رابطه، E_{ii} اعضای قطری ماتریس و N تعداد کل پیکسل‌های معلوم است.

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^c E_{ii}}{N} \quad \text{رابطه ۴}$$

ضریب کاپا یکی دیگر از شاخص‌های آماری است که از ماتریس خطا به دست می‌آید. ضریب کاپا صحت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند و از طریق رابطه ۵ به دست می‌آید (هونگ‌مین و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۰)؛ در این رابطه، N تعداد کل واقعیت زمینی، X_{i+} مجموع عناصر سطر i ام، X_{+i} مجموع عناصر ستون i ام و k تعداد سطر یا ستون‌های ماتریس خطاست.

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})} \quad \text{رابطه ۵}$$

جدول ۱. ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا برای نتایج الگوریتم SAM

| کلی | کالکوپیریت | پیریت | بورنیت | مالاکیت | آزوریت | جمع کل |
|------------|------------|-------|--------|---------|--------|--------|
| کالکوپیریت | ۹۱ | ۲ | ۱ | ۴ | ۳ | ۱۰۱ |
| پیریت | ۵ | ۶۴ | ۰ | ۱ | ۳ | ۷۳ |
| بورنیت | ۴ | ۲ | ۵۸ | ۲ | ۱ | ۶۷ |
| مالاکیت | ۰ | ۳ | ۴ | ۲۳ | ۰ | ۳۰ |
| آزوریت | ۲ | ۰ | ۲ | ۴ | ۱۸ | ۲۶ |
| جمع کل | ۱۰۲ | ۷۱ | ۶۵ | ۳۴ | ۲۵ | ۲۹۷ |

صحت کلی = ۸۵ درصد؛ ضریب کاپا = ۸۰ درصد

1. Accuracy Assessment
2. Ground Truth
3. Reference Data
4. Overall Accuracy
5. Kappa Coefficient
6. Error Matrix

جدول ۲. ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا برای نتایج الگوریتم SID

| کالیبریت | کالیبریت | پیریت | بورنیت | مالاکیت | آزوریت | جمع کل |
|----------|----------|-------|--------|---------|--------|--------|
| کالیبریت | ۷۶ | ۷ | ۵ | ۳ | ۲ | ۹۳ |
| پیریت | ۸ | ۶۵ | ۳ | ۴ | ۰ | ۸۰ |
| بورنیت | ۳ | ۰ | ۴۹ | ۵ | ۴ | ۶۱ |
| مالاکیت | ۶ | ۵ | ۷ | ۲۱ | ۱ | ۴۰ |
| آزوریت | ۳ | ۴ | ۱ | ۰ | ۱۵ | ۲۳ |
| جمع کل | ۹۶ | ۸۱ | ۶۵ | ۳۳ | ۲۲ | ۲۹۷ |

صحت کلی = ۷۶ درصد؛ ضریب کاپا = ۶۸ درصد

نتایج بررسی صحت نشان داد که نقشه‌های حاصل از روش SAM دارای صحت کلی ۸۵ درصد و ضریب کاپای ۸۰ درصد (جدول ۱) و نقشه‌های حاصل از روش SID دارای صحت کلی ۷۶ درصد و ضریب کاپای ۶۸ درصد (جدول ۲) است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه فرایند اکتشاف معادن، به نسبت پیچیده و هزینه‌بر است، به سادگی می‌توان به اهمیت استفاده از فناوری‌ها و علوم روز در تسهیل و کاهش هزینه‌های اکتشافی پی برد. بهره‌گیری از سنجش از دور و استفاده از تصاویر فرایطیفی، با توجه به تعداد باندهای زیاد و قدرت تفکیک طیفی زیاد، قابلیت‌های بسیاری را در آشکارسازی اهداف فراهم کرده است. در این تحقیق، الگوریتم‌های SAM و SID برای شناسایی کانی‌های مس ارزیابی قرار شد. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تشخیص هدف که نتیجه نهایی ارزیابی الگوریتم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، انتخاب مقدار حد آستانه است که در این پژوهش، از طریق آزمون و خطا مشخص شد.

ارزیابی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقایسه مکان‌های دارای مس که نقشه آنها با استفاده از الگوریتم‌های SAM و SID حاصل شد، با نقشه‌هایی که پیش‌تر سازمان صنایع و معادن استان آذربایجان غربی و سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه کرده بودند، بیان‌کننده این واقعیت است که الگوریتم SAM با صحت کلی ۸۵ درصد و ضریب کاپای ۸۰ درصد نسبت به الگوریتم SID با صحت کلی ۷۶ درصد و ضریب کاپای ۶۸ درصد، دارای صحت بیشتری است (جدول ۱ و ۲) و نقشه‌های حاصل از روش SID، مناطق کانی‌دار زیادی را نشان می‌دهد که چه بسا نوعی اغراق تلقی شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم SAM با در نظر گرفتن شرایط منطقه، روشی کارآمد در طبقه‌بندی منطقه بر اساس کانی‌های موجود، در تحقیقات اکتشاف معادن فلزی است که این نتایج با نتایجی مطابقت دارد که آمر و همکاران (۲۰۱۲) از روش‌های SAM و SID برای طبقه‌بندی زون‌های دگرسانی مرتبط با طلا استفاده کرده بودند. با توجه به اینکه هر پدیده‌ای طول موج انعکاسی خاصی دارد، با بررسی این طول موج‌ها می‌توان محدوده‌ای را شناسایی کرد که در آن پدیده مورد نظر بیشینه انعکاس یا کمینه انعکاس را دارد؛ به بیان دیگر، هر کانی منحنی انعکاس طیفی ویژه‌ای دارد

که با کانی‌های دیگر متفاوت است. قابلیت زیاد تصاویر فراطیفی در تفکیک‌پذیری پدیده‌ها نشان می‌دهد که شناسایی و جداسازی کانی‌ها با استفاده از این تصاویر، از سهولت و دقت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر از قبیل استفاده از تصاویر چندباندی برخوردار است.

منابع

- ارغوانیان، آ.، درویش‌زاده، ر.، رسا، ا. و حسینی‌اصل، ا. (۱۳۹۰). «استخراج نواحی دارای پتانسیل طلا در منطقه غرب مشکین شهر با استفاده از تصاویر HYPERION». *سنجش از دور و GIS ایران*. س ۳، ش ۱، بهار ۱۳۹۰.
- اکبری، د.، سعادت‌سرشت، م. و همایونی، س. (۱۳۸۸). «بررسی و پیاده‌سازی روش‌های مختلف آشکارسازی طیفی بام‌های دارای پوشش خاص روی تصاویر فراطیفی». *همایش ژئوماتیک ۸۸*. تهران.
- بشارتی، س.، ذاکری، ل. و فتاحی، ش. (۱۳۹۰). «بررسی مینرالیزاسیون و ژنز کانسار مس قزل‌داز خوی (استان آذربایجان غربی)». *مجموعه مقالات چهاردهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران*. دانشگاه بیرجند. ص ۴۶-۴۹.
- بهرام‌بیگی، ب.، رنجبر، ح. و شهاب‌پور، ج. (۱۳۹۱). «مقایسه روش‌های داده‌پایه و طیف‌پایه برای نقشه‌برداری از مناطق دارای کائولینیت در آتشفشان مساحیم با استفاده از داده‌های هایپریون». *مجله زمین‌شناسی اقتصادی*. ش ۲، ص ۱۹۹-۲۱۵.
- سیدین، س.، ولدان، م. و مقصودی، ی. (۱۳۹۳). «اکتشاف تراوشات هیدروکربوری با استفاده از روش‌های آشکارسازی هدف در تصاویر فراطیفی». *ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز*. ش ۱۱۱، ص ۶۳-۶۹.
- علوی‌پناه، س.ک. (۱۳۹۲). *کاربرد سنجش از دور در علوم زمین*. چ ۴. تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- فاطمی، س.ب. و رضایی، ی. (۱۳۹۱). *مبانی سنجش از دور*. چ ۳. تهران: انتشارات آزاده.
- کوثری، س. و پارسی، پ. (۱۳۷۳). «بانک اطلاعاتی داده‌های ژئوشیمیایی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خوی». سازمان زمین‌شناسی کشور.
- مهندسین مشاور کاوشگران (۱۳۷۵). «گزارش طرح اکتشاف نیمه‌تفصیلی مس در منطقه قزل‌داز خوی». سازمان صنایع و معادن آذربایجان غربی.
- شریفی، ا.ر. (۱۳۸۷). *طبقه‌بندی تصاویر ابرطیفی از طریق تجزیه و تحلیل امضای طیفی پدیده‌ها*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران.
- Akbari D., Saadat-Seresht, M. and Homayooni, S. (2009). "Investigate and implement methods of detection range with special coating on the roof of hyperspectral images". *Geomatics Conference*. 2009. Tehran. (In Persian).
- Aktaruzzaman, A. (2008). "Simulation and Correction of Spectral Smile Effect and its Influence on Hyperspectral Mapping". MS Thesis. International Institute for GeoInformation Science and Earth Observation. Enschede. Netherlands. pp. 86-102.
- Alavi-panah, S.K. (2012). *Application of Remote Senseing in the Earth Sciences (soil)*. 4th Edition. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- Amer, R, Kusky.T. and Mezayen, A.E (2012). "Remote sensing detection of gold related alteration zones in Um Rus area, Central Eastern Desert of Egypt". *Advances in Space Research* 49. pp. 121-134.
- Arghavanian A., Darvish-zadeh R., Rasa, I. and Hossaini-Asl, A. (2011). "Surveying the Potential Auriferous Areas in Western Region of MeshkinShahr, using Hyperion Images". *Iranian Remote Sensing & GIS*. Vol. 3. No. 1. pp. 91-106. (In Persian).
- Bahram-Beigi, B., Ranjbar, H.A. and Shahab-Pour, J. (2012). "Comparison of Spectral Base and Pixel Base Methods for Mapping the Kaolinite Areas in Mozahem Volcano with Use of Hyperion Images". *Journal of Economic Geology*. Vol. 4. No. 2. pp. 199-215. (In Persian).
- Beiranvand-Pour, A. and Hashim, M. (2011). "The Earth Observing-1 (EO-1) Satellite Data for Geological Mapping,

- Southeastern Segment of the Central Iranian Volcanic Belt". Iran. International Journal of the Physical Sciences. Vol. 6. No. 33. pp. 7638 -7650.
- Besharati, S., Zakeri, L. and Fattahi, Sh. (2010). "Rainbow Dash temper copper deposit mineralization and genesis review (West Azarbaijan province)". Proceedings of the Fourteenth Conference Crystallography and Mineralogy of Iran. University of Birjand. pp. 46–49. (In Persian).
- Chang, C.I. (2003). *Hyperspectral Imaging: Techniques for spectral Detection and Classification*, Orlando. FL: Kluwer Academic.
- Du, Y., Chang, C.I. and Ren, H. (2004). "New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization". Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- Emami, H. and Afary, A. (2007). "Subpixel Classification on the Hyperspectral Images for Accuracy Improvement of Classification Results". Dep. of Geodesy and Geomatic Eng. K.N.Toosi University of Technology. Tehran.Iran.
- Fatemi, S.B. and Rezaei.Y. (2010). *Principles of Remote Sensing*. Tehran: Azadeh publication. (In Persian).
- Goodenough, D.G., Dyk, A., Niemann, K.O., Pearlman, J.S., Chen, H., Han, T., Murdoch, M. and West, C. (2003). "Processing Hyperion and ALI for Forest Classification". Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions on. Vol. 41. pp. 1321-1331.
- Gowen, A.A., O'Donnell, C.P., Cullen, P.J., Downey and Frias, J.M. (2007). "Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control". Trends in Food Science & Technology. No 18. pp. 590-598.
- Jupp, D.L.B., Datt, B., Lovell, J., Campbell, S., King, E.A., et al. (2002). *Discussions around Hyperion Data: Background Notes for the Hyperion Data Users Workshop*. CSIRO Earth Observation Centre. Canberra.
- Kavoshgaran Consulting Engineers (1996). "Report Semidetailed copper exploration project in the khoy city areas Ghezal Dash". Industries and Mines Organization in West Azarbaijan. (In Persian).
- Kosari, S. and Parsi, P. (1994). "Khoy Database of geochemical data sheet 1:100000". Geological Organization of Iran. (In Persian).
- Kurse, F.A., Boardman, J.W. and Huntington, J.F. (2003). "Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping". IEEE transactions on Geoscience and remote sensing. No. 41. pp. 1388-1400.
- Liu, L., Zhou, J., Yin, F., Feng, M. and Zhang, B. (2014). "The Reconnaissance of Mineral Resources through ASTER Data-Based Image Processing, Interpreting and Ground Inspection in the Jiafushaersu Area, West Junggar, China". Journal of Earth Science. Vol. 25. No. 2. pp. 397–406.
- Luciano, J. and Accioly, O. (1998). "Using mixture analysis for soil information extraction from an AVIRIS scene at the Walnut Gulch Experimental Watershed – Arizona". Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Vol. 9. pp. 1335-1344.
- Meer, V.D., Freek, D. and De Jong, S.M. (2001). *Imagins Spectrometry: basic principle and prospective applications*. Academic press. Springer Netherlands.
- Nagedra, H. and Rocchini, D. (2008). "High resolution satellite imagery for tropical bio diversity Studies: the devil is in the detail". Biodiver Conserv. No. 1. pp. 3431–3442.
- Pearlman, J, Carman, S., Segal, C., Jarecke, P. and Barry, P. (2001). *Overview of the Hyperion imaging spectrometer for the NASA EO-1 mission*. in Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'01). Sydney. Australia.
- Perry, D. (2000). "Visual And Near-Infrared Imagery Using NVIS". M.S thesis. NAVAL postgraduate school. California. USA.
- Sayedini, S., Valadan, M. and Maghsoudi, Y. (2014). "Exploration of hydrocarbon seeps with hyperspectral detection methods aimed Drtsavyr". Science magazine promoting oil and gas exploration and production. No. 111. pp. 63–69. (In Persian).
- Sharifi, A.R. (2008). "Hyperspectral Image Classification Using Spectral Signature Analysis". Masters of Science Dissertation. University of Tehran. (In Persian).
- Ungar, S.G. (2001). *Overview of EO-1, the first 120 days*. in Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'01). Sydney. Australia.
- "USGS spectral library". (<http://www.speclab.cr.usgs.gov>).

Villa, A., Benediktsson, J.A., Chanussot, J. and Jutten, J. (2011). "Hyperspectral Image Classification With Independent Component Discriminant Analysis". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 49. No. 12. pp. 4865-4876.

Vincent, R.K. (1997). *Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing*. Prentice Hall.

Wenkai, L. and Qinghua, G. (2014). "A New Accuracy Assessment Method for One- Class Remote Sensing Classification". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 52. No. 8. pp. 1- 13.