



جغرافیا و روابط انسانی، تابستان ۱۳۹۷، دوره ۱، شماره ۱

ارزیابی الگوریتم های PPI و SMACC در استخراج مس از تصاویر فراطیفی (مورد مطالعه: منطقه قزلداش خوی)

علی اصغر تراهی^۱، پرویز ضیائیان فیروزآبادی^۲، حسین راستاد^۳

۱- استادیار سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه خوارزمی تهران

۲- دانشیار سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه خوارزمی تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه خوارزمی تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۲

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی الگوریتم های اندیس خلوص پیکسلی (PPI) و حداکثر زاویه مخروط کوژ (SMACC) به منظور استخراج طیف کانی های مس منطقه قزلداش با استفاده از تصویر فراطیفی سنجنده هایپریون سطح ۱R می باشد. برای این کار پنجره ای از تصاویر سنجنده هایپریون، منطقه قزلداش شهرستان خوی انتخاب گردید. در ادامه به منظور استخراج طیف های خالص مواد نسبت به اعمال پیش پردازش تصویر از جمله تصحیح رادیومتریک شامل حذف باندهای نامناسب، خط های نواری حاوی نویز، حذف اثر طیفی و تصحیح اتمسفری به منظور تبدیل مقادیر تابش به انعکاس اقدام شد. سپس تبدیل MNF به منظور کاهش تصاویر و کاهش نویزها صورت گرفت. در مرحله بعد خالص ترین پیکسل ها با استفاده از پیاده سازی الگوریتم PPI و SMACC بروی تصاویر به دست آمده و توسط الگوریتم SAM پیکسل های خالص را طبقه بندی کردیم. در مرحله آخر با استفاده از نقاط کنترل زمینی صحت الگوریتم ها را در استخراج طیف کانی ها سنجیدیم که صحت کلی و ضریب کاپا برای الگوریتم PPI به ترتیب ۷۴،۱۲٪ و ۰،۶۱ و برای الگوریتم SMACC به ترتیب ۶۹،۲۳ و ۰،۵۷ بود. همچنین فراوانی پیکسل های خالص مربوط به کانی ها در الگوریتم PPI بیشتر از SMACC بود.

واژگان کلیدی: PPI، SMACC، تصویر فراطیفی، MNF، SAM

مقدمه

سنجش از دور علم و هنر استخراج اطلاعات در باره سطح زمین و آب با استفاده از تصاویر دریافتی از چشم انداز بالا می‌باشد که از تابش الکترومغناطیسی منعکس شده از سطح زمین در محدوده‌هایی از طیف‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌کند (معصوم زاده، ۱۳۷۶، ۳۹-۴۴). این تابش الکترومغناطیسی که مرتبط با ساختار مواد می‌باشد، می‌تواند به عنوان وجه تمایز جهت تشخیص مواد مختلف به کار گرفته شود (نیکتا، ۱۳۹۱) بر همین اساس نیز متناسب با ویژگی‌ها و نیازمندی‌های هریک از علوم، سنجنده‌هایی با قابلیت‌های متفاوت طراحی و ساخته شده‌اند. (خزایی و همکاران، ۱۳۸۹، ۶۳، ۷۴) یکی از مهم‌ترین مزیت‌های سنجش از دور در تشخیص مواد معدنی مختلف می‌باشد. سنجنده‌های فراطیفی به خوبی از عهده ثبت مشخصه طیفی این مواد برمی‌آیند. به عبارت دیگر، تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی، باندهای طیفی محدود و گسسته‌ای را برای هر پیکسل ثبت می‌کند. (ارغوانیان و همکاران، ۱۳۹۰) در مقابل سنجنده‌های فراطیفی دارای توانمندی ثبت باندهای طیفی پیوسته‌ای هستند که اطلاعات طیفی مفصل‌تری فراهم می‌آورد. براساس این اطلاعات طیفی، طبقه‌بندی و آشکارسازی و تشخیص مواد تشکیل دهنده سطح پیکسل زمینی امکان پذیر می‌شود. (چراغچی، ۱۳۹۰). با وجود این مزایا در سنجنده‌های فراطیفی با توجه به این که معمولاً ابعاد پیکسلی تصاویر ماهواره‌ای بزرگ است، اما قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌های فراطیفی معمولاً پایین می‌باشد، در نتیجه امکان وجود پیکسل که تماماً از یک نوع ماده تشکیل شده باشد، مخصوصاً در مطالعات زمین‌شناسی عملاً غیرممکن است.

بنابراین با توجه به دقت مکانی پایین سنجنده‌های فراطیفی، معمولاً با پیکسل‌های سرکارداریم که بیش از یک شیء منفرد در تشکیل آن‌ها حضور داشته‌اند، به این پیکسل‌ها، پیکسل‌های مختلط^۱ گفته می‌شود و در پردازش داده‌های فراطیفی در نهایت لازم است پیکسل‌های مختلط به مجموعه‌ای از مواد خالص یا اعضای انتهایی و کسرهای فراوانی متناظرشان تجزیه شوند. (علیزاده و قاسمیان، ۱۳۹۳، ۵۷-۷۰) به همین جهت امروزه در پردازش و مطالعات دورسنجی روش‌های طبقه‌بندی زیرپیکسلی توسعه پیدا کرده است. در طیف ناآمیختگی زیرپیکسلی، طیف یک پیکسل آمیخته، از طریق تفکیک آن به مجموعه‌ای از طیف‌های ترکیبات مختلف موجود در آن پیکسل که اصطلاحاً عضو انتهایی نامیده می‌شوند، اندازه‌گیری می‌شود که بر اساس فراوانی و سهم هر عضو انتهایی در آن پیکسل مشخص می‌شوند. (شهریاری و همکاران، ۱۳۹۱، ۳۱) و (Keshava, ۲۰۰۳، ۵۵-۷۸)

^۱ Mixed pixel

در دهه گذشته الگوریتم‌های فراوانی به منظور یافتن اعضای خالص تصویری از داده‌های فراطیفی توسعه یافته‌اند؛ که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌های اندیس خلوص پیکسلی^(۱) (PPI)، N-FINDER، آنالیز خطای تکرارشونده^(۲) (IEA)، آنالیز مؤلفه رأسی^(۳) (VCA)، AMEE^(۴)، SMACC^(۵)، ORASIS^(۶) و... اشاره کرد. با توجه به موارد فوق در این تحقیق از روش‌های PPI و SMACC برای استخراج کانی مس در منطقه قزلداش خوی استفاده گردید.

استخراج موادخالص با روش‌های پیچیده ریاضی صورت می‌گیرد مهم‌ترین آن‌ها شاخص خلوص پیکسل (PPI) می‌باشد. (Chang And Plaza, ۲۰۰۶: ۶۳-۶۷)

در این روش ممکن است بخش کمی از پیکسل‌های آمیخته در طول مراحل انتخاب خودکار، به عنوان پیکسل خالص جدا شده باشند. بنابراین به منظور تصحیح و تکمیل بیشتر، طیف انتهایی اعضای خالص از تصویر PPI دوبعدی و از ابر پیکسلی استخراج می‌شود. (De Carvalho et al, ۲۰۰۳: ۳۷۵۴-۳۷۵۶)

روش دیگر برای طبقه‌بندی‌های زیر پیکسلی روش حداکثر زاویه مخروط کوژ (SMACC) از تصاویر فراطیفی برای استخراج مواد خالص و تعیین فراوانی آن‌ها می‌باشد. (Gruninger et al, ۲۰۰۴: ۱-۱۵) کاربرد این روش در مواجهه با باندها و پیکسل‌های با همبستگی بالا که فرایند ناآمیختگی را با مشکل روبه‌رو می‌کنند می‌تواند نسبت به روش‌های استاندارد دارای مزیت‌هایی می‌باشد. (Santos-Garsia et al, ۲۰۱۰: ۱-۴) و (غلامی و تنگستانی، ۲۷۷، ۱۳۹۲-۲۸۸).

گرونینگر و همکاران (۲۰۰۴) در یک روش جدید به نام SMACC برای استخراج اعضای خالص، از مدل مخروط‌های محدب بهره گرفتند. مدل مخروط محدب با یک عضو خالص شروع می‌شود سپس به صورت افزایشی بر تعداد اعضا می‌افزاید. یک عضو خالص جدید بر اساس داشتن بیشترین زاویه با مخروط محدب تعیین می‌شود و به مجموعه اعضای خالص اضافه می‌شود. در هر گام نقشه‌های فراوانی همزمان تولید شده و بروزمی‌شود.

Nasimento (۲۰۰۶) به معرفی سه روش نظارت‌نشده برای جداسازی طیفی تصاویر فراطیفی پرداخته است. روش اول Hysime به منظور تخمین ابعاد زیرفضای سیگنال (تعداد اعضای خالص) ارائه شده است. روش دوم، روش هندسی VCA می‌باشد که اعضای خالص را رئوس یک چندوجهی در نظر می‌گیرد و بر پایه فرض حضور حداقل یک پیکسل خالص از هر عضو خالص در صحنه تصویر به جستجوی این اعضا می‌پردازد. روش سوم، روش اماری^(۷) deca است که جداسازی طیفی را به عنوان یک مسئله بیشترین شباهت فرموله می‌کند. و از پارامترهای آماری به منظور تجزیه طیفی بهره می‌گیرد و برخلاف روش VCA نیازمند حضور پیکسل‌های خالص در صحنه تصویر نمی‌باشد.

^۱ Pixel purity index

^۲ Iterative error analysis

^۳ Vertex component analysis

^۴ Auto-mated morphological endmember extraction

^۵ Sequential Maximum Angle Convex Cone

^۶ Optical real-time adaptive spectral identification system

^۷ Dependent Component Analyses

الیس و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از تصاویر سنجنده HYMAP مطالعاتی را بروی یکی از مناطق معدنی انگلستان (معدن کائولن) انجام دادند. ماده کائولن عمدتاً در نتیجه دگرگونی آتشفشانی سنگ های گرانیتی است. عمده کانی های این منطقه را کائولیت، مونوریولونیت، موسکویت، لپیدوتیت و توپاز بود که از همین کانی ها به عنوان طیف معلوم جهت طبقه بندی استفاده کردند.

لاگاشری و همکاران (۲۰۰۸) جهت تخمین میزان آهک مطالعه را بروی منطقه ای در جنوب فرانسه انجام دادند. آن ها نیز از تحلیل باندهای جذبی آهک استفاده کردند. با استفاده از عمق جذبی آهک در طول موج های منحصر به فرد خود یک تخمین کمی انجام دادند. همچنین با استفاده از طیف سنج های میدانی و آزمایشگاهی نتایج حاصله را از مقیاس میدانی، آزمایشگاهی به مقیاس کلی تصویر هوایی تعمیم دادند. تصویر مورد استفاده تصویر سنجنده فراطیفی HYMAP بود.

آقاسی (۱۳۹۳) به تحلیل واحدهای سنگ شناختی و رخداد پتاس با استفاده از داده های چند طیفی در گنبد نمکی پل پرداخت. وی از تصاویر ماهواره ای استر و با استفاده از الگوریتم های PPI و SMACC طیف های مربوط به رده های گنبد نمکی را استخراج کرد. و در نهایت نقشه مربوط به سنگ شناختی منطقه براساس نقاط کنترل زمینی به دست آمد.

بلواسی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به اکتشاف کانی ها در منطقه قزلداش خوی با استفاده از تصویر فراطیفی پرداخت. روش به کار برده شده برای استخراج پیکسل خالص الگوریتم PPI بود. و پیکسل های خالص مربوط به اعضای خالص را با استفاده از SAM¹ طبقه بندی کرد.

ارغوانیان و همکاران (۱۳۹۰)، به شناسایی نواحی حاوی مس منطقه مشکین شهر با استفاده از تصاویر هایپریون پرداختند. پیکسل های خالص تصویر را با استفاده از الگوریتم PPI به دست آوردند. سپس الگوریتم SAM با اعضای مرجع انتخاب شده روی تصویر اجرا کردند. و قابلیت الگوریتم PPI را به عنوان روشی برای استخراج خالص ترین پیکسل با استفاده از نقاط کنترل زمینی سنجدند.

ضیایان و همکاران (۱۳۹۶) با به کارگیری الگوریتم طبقه بندی نظارت شده SAM در تهیه نقشه واحدهای سنگی با استفاده از تصاویر ماهواره ای فراطیفی پرداختند. برای پیدا کردن پیکسل های با خلوص بیشتر به منظور کار جداسازی طیفی از الگوریتم PPI استفاده کردند. و در نهایت نقشه واحدهای سنگی مربوط به منطقه به دست آمد.

شهریاری و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی به ارزیابی روش های PPI و SMACC جهت نقشه برداری دگرسانی های هیدروترمال منطقه مس پورفیری دره زار پرداخت. در نهایت کنترل زمینی نتایج به دست آمده نشان داد استفاده از روش SMACC می تواند در صورت وجود ابهام به عنوان مکمل روش PPI استفاده شود.

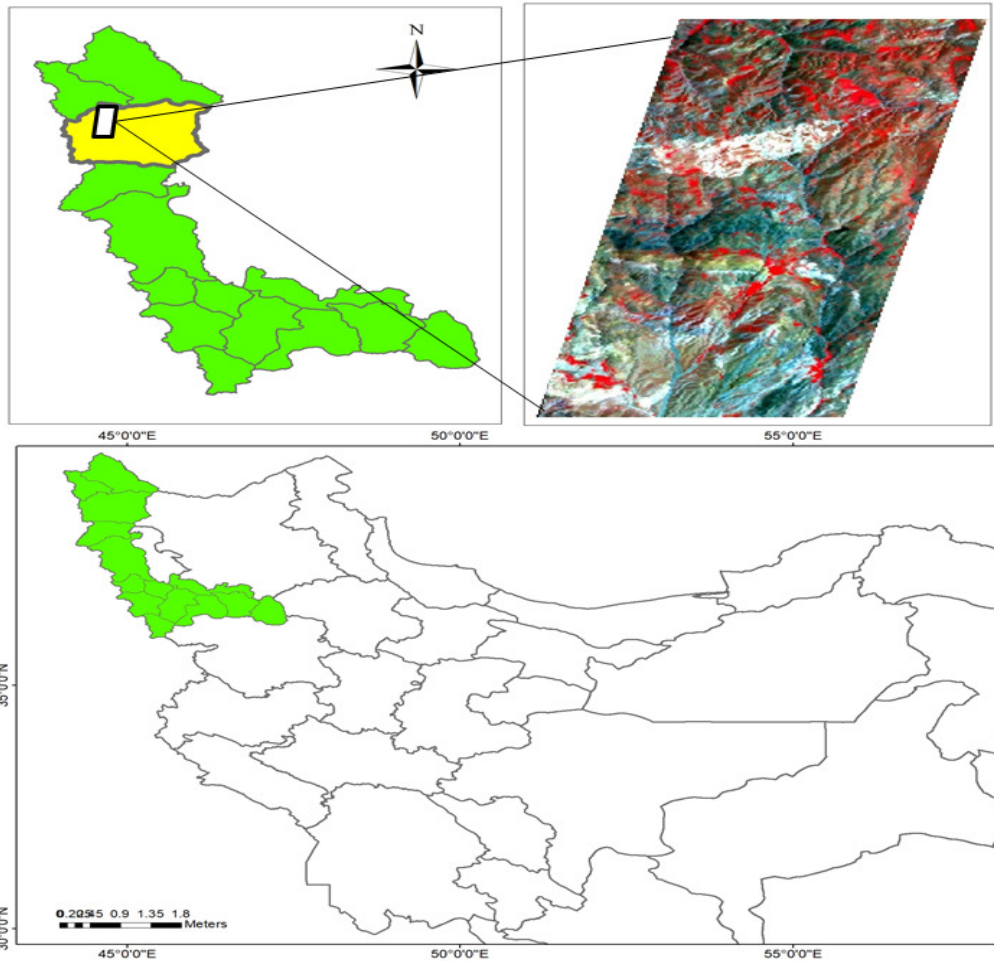
مواد و روش ها

در این بخش به معرفی منطقه مورد مطالعه، داده های استفاده شده و روش های پیاده سازی شده پرداخته می شود.

¹ Spectral Angle Mapper

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مربوط به منطقه قزلداش با طول جغرافیایی $41^{\circ} 44'$ - $28^{\circ} 44'$ و عرض جغرافیایی $39^{\circ} 06'$ - $43^{\circ} 38'$ در شمال غرب ایران در استان آذربایجان غربی و در ۵۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان خوی واقع شده است. دسترسی به این محدوده از طریق جاده آسفالت خوی - زرآباد - چالدران به طول ۵۱ کیلومتر و راه خاکی فرعی منشعب از آن به طول ۶ کیلومتر به سمت روستای قزلداش بالا امکان پذیر است. موقعیت جغرافیایی و تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

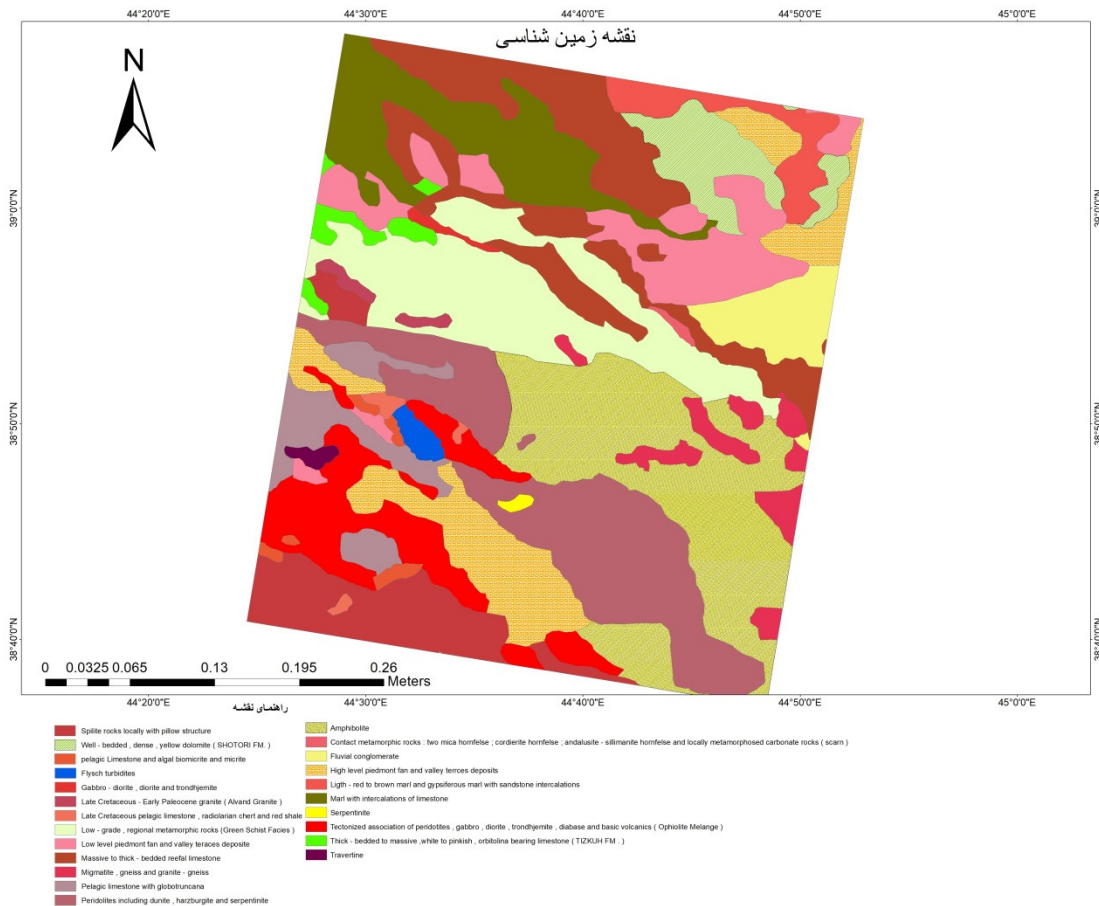


شکل ۱. موقعیت شماتیک منطقه مورد مطالعه

ژئومورفولوژی منطقه

منطقه قزلداش دارای توپوگرافی کوهستانی است به طوری که وضعیت توپوگرافی در قسمت‌های شمالی این منطقه خشن و صعب العبور و در جنوب آن نسبتاً ملایم است. اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقاط منطقه در حدود ۲۰۵ متر است مرتفع‌ترین نقاط این محدوده با ارتفاع ۲۲۰۰ متر در شمال شرق و پست‌ترین نقاط آن با ارتفاع ۱۹۹۵ متر در جنوب محدوده قرار دارند.

عمده ترین تشکیلات منطقه توده های سنگی سکانس افیولیتی شامل سنگ های الترامافیک (دونیت و هارزبورگیت)، بازالت های بالشی، دایک های دیابازی، توده های نفوذی گابرویی دیوریتی و میکروگابرویی همراه با آهک های پلاژیک و چرت رادیولاریت های کرتاسه فوقانی می باشد که مجموعاً پوسته اقیانوسی نئوتیس را در کرتاسه پسین تشکیل می داده اند. عملکرد نیروهای ناشی از نزدیک شدن بلوک های ایران و عربستان موجب بسته شدن اقیانوس نئوتیس، چین خوردگی دگرگونی و دگرگونی نهشته های رسوبی - آتشفشانی حوضه اقیانوسی و روراندگی قطعاتی از آن بر روی پوسته قاره ای مجاور گردیده است. عملکرد بعدی گسل های راندگی موجب بالا آمدن و ظهور مجموعه های افیولیتی و توده های مسی و سولفاید همراه در سطح زمین گشته است (بلواسی، ۲۰۲، ۱۳۹۴-۲۸۷). کانسار مس قولدش در زون افیولیت ملائزخوی-ماکو واقع شده و واحدهای سنگی موجود در آن بخشی از سنگ های سکانس افیولیتی را تشکیل می دهد. بنابراین ساختار زمین شناسی محدوده کانسار به تبع از ناحیه ای که در آن قرار دارد، متاثر از فرایندهای مختلفی است که ظهور و تکوین پوسته اقیانوسی نئوتیس و متعاقب آن بسته شدن، تصادم قاره ای و بهم ریختگی پوسته یاد شده را سبب شده اند (غیوری، ۱۳۷۹).



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

داده های مورد استفاده

در این تحقیق پنجره‌ای از تصاویر فرایفی Hyperion در سطح پردازش L1R با فرمت HDF به تاریخ ۲۰ ژوئن ۲۰۱۰ اخذ گردید. قدرت تفکیک مکانی سنجنده هایپریون ۳۰ متر و قدرت تفکیک طیفی آن ۲۴۲ باند طیفی با پوشش ابر ۱۰-۱۹ درصد و زاویه دید نزدیک به قائم ۱۲,۲۴ می باشد.

به منظور تصحیح هندسی تصاویر هایپریون از تصویرسنجنده OLI ماهواره لندست ۸ به تاریخ ۲۳ ژوئیه ۲۰۱۵ استفاده شد. باند ۸ این سنجنده دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر و باندهای دیگر آن قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر دارند. با استفاده از باند پانکروماتیک این سنجنده، تصاویر هایپریون زمین مرجع گردیدند.

پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای

پیش پردازش

مرحله پیش پردازش تصویر برای آماده سازی داده‌ها قبل از هرگونه پردازش و آنالیز صورت می‌گیرد که شامل تصحیح رادیومتریکی - اتمسفری و تصحیح هندسی است و با توجه به نوع و مشخصات داده به آن اعمال می‌شود. تصحیحات رادیومتریکی برای بهبود کیفیت رادیومتریکی تصاویر، افزایش وضوح و در نتیجه افزایش میزان اطلاعات قابل استخراج از تصاویر موثر می باشد. رویکرد پیش پردازش در این پژوهش مراحل زیر را در برمی‌گیرد.

۱- حذف باندهای نامناسب

۲- تصحیح جابجایی مکانی

۳- تصحیح خطاهای نواری

۴- تصحیح اثر طیفی (Smile)

۵- تصحیح اتمسفری برای تبدیل رادپانس به انعکاس

۶- تصحیح هندسی

یکی از مهم ترین تصحیحات برای تصاویر هایپریون تصحیح اتمسفری می‌باشد. که در زیر توضیح داده شده است. خطای اتمسفری در اثر جذب و پراکنش ذرات اتمسفر پیش می‌آید. خطاهای اتمسفری باعث محو جزئیات تصویر می‌شوند و بدین وسیله از قدرت تفکیک مکانی سنجنده نیز می‌کاهند. بیشترین اثر اتمسفر مربوط به پراکنش است که وابستگی زیادی به طول موج دارند، بنابراین اثرات اتمسفر در باندهای مختلف یک سنجنده با هم یکسان نیست. هر چه طول موج بیشتر شود اثر پراکنش اتمسفری کمتر خواهد شد. (عظیمی هالم، ۱۳۹۳) زاویه دید سنجنده نیز عامل دیگری است که بر مقدار خطای اتمسفری موثر است. خطاهای اتمسفری در تصاویری که با زاویه دید بزرگ برداشت می‌شوند یا دارای عرض برداشت بزرگی هستند معمولاً بصورت ناهمگون ظاهر می‌شود. در کناره‌های تصویر، خطاهای اتمسفری بیشتر از وسط تصویر می‌باشد و این به علت مسیر طولانی‌تری است که امواج، الکترومغناطیسی برای پیکسل های کناری باید طی کنند. (مراذاده، ۱۳۸۹).

مراحل تصحیح رادیومتری تصاویر را می توان به صورت زیر نمایش داد:

۱- تبدیل ارزش رقومی (DN) به تشعشع رسیده به سنجنده

$$DN = DN(\min) + ((DN(\max) - DN(\min)) / (L_{\max} - L_{\min})) * L + L_{\min}$$

Or

$$DN = \text{channel Gain} * \text{Channel Offset}$$

۲- تصحیح اتمسفری و تبدیل تشعشع سنجنده به تشعشع سطحی

۳- تصحیح توپوگرافی و خورشیدی و تبدیل تشعشع سطحی به انعکاس

در این تحقیق برای تصحیح اتمسفری تصویر هایپریون از روش FLAASH استفاده شد. روش FLAASH یکی از اولین ابزارهای تصحیح اتمسفری است که طول موج‌هایی را از گستره مرئی تا ۱ میکرومتر پوشش می‌دهد. این مدل بیشتر بر روی تصاویر چندطیفی و فراطیفی کار می‌کند. بازیابی بخار آب و گرد و غبار تنها زمانی امکان پذیر است که تصویر شامل باندهایی با طول موج‌های در موقعیت مناسب باشد. این مدل می‌تواند تصویر را هم در هندسه دید قائم و هم در هندسه دید مایل از لحاظ تاثیرات اتمسفری تصحیح کند. (آوریده و همکاران، ۱۳۹۳) تصحیح هندسی تصویر بعد از انجام عمل فلش صورت گرفت.

تبدیل کم ترین کسر به نویز (MNF)

تبدیل MNF^۱، یک تبدیل خطی است که برای مشخص کردن بعد و حجم اصلی تصویر، جدا کردن نویز از دیگر اطلاعات و کاهش میزان پردازش در مراحل بعد استفاده می‌شود. در این تبدیل در ابتدا تصویر به دو بخش نویز و غیرنویز تقسیم می‌شود و سپس بخش غیرنویز به عنوان جزو اصلی شناخته می‌شود و نویز حذف می‌شود. (مرادزاده، ۱۳۸۹). در واقع MNF یک الگوریتم آماری غیرپارامتریک است که ابعاد واقعی داده‌ها، با امتحان مقادیر ویژه داده‌ها تعیین می‌شود. در پردازش‌های بعدی، فقط باندهای MNF با مقادیر ویژه بالا استفاده می‌شود. (Chaudhry et al, 2006)

الگوریتم های استخراج پیکسل های خالص

این الگوریتم‌ها کار جداسازی طیفی را انجام می‌دهند. در واقع هدف اصلی یافتن عناصر خالص و فراوانی آن‌ها در پیکسل‌های مختلط می‌باشد. برای انجام جداسازی طیفی باید نحوه ترکیب شدن عناصر خالص با فراوانی مربوطه مدل سازی گردد. (Iordache et al, 2011) روش‌های جداسازی طیفی مورد مطالعه در این بخش جزو روش‌های هندسی می‌باشند. روش‌های هندسی برای تعیین اعضای خالص درون پیکسل از شباهت بسیار زیاد مدل اختلاط خطی^۲ و هندسه محدب بهره می‌گیرند.

^۱ minimum noise fraction

^۲ linear mixed model

تحت مدل اختلاط خطی، مشاهدات در صحنه فراطیفی درون یک چندضلعی واقع هستند که رئوس این چندضلعی مربوط به اعضای خالص موجود در صحنه است. (چراغچی، ۱۳۹۰) این یعنی، مسئله استخراج اعضای خالص هم ارز با یافتن رئوس چندضلعی دربرگیرنده ابر داده^۱ می‌شود. در این مطالعه الگوریتم‌های هندسی جداسازی طیفی PPI و SMACC برای شناسایی نواحی دارای مس در منطقه قزلداش مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

استخراج اعضای خالص با الگوریتم PPI :

در مواردی که اعضای خالص به صورت آمیخته باشند از الگوریتم PPI برای پیدا کردن پیکسل‌هایی استفاده می‌شود که کاملاً خالص هستند. الگوریتم PPI از طریق تصویر کردن نمودارهای پراکندگی n بعدی روی بردارهای واحد اتفاقی محاسبه می‌شود (عبداللهی، ۱۳۹۲). در هر بار تصویر کردن پیکسل‌های نهایی، پیکسل‌هایی که در انتهای بردارهای واحد قرار می‌گیرند، شمرده می‌شوند. در نهایت تصویر پیکسل خالص ایجاد می‌شود که در آن مقدار هر پیکسل متناظر با تعداد دفعاتی است که به عنوان پیکسل نهایی شمرده شده است. این الگوریتم بر روی نتایج تبدیل MNF اجرا می‌شود، البته در شرایطی که باندهای شامل نویز و بدون اطلاعات از تصویر حذف شده باشند. هر چه تعداد دفعات تکرار الگوریتم بیشتر باشد امکان پیدا کردن پیکسل‌های خالص‌تر بیشتر است. پیکسل‌هایی که دارای مقادیر بالایی هستند از نظر طیفی خالص‌تر هستند. (محرابی، ۱۳۹۰) و (Nascimento & Dias, ۲۰۰۵: ۸۹۸-۹۱۰) پیکسل‌هایی که بیشترین مقدار را دارند برای تعیین نوع مواد خالص وارد فضای ویژگی n-D visualizer می‌شوند.

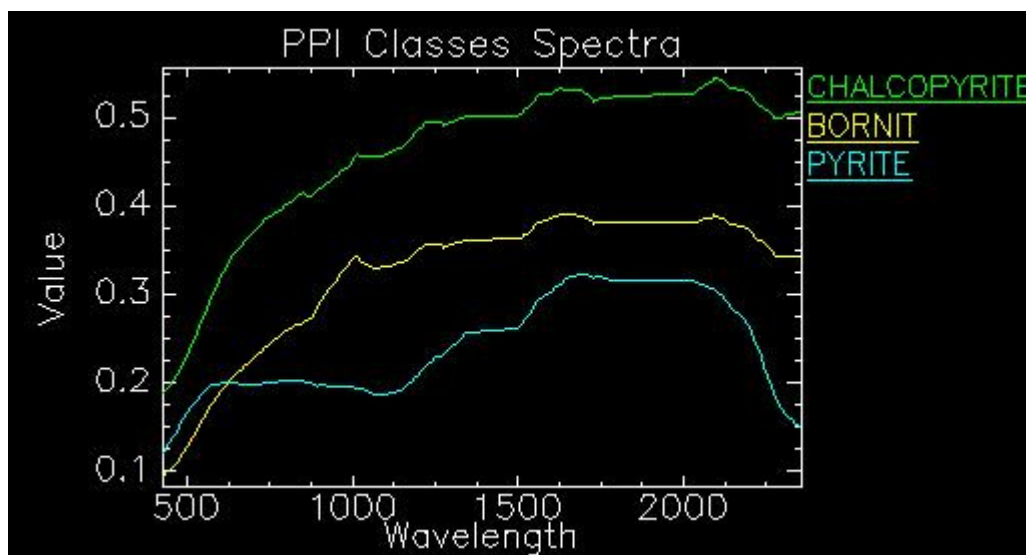
با اعمال الگوریتم PPI بر روی باندهای MNF سنجنده هایپریون برخی از طیف‌های خالص از میان ابرپیکسلی استخراج و پس از تطبیق با طیف‌های استاندارد و تجربی، طیف‌های شاخص کانی‌های مس جدا شدند. شکل ۳ طیف‌های استخراجی حاصل از الگوریتم PPI را نشان می‌دهد. در این شکل طیف‌های مربوط به کانی‌های کالکوپیریت^۲، بورنیت^۳ و پیریت^۴ مشخص شده‌اند.

^۱ metadata

^۲ chalcopyrite

^۳ bornit

^۴ pyrite



شکل ۳. طیف های استخراجی حاصل از الگوریتم PPI

استخراج اعضای خالص با الگوریتم SMACC

روش SMACC از روش های توسعه یافته جدید جهت تعیین عضوهای انتهایی در تصاویر ابرطیفی می باشد که برای نمایش داده های برداری از مدل مخروط های محدب بهره می گیرد. در این روش اجزا بطور مستقیم از مجموعه داده ها انتخاب می شوند. یافتن اجزاء خالص در این روش بصورت یک فرایند تکراری است. مدل مخروط محدب انتخاب عضوهای انتهایی را تنها با یک عضو خالص شروع می کند و سپس بطور افزایشی بر تعداد اجزا خالص می افزاید. در هر مرحله از مراحل تکرار، نقشه های فراوانی تولید می شوند. (نجفیان و همکاران، ۱۳۹۲، ۵۰-۳۷)

این الگوریتم بطور ویژه برای داده های فراطیفی که از قبل کالیبره شده اند بصورت خودکار اعضای انتهایی را پیدا می کند. الگوریتم فراطیفی مخروط محدب حداکثر زاویه متوالی مدل مخروط محدب را به همراه محدودیت هایی برای شناسایی طیف عنصر انتهایی مورد بررسی قرار می دهد. برای مثال در صورتی که داده اولیه دسته داده بازتابی کالیبره شده باشد در این صورت باید محدودیت های مثبت بودن یا حاصل جمع تایک یا کمتر را انتخاب کرد. در این روش ابتدا روشن ترین پیکسل ها مشخص می شود سپس پیکسلی که نسبت به پیکسل اول متمایز است انتخاب می شود و در ادامه پیکسلی که متمایز از دو پیکسل اول خواهد بود توسط این روش جدا می گردد و سپس بصورت افزایشی بر تعداد اجزاء خالص می افزاید.

همچنین برداری از داده که بیشترین زاویه را با مخروط می سازد بعنوان عضو انتهایی جدید انتخاب می شود و این فرایند تکرار خواهد شد تا اینکه تعداد ویژه ای از عضوهای انتهایی با احتساب محدودیت های اشاره شده انتخاب گردند. هرچند عضوهای انتهایی بدست آمده از طریق SMACC منحصر بفرد می باشند اما تطابق یک به یکی نسبت به تعداد مواد حاضر در تصویر و تعداد عضوهای انتهایی ندارد (تنگستانی و غلامی، ۲۷۷، ۱۳۹۲-۲۸۸).

(Gruninger et al, 2004)

این روش مزیت هایی برای داده های طیفی دارد درجایی که همبستگی زیاد میان باندها و پیکسل ها می تواند تکنیک های استاندارد را مخدوش کند.

در الگوریتم SMACC، بردارهای انتهایی درون مجموعه داده، جستجو و بعنوان اجزای خالص استفاده می‌شوند. یک بردار انتهایی برداری است که نمی‌توان آن را با یک ترکیب خطی مثبت از بقیه بردارهای داده‌ها نشان داد. بردارهای انتهایی یا اجزاء خالص یک مخروط محدب را تشکیل می‌دهند که بقیه بردارهای داده باقیمانده را در بر می‌گیرد (آقاسی، ۱۳۹۳). SMACC با استفاده از رابطه زیر مخروط محدب را برای طیف انتهایی هر پیکسل محاسبه و استفاده می‌کند که با H نشان داده می‌شود:

رابطه ۲

$$H(c, i) = \sum_k^N R(c, k) A(k, j)$$

که در آن:

I ایندکس پیکسل است.

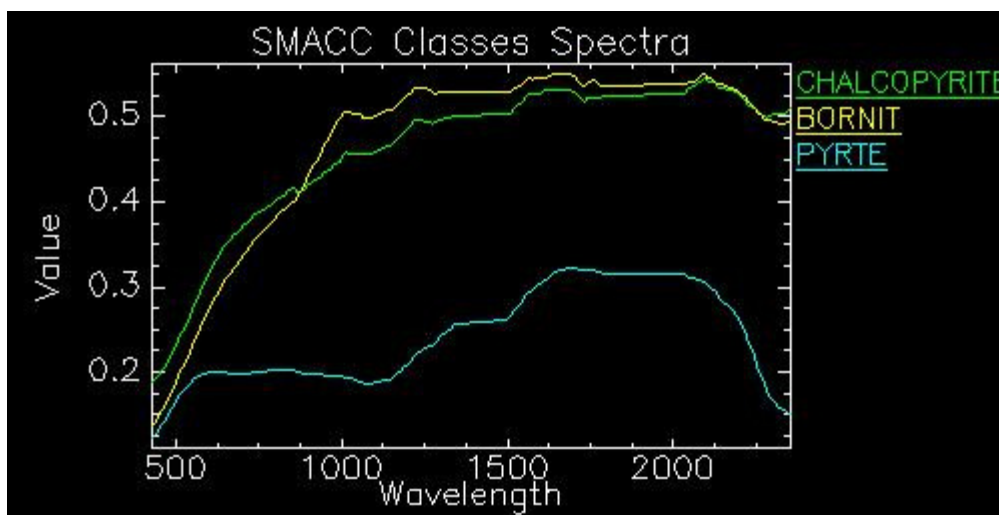
k, j شاخص‌های انتهایی هستند از ۱ تا طول بسط داده شده، N .

R ماتریسی است که طیف‌های انتهایی را بصورت یک ستون نشان می‌دهد.

C شاخص کانال طیفی است.

A ماتریس پراکندگی بخشی برای هر عضو انتهایی J در هر عضو انتهایی k برای هر پیکسل می‌باشد. (آقاسی، ۱۳۹۳).

برای انجام روش SMACC استخراج ۳۰ عضو انتهایی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در الگوریتم SMACC استخراج عضوهای انتهایی به صورت نظارت نشده انجام می‌شود بنابراین انتظار جداسازی طیف‌های نامرتب زیاد است. پس برای انتخاب طیف‌های مربوط به کانی‌های تشکیل‌دهنده مس موجود در منطقه از تطبیق طیف با طیف‌های استاندارد و تجربی استفاده شد. در شکل ۴ طیف‌های استخراجی حاصل از الگوریتم SMACC، مربوط به کانی‌های کالکوپیریت (SMACC۱۳)، بورنیت (SMACC۶) و پیریت (SMACC۵) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴. طیف‌های استخراجی حاصل از الگوریتم SMACC

الگوریتم طبقه بندی

نقشه بردار زاویه طیفی (SAM)

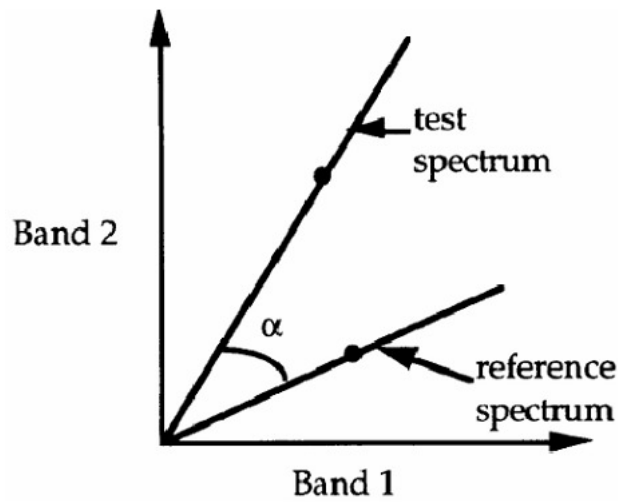
این روش که به طور وسیعی در سنجش از دور مورد استفاده قرار می‌گیرد زاویه بین امضاهای طیفی دو بردار را محاسبه می‌کند. این روش توسط Bordman در سال ۱۹۹۲ توسعه داده شده است. (چراغچی، ۱۳۹۰) این روش با استفاده از ضرب داخلی و محاسبه زاویه طیفی بین دو بردار منحنی طیفی مرجع و پیکسل تصویر، تشابه بین دو بردار را تعیین و به صورت زیر محاسبه می‌کند. (عرب نرمی، ۱۳۹۲) و (Dennison et al, ۲۰۰۴: ۳۵۹-۳۶۷)

در واقع نگارنده زاویه طیفی بردارهای $r_i = (r_{i1}, \dots, r_{iL})^T$ و $r_j = (r_{j1}, \dots, r_{jL})^T$ با مشخصه های طیفی مربوطه $s_i = (s_{i1}, \dots, s_{iL})^T$ و $s_j = (s_{j1}, \dots, s_{jL})^T$ به صورت زیر محاسبه می‌کند.

رابطه ۳

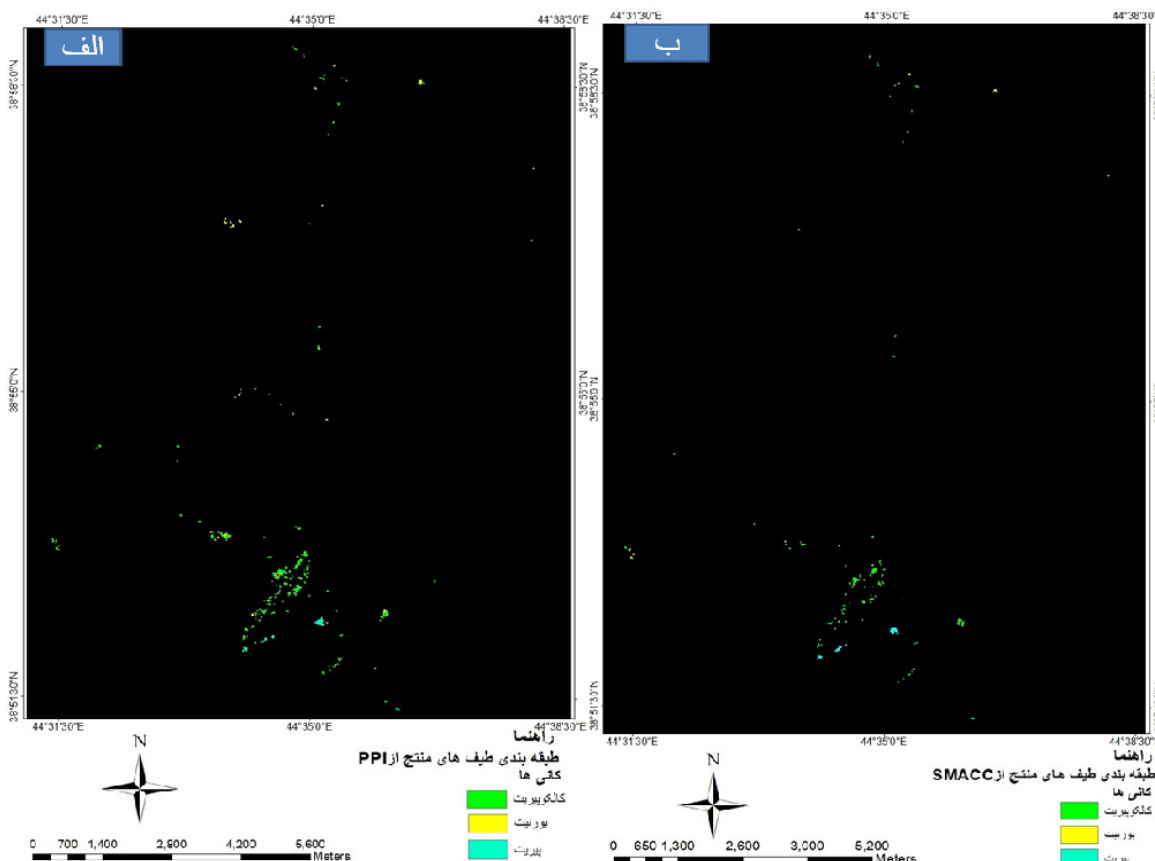
$$SAM = (s_i, s_j) = \cos^{-1} \left(\frac{s_i^T \cdot s_j}{\left((s_i^T \cdot s_i) \right)^{1/2} \left((s_j^T \cdot s_j) \right)^{1/2}} \right)$$

در واقع با تبدیل طیف‌ها به بردار در فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه طیفی بین دو بردار محاسبه می‌شود. در این روش برای محاسبه زاویه، جهت بردارها اهمیت دارد نه طول آن‌ها، بنابراین این روش غیرحساس به فاکتور Gain است که ممکن است با تغییرات توپوگرافی تغییر کند. (Yang et al, ۲۰۰۸: ۷۲۹-۷۳۷) شکل ۵ محاسبه زاویه طیفی در فضای دوبعدی نشان داده شده است. مقدار کمتر زاویه طیفی دلالت بر تشابه بالاتر بین ویژگی طیفی پیکسل‌های تصویر و طیف مرجع دارد (لطفی و همکاران، ۲۰۲۹، ۱۳۹۶-۲۱۷). در الگوریتم SAM علاوه بر تصویر طبقه‌بندی شده خروجی، یکسری تصاویری قاعده‌ای برای هر عضو انتهایی ساخته می‌شود که نشان‌دهنده فاصله زاویه‌ای واقعی (رادیانس) بین هر طیف در تصویر (پیکسل) با طیف مرجع می‌باشند. پیکسل‌های تیر در این تصاویر نشان دهنده زاویه طیفی کوچکتر و تشابه بیشتر با طیف مرجع می‌باشند. (Yuhas et al, ۱۹۹۲)



شکل ۵. محاسبه زاویه طیفی در فضای دوبعدی

با استفاده از طیف‌های حاصل از روش‌های PPI و SMACC و به کمک تصاویر قاعده‌ای و انتخاب زاویه مناسب طیفی تصویر پردازش شد. شکل ۶ پراکندگی کانی‌های تشکیل‌دهنده مس در منطقه مورد مطالعه را با استفاده از طیف‌های منتج از PPI (الف) و SMACC (ب) را نشان می‌دهد.



شکل ۶. طیف های استخراج شده کانی مس توسط الگوریتم های PPI و SMACC با استفاده از الگوریتم طبقه بندی SAM

همانطور که در شکل دیده می شود فراوانی کانی های به دست آمده توسط الگوریتم PPI به مراتب بیشتر بوده است. در ادامه با استفاده از نقاط کنترل زمینی که از طریق جی پی اس برداشت شده بودند صحت طبقه بندی و قابلیت الگوریتم ها در تشخیص خالص ترین پیکسل ها سنجیده شد.

ارزیابی نتایج طبقه بندی

روش های مختلفی جهت ارزیابی نتایج حاصل از طبقه بندی داده ها وجود دارد. متداول ترین روش برای ارزیابی کمی صحت طبقه بندی انتخاب تعدادی پیکسل نمونه معلوم و مقایسه کلاس آن ها با نتایج طبقه بندی می باشد که این داده های معلوم را واقعیت زمینی^۱ یا داده های مرجع^۲ می نامند (بلواسی و همکاران، ۲۰۲، ۱۳۹۴-۲۸۷).

¹ Ground Truth

² Reference Data

در این پژوهش، نتایج ارزیابی به صورت صحت کلی^۱ و ضریب کاپا^۲ ارائه شده است. بدین منظور ابتدا طیف‌های به دست آمده از الگوریتم‌های PPI و SMACC توسط سنجه نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) طبقه‌بندی شدند و سپس ماتریس خطا^۳ تشکیل گردید در ماتریس خطا داده‌های زمینی به صورت ستون‌ها و داده‌های مربوط به نتایج طبقه‌بندی (طیف‌های استخراج شده توسط الگوریتم‌ها) به صورت سطرها ظاهر می‌شوند (جدول ۱ و ۲). صحت کلی عبارت است از نسبت پیکسل‌های که درست طبقه‌بندی شده‌اند به کل پیکسل‌های معلوم است و بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود (بلواسی و همکاران، ۱۳۹۴). در این رابطه E_{ii} اعضای قطری ماتریس، N تعداد کل پیکسل‌های معلوم می‌باشند.

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

ضریب کاپا یکی دیگر از پارامترهای آماری است که از ماتریس خطا استخراج می‌شود. ضریب کاپا صحت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند و بر اساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Shao et al, ۲۰۱۲: ۷۸-۸۷). در این رابطه N تعداد کل واقعیت زمینی، \mathbf{X}_{i+} مجموع عناصر سطر i ام و \mathbf{X}_{+i} مجموع عناصر ستون i ام و k تعداد سطر یا ستون‌های ماتریس خطا می‌باشند.

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

جدول ۱: ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا برای نتایج الگوریتم PPI حاصل SAM

مجموع	پیریت	بورنیت	کالکوپیریت	کانی
۹	۳	۰	۶	طبقه بندی نشده
۵۷	۸	۴	۴۵	کالکوپیریت
۴۱	۱	۳۲	۸	بورنیت
۳۶	۲۹	۵	۲	پیریت
۱۴۳	۴۱	۴۱	۶۱	مجموع
صحت کلی ۷۴,۱۲۵۹٪ ، ضریب کاپا ۰,۶۱۷۰				

^۱ Overall Accuracy

^۲ Kappa Coefficient

^۳ Error Matrix

جدول ۲: ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا برای نتایج الگوریتم SMACC حاصل از SAM

مجموع	پیریت	بورنیت	کالکوپیریت	کانی
۳۰	۹	۷	۱۴	طبقه بندی نشده
۵۴	۷	۱	۴۶	کالکوپیریت
۲۸	۰	۲۸	۰	بورنیت
۳۱	۲۵	۵	۱	پیریت
۱۴۳	۴۱	۴۱	۶۱	مجموع
صحت کلی ۶۹,۲۳۰٪، ضریب کاپا ۰,۵۷۳۰				

نتایج حاصل از طبقه بندی نشان داد که پیکسل‌های خالص به دست آمده توسط الگوریتم PPI دارای صحت کلی ۷۴,۱۲۵٪ درصد و ضریب کاپای ۰,۶۱۷۰ درصد (جدول ۱) و پیکسل‌های خالص به دست آمده توسط الگوریتم SMACC دارای صحت کلی ۶۹,۲۳۰٪ درصد و ضریب کاپای ۰,۵۷۳۰ درصد (جدول ۲) می باشند.

بحث و نتیجه گیری:

از مجموع ۲۴۲ باند سنجنده‌ی هایپریون، ۱۴۶ باند انتخاب و برای پردازش‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند. به دلیل پیوسته بودن باندهای سنجنده‌ی هایپریون، این داده‌ها به شدت در معرض پراکنش‌های جوی، تابش خورشیدی، هندسه تصویربرداری سنسور و تغییرات عوارض زمینی قرار می‌گیرند. در نتیجه یکی از مهمترین تصحیحاتی که باید بر روی آن‌ها اعمال شود، تصحیح اتمسفری است. در غیر این صورت، نتایج به دست آمده با عدم قطعیت همراه خواهد بود. استفاده از کلاس‌های طیفی شناسایی شده جهت تصمیم‌گیری و اعمال روش‌ها، باعث نتایج دقیق‌تر در پردازش‌ها می‌شود. بررسی نتایج حاصل از سیماهای طیفی استخراج شده توسط الگوریتم‌های SMACC و PPI نشان می‌دهد که طیف تصویر و طیف‌های استاندارد (کتابخانه طیفی USGS) به طور کلی با هم سازگار بوده و باندهای جذبی اصلی در طیف نمونه‌های منطقه بروی تصویر با طیف‌های استاندارد مشابه هستند. الگوریتم‌های مورد مطالعه برای شروع کار به وجود حداقل یک پیکسل خالص در تصویر نیاز دارند. در الگوریتم PPI انتخاب طیف عضوهای خالص در محیط n-D Visualizer از میان ابر پیکسلی و به صورت بصری انجام شد. بنابراین در مواردی امکان جداسازی طیف‌های مورد نظر چه به لحاظ وجود آمیختگی بیشتر پیکسل‌ها و چه از نظر شباهت بسیار زیاد دو یا چند طیف توسط کاربر میسر نمی‌باشد. روش SMACC روشی متداول و بروز برای استخراج عضوهای خالص از تصاویر فراطیفی می‌باشد. چون به طور خودکار طیف‌های مربوط به اعضای خالص تصویر را استخراج می‌کند و با مقایسه طیف‌ها با طیف استاندارد می‌توان نوع ماده خالص را به راحتی شناسایی کرد. بعد از استخراج طیف‌ها، به طبقه‌بندی کلاس‌ها با الگوریتم SAM اقدام شد. برای ارزیابی طبقه‌بندی از نقاط کنترل زمینی استفاده شد. طیف‌های شناسایی شده توسط PPI با واقعیت زمینی مطابقت بیشتری داشت.

همچنین فراوانی کانی‌ها توسط PPI به نسبت SMACC بیشتر بود. شناسایی نوع طیف استخراج شده با استفاده از الگوریتم SMACC به زمان کمتری برای کاربر نیاز دارد. در کل می‌توان گفت که الگوریتم SMACC می‌تواند به عنوان روشی مکمل در کنار الگوریتم PPI برای تشخیص پیکسل‌های خالص استفاده شود. شرط موفقیت در کاربرد این روش، استفاده توأمان از نقشه‌های فراوانی تولید شده و مطابقت طیف استخراجی با طیف استاندارد و همچنین در نظر گرفتن کنترل‌های زمینی است. نتایج بر روی منطقه مورد نظر نشان داد که منطقه از لحاظ کانی‌زایی مس بیشتر از کالکوپیریت تشکیل شده است. پیریت بعد از کالکوپیریت از فراوانی بیشتری نسبت به بورنیت در سطح منطقه برخوردار بود. استفاده از تصویر هایپریون برای اکتشاف نواحی مسی در این تحقیق نشان داد که برای شناسایی و جداسازی نواحی دارای مس یا هر نوع ماده خالص دیگر، استفاده از این تصاویر سهولت و دقتی بیشتر از روش‌های دیگر، مانند استفاده از تصاویر چندباندی، دربر دارد. با توجه به این که بسیاری از ذخایر اصلی در نتیجه تفسیر برداشت زمین‌شناسی و نمونه‌برداری زمین‌شناسی تفصیلی کشف می‌شود. ژئوشیمی و ژئوفیزیک، کاربرد گسترده‌ای در اکتشاف دارد و بدون تردید هیچ‌کسار اقتصادی، بدون برنامه‌های حفاری گسترده کشف نمی‌شود. لذا استفاده از این نوع داده‌های ماهواره‌ای در کنار ژئوشیمی و ژئوفیزیک در شناسایی نواحی مستعد برای ذخایر مس می‌تواند به عنوان منبعی مهم تلقی شود.

منابع

آقاسی، امیر (۱۳۹۳)، تحلیل ارتباط واحدهای سنگ شناختی و رخداد پتاس با استفاده از داده‌های چند طیفی در گنبد نمکی پل، استان هرمزگان، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز، استاد راهنما مجید هاشمی تنگستانی

ارغوانیان، آذر. درویش زاده، روشنگر. رسا، ایرج. وحسینی، امین (۱۳۹۰)، شناسایی نواحی حاوی فلز مس با استفاده از تصاویر هایپریون، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم

ارغوانیان، آذر. درویش زاده، روشنگر. رسا، ایرج. حسینی اصل، امین (۱۳۹۰)، اکتشاف نواحی دارای پتانسیل طلا در منطقه غرب مشکین شهر با استفاده از تصاویر HYPERION، انجمن سنجش از دور و GIS ایران، ۳(۱)، ۶۱-۹۱

بلواسی، مهدی. صیاد، اصغری سراسکانرود. زینالی، بتول. وصاحبی وایقان، سعیده (۱۳۹۴). اکتشاف نواحی دارای مس در منطقه قزل‌داش شهرستان خوی با استفاده از تصاویر هایپریون. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷(۲)، ۲۸۷-۳۰۲

چراغچی، حمید (۱۳۹۰)، پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم‌های جداسازی طیفی در تصاویر فراطیفی برای شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده خاک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه اصفهان، استاد راهنما سعید همایونی

خزایی، صفت. همایونی، سعید. صفری، عبدالرضا (۱۳۸۹)، تصویربرداری فراطیفی و ملاحظات آفا در برابر تهدیدات آن، مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری‌های پدافند نوین، ۱(۲)، ۶۳-۷۴

شهریاری، هادی. رنجبر، حجت‌اله. وهنرمنند، مهدی (۱۳۹۱)، کاربرد روش‌های SMACC و PPI در استخراج عضوهای انتهایی جهت نقشه‌برداری دگرسانی‌های هیدروترمال منطقه مس پورفیری دره زار، سی یکمین همایش علوم زمین، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

- صفری، عبدالرضا، آوریده. حمیدرضا. همایونی، سعید. خزایی، صفا (۱۳۹۳)، برآورد عمق آب های ساحلی به کمک تصاویر سنجنش از دور فراطیفی، نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، ۶(۱)
- ضیائیان فیروزآبادی، پرویز. صفر بیرانوند، پریرسا. حسینقلی زاده، علی. حسینی تبار، رحیم. و صفر بیرانوند، مهدی (۱۳۹۶)، به کارگیری الگوریتم طبقه بندی نظارت شده SAM در تهیه نقشه واحدهای سنگی با استفاده از تصاویر ماهواره ای، سنجنش از دور و GIS ایران، ۱۰(۱)، ۱-۱۶
- عبدالهی، حمید (۱۳۹۲)، ارائه و ارزیابی الگوریتم های نظارت نشده برای جداسازی طیفی تصاویر فراطیفی با استفاده از داده های طیف نگاری، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، استاد راهنما سعید همایونی و علی اسماعیلی
- علیزاده، حبیب. قاسمیان، حسن (۱۳۹۳)، جداسازی طیفی و مکانی تصاویر ابرطیفی با استفاده از Semi-NMF و تبدیل PCA، نشریه پردازش علایم و داده ها، دوره ۲ (پیاپی ۲۲)، ۷۰-۵۷
- عظیمی هالم، مریم (۱۳۹۳)، تعیین پوشش گیاهی و تفکیک گونه ها در مناطق جنگلی شهری با استفاده از تصاویر فراطیفی، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، استاد راهنما محمد جواد ولدان زوج و مهدی مختارزاده.
- عرب نرمی، حمید (۱۳۹۲)، بررسی های معدنی و زمین شناسی منطقه همیچ با استفاده از تصاویر سنجنده های ETM+ و ASTER به روش نقشه بردار زاویه طیفی (SAM)، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه بیرجند، استاد راهنما غلامرضا نوروزی و جواد صدری
- غیوری (۱۳۷۹)، گزارش بررسی کانسار مس قزلداش خوی، شرکت ملی صنایع مس ایران، معاونت برنامه ریزی و توسعه امور اکتشاف
- لطفی، مریم. قنبری، حمید. عارفی، حسین، بحرودی، عباس (۱۳۹۶)، نگاشت مناطق آلتراسیون با استفاده از مدل آمیخته گاوسی و نقشه بردار زاویه طیفی، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، ۶(۴)، ۲۱۷-۲۲۹
- معصوم زاده (مترجم)، حسن (۱۳۷۶)، کاربرد عکس های ماهواره ای جهت اکتشاف معادن زیرزمینی، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۶(۲۱)، ۴۴-۳۹
- مرادزاده، محسن (۱۳۸۹)، استفاده از تصاویر فراطیفی هایپریون در شناسایی و مطالعه میزان رس و کربنات کلسیم در خاک های آبرفتی، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز، استاد راهنما کاظم رنگزن و برات مجردی
- محرابی، علیرضا (۱۳۹۰)، ارزیابی پتانسیل فناوری سنجنش از دور در شناسایی و تخمین سطحی میزان کانی های صنعتی، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، استاد راهنما مهدی مختارزاده و برات مجردی
- نیکتا، میثم (۱۳۹۱). آنالیز داده های فراطیفی به منظور پتانسیل یابی نواحی مستعد اکتشاف کانی های فلزی در غرب کرمان. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس. استاد راهنما روشنگ درویش زاده.
- نجفیان، طاهر. رنجبر، حجت الله. و فتحیان پور، نادر (۱۳۹۲)، شناسایی دگرسانی های گرمابی مرتبط با کانسارهای مس پورفیری با استفاده از داده های سنجنده فراطیفی هایپریون، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، ۸(۱۸)، ۳۷-۵۰.

هاشمی تنگستانی، مجید، و غلامی، محبوبه (۱۳۹۲)، مقایسه رده بندی کننده های زیر پیکسلی و تمام پیکسلی برای تعیین فراوانی رس و کربنات سازند مارنی میشان با استفاده از داده های استر، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، ۲۱(۲)، ۲۷۷-۲۸۸.

Chang, C.I. and Plaza, A., ۲۰۰۶. A fast iterative algorithm for implementation of pixel purity index. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, ۳(۱), pp. ۶۳-۶۷.

Chaudhry, F., Wu, C.C., Liu, W., Chang, C.I. and Plaza, A., ۲۰۰۶. Pixel purity index-based algorithms for endmember extraction from hyperspectral imagery. *Recent advances in hyperspectral signal and image processing*, ۳۷(۲), pp. ۲۹-۶۲.

Dennison, P.E., Halligan, K.Q. and Roberts, D.A., ۲۰۰۴. A comparison of error metrics and constraints for multiple endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper. *Remote Sensing of Environment*, ۹۳(۳), pp. ۳۵۹-۳۶۷.

De Carvalho, O.A., de Carvalho, A.P.F., Guimaraes, R.F., Lopes, R.A.S., Guimaraes, P.A., de Souza Martins, E. and Pedreno, J.N., ۲۰۰۳, July. Classification of hyperspectral image using SCM methods for geobotanical analysis in the brazilian savanna region. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, ۲۰۰۳. IGARSS ۰۳. Proceedings. ۲۰۰۳ IEEE International (Vol. ۶, pp. ۳۷۵۴-۳۷۵۶). IEEE.

Ellis, J. R. and Scott, W. P. (۲۰۰۴). Evaluation of hyperspectral remote sensing as a means of environmental monitoring in the St. Austell Chinaclay (kaolin) region, Cornwall, UK. *Remote Sensing of Environment* ۹۳, pp ۱۳-۱۱۸.

Gruninger, J.H., Ratkowski, A.J. and Hoke, M.L., ۲۰۰۴, August. The sequential maximum angle convex cone (SMACC) endmember model. In *Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery X*(Vol. ۵۴۲۵, pp. ۱-۱۵). International Society for Optics and Photonics.

Iordache, M.D., Bioucas-Dias, J.M. and Plaza, A., ۲۰۱۱. Sparse unmixing of hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, ۴۹(۶), pp. ۲۰۱۴-۲۰۳۹.

Keshava, N., ۲۰۰۳. A survey of spectral unmixing algorithms. Lincoln laboratory journal, ۱۴(۱), pp.۵۵-۷۸.

Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J., Netto, M. J. and Masson, M. J. (۲۰۰۸). Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. Remote Sensing of Environment ۱۱۲ (۲۰۰۸) ۸۲۵- ۸۳۵

Nascimento, J.M. and Dias, J.M., ۲۰۰۵. Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, ۴۳(۴), pp.۸۹۸-۹۱۰.

Santos-García, A. and Velez-Reyes, M., ۲۰۱۰, June. Identifiability of geometric models for linear unmixing at different spatial resolutions in hyperspectral unmixing. In Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), ۲۰۱۰ ۲nd Workshop on (pp. ۱-۴). IEEE.

Shao, Y. and Lunetta, R.S., ۲۰۱۲. Comparison of support vector machine, neural network, and CART algorithms for the land-cover classification using limited training data points. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, ۷۰, pp.۷۸-۸۷.

Yang, C., Everitt, J.H. and Bradford, J.M., ۲۰۰۸. Yield estimation from hyperspectral imagery using spectral angle mapper (SAM). Transactions of the ASABE, ۵۱(۲), pp.۷۲۹-۷۳۷.

Yuhas, R.H., Goetz, A.F. and Boardman, J.W., ۱۹۹۲. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm.