

پردازش داده‌های فراطیفی هایپریون در منطقه آق داغ اردبیل و شناسایی کانی‌ها به روش تطبیق همزمان نوری (ORASIS)

حمید ذکری^۱؛ مجید محمدی اسکویی*^۲؛ توحید نوری^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ h.zekri@mi.iut.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز؛ mohammady@sut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز؛ t_nouri@sut.ac.ir

(دریافت ۱۵ مرداد ۱۳۹۲، پذیرش ۲۳ آبان ۱۳۹۴)

چکیده

تشخیص و شناسایی اعضای انتهایی یکی از موارد مهم در بالا بردن صحت روش‌های تجزیه طیفی در دورسنجی است. در سال‌های اخیر، روش‌هایی که متکی بر وجود تعدادی پیکسل خالص در تصویر هستند توسعه بیشتری داشته‌اند؛ حال آن که این روش‌ها در مطالعات کانی‌شناسی که احتمال وجود پیکسل‌های خالص در داخل تصویر پائین است، مشکلاتی را ایجاد می‌کنند. هدف از این مطالعه، بررسی روش ORASIS برای تشخیص اعضای انتهایی موجود در داده‌های هایپریون منطقه آق داغ اردبیل و مقایسه‌ی نتایج با روش اندیس خلوص پیکسلی (PPI) است. مزیت این روش با توجه به مشکل عدم حضور پیکسل خالص در دورسنجی اکتشافی، این است که شامل الگوریتم‌هایی می‌باشد که به صورت هوشمندانه‌ای عمل قیاس را با فضای خارج از مجموعه داده‌ها انجام می‌دهد و منجر به تولید اعضای انتهایی می‌شود که لزوماً داخل تصویر نیستند. با اعمال ORASIS روی داده‌های هایپریون منطقه، ۲۳ عضو انتهایی تولید شدند. شناسایی اعضای انتهایی و اختصاص ترکیب‌های کانی‌شناسی مختلف از طریق آنالیز طیفی و مقایسه نمودارهای طیفی آن‌ها با کتابخانه‌ی طیفی USGS با استفاده از تکنیک‌های SAM و SFF انجام شد. در نهایت ۱۰ ترکیب کانی-شناسی غالب هورنبلند، آرسنوپیریت، کائولینیت، ورمیکولیت، ژیبس، لپیدولیت، لیمونیت، آلونیت، چرت و مالاکیت در منطقه شناسایی شدند. در مقابل، روش PPI، ۵ ترکیب کانی‌شناسی غالب کائولینیت/اسمکتیت، کلینوپتیلولیت، سلسیان، موسکوویت و مونتموریونیت را شناسایی کرد. نقشه‌های فراوانی و طبقه‌بندی حاصل از روش جداسازی طیفی خطی مربوط به دو روش ORASIS و PPI با گزارش‌های زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه و مشاهدات صحرایی تحت مقایسه و بررسی قرار گرفتند که نتایج نشان از برتری و صحت عملکرد روش ORASIS در زمینه تشخیص اعضای انتهایی از دیدگاه کانی‌شناسی دارد.

کلمات کلیدی

تجزیه طیفی، دورسنجی فراطیفی، اعضای انتهایی، ORASIS، اندیس خلوص پیکسلی

۱- مقدمه

اکتشافی نیاز به روش‌های استخراج اعضای انتهایی بدون نیاز به وجود پیکسل‌های خالص در داخل تصویر دیده می‌شود.

هدف از این مطالعه، بررسی عملکرد روش سیستم شناسایی طیفی تطبیق همزمان نوری (ORASIS^۱) به عنوان یک الگوریتم توانمند در زمینه تشخیص اعضای انتهایی و برای برطرف کردن مشکل حضور پیکسل مخلوط در مطالعات کانی شناسی است. ایده اولیه این روش ابتدا توسط جفری بوئلس و همکاران در بخش دورسنجی آزمایشگاه تحقیقات نیروی دریایی ایالات متحده ارائه شد و هدف از توسعه آن، یافتن اهداف پنهان در تصاویر فراطیفی به صورت آنی و سریع بوده است [۸]. این روش مجموعه‌ای از الگوریتم‌های گام به گام است که برای تولید اعضای انتهایی که لزوماً در داخل تصویر موجود نیستند، با یکدیگر کار می‌کنند. بخشی از این الگوریتم که هدف آن تولید اعضای انتهایی است، بسته‌بندی انقباضی^۲ نام دارد و هوشمندانه نواحی خارج از مجموعه داده‌ها را برای یافتن اعضا انتهایی که ممکن است نزدیک‌تر از بقیه طیف‌های موجود در داده به مواد خالص باشند، برون‌یابی می‌کند [۹]. بوئلس و همکاران در تحقیقی از مزیت‌های کار با این روش سخن گفته‌اند؛ که می‌توان به‌طور خلاصه به توانایی خوب این روش در کار با فضایی با ابعاد پائین، سرعت عملکرد مناسب، توانایی حداکثرسازی زوایای طیفی بین اعضای انتهایی هدف و پیکسل‌های حد زمینه، قابلیت شناسایی اعضای انتهایی کمیاب در پیکسل‌های مخلوط (ناخالص) و همچنین روشی برای فشرده‌سازی تصاویر فراطیفی اشاره کرد [۱۰].

در این راستا، ابتدا در بخش دوم به مفهوم آنالیز طیفی و تجزیه طیفی خطی خواهیم پرداخت. سپس بحث با معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه و ویژگی‌های زمین‌شناسی آن در بخش سوم ادامه خواهد یافت. بخش چهارم به پردازش طیفی داده‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، اعمال روش ORASIS روی این داده‌ها، مقایسه‌ی نتایج این روش با نتایج روش اندیس خلوص پیکسلی (PPI) به عنوان یک روش بر پایه‌ی فرض وجود پیکسل‌های خالص در تصویر و در نهایت بحث و تفسیر نتایج به دست آمده اختصاص خواهد داشت. این مطالعه در بخش آخر با نتیجه‌گیری از کارهای انجام یافته و ارائه‌ی پیشنهادها در مبحث تعیین اعضای انتهایی به پایان خواهد رسید.

۲- تجزیه طیفی

اغلب برای استفاده از داده‌های فراطیفی لازم است پیکسل‌های مخلوط به مجموعه‌ای از نشانه‌های اعضای انتهایی و کسر-

استفاده از دورسنجی در مطالعات اولیه و ناحیه‌ای اکتشاف مواد معدنی امری ضروری بوده و در چند دهه‌ی اخیر با توسعه-ی سنجنده‌های فراطیفی (هایپراسپکترال^۱)، پژوهش‌های زیادی در زمینه اکتشاف مواد معدنی انجام شده است. در این میان اطلاعات بسیار مفیدی از مواد روی سطح زمین به دست آمده است.

سنجنده‌های فراطیفی تصاویر خود را در فواصل طول موجی نزدیک و با تعداد باندهای زیاد به پهنای چند ده نانومتر جمع‌آوری می‌کنند. تصویربرداری فراطیفی، دریافت همزمان تصاویر سطح زمین در تعداد زیادی از باندهای طیفی پیوسته و باریک است؛ بنابراین با پردازش این تصاویر امکان استخراج پروفیل‌های طیفی دقیق و پیوسته برای هر پیکسل وجود دارد [۱]. سنجنده‌های فراطیفی برای نمونه‌برداری از بخش پراکنده‌ی طیف الکترومغناطیس متغیر از ناحیه‌ی مرئی تا ناحیه مادون قرمز نزدیک و متوسط در صدها باند کم عرض توسعه یافته‌اند [۲]. این سنجنده‌ها قدرت تفکیک طیفی بالایی دارند که اجازه‌ی شناسایی مستقیم مواد روی سطح زمین را بر اساس ویژگی‌های انعکاسی آن‌ها می‌دهد.

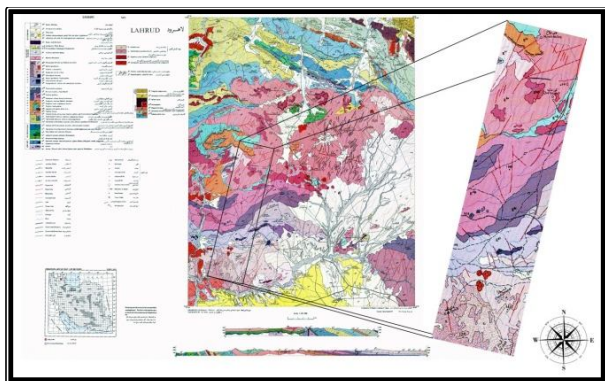
یک مشکل معمول موجود در تصاویر ماهواره‌ای، حضور گسترده‌ی پیکسل‌های مخلوط^۲ است. طیف اندازه‌گیری شده از یک پیکسل، ترکیبی از طیف‌های پوشش دهنده‌ی سطح آن است که با عنوان اعضای انتهایی^۳ شناخته می‌شوند و سپس بر اساس فراوانی‌شان وزن‌دهی می‌شوند [۳]. تشخیص و شناسایی اعضای انتهایی یکی از موارد مهم در بالا بردن صحت روش‌های جداسازی (تجزیه طیفی) در دورسنجی است. روش‌هایی که در این زمینه متکی بر وجود تعدادی پیکسل خالص^۴ در داخل تصویر هستند تا کنون اهمیت و توسعه بیشتری داشته‌اند؛ حال آن که این روش‌ها در مطالعات کانی‌شناسی که احتمال وجود پیکسل‌های خالص در داخل تصویر پائین است، مشکلاتی را ایجاد می‌کنند. تکنیک‌های کلاسیک و معمول شامل اندیس خلوص پیکسلی (PPI)^۴، [4] N-FINDR [۵,۶]، آنالیز خطای تکرار شونده (IEA)^۵ [۷] و آنالیز مولفه رأسی (VCA)^۶ [۲] هستند. از مزایای تکنیک‌های معرفی شده راحتی کاربرد و سرعت پردازش بالا است در مقابل تمامی آن‌ها بر اساس فرض پیکسل خالص، استخراج اعضای انتهایی را انجام می‌دهند، همچنین در مواقعی که تعداد پیکسل‌های خالص در تصویر کم است، در تشخیص اعضای انتهایی که ویژگی‌هایی طیفی نزدیک به هم دارند دچار مشکل می‌شوند. بر این اساس، در دورسنجی

۳- زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در شمال‌غربی کشور و در غرب استان اردبیل واقع شده است. این منطقه حدوداً در ۱۶۰ کیلومتری شمال شرق شهر تبریز، و ۱۲۰ کیلومتری شهر اردبیل قرار دارد. لازم به ذکر است که در جنوب شرقی این محدوده در فاصله‌ی حدوداً ۵۰ کیلومتری از آن کوه ۴۸۱۱ متری سبلان قرار دارد.

۳-۱- ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه

محدوده‌ی مطالعه در ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود واقع شده است، این ورقه در غرب استان اردبیل و بین طول‌های جغرافیایی ۳۰° ۴۷' تا ۳۸° ۳۰' و عرض‌های جغرافیایی ۳۹° ۳۰' تا ۳۹° ۳۹' قرار دارد (شکل ۱). با توجه به گسترش نواحی آلتراسیون کائولینیتی، آلونیتی و سیلیسی در جنوب غربی ورقه‌ی لاهرود واقع در شمال روستای احمد بیگلو، و معرفی این منطقه به عنوان منطقه‌ی امید بخش طلای اپی‌ترمال توسط فریبرز بنی-آدم و همچنین در دسترس بودن داده‌های هایپریون این محدوده، منطقه‌ی مشخص شده در شکل ۱ برای پردازش طیفی و استخراج اعضای انتهایی انتخاب شده است [۱۴].



شکل ۱: ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود و موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه [۱۵].

برای بررسی بهتر این محدوده، نقشه‌ی زمین‌شناسی این بخش در نرم‌افزار ArcMap 9.3 تهیه شده است تا ویژگی‌های زمین‌شناسی این منطقه به صورت بارز و مناسبی معرفی و بحث شوند. نقشه‌ی تهیه شده در شکل ۲ بخش‌های سنگ-شناسی مختلف منطقه را به خوبی از هم تفکیک می‌کند.

های فراوانی متناظرشان تجزیه شوند. این فرآیند، تجزیه طیفی و یا تجزیه پیکسل مخلوط نام دارد [۳]. تجزیه طیفی از اولین روزهای تصویربرداری فراطیفی تا کنون یک هدف استخراجی قابل توجه بوده است [۱۱]. همه‌ی نشانه‌های طیفی جمع‌آوری شده در محیط‌های طبیعی بدون توجه به این‌که سنجنده چه قدرت تفکیک مکانی دارد، همواره مخلوطی از نشانه‌های مواد مختلف یافته شده در محدوده مکانی زاویه دید آبی سنجنده می‌باشند [۱۲]. دسترسی داشتن به تصویربردارهای فراطیفی با تعداد باندهای طیفی بیشتر از اجزا مخلوط طیفی، این قابلیت را می‌دهد تا مسئله‌ی جداسازی را بر حسب یک سیستم فرامعینی از معادلات بگنجانند که در آن‌ها به مجموعه‌ای از نشانه‌های طیفی خالص (اعضای انتهایی)، عمل جداسازی برای تعیین کسر فراوانی پیکسل ظاهری اعمال می‌شوند [۱۳].

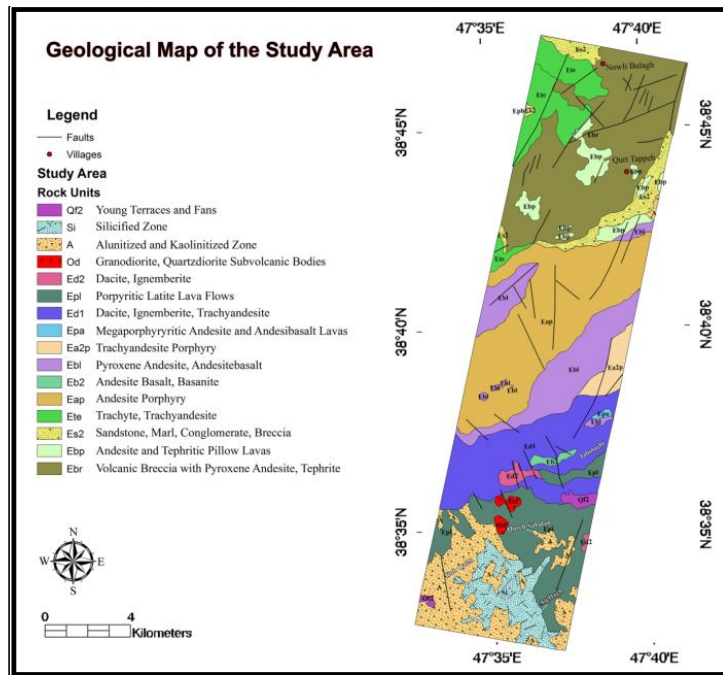
یکی از تکنیک‌های استاندارد برای تجزیه ترکیب طیفی، تجزیه طیفی خطی است؛ این روش فرض می‌نماید که طیف-های گرفته شده توسط طیف‌سنج (اسپکترومتر) به صورت فرمی از ترکیب خطی اعضای انتهایی وزن‌دهی شده بر اساس کسرهای فراوانی آن‌ها نشان داده می‌شوند.

فرض می‌شود، یک تصویر^{۱۱} فراطیفی n باند دارد که توسط ماتریس I مشخص می‌شود، و مختصات مکانی به صورت مجزا (i, j) برای هر پیکسل به شکل $X(i, j) = [x_1(i, j), x_2(i, j), \dots, x_n(i, j)] \in \mathbb{R}^n$ نشان داده می‌شود که \mathbb{R} مجموعه‌ای از اعداد حقیقی است که بیانگر انعکاس طیفی هر پیکسل (i, j) در باندهای $k=1, \dots, n$ سنجنده است. با استفاده از مدل خطی، هر بردار پیکسل در تصویر اصلی را می‌توان به ترتیب زیر نوشت:

$$X(i, j) = \sum_{z=1}^p \Phi_z(i, j) \cdot E_z + n(i, j) \quad (1)$$

که در این رابطه E_z نشان‌دهنده‌ی انعکاس طیفی عضو انتهایی Z و Φ_z ارزش اسکالر تخصیص یافته به نسبت فراوانی عضو انتهایی Z در پیکسل $X(i, j)$ است، p نیز تعداد کلی اعضا انتهایی و $n(i, j)$ بردار نوفه^{۱۲} است.

دو قید (محدودیت فیزیکی) اغلب در مدل توصیف شده ۱ در نظر گرفته می‌شوند: غیرمنفی بودن فراوانی‌ها (ANC^{13}) یعنی $\Phi_z(i, j) > 0$ و دیگری شرط واحد بودن جمع فراوانی یعنی $(ASC^{14}) \sum_{z=1}^p \Phi_z(i, j) = 1$ [۳].



شکل ۲: نقشه‌ی زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه‌ی مورد مطالعه.

۳-۱-۲- بخش‌های مرکزی

قسمت اعظم بخش‌های مرکزی را واحدهای آندزیت و تراکی آندزیت پرفیری (Ea2p و Eap) تشکیل می‌دهد که روی این واحدها آندزیت‌های پیروکسین‌دار و همچنین آندزیت-بازالت‌ها (Ebl) در بخش‌هایی رخمون دارند [۱۵]. با توجه به این‌که آندزیت سنگ خروجی حد واسط بین داسیت و بازالت است، توالی مناسبی از این سنگ‌ها در این نواحی مشاهده می‌شود؛ به طوری که در بخش پائینی واحدهای آندزیتی سنگ‌های داسیتی همراه با تراکی آندزیت و پیروکلاستیک‌های ایگنمبریت (Ed1 و Ed2) مشاهده می‌شود و همچنین در قسمت‌های پائین‌تر گدازه‌های بازالتی و باسانیتی (Eb2) گسترش دارند. تمامی واحدهای سنگی حاضر در این بخش‌ها نیز به سن ائوسن هستند. واحدهای سنگی ذکر شده اغلب دارای سیلیس زیاد همراه با مقادیری از پلاژیوکلازها، آلکالی فلدسپارها و بیوتیت هستند و همچنین حضور پیروکسین علی‌الخصوص در بخش‌های آندزیتی و داسیتی مشاهده شده است [۱۵]. در بخش‌های شرقی در نزدیکی کوه جَبَل‌اغی رگچه‌های نازکی از آرسنیک مشاهده شده است که از لحاظ زمین‌شناسی اقتصادی اهمیت دارند [۱۴].

۳-۱-۳- بخش‌های جنوبی

این محدوده در گوشه‌ی جنوب غربی ورقه یکصد هزارم لاهرود، و در شمال اتصال رودخانه‌های قره‌سو و اهرچای واقع

منطقه‌ی مورد مطالعه را می‌توان به سه بخش شمالی، مرکزی و جنوبی تقسیم‌بندی کرد که با توجه شکل (۲) در ادامه به‌توصیف این مناطق بر اساس نقشه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ لاهرود و گزارش مناطق امید بخش این ورقه پرداخته می‌شود [۸،۷]

۳-۱-۱- بخش‌های شمالی

واحدهای زمین‌شناسی دربرگیرنده‌ی این منطقه عبارتند از: سنگ‌های ولکانیکی با ترکیب آندزیت و تراکی آندزیت (Ete)، برش‌های ولکانیکی با ترکیب آندزیت پیروکسن و تفریت (Ebr)، گدازه‌های بالشی آندزیتی-تفریتی (Ebp) و همچنین ماسه‌سنگ، مارن، کنگلومرا و برش (Es2) که همگی به سن ائوسن می‌باشند [۱۵]. قدیمی‌ترین سنگ‌های این بخش و کل محدوده مربوط به سنگ‌های ولکانیکی آندزیتی، تراکی آندزیتی و تفریتی می‌باشند که قسمت اعظمی از بخش‌های شمالی محدوده را در بر می‌گیرند. بخش‌هایی از سنگ‌های ولکانیکی در این محدوده تحت تأثیر فرآیندهای گرمایی قرار گرفته و از شدت کم تا زیاد دگرسان شده‌اند. نوع دگرسانی در این منطقه اغلب کائولینیتی است، که در بخش‌های شرقی در زون کوچکی در شکل ۲ نمایان است (A). رگچه‌های هماتیتی و لیمونیتی فراوان در متن بخش‌های آلتزه به فراوانی قابل مشاهده است. زون‌های دگرسانی با تنوع رنگی فراوان از سفید تا قهوه‌ای و لیمویی در این بخش‌ها دیده می‌شوند [۱۴].

به همراه نتایج حاصل از این روش و مقایسه با نتایج حاصل از روش معمول PPI تشریح داده شده‌اند.

لازم به ذکر است، مراحل برنامه‌نویسی و اجرای الگوریتم-های مختلف ORASIS در محیط نرم‌افزار MATLAB[®] انجام شدند. پس از استخراج اعضای انتهایی، ادامه‌ی کارهای پردازشی انجام شده روی تصاویر و همچنین اجرای روش اندیس خلوص پیکسلی توسط نرم‌افزار ENVI 4.7[®] حاصل شده است که در نهایت منجر به تولید نقشه‌های فراوانی و تصاویر طبقه‌بندی ترکیب‌های کانی شناسایی شده توسط این دو روش در منطقه شده است.

۴-۱- داده‌های فراطیفی مورد استفاده

داده‌های استفاده شده برای انجام پردازش طیفی و استخراج اعضای انتهایی، زیرتصویری تهیه شده از یک تصویر سنجنده‌ی هایپرین پوشش‌دهنده‌ی بخش‌های غربی استان اردبیل است. این داده‌ها دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و پهنای باند طیفی ۱۰ نانومتر بوده و دارای ۲۲۰ باند در بازه‌ی طول موجی ۳۵۶ تا ۲۵۷۷ نانومتر (VNIR^{۱۵} و SWIR^{۱۶}) هستند. ابعاد تصویر اصلی ۲۴۸۳×۲۳۰ پیکسل، معادل با ۶/۹×۷۴/۴۹۰ کیلومتر است که برای مطالعه‌ی نواحی معرفی شده، زیرتصویری با ابعاد ۸۹۲×۲۳۰ پیکسل معادل با ۶/۹×۲۶/۷۶۰ کیلومتر از بخش بالایی رودخانه‌ی قره‌سو انتخاب شده است (شکل ۳). برای کاهش عوامل تداخل و نوفه، پیش-پردازش داده‌ها شامل ارزیابی کیفی داده‌ها، تصحیح‌های اتمسفری و توپوگرافی نیز به منظور استخراج اطلاعات دقیق روی داده‌ها صورت گرفته است.

۴-۲- استخراج اعضای انتهایی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش ORASIS

سیستم شناسایی طیفی تطبیق همزمان نوری (ORASIS) مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها است که برای تعیین اعضای انتهایی که لزوماً داخل تصویر نیستند، با یکدیگر کار می‌کنند. این روش بر اساس مدل ترکیب خطی، کار شناسایی اعضای انتهایی و تجزیه طیفی را انجام می‌دهد. گیلیس و بوئلس به‌طور دقیق به تشریح الگوریتم‌های گام به گام این روش پرداخته‌اند [۹، ۱۶]. مراحل انجام شده روی داده‌ها بر اساس اصول ارائه شده توسط توسعه‌دهندگان روش ORASIS با هدف استخراج اعضای انتهایی داده‌های هایپرین منطقه در ادامه تشریح می‌شوند.

شده است. واحدهای تشکیل دهنده‌ی بخش‌های جنوبی، جوان‌ترین سنگ‌های منطقه می‌باشند. جوان‌ترین بخش‌های این ناحیه، پادگانه‌های جدید و مخروط افکنه‌ها (Qf2) هستند؛ که در بخش‌های شرقی و جنوب‌غربی مشاهده می‌شوند و دارای سن کواترنری می‌باشند. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی این منطقه نیز مربوط به گدازه‌های لاتیت پرفیری (Ep1) است که گسترش نسبتاً زیادی در این نواحی دارند؛ این گدازه‌ها بر خلاف بخش‌های مرکزی دارای سیلیس کمی می‌باشند [۱۵]. بین سنگ‌های ولکانیکی به سن آئوسن با ترکیب توفی، آندزیتی، لاتیت آندزیتی و لاتیتی، سنگ‌های نفوذی نیمه عمیق با ترکیب گرانودیوریت و کوارتزیدیوریت با سن الیگوسن (Od) در بخش‌های شمالی این محدوده رخنمون دارند. بخش‌های گسترده‌ای از سنگ‌های آندزیتی و لاتیتی در اثر فرآیندهای گرمایی با شدت‌های مختلف دچار دگرسانی از نوع کائولینیتی-آلونیتی (A)، سیلیسی (Si) و اکسیدآهنی شده‌اند. رنگ بخش‌های زیادی از این منطقه در اثر حضور اکسید آهن قهوه‌ای و لیمویی شده است. در بخش‌هایی از این مناطق، کانی‌های اتومورف پیریت و یا قالب‌های تهی حاصل از انحلال پیریت‌ها دیده می‌شود و در برخی نقاط نیز در اثر تبدیل این پیریت‌ها به هماتیت و لیمونیت و سایر اکسیدهای آهن رنگ زون آلتزه به قهوه‌ای تیره و لیمویی گراییده است. به همین دلیل به طور کلی سنگ‌های منطقه با طیف رنگی از سفید تا خاکستری و قهوه‌ای تا لیمویی قابل مشاهده هستند. همچنین در برخی موارد در درزه‌های موجود در نقاط دگرسان، آغستگی به ملاکیت دیده می‌شود [۱۴]. شایان توجه است که با بازدید-های صحرائی عمل آمده از مناطق دارای آلتراسیون‌های آلونیتی، در بخش‌هایی کانی ژیبس نیز مشاهده شده است که همانند بخش‌های آلونیتی به صورت سولفات می‌باشد. نکته‌ی قابل ملاحظه به لحاظ زمین‌شناسی اقتصادی علاوه بر آلتراسیون گسترده منطقه، حضور رگ‌ها و رگچه‌های سیلیسی فراوان در بخش‌هایی از محدوده مورد بررسی است. قسمت‌های جنوبی منطقه‌ی مورد مطالعه، مهم‌ترین بخش‌ها از لحاظ اقتصادی و امیدبخش‌ترین نواحی معرفی شده‌ی منطقه از لحاظ کانی‌سازی طلا می‌باشند [۱۴].

۴- پردازش طیفی داده‌ها

در این بخش پردازش‌های طیفی انجام شده بر روی داده-های فراطیفی منطقه تشریح می‌شود. در ابتدا به معرفی داده-های استفاده شده و تصحیح‌های انجام شده روی آن‌ها پرداخته شده است؛ در ادامه نیز الگوریتم‌های مختلف روش ORASIS

این مجموعه اختصاص یابد ادامه پیدا می کند [۹].

منظور از «تشابه کافی»، زاویه $\theta(X_i, E_j)$ بین طیف تصویر X_i و سرمشق E_j است که بایستی کوچکتر از زاویه خطای از قبل تعیین شده θ_T باشد. زاویه بین دو بردار به شکل زیر بیان می شود:

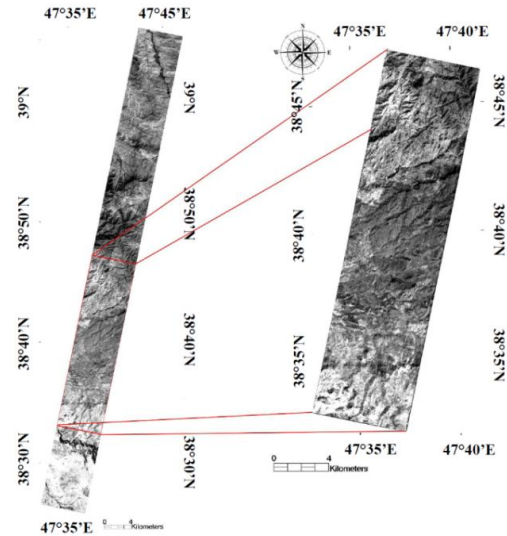
$$\theta(X_i, E_j) = \cos^{-1} \left(\frac{|\langle X_i, E_j \rangle|}{\|X_i\| \cdot \|E_j\|} \right) \quad (2)$$

که $\langle \#, \# \rangle$ بیان گر ضرب نقطه ای معمولی (اقلیدسی) بردارها و $\| \# \|$ بیان گر نرم اقلیدسی است [۹]. در این مطالعه، θ_T برابر $2/2$ درجه در نظر گرفته شده است که بر اساس این زاویه طیفی حدآستانه (θ_T)، در نهایت تعداد سرمشق های استخراج شده $1/6$ داده های اولیه را شامل خواهند شد که به صورت مناسبی توصیف کننده ی کل داده های اولیه هستند.

با اعمال این الگوریتم روی داده های هایپریون منطقه، در نهایت تعداد ۲۱۷۱۴ سرمشق متمایز از بین ۲۰۵۱۶۰ پیکسل حاضر در تصویر منطقه استخراج شدند ($1/6$ کل داده ها). در ادامه لازم است هر پیکسل تصویر با یکی از سرمشق ها جایگزین شده و تصویر جدیدی به نام «تصویر تراکم یافته» حاصل شود. در زیر بخش بعدی این مرحله توصیف می شود.

۴-۲-۱-ب- جانشین سازی کدبوک^{۱۸}

دومین دستورالعمل اصلی پیش غربال گر، فرآیند جانشین سازی کدبوک است، که هر طیف مازاد (یعنی غیر سرمشق) داخل تصویر را با یک طیف سرمشق جایگزین می کند. این فرآیند تنها روی تطبیق با سرمشق ها تأثیر می گذارد و محتوای طیفی مجموعه ی سرمشق ها را تغییر نمی دهد؛ بنابراین، تأثیری روی پردازش های بعدی نخواهد گذاشت [۹]. بهترین روش موجود در این خصوص، «بهترین برازش^{۱۹}» یا «جستجوی کارآمد همسایه نزدیک ($ENNS^2$)» نام دارد. در این روش، یک طیف داوطلب با سرمشق ها مقایسه می شود و پس از یافتن اولین تطبیق، احتمال تقریبی وجود تطبیقی بهتر محاسبه و نسبت به ادامه جستجو تصمیم گرفته می شود. اگر احتمال محاسبه شده از حدآستانه ای (تعیین شده توسط کاربر) کم تر باشد، جستجو متوقف و طیف داوطلب توسط سرمشق تطبیقی کنونی جانشین می شود. در غیر این صورت، پارامتر خطا به زاویه بین داوطلب و بهترین سرمشق تطبیقی کنونی تغییر می یابد. به این ترتیب با ایجاد یک ناحیه ی احتمال جدید و کوچکتر جستجو ادامه می یابد. جستجو تا جایی ادامه می یابد



شکل ۳: باند ۱ از تصویر تصحیح یافته ی هایپریون (چپ) و زیر تصویر جدا شده از آن (راست).

۴-۲-۱-الف- الگوریتم پیش غربالگر

مدول پیش غربالگر در ORASIS دو عملکرد اصلی دارد: جایگزینی مجموعه ی بزرگ طیف های داده های اصلی با یک مجموعه ی کوچک معرف که سرمشق^{۱۷} نام دارند و الحاق هر طیف تصویر با یک عضو مجموعه ی سرمشق ها. دو دلیل برای انجام این کار وجود دارد: اول این که با انتخاب یک مجموعه ی کوچک از سرمشق ها که به طور کامل بیان گر داده های تصویر هستند، پردازش مجدد با سرعت بیشتری انجام می شود؛ همچنین با جایگزینی هر طیف اصلی با یک سرمشق، مقدار داده هایی که برای بیان تصویر ذخیره می شوند به مقدار قابل توجهی کاهش می یابند [۹]. در ORASIS این دو مرحله دارای ارتباط نزدیکی با یکدیگرند؛ با این حال برای راحتی تفسیر، مرحله ی انتخاب سرمشق و بحث فرآیند جایگزینی جداگانه بررسی می شوند.

۴-۲-۱-الف- انتخاب سرمشق

در هر مرحله از فرآیند، یک طیف تصویر X_i خوانده می شود و با مجموعه ی فعلی سرمشق ها مقایسه می شود. اگر مجموعه خالی باشد، X_i اولین سرمشق عنوان می گیرد و در غیر این صورت، X_i با مجموعه سرمشق های E_1, \dots, E_m مقایسه می شود. اگر X_i به اندازه کافی با یکی از آن ها مشابه باشد، «مازاد» در نظر گرفته شده و با یکی از سرمشق ها جایگزین می شود و در صورت عدم وجود یک سرمشق با «تشابه کافی» به مجموعه سرمشق: $E_{m+1} = X_i$ اضافه می شود. این فرآیند تا جایی که هر طیف داخل تصویر به یک مجموعه سرمشق و یا شاخصی داخل

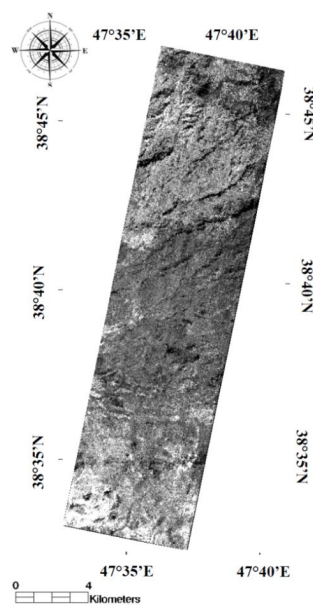
زیرفضا، پیچیدگی‌های محاسباتی را کاهش داده (با کار کردن در ابعاد فضایی کوچک‌تر) و همچنین به کاهش نوفه نیز منجر خواهد شد. روش‌های زیادی برای تعیین این زیر فضا ارائه شده است [۹]. الگوریتم اصلی انتخاب مبنای ORASIS که در این مطالعه نیز از این روش استفاده شده، از یک شیوه‌ی مشابه گرام اشمیت^{۲۲} برای ساختن متوالی مجموعه‌ای از بردارهای مبنای متعامد بهره می‌گیرد. این روش تا زمانی که بزرگترین باقیمانده^{۲۳} از سرمشق‌های تصویر شده، کوچک‌تر از یک حدآستانه تعیین شده توسط کاربر باشد، بردارهای متمایز مبنایی را اضافه می‌کند [۹].

الگوریتم با یافتن دو سرمشق $S_{i(1)}$ و $S_{i(2)}$ که دارای بزرگترین زاویه بین خودشان هستند، شروع می‌شود. این دو سرمشق با عنوان «برجسته»^{۲۴} شناخته می‌شوند و با اندیس-های $i(1)$ و $i(2)$ برای استفاده در مرحله انتخاب عضو انتهایی ذخیره می‌شوند. دو سرمشق برجسته‌ی یک‌متعامد^{۲۵} شده و تشکیل دو بردار مبنای ابتدایی B_1 و B_2 را می‌دهند. سپس، مجموعه‌ی سرمشق‌ها در یک زیرفضای دوبعدی ایجاد شده توسط B_1 و B_2 تصویر می‌شوند. لازم است باقیمانده‌ی تمامی این سرمشق‌ها بعد از تصویرسازی محاسبه شوند. اگر مقدار بزرگترین باقیمانده کوچکتر از یک حدآستانه از قبل تعیین شده باشد، فرآیند به انتها می‌رسد. در غیر این صورت، سرمشق با بزرگترین باقیمانده (S_j) به مجموعه برجسته اضافه می‌شود و فهرست ذخیره می‌شود. این سرمشق به مجموعه‌ی مبنای کنونی (با استفاده از فرآیند گرام اشمیت) متعامد می‌شود تا سومین بردار مبنای B_3 را تشکیل دهد. حال سرمشق‌ها روی یک فضای سه بعدی تعریف شده توسط B_1, B_2, B_3 تصویر و فرآیند تکرار می‌شود. این عمل تا جایی که باقیمانده به حدآستانه‌ای برسد یا یک تعداد حداکثر از قبل تعیین شده‌ای از بردارهای مبنا انتخاب شوند، ادامه پیدا می‌کند [۹].

برای به دست آوردن متوالی بردارهای متعامد، نیاز به ایجاد یک حد آستانه‌ی حداقل برای مقدار باقیمانده‌ها و یا دستیابی به یک تعداد حداکثری از بردارهای متعامد دیده می‌شود. بر همین اساس، با توجه به این واقعیت که تعداد سرمشق‌های برجسته خروجی از این الگوریتم همان تعداد اعضای انتهایی اولیه تصویر می‌باشند، در این مطالعه از یک تکنیک تخمین ابعاد درونی داده‌ها ($VD^{۲۶}$) استفاده شده است. با توجه به این-که این تکنیک‌ها تخمینی از تعداد اعضای انتهایی موجود در تصاویر دورسنجی را ارائه می‌دهند، بنابراین یکی از مهمترین گام‌ها در بحث تشخیص اعضای انتهایی و متعاقب آن در تجزیه

که یا تمامی سرمشق‌های ممکن آزمایش شده باشند یا احتمال یافتن یک تطبیق بهتر از تطبیق کنونی برای جستجو بسیار کم باشد [۹].

در این تحقیق، حدفاصلی در سطح اعتماد ۹۵٪ برای ناحیه‌ی احتمال وضع شده است و خروجی این بخش از الگوریتم، ماتریس برداری (M) است که هر درایه‌ی موجود در آن نشان دهنده‌ی عدد (کد) متناظر هر پیکسل با سرمشق تطبیق یافته آن است. پس از استخراج ماتریس سرمشق‌ها (E) و متعاقب آن ماتریس حاوی سرمشق‌های متناظر (M)، با جایگزینی سرمشق‌های تولید شده به جای پیکسل‌های تصویر اولیه، تصویر جدیدی تولید شد که تراکم یافته‌ی تصویر منطقه بوده و دارای همان ابعاد است، با این تفاوت که متشکل از ۲۱۷۱۴ سرمشق متمایز است که در سرتاسر تصویر تکرار شده-اند (شکل ۴).



شکل ۴: تصویر احیاشده (تراکم‌یافته) مربوط به باندهای داده‌های هایپریون منطقه.

۴-۲-۳- الگوریتم انتخاب مبنا^{۲۱}

پس از اجرای الگوریتم پیش‌غربال‌گر و محاسبه‌ی سرمشق-ها، گام بعدی تصویرسازی مجموعه سرمشق‌ها روی یک زیرفضای مناسب با ابعاد کوچک است. این کار به دلیل اساس مدل ترکیب خطی است که با چشم‌پوشی از نوفه، داده‌ها باید در زیرفضایی که توسط خود اعضا انتهایی محدود شده‌اند، قرار گیرند. اگر بتوان چنین زیرفضایی را پیدا کرد، تنها نیاز است مبنای «صحیح» برای زیرفضای یافته شده جهت تعیین اعضا انتهایی مشخص شود. از طرفی دیگر، تصویر داده‌ها روی این

سرمشق برجسته به عنوان خروجی الگوریتم تعیین مبنا خواهیم داشت. بر اساس برنامه‌ی نوشته شده، حداکثر زاویه‌ی طیفی بین دو سرمشق برجسته‌ی ابتدایی، $0/8598$ رادیان (معادل $49/26$ درجه) محاسبه گشته که مربوط به سرمشق‌های 9918 و 10260 است. بنابراین دو سرمشق برجسته اولیه، $S_1=E_{9918}$ و $S_2=E_{10260}$ عنوان گرفته‌اند (E، ماتریس مربوط به سرمشق‌ها است). در ادامه طبق روندی که گفته شد و در قالب برنامه‌ی که در محیط نرم افزار $MATLAB^{\text{®}}$ نوشته شده است، ۲۳ بردار مبنا استخراج گردیده که مقادیر مربوط به بزرگترین باقیمانده‌ها و سرمشق‌های برجسته‌ی استخراج شده در هر مرحله از تصویرسازی در جدول ۲ ثبت شده‌اند. لازم به ذکر است که این الگوریتم ۲۳ سرمشق برجسته را به عنوان اعضای انتهایی اولیه حاصل کرده است که در واقع ورودی الگوریتم بعدی روش $ORASIS$ می‌باشد که با عنوان الگوریتم تعیین عضو انتهایی بحث خواهد شد.

جدول ۲: مقادیر باقیمانده‌ی بدست آمده از هر مرحله تصویرسازی سرمشق‌ها روی بردارهای مبنا و سرمشق‌های برجسته استخراج شده

زاویه = $0/8598$ رادیان		S_1	S_2
		$E(9918,;)$	$E(10260,;)$
باقیمانده	سرمشق انتخابی	مرحله تصویرسازی	
۱۵۷۸۷	$E(9286,;)$	Proj. ۱	S_3
۱۴۳۹۶	$E(6145,;)$	proj. ۲	S_4
۵۱۸۴/۳	$E(4682,;)$	Proj. ۳	S_5
۴۵۰۹/۱	$E(10728,;)$	Proj. ۴	S_6
۳۳۵۸/۶	$E(19454,;)$	Proj. ۵	S_7
۲۶۸۱/۶	$E(21333,;)$	Proj. ۶	S_8
۲۰۳۷/۳	$E(13881,;)$	Proj. ۷	S_9
۱۷۹۹/۲	$E(5316,;)$	Proj. ۸	S_{10}
۱۶۵۵/۶	$E(8803,;)$	Proj. ۹	S_{11}
۱۵۴۵/۸	$E(8918,;)$	Proj. ۱۰	S_{12}
۱۳۱۸/۱	$E(5546,;)$	Proj. ۱۱	S_{13}
۱۲۷۴/۸	$E(11518,;)$	Proj. ۱۲	S_{14}
۱۲۴۳/۶	$E(7693,;)$	Proj. ۱۳	S_{15}
۱۲۱۸/۵	$E(13131,;)$	Proj. ۱۴	S_{16}
۱۱۵۱/۴	$E(21132,;)$	Proj. ۱۵	S_{17}
۱۱۱۳/۵	$E(16481,;)$	Proj. ۱۶	S_{18}
۱۰۸۷/۵	$E(3768,;)$	Proj. ۱۷	S_{19}
۱۰۸۳/۶	$E(2648,;)$	Proj. ۱۸	S_{20}
۱۰۷۴	$E(2632,;)$	Proj. ۱۹	S_{21}
۱۰۲۶/۴	$E(13711,;)$	Proj. ۲۰	S_{22}
۱۰۰۲/۸	$E(21470,;)$	Proj. ۲۱	S_{23}

طیفی، بحث تخمین ابعاد درونی داده‌ها می‌باشد. از جمله روش‌هایی که در سال‌های اخیر در مطالعات مختلف دورسنجی استفاده شده‌اند، کسر نوفه حداقل (MNF^{TV})، آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA^{TA}) و روش آماری مرتبه‌ی بالای HFC^{T9} هستند. این روش‌ها در حقیقت تعداد اعضای انتهایی قابل تشخیص در تصویر را ارائه می‌نمایند. بدون پرداختن مفصل به نحوه‌ی عملکرد دو روش MNF و PCA در امر تعیین VD تصاویر فراطیفی، لازم به ذکر است در این روش‌ها که بر اساس ارزیابی واریانس باندهای مختلف عمل می‌کنند، برخی از کانی‌ها به دلیل داشتن کسر انرژی کمتری نسبت به کل انرژی اندازه-گیری شده توسط سنجنده، نادیده گرفته می‌شوند و در نتیجه تخمینی که این دو روش ارائه می‌دهند کمتر از تعداد واقعی خواهد بود [۱۷, ۱۸].

با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، در این مطالعه نیز از روش HFC برای تعیین تعداد اعضای انتهایی قابل تشخیص در تصویر هایپریون منطقه استفاده شده است [۱۷-۱۹].

با اعمال روش HFC در محیط $MATLAB^{\text{®}}$ بر روی داده‌های هایپریون منطقه، مقادیر VD موجود در تصویر با مقدار احتمال هشدار خطاهای مختلف (P_{Fa}) حاصل گشته و در جدول ۱ مشخص است.

جدول ۱: نتایج تخمین VD به روش HFC با P_{Fa} های مختلف.

P_{Fa}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
Estimated VD	۱۴	۱۶	۱۸	۱۹	۲۳	۲۷

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار P_{Fa} ، مقدار VD تخمین زده شده نیز افزایش می‌یابد. با توجه به مطالعات انجام شده در مراجع [۱۰-۱۲]، مقادیر $0/001$ و $0/0001$ برای P_F جهت تخمین مناسب VD پیشنهاد شده‌اند. بر این اساس، در این مطالعه نیز از مقدار $P_{Fa}=0/0001$ استفاده شده که ابعاد درونی تخمین زده شده توسط این روش با توجه به جدول ۱، برابر ۲۳ محاسبه گشته است. این عدد بیان‌گر تعداد اعضای انتهایی قابل تشخیص در تصویر بوده که با توجه به مطالعات پی‌جویی انجام شده‌ی قبلی و هم‌چنین نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه، مقداری معقول است [۱۴, ۱۵].

خروجی این روش، نقطه‌ی توقفی است برای اجرای الگوریتم تعیین مبنا $ORASIS$ ، تا بدین وسیله اعضای انتهایی اولیه حاصل شوند. به عبارتی ساده‌تر، در نهایت ۲۳

۴-۲-۴- الگوریتم انتخاب اعضای انتهایی

کاربرد تجزیه طیفی خطی بدون محدودیت^{۲۲}، یافتن دورترین E از سادک اولیه را میسر ساخته است. در این مدل از دو محدودیت فیزیکی مدل ترکیب خطی (ASC و ANC) چشم-پوشی می‌شود تا بتوان به هدف مورد نظر نائل گشت [۱۶]. با باز نویسی رابطه‌ی ۱ برای هر سرمشق E به صورت زیر، دو حالت ممکن است پیش بیاید:

$$E = \sum_{z=1}^{23} \Phi_z \cdot S_z \quad (۳)$$

- ۱- فراوانی تمامی سرمشق‌های برجسته که با Φ_z تعریف می‌شوند، بزرگتر از صفر باشند؛ در این صورت سادک کنونی در برگیرنده‌ی تمامی سرمشق‌ها بوده و رئوس آن اعضای انتهایی هستند.
- ۲- حداقل یکی از Φ_z ها کوچک تر از صفر باشد؛ سادک فعلی بهینه نبوده و لازم است تا حدی بزرگتر شود که تمامی سرمشق‌ها را پوشش دهد.

با اجرای تجزیه طیفی بدون محدودیت بر روی سرمشق‌ها، همان طور که پیش‌بینی می‌شد مقادیری از Φ_z در بین فراوانی‌ها حاصل شده‌اند که منفی هستند. بنابراین قطعاً نیاز است در ادامه با اعمال الگوریتم بسته‌بندی انقباضی، سادک فعلی بزرگتر شود. برای این منظور، از بین فراوانی‌های محاسبه شده، منفی‌ترین مقدار فراوانی جستجو می‌شود و سرمشق برجسته‌ی متناظر با آن یافته می‌شود [۱۶]. این سرمشق برجسته که در حقیقت رأسی از سادک فعلی است، ثابت نگه داشته شده و بقیه‌ی رئوس سادک به سمت خارج فضای داده‌ها بزرگتر می‌شوند [۱۶]. پس از بزرگنمایی اولیه‌ی سادک، تجزیه طیفی بدون محدودیت دوباره بر روی همان سرمشق‌ها ولی با اعضای انتهایی جدید تولید شده اعمال می‌شود و بار دیگر منفی‌ترین فراوانی و عضو انتهایی متناظرش استخراج می‌شود. عضو انتهایی فعلی ثابت مانده، و بقیه رئوس دوباره به سمت خارج فضای داده‌ها جابه‌جا می‌شوند. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا خواهد که بین فراوانی‌های حاصل، مقدار منفی دیگر وجود نداشته باشد. این حالت بیانگر این واقعیت است که سادک متشکل از اعضای انتهایی مجازی کنونی در برگیرنده‌ی تمامی داده‌های تصویر بوده و به عنوان اعضای انتهایی مورد نظر در روش ORASIS معرفی می‌شوند. جهت روشن‌تر شدن موضوع، در ادامه نحوه‌ی عملکرد الگوریتم و بزرگنمایی سادک در هر مرحله تشریح می‌شود.

مرحله‌ی بعدی در پردازش ORASIS، الگوریتم تعیین عضو انتهایی یا به اصطلاح «بسته‌بندی انقباضی» است. در مدل ترکیب خطی، بردارهای اعضای انتهایی یک زیرفضای k-بعدی حاوی داده‌ها را تشکیل می‌دهند (k برابر تعداد اعضای انتهایی). با اعمال دو محدودیت ANC و ASC (توصیف شده در بخش ۲)، شرایط جدیدی ایجاد می‌شود که در آن اعضای انتهایی در واقع رئوس یک سادک $k-1$ بعدی است که شامل داده‌های تصویر است [۱۶]. سادک، ساده‌ترین شیء هندسی است که دارای فضایی از یک بعد معین است. به‌عنوان مثال، در فضای سه بعدی، سادک یک چهار وجهی است. رئوس یک سادک توسط طیف‌های اعضا انتهایی تعیین می‌شود. فضای داخلی سادک بیان‌گر ترکیبات محتمل هر ماده است که رابطه‌ی ۱ و دو محدودیت ذکر شده در آن‌ها صادق است [۵].

روش ORASIS از ایده‌ی اشاره شده استفاده کرده و اعضای انتهایی را به عنوان رئوس یک سادک بهینه تعریف می‌نماید که به صورت محفظه‌ای داده‌های تصویر را در بر می‌گیرند [۲۰]. هدف از ORASIS تشخیص «اعضای انتهایی مجازی» (آن‌هایی که داخل مجموعه داده‌ها نیستند) و برون‌یابی آن‌ها از ترکیبات حاضر در داخل داده‌ها است [۱۶].

ورودی الگوریتم، مجموعه‌ی ۲۳ سرمشق برجسته‌ی حاصل شده از مرحله‌ی قبلی است. این سرمشق‌های برجسته (Sها) در یک فضای ۲۲-بعدی تشکیل سادکی با ۲۳ رأس را داده‌اند. ایده‌ی اساسی الگوریتم بسته‌بندی انقباضی، بزرگنمایی سیستماتیک رئوس این سادک به سمت خارج فضای داده‌ها می‌باشد. در هر گام رئوس جدیدی از سادک فعلی ایجاد شده و سادکی بزرگ‌تر تولید می‌شود. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی ۲۱۷۱۴ سرمشق موجود، داخل سادک جدید تولید شده قرار بگیرند.

در ابتدای این الگوریتم، ضروری است شرط قرارگیری تمامی ۲۱۷۱۴ سرمشق، داخل سادک متشکل از ۲۳ سرمشق برجسته بررسی شود. اگر شرط برقرار باشد، سرمشق‌های برجسته در حقیقت همان اعضای انتهایی نهایی خواهند بود. در حالی که در اکثریت قریب به اتفاق موارد، حداقل یک سرمشق وجود خواهد داشت که خارج از سادک اولیه قرار می‌گیرند [۱۶]. در این مطالعه جهت بررسی این موضوع، سرمشق حداکثر (E_{max}) از مجموعه‌ی سرمشق‌ها یافته شد که در واقع در طولانی‌ترین فاصله از سادک اولیه قرار دارد. در این راستا

برای سادگی نمایش نحوه عملکرد الگوریتم بسته‌بندی انقباضی، فرض می‌شود که داده‌ها در یک فضای ۳-بعدی تصویر شده‌اند و ۴ عضو انتهایی (S_1, S_2, S_3, S_4) رئوس یک سادک چهاروجهی را تشکیل می‌دهند. شکل ۵ تفسیری شماتیک از این اعضای انتهایی را ارائه می‌دهد. در این شکل نقاط سبز رنگ داده‌هایی را که داخل سادک هستند را نشان می‌دهد و نقاط قرمز رنگ متعلق به داده‌های خارج از سادک هستند. هدف این است که تمامی این داده‌ها داخل سادک متشکل از اعضای انتهایی قرار بگیرند. فرض بر این است که بعد از اعمال مرحله‌ی اول تجزیه طیفی بدون محدودیت، منفی-ترین فراوانی مربوط به عضو انتهایی S_4 است. بنابراین بر اساس اصول ذکر شده، لازم است این رأس از سادک ثابت نگه داشته شده و بقیه‌ی رئوس بزرگتر شوند (شکل ۵ قسمت ب). برای حفظ برای بزرگنمایی سادک در اضلاع منتهی به رأس S_4 ، ابتدا نیاز است اختلاف رئوس S_1, S_2, S_3 از رأس S_4 یافته شود؛ یعنی با توجه به قسمت الف شکل ۵ می‌توان نوشت:

ثابت هستند. انتخاب ضریب α بسیار مهم می‌باشد، چرا که در الگوریتم بسته‌بندی انقباضی هدف ایجاد یک سادک بهینه است؛ به طوری که هم حجم حداقل داشته باشد و هم تمامی سرمشق‌های موجود را در برگیرد. اگر α انتخاب شده بیش از اندازه بزرگ باشد، سادک با این که با تکرار دفعات محدود الگوریتم تمامی داده‌ها را در بر خواهد گرفت اما این سادک بسیار بزرگ بوده و شرط حداقل حجم رعایت نخواهد شد. از طرفی اگر این ضریب بسیار کوچک باشد، مدت زمان زیادی برای پردازش و بزرگنمایی سادک نیاز است. با توجه به حجم داده‌ها و همچنین قدرت و سرعت پردازش‌گر کامپیوترهای در دسترس به هیچ وجه انتخاب چنین ضریب بزرگنمایی معقول نیست. بر این اساس، در این مطالعه با استفاده از آزمون سعی و خطا مقدار $\alpha=0.001$ به عنوان ضریب بزرگنمایی انتخاب شده است. مدت زمان پردازش با این مقدار معقول بوده و حدود ۵ دقیقه به طول انجامید. در نهایت تمامی فراوانی‌های حاصل از اجرای آخرین مرحله‌ی تجزیه طیفی بدون محدودیت بزرگتر از صفر حاصل شده‌اند. بنابراین، رئوس سادک فعلی ۲۳ عضو انتهایی مجازی و نهایی حاصل از اجرای الگوریتم‌های گام‌به‌گام ORASIS را ارائه داده و با توجه به دربرگیری تمامی سرمشق-های موجود در فضای داده‌ها، سادکی بهینه است.

$$\vec{d}_{1,4} = \vec{S}_1 - \vec{S}_4 \quad (4)$$

$$\vec{d}_{2,4} = \vec{S}_2 - \vec{S}_4 \quad (5)$$

$$\vec{d}_{3,4} = \vec{S}_3 - \vec{S}_4 \quad (6)$$

حال با توجه به قسمت ب شکل (۵)، رئوس جدید با استفاده از رابطه‌های زیر حاصل می‌شوند:

$$\vec{S}'_1 = \vec{S}_1 + \alpha \vec{d}_{1,4} \quad (7)$$

$$\vec{S}'_2 = \vec{S}_2 + \alpha \vec{d}_{2,4} \quad (8)$$

$$\vec{S}'_3 = \vec{S}_3 + \alpha \vec{d}_{3,4} \quad (9)$$

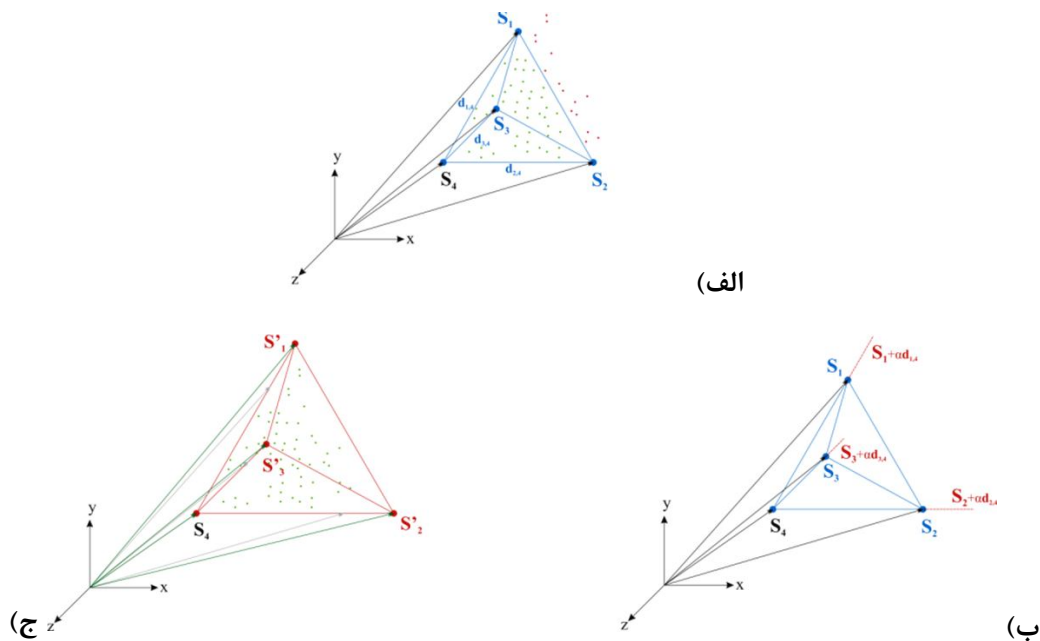
که در این رابطه‌ها α ضریب ثابتی است و با اصطلاح ضریب بزرگنمایی سادک معرفی می‌شود. همان‌طور که در قسمت ج شکل (۵) به وضوح مشاهده می‌شود، داده‌هایی که در قسمت الف خارج از سادک بودند، با بزرگنمایی ایجاد شده داخل سادک کنونی قرار گرفته‌اند. روابط یادشده‌ی فوق را می‌توان به شکل زیر برای داده‌های مورد مطالعه نیز تعمیم داد:

$$\vec{S}'_i \quad (10)$$

در این رابطه، \vec{S}'_i عضو انتهایی (رأس) اولیه، \vec{S}_i عضو انتهایی جدید به‌دست آمده، α ضریب بزرگنمایی سادک و

۴-۳- شناسایی نمودارهای طیفی اعضای انتهایی

۲۳ عضو انتهایی بدست آمده از روش ORASIS، مربوط به مواد ناشناخته‌ای هستند. جهت تهیه‌ی نقشه‌ی فراوانی این اعضای انتهایی مجهول نیاز است پس از تهیه‌ی نمودارهای طیفی آن‌ها، کار شناسایی و اختصاص آن‌ها به کانی‌های مختلف انجام شود. برای این منظور، ضروری است که نمودار-های طیفی این اعضای انتهایی با طیف‌های موجود در کتابخانه‌های طیفی^{۳۳} مقایسه شوند. غالباً در آنالیز طیف‌سنجی از تکنیک‌های نقشه‌بردار زاویه‌ی طیفی (SAM^{34}) و تطبیق ساختار طیفی (SFF^{35}) استفاده می‌شود و میزان انطباق طیف-های موجود در کتابخانه‌ی طیفی با طیف هر یک از اعضای انتهایی سنجیده شده و بر اساس درجه‌ی انطباق رتبه بندی انجام می‌پذیرد [۲۱].



شکل ۵: مثالی شماتیک از بزرگنمایی یک سادک چهاروجهی در فضای سه بعدی.

تطابق بالا، تطابق بصری نداشته و از لیست اعضای انتهایی شناخته شده کنار گذاشته شده‌اند.

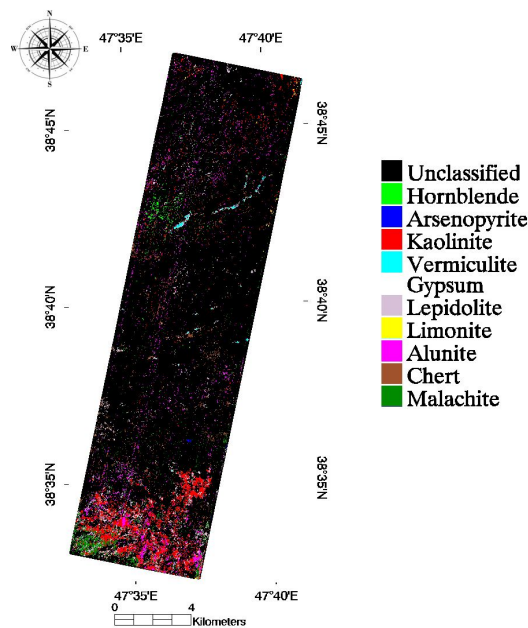
جدول ۳: ترکیب‌های کانی‌شناسی غالب اختصاص یافته به اعضای انتهایی مجهول حاصل از روش ORASIS بر اساس امتیازهای SAM و SFF.

عضو انتهایی	امتیاز SFF	امتیاز SAM	امتیاز میانگین	ترکیب کانی شناسی غالب تشخیص داده شده
EM4	۰/۹۲۴	۰/۹۳۳	۰/۹۲۹	هالونیسیت/کاتولینیت
EM5	۰/۸۶۱	۰/۸۵۷	۰/۸۵۹	هورنبلند
EM6	۰/۸۸۹	۰/۸۵۹	۰/۸۷۴	آرسنوپیریت
EM7	۰/۷۸۱	۰/۷۲۳	۰/۷۵۲	دیکیت
EM8	۰/۷۹۵	۰/۷۰۸	۰/۷۵۱	ورمیکولیت
EM9	۰/۸۸۹	۰/۸۸۵	۰/۸۸۷	آلونیت
EM10	۰/۸۹۵	۰/۹۱۸	۰/۹۰۶	لپیدولیت
EM12	۰/۸۹۲	۰/۸۸۳	۰/۸۸۸	آلونیت
EM13	۰/۷۹۵	۰/۸۰۰	۰/۷۹۷	ژپس
EM15	۰/۷۵۶	۰/۶۸۳	۰/۷۲۰	لپیدولیت
EM16	۰/۸۷۷	۰/۷۸۹	۰/۸۳۳	آرسنوپیریت
EM17	۰/۸۸۱	۰/۸۶۲	۰/۸۷۲	لیمونیت
EM18	۰/۸۴۰	۰/۸۴۵	۰/۸۴۲	آلونیت
EM19	۰/۸۳۳	۰/۷۶۵	۰/۷۹۹	چرت
EM20	۰/۸۶۵	۰/۸۰۴	۰/۸۳۵	هماتیت
EM21	۰/۷۰۹	۰/۶۶۸	۰/۶۸۸	مالاکیت
EM22	۰/۸۲۰	۰/۷۸۵	۰/۸۰۲	آرسنوپیریت

با بررسی جدول ۳ مشخص می‌شود که اعضای انتهایی ۹،

در این مطالعه، از کتابخانه‌ی طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS^{۳۶}) برای عمل شناسایی استفاده شده است. برای مقایسه لازم بود ابتدا کتابخانه‌ی طیفی مرجع بر طبق محدوده‌های طیفی اعضای انتهایی که همان محدوده‌های طیفی باندهای تصویر مورد مطالعه می‌باشند، سازگار^{۳۷} شوند. با استفاده از دو تکنیک SAM و SFF و اختصاص وزن یکسان (۰/۵) به هر دو روش، مقایسه‌ی تمامی نمودارهای طیفی اعضای انتهایی مجهول (EMها) با نمودارهای طیفی مرجع در محیط نرم افزار ENVI انجام و مقادیر انطباق آن‌ها استخراج گردید. مقادیر انطباق SAM، SFF و امتیاز میانگین آن‌ها برای بهترین ترکیب‌های کانی‌شناسی غالب تطبیق یافته با طیف‌های مجهول در جدول ۳ ثبت شده‌اند. امتیازهای حاصل شده بین ۰ تا ۱ تنظیم شده‌اند که مقدار ۱، نشان دهنده‌ی تطابق کامل است. در تصمیم‌گیری برای اختصاص یک ترکیب کانی شناسی غالب معین به یک عضو انتهایی مجهول، علاوه بر در نظر گرفتن تطابق‌های دارای امتیاز بالا، به مقایسه‌ی بصری ساختار-های طیفی نیز توجه شده است تا بهترین انطباق برگزیده شود. از میان ۲۳ عضو انتهایی موجود، به ۶ عضو انتهایی ۱، ۲، ۳، ۱۱، ۱۴ و ۲۳ به دلیل نداشتن هیچ‌گونه تطابق بصری و دارا بودن امتیاز تطابق بسیار پائین، هیچ ترکیب کانی شناسی خاصی اختصاص داده نشده است و از لیست اعضای انتهایی حذف شده‌اند. از ۱۷ عضو انتهایی باقیمانده، ۱۴ عضو انتهایی دارای هم تطابق بصری و هم امتیاز بالای تطابق بوده‌اند و در نهایت ۳ عضو انتهایی ۱۶، ۲۰ و ۲۲ علی‌رغم داشتن امتیاز

پس از استخراج تصاویر فراوانی مربوط به هر یک از اعضای انتهایی از روش جداسازی طیفی خطی، لازم است برای ایجاد نقشه‌ی فراوانی نهایی، عمل طبقه‌بندی انجام شود تا پیکسل‌های مربوط به هر یک از اعضای انتهایی در یک تصویر کلی از یکدیگر تفکیک شوند. مدول «رول کلاسیفایر»^{۴۱} (دسته‌بندی کننده‌ی تصاویر فراوانی) در نرم‌افزار ENVI این امر را میسر ساخته است. در این مطالعه با محاسبه‌ی پارامترهای آمار کلاسیک برای هر یک از تصاویر فراوانی، مقدار حد آستانه‌ی $3\sigma + \bar{x}$ برای هر یک از آن‌ها در نظر گرفته شده است. σ و \bar{x} به ترتیب برابر با میانگین و انحراف معیار مقادیر فراوانی مربوط به هر تصویر فراوانی است. در نهایت، تصویر طبقه‌بندی حاصل از روش جداسازی طیفی خطی در شکل ۷ قابل مشاهده است. کانی‌های هالوسیت و دیکیت دارای ترکیب شیمیایی یکسان با کانی کائولینیت می‌باشند و تنها از لحاظ ساختار بلوری با این کانی تفاوت دارند، به همین دلیل برای انجام طبقه‌بندی، اعضای انتهایی ۴ و ۷ با عنوان کائولینیت نشان داده شده‌اند.

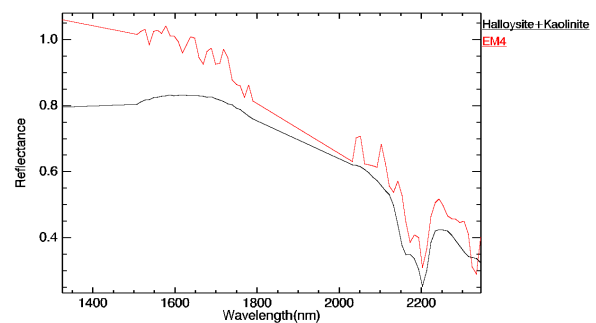


شکل ۷: نقشه‌ی طبقه‌بندی تصاویر رول مربوط به اعضا انتهایی تعیین شده توسط روش ORASIS.

۴-۶- اندیس خلوص پیکسلی (PPI)

برای ارزیابی عملکرد روش ORASIS و مقایسه نتایج آن با نتایج اعمال روش اندیس خلوص پیکسلی (PPI) روی داده‌های منطقه، در ادامه‌ی بحث به تئوری و نتایج این روش پرداخته می‌شود. این روش یکی از معمول‌ترین روش‌های تشخیص اعضای انتهایی است و ایده‌ی آن بر پایه فرض حضور پیکسل-

۱۲ و ۱۸ مربوط به ترکیب کانی شناسی غالب آلونیت، ۱۰ و ۱۵ مربوط به ترکیب کانی شناسی غالب لپیدولیت می‌باشند و بقیه ترکیب‌های کانی‌شناسی غالب اختصاص داده شده به اعضای انتهایی شامل هالوسیت/کائولینیت، هورنبلند، آرسنوپیریت، دیکیت، ورمیکولیت، لپیدولیت، ژپس، چرت، هماتیت و مالاکیت هستند. به عنوان نمونه، در شکل ۶ بهترین تطابق بصری ایجاد شده در نمودار طیفی عضو انتهایی ۴ با ترکیب کانی شناسی غالب کائولینیت/هالوسیت کتابخانه‌ی طیفی USGS نمایش داده شده است.



شکل ۶: تطابق بصری نمودار طیفی عضو انتهایی ۴ حاصل از روش ORASIS با ترکیب کانی شناسی غالب کائولینیت و هالوسیت

۴-۴- تهیه‌ی نقشه‌های فراوانی کانی‌ها در منطقه

بر اساس مدل ترکیب خطی (رابطه‌ی ۱)، پس از مشخص شدن ترکیب‌های کانی‌شناسی غالب اختصاص یافته به هر کدام از ۱۴ عضو انتهایی شناسایی شده، برای تعیین ضرایب Φ_z متناظر با هر یک از اعضای انتهایی، نیاز است که نقشه‌های فراوانی^{۳۸} آن‌ها در منطقه تهیه شوند. برای این منظور از بین روش‌های موجود، در محیط نرم‌افزار ENVI، مدول نقشه-برداری جداسازی طیفی خطی با اعمال دو قید (محدودیت) غیرمنفی بودن فراوانی‌ها و شرط واحد بودن جمع فراوانی‌ها به کار رفته است. دلیل انتخاب این روش این است که اصول روش ORASIS بر روش جداسازی طیفی خطی بنا نهاده شده است [۹]. در این روش مقادیر فراوانی هر ۱۴ عضو انتهایی در هر یک از پیکسل‌ها محاسبه شده و ۱۵ تصویر خاکستری^{۳۹} به‌عنوان خروجی ایجاد شده است. ۱۴ تصویر، مربوط به نقشه‌ی فراوانی هر یک از اعضای انتهایی بوده و تصویر آخر مربوط به نوفه‌ی موجود در داده‌ها است، که تحت عنوان تصویر جذر میانگین مربعات ($RMS^{۴۰}$) از آن یاد می‌شود.

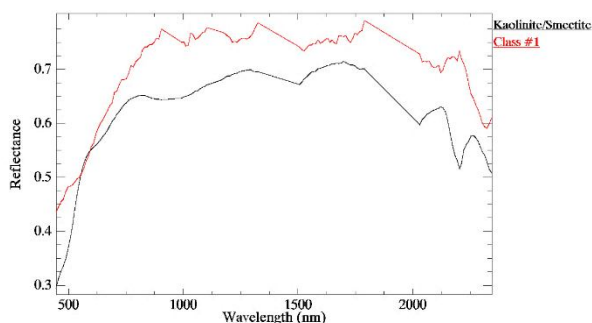
۴-۵- طبقه‌بندی

انطباق SAM، SFF و امتیاز میانگین آن‌ها برای بهترین کانی-های تطبیق یافته با طیف‌های مجهول ۱۰ کلاس حاصل از روش PPI در جدول ۴ ثبت شده‌اند.

جدول ۴. ترکیب‌های کانی‌شناسی غالب اختصاص یافته به اعضای انتهایی مجهول حاصل از روش PPI بر اساس امتیازهای SAM و SFF.

عضو انتهایی	امتیاز SFF	امتیاز SAM	امتیاز میانگین	ترکیب کانی شناسی غالب تشخیص داده شده
Class 1	۰/۹۶۸	۰/۹۳۸	۰/۹۵۳	کائولینیت / اسمکتیت
Class 2	۰/۹۱۳	۰/۹۱۳	۰/۹۱۳	کلینوپتیلولیت
Class 3	۰/۹۲۲	۰/۹۴۷	۰/۹۳۴	سلسیان
Class 4	۰/۹۲۶	۰/۹۴۰	۰/۹۳۳	کائولینیت / اسمکتیت
Class 5	۰/۹۴۵	۰/۹۳۳	۰/۹۳۹	کلینوپتیلولیت
Class 6	۰/۹۰۱	۰/۹۳۱	۰/۹۱۶	کائولینیت / اسمکتیت
Class 7	۰/۹۶۴	۰/۹۴۰	۰/۹۵۲	موسکوویت
Class 8	۰/۹۰۰	۰/۹۱۶	۰/۹۰۸	کائولینیت / اسمکتیت
Class 9	۰/۹۵۴	۰/۹۳۲	۰/۹۴۳	مونتموریونیت
Class 10	۰/۹۰۱	۰/۹۳۲	۰/۹۱۶	کائولینیت / اسمکتیت

با توجه به جدول ۴، مشاهده می‌شود که ۵ کانی کائولینیت/اسمکتیت، کلینوپتیلولیت، سلسیان، موسکوویت و مونتموریونیت به ۱۰ عضو انتهایی استخراج شده از روش PPI اطلاق شده‌اند. در تصمیم‌گیری برای اطلاق کانی‌ها به هر یک از این کلاس تطابق بصری نیز عامل تعیین کننده بوده که به عنوان نمونه، در شکل ۹ بهترین تطابق بصری ایجاد شده در نمودار طیفی عضو انتهایی کلاس ۱ با کانی کائولینیت/اسمکتیت کتابخانه‌ی طیفی USGS نمایش داده شده است.

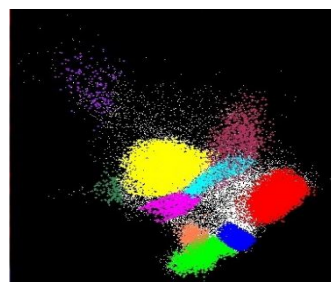


شکل ۹: تطابق بصری نمودار طیفی عضو انتهایی کلاس ۱ حاصل از روش PPI با ترکیب کانی شناسی غالب کائولینیت/اسمکتیت.

با شناسایی اعضای انتهایی حاصل از روش PPI، تصاویر فراوانی هر یک از آن‌ها توسط روش جداسازی طیفی خطی به دست آمد و همانند روش ORASIS تصویر طبقه‌بندی

های خالص در تصویر بنا شده است. الگوریتم PPI ابتدا توسط بوردمن و همکاران معرفی و سپس در سیستم‌های تحقیقاتی کداک ENVI ثبت شده است، این روش نیز همانند روش ORASIS از اصول جداسازی طیفی خطی استفاده می‌نماید؛ با این تفاوت که پیکسل‌های مخلوط تصویر به صورت ترکیب خطی از «اعضای انتهایی خالص» تعریف می‌شوند [۴]. در این روش برای استخراج مناسب اعضا انتهایی، بایستی ابعاد درونی داده‌ها تعیین شده و عمل جداسازی نوفه انجام گیرد؛ بدین منظور از الگوریتم تبدیل کسر نوفه حداقل (MNF) استفاده می‌شود. سپس اعضای انتهایی توسط تکنیک‌های اندیس خلوص پیکسلی (PPI) و تجسم گر n- بعدی از تصاویر MNF حاصل می‌شوند [۲۲].

ابعاد درونی داده‌ها بر اساس نتایج MNF، $VD=12$ حاصل شد و سپس با اعمال الگوریتم PPI روی تصاویر MNF، پیکسل‌های خالص منطقه مشخص شدند. در نرم‌افزار ENVI اقدام به خوشه‌بندی پیکسل‌های خالص توسط تجسم گر n- بعدی در فضای ۱۲- بعدی شد و در نهایت ۱۰ خوشه با رنگ‌های مختلف به صورت بصری تشخیص داده شدند (شکل ۸). همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، توزیع فضایی پیکسل‌های خالص به شکلی می‌باشد که عمل خوشه‌بندی را مشکل می‌کند و بر خلاف ابعاد درونی داده‌ها که توسط روش MNF، ۱۲ حاصل شده بود، تنها امکان تمایز و خوشه‌بندی ۱۰ کلاس میسر بوده است.



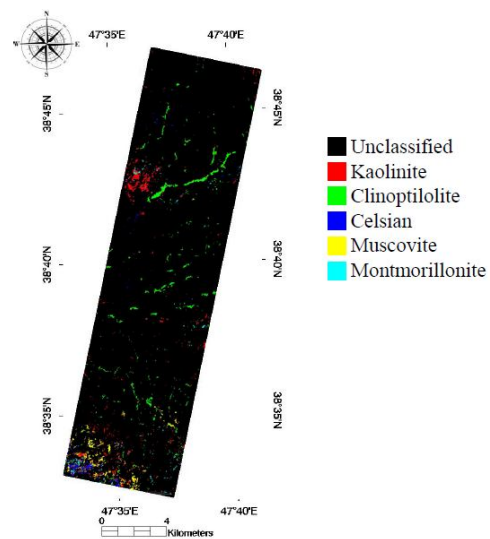
شکل ۸: خوشه‌بندی پیکسل‌های خالص حاصل از روش PPI. ۱۰ کلاس خوشه‌بندی به صورت بصری تفکیک و استخراج شده‌اند.

پروفیل طیفی میانگین هر کدام از این ۱۰ خوشه استخراج شدند و به عنوان اعضای انتهایی حاصل از روش PPI جهت انطباق با پروفیل‌های طیفی کتابخانه USGS توسط روش‌های SAM و SFF در نظر گرفته شدند. مراحل تطبیق اعضای انتهایی ناشناخته حاصل از روش PPI با پروفیل‌های کتابخانه‌ای و شناسایی ترکیب‌های کانی شناسی غالب متناظر نیز همانند آنچه که در زیر بخش ۳-۴ توصیف شد، انجام شدند. مقادیر

لپیدولیت جزو فیلوسیلیکات‌ها هستند، حضور این کانی‌ها در این واحد سنگی معقول است. همچنین در قسمت‌های شمال غربی، پیکسل‌هایی به رنگ سبز روشن مشاهده می‌شود که مربوط به ترکیب کانی شناسی غالب هورنبلند می‌باشند. با توجه به نقشه‌ی زمین شناسی، این نواحی در واحدهای سنگی Ebr و Ebp واقع شده‌اند؛ که به ترتیب دربرگیرنده‌ی گدازه‌های بالشی آندزیتی - تفریتی و برش‌های ولکانیکی با ترکیب آندزیت پیروکسن و تفریت هستند. بنابراین با توجه به این که هورنبلند نوعی آمفیبول است، دارای بیش از ۵۰٪ SiO_2 بوده و در سنگ‌های آندزیتی نیز مشاهده می‌شود، حضور این کانی در این نواحی منطقی است. بر اساس گزارش زمین‌شناسی منطقه در بخش‌های مرکزی این منطقه واحدهای سنگی موجود دارای سیلیس زیادی می‌باشند [۱۵]. پیکسل‌های قهوه‌ای رنگ که مربوط به کانی چرت هستند، در نواحی مرکزی این منطقه به وفور دیده می‌شود و نشان از مطابقت این قسمت‌ها با نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه دارد. علاوه بر این، در این قسمت‌ها بر اساس گزارش زمین‌شناسی منطقه در نزدیکی کوه جبلاخی رگچه‌هایی از آرسنیک مشاهده شده است؛ پیکسل‌های آبی رنگی در این نواحی دیده می‌شوند که مربوط به ترکیب کانی شناسی غالب آرسنوپیریت هستند [۱۵].

قسمت‌های جنوبی منطقه مربوط به آلتراسیون‌های کائولینیتی-آلونیتی، سیلیسی و اکسید آهن می‌باشند؛ با توجه به شکل ۷ در این مناطق ترکیب‌های کانی شناسی غالب تشخیص داده شده عموماً مربوط به کائولینیت و آلونیت (قرمز و بنفش رنگ) هستند که در بخش‌هایی لیمونیت (زرد) نیز مشخص است. در این نواحی تعدادی از پیکسل‌های قهوه‌ای رنگ (ترکیب کانی شناسی غالب چرت) نیز پراکنده شده‌اند؛ همچنین در بخش‌های جنوب غربی تعدادی از پیکسل‌های مربوط به ترکیب کانی شناسی غالب مالاکیت (سبز پر رنگ) مشاهده می‌شود که در گزارش زمین‌شناسی منطقه، به این نواحی دارای مالاکیت نیز اشاره شده است [۱۵]. طی بازدید‌هایی که از منطقه مورد مطالعه صورت گرفته شد، مشاهدات صحرایی در بخش‌های جنوبی، در نزدیکی رودخانه قره‌سو حضور کانی ژپیس در قسمت‌های آلتراسیون آلونیتی را تایید می‌کند که حضور پیکسل‌های سفید رنگ در این مناطق از این نظر توجیه پذیر می‌باشد (شکل ۱۱). بنابراین با بررسی دقیق نقشه‌ی طبقه‌بندی بدست آمده از روش ORASIS و مقایسه‌ی آن با نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مشخص می‌شود که نتایج حاصل به واقعیت نزدیک بوده و انطباق مناسبی با گزارش‌های زمین‌شناسی این منطقه دارد.

ترکیبات کانی‌شناسی استخراج گردید (شکل ۱۰). در این شکل با توجه به جدول ۴ کلاس‌های ۱، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ با یکدیگر ادغام شده و با رنگ قرمز به عنوان ترکیب کانی‌شناسی غالب کائولینیتی، کلاس‌های ۲ و ۵ نیز همراه با رنگ سبز به عنوان ترکیب کانی‌شناسی غالب کلینوپتیلولیتی و همچنین کلاس‌های ۳، ۷ و ۹ نیز به ترتیب با رنگ‌های آبی، زرد و فیروزه‌ای به عنوان ترکیب کانی‌شناسی سلسیانی، موسکوویت و مونت‌موریونیتی مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۰: نقشه‌ی طبقه‌بندی تصاویر رول مربوط به اعضا انتهایی تعیین شده توسط روش PPI.

۴-۷- بررسی نتایج

برای ارزیابی صحت نتایج، در این بخش نقشه‌های طبقه‌بندی تهیه شده توسط دو روش ORASIS و PPI با گزارش‌های زمین‌شناسی منطقه مقایسه شدند.

۴-۷-۱- ارزیابی نتایج ORASIS

تعداد اعضای انتهایی تشخیص داده شده با روش ORASIS، ۱۰ ترکیب کانی‌شناسی متمایز می‌باشد که در شکل ۷ به صورت طبقه‌بندی شده نمایان شده‌اند. با توجه به قسمت‌های شمالی شکل ۷، پیکسل‌هایی که با رنگ فیروزه‌ای و خاکستری روشن مشخص شده‌اند (رگه‌ای مانند) به ترتیب مربوط به ترکیب کانی شناسی غالب ورمیکولیت و لپیدولیت می‌باشند. با نگاهی به نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه (شکل ۲) مشخص می‌شود که این قسمت‌ها در واحد سنگی Es2 واقع شده‌اند؛ این واحد دربرگیرنده‌ی ماسه سنگ، مارن، کنگلومرا و برش است. بنابراین با توجه به این که دو کانی ورمیکولیت و



شکل ۱۱: مشاهدات صحرایی از جنوب منطقه مورد مطالعه. الف) تصویر بخشی از جنوب منطقه‌ی مورد مطالعه واقع در شمال رودخانه قره‌سو؛ دید به سمت غرب. ب) تصویری از بخش آلتراسیون آلونیتی که در آن کانی ژپس نیز به صورت ورقه‌ای مشاهده می‌شود.

گزارش‌های موجود که نشان از حضور آلتراسیون‌های اکسید آهن در منطقه هستند، اما روش PPI قادر به شناسایی آن‌ها نبوده است [۱۴].

۵- نتیجه‌گیری

در دورسنجی اکتشافی، با در نظر گرفتن قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌های حاضر، عموماً پیکسل خالصی در تصاویر دورسنجی مشاهده نمی‌شود. در حالی که اغلب روش‌های گسترش یافته در سال‌های اخیر در زمینه‌ی تعیین اعضای انتهایی بر اساس فرض پیکسل خالص عمل می‌کنند. بر این اساس، نیاز به روش‌هایی احساس می‌شود که بر مبنای فرض حضور پیکسل خالص بنا نشده باشند. هدف اصلی این مطالعه نیز قدم برداشتن در راستای این هدف مهم بوده است. روش ORASIS اقدام به تولید اعضای انتهایی می‌نماید که لزوماً داخل فضای داده‌ها نیستند و بر اساس فرض عدم حضور پیکسل خالص بنا شده است. با اعمال الگوریتم‌های گام‌به‌گام این روش روی داده‌های هایپرین منطقه، ۲۳ عضو انتهایی مجازی تولید شد. کار شناسایی اعضای انتهایی مجهول ایجاد شده توسط روش ORASIS و اختصاص کانی‌های مختلف به آن‌ها از طریق آنالیز طیفی و مقایسه نمودارهای طیفی ۲۳ عضو انتهایی با تکنیک‌های SAM و SFF انجام شده و در نهایت ۱۴ عضو انتهایی هم از لحاظ امتیازهای تطابقی SAM و SFF و هم از لحاظ تطابق بصری شناخته شدند. ۱۰ کانی هورنبلند، آرسنوپیریت، کائولینیت، ورمیکولیت، ژپس، لپیدولیت، لیمونیت، آلونیت، چرت و ملاکیت در منطقه شناسایی گشته و نقشه‌های فراوانی و طبقه بندی شده‌ی حاصل از روش جداسازی طیفی خطی استخراج شد. نقشه‌ی زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه و گزارش‌های زمین‌شناسی نواحی مختلف منطقه‌ی مورد مطالعه، نتایج حاصل از روش ORASIS را

۴-۷-۲- ارزیابی نتایج PPI

تعداد اعضای انتهایی تشخیص داده شده توسط روش PPI، ۵ ترکیب کانی‌شناسی متمایز می‌باشد که در شکل ۱۰ به صورت طبقه‌بندی شده نمایان شده‌اند. بر خلاف نتایج حاصل از روش ORASIS، تصویر طبقه‌بندی اعضای انتهایی تشخیص داده شده توسط روش اندیس خلوص پیکسلی (شکل ۱۰) انطباق کمتری با نقشه و گزارش زمین‌شناسی منطقه دارد (شکل ۲). دلیل این ادعا این است که بر خلاف اینکه در گزارشات موجود [۱۴] و همچنین بازدیدهای محلی که از منطقه انجام شده است، مناطق جنوبی مربوط به آلتراسیون‌های کائولینیتی و آلونیتی می‌باشند (شکل ۱۱)؛ اما این روش قادر به شناسایی مناطق آلونیتی نبوده است و برخلاف روش ORASIS بخش‌های جنوبی (کائولینیتی) را نیز نتوانسته به نقشه درآورد. با توجه به شکل ۱۰ در بخش‌های جنوبی، پیکسل‌های آبی رنگ تمرکز یافته‌اند که مربوط به ترکیب کانی‌شناسی سلسیان می‌باشد؛ این ترکیب کانی‌شناسی نوع کمیابی از آلومیناسیلیکات باریم می‌باشد که به نظر می‌رسد به اشتباه به جای آلتراسیون‌های آلونیتی و کائولینیتی که در واقعیت نیز در منطقه حضور دارند تشخیص داده شده‌اند. امادر این بخش‌ها، حضور پیکسل‌های زرد و آبی مایل به سبز که به ترتیب به ترکیبات کانی‌شناسی موسکوویت و مونتموریونیت اختصاص دارند با توجه به حضور آلتراسیون‌های موجود منطقی می‌باشند.

رگچه‌های سبز رنگ در شکل ۱۰ مربوط به ترکیب کانی‌شناسی کلینوپتیلولیت می‌باشد که نوعی زئولیت بوده و در حقیقت تکتوسیلیکات می‌باشد، نمی‌توان با قاطعیت حضور این ترکیب کانی‌شناسی در مناطق مربوط به واحد سنگی Es2 (درب‌گیرنده‌ی ماسه سنگ، مارن، کنگلومرا و برش) تأیید نمود. در نهایت ذکر این نکته دارای اهمیت است که بر خلاف

تصدیق می‌کنند. حاصل از این مطالعه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بسیار حائز اهمیت و مفید خواهد بود.

۶- تشکر و قدردانی

از خانم مهندس بابکان، دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن دانشگاه صنعتی سهند به دلیل در اختیار گذاشتن تصاویر تصحیح یافته‌ی هایپریون منطقه و تأثیر بسزای آن بر روی صحت نتایج حاصل شده، نهایت سپاس‌گذاری به عمل می‌آید.

مراجع

[1] F. A. Kruse; 1998; "Advances in hyperspectral remote sensing for geologic mapping and exploration", Proceedings of 9th Australasian Remote Sensing Conference, Sydney, Australia.

[2] J. M. P. Nascimento; J. M. B. Dias; 2005; "Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data", Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 43, pp.898-910.

[3] L. Miao ; H. Qi; 2007; "Endmember extraction from highly mixed data using minimum volume constrained nonnegative matrix factorization", Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 45, pp. 765-777.

[4] J. W. Boardman, F. A. Kruse, and R. O. Green; 1995; "Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data." Proc. JPL airborne earth sci. workshop. Vol. 1.

[5] M. E. Winter; 1999; "N-FINDR: an algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data", In SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, pp. 266-275.

[6] M. Zortea, and A. Plaza; 2009; "A quantitative and comparative analysis of different implementations of N-FINDR: A fast endmember extraction algorithm", Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE 6.4, pp. 787-791.

[7] R. A. Neville, K. Staenz, T. Szeredi, J. Lefebvre, and P. Hauff; 1999; "Automatic endmember extraction from hyperspectral data for mineral exploration.", In Proc. 21st Can. Symp. Remote Sens, pp. 21-24.

[8] J. H. Bowles, P. J. Palmadesso, J. A. Antoniadis, M. M. Baumbach, and L. J. Rickard; 1995; "Use of filter vectors in hyperspectral data analysis." In SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, pp. 148-157.

برای مقایسه‌ی نتایج روش ORASIS با یک روش تعیین اعضای انتهایی که بر اساس فرض حضور پیکسل‌های خالص بنا شده‌اند، روش اندیس خلوص پیکسلی (PPI) که روش معمول و سریعی در این زمینه است، انتخاب شد. نتایج این روش نشان داد که علی‌رغم امکان اعمال سریع این روش روی داده‌های فراطیفی، این روش دارای ضعف‌هایی در مقایسه با روش ORASIS می‌باشد. اولاً با توجه به اینکه روش اندیس خلوص پیکسلی از تبدیل MNF جهت تعیین ابعاد درونی و یا در حقیقت تعداد اعضای انتهایی استفاده می‌نماید، این تبدیل توانست ابعاد واقعی داده‌ها را ۱۲ تخمین زند؛ که نسبت به روش HFC انجام شده در روش ORASIS کمتر می‌باشد. ثانیاً، کار خوشه‌بندی پیکسل‌های خالص توسط تجسمگر n-بعدی به صورت بصری انجام می‌شود و در مواردی مانند این مطالعه که مشخصات طیفی این پیکسل‌های مشابه یکدیگر می‌باشند کار تمایز کلاس‌های مختلف و در نتیجه تشخیص اعضای انتهایی مشکل می‌باشد. این مسئله را می‌توان به وضوح در شکل (۸) مشاهده نمود؛ که تنها ۱۰ کلاس از ۱۲ کلاس موجود توسط کاربر قابل تفکیک بوده است. علاوه بر این خطای انسانی نیز در تشخیص این کلاس‌ها تأثیرگذار بوده، به طوری- که از ۱۰ کلاس موجود تنها ۵ ترکیب کانی‌شناسی منحصر به فرد کائولینیت/اسمکتیت، کلینوپتیلولیت، سلسیان، موسکوویت و مونتموریونیت تشخیص داده شده‌اند و در واقع تعدادی از این کلاس‌ها به دلیل مشابه بودن پروفیل طیفی میانگین با یکدیگر ادغام شده‌اند. با توجه به این تفاسیر، ارزیابی نقشه‌ی طبقه‌بندی این روش (شکل ۱۰) با استنادات زمین‌شناسی و مشاهدات عینی از انطباق کمتر نتایج حاصل از روش PPI با واقعیت‌های موجود و همچنین عدم توانایی این روش در تشخیص آلتراسیون‌های آلونیتی، سیلیسی و اکسید آهن خبر می‌دهد. در این مطالعه به دلیل عدم شناسایی و تخصیص ترکیب کانی‌شناسی به ۶ عضو انتهایی توسط روش ORASIS و مناسب نبودن نمودارهای طیفی آن‌ها پیشنهاد می‌شود در الگوریتم تعیین عضو انتهایی ORASIS از سایر روش‌های بسته‌بندی انقباضی مانند روش گرادیان کاهش‌ی معرفی شده توسط آقای دانیل فورمن نیز استفاده شود و نتایج حاصله با روش استفاده شده در این مطالعه مقایسه شوند [۲۳]. بدیهی است، جهت اعتبار سنجی دقیق نتایج چنین مطالعاتی، استفاده از نتایج سایر روش‌های اکتشافی انجام شده در منطقه، مانند نقشه‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی و تلفیق نتایج آن‌ها با نتایج

[21] T. Nouri; 2010; "Detection of promising targets for geothermal energy using remote sensing studies and analysis of ASTER data in Sabalan Zone", M.Sc. Thesis, Sahand University of Technology.

[22] H. Zekri, M. M. Oskouei; 2011; "Application of spectral analysis on ASTER data for mapping of the Argillic & Iron-oxide alterations in Lahrud, Iran", 15th Conference of Geological Society of Iran, Tehran.

[23] D. R. Fuhrmann; 1999; "A Simplex shrink-wrap algorithm", AeroSense'99, International Society for Optics and Photonics, pp. 501-511.

[9] C. I. Chang; 2007; "Hyperspectral data exploitation: theory and applications", Wiley-Interscience, Chap. 4, pp. 71-106.

[10] J. H. Bowles, W. Chen, and D. Gillis; 2003; "ORASIS framework-benefits to working within the linear mixing model", Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03. Proceedings, IEEE International. Vol. 1.

[11] A. Plaza; J. A. Benediktsson; J. W. Boardman; J. Brazile; L. Bruzzone; G. Camps-Valls; J. Chanussot; M. Fauvel; P. Gamba; A. Gualtieri; 2009; "Recent advances in techniques for hyperspectral image processing", Remote Sensing of Environment, vol. 113, pp. S110-S122.

[12] J. B. Adams; M. O. Smith; P. E. Johnson; 1986; "Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site", Journal of Geophysical Research, vol. 91, pp. 8098-8112.

[13] J. Ball; L. Bruce; N. Younan; 2007; "Hyperspectral pixel unmixing via spectral band selection and DC-insensitive singular value decomposition", Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 4, pp. 382-386.

[14] F. Baniadam; 2008; "Report of promising regions of 1:100000 Geological Map of Lahrud", Geological Survey of Iran.

[15] M. Ghandchi, A. Afsharian Zadeh, Z. Chaychi; 1991; "1:100000 Geological Map of Lahrud", Geological Survey of Iran.

[16] A. J. Plaza; C. I. Chang; 2007; "High performance computing in remote sensing", Chapman & Hall/CRC, Chap. 4, pp:69-95.

[17] M. M. Oskouei; R. Poormirzaee; 2009; "Detection of the Number of Signal Sources in the Hyperspectral Data", NAUN International Journal of Circuits, Systems, and Signal Processing, vol. 3, pp. 190-197.

[18] C.-I. Chang; Q. Du; 2004; "Estimation of number of spectrally distinct signal sources in hyperspectral imagery", Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 42, pp. 608-619.

[19] J. Harsanyi; W. Farrand; C.I. Chang; 1993; "Determining the number and identity of spectral endmembers: an integrated approach using Neyman-Pearson eigen-thresholding and iterative constrained RMS error minimization", Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, pp. 395-395.

[20] A. Plaza; G. Martín; J. Plaza; M. Zortea; S. Sánchez; 2011; "Recent developments in endmember extraction and spectral unmixing", Optical Remote Sensing, pp. 235-267.

پی‌نوشت

¹ Hyperspectral

² Mixed Pixels

³ Endmembers

⁴ Pure Pixels

⁵ Pixel Purity Index

⁶ Iterative Error Analysis

⁷ Vertex Component Analysis

⁸ Optical Real-time Adaptive Spectral Identification System

⁹ Shrinkwrap

¹⁰ Linear Spectral Unmixing

¹¹ Scene

¹² Noise

¹³ Abundance Non-negativity Constraint

¹⁴ Abundance Sum-to-one Constraint

¹⁵ Visible and Near Infrared

¹⁶ Short-Wave Infrared

¹⁷ Exemplars

¹⁸ Codebook replacement

¹⁹ Best fit method

²⁰ Efficient Near-Neighbor Search

²¹ Basis Selection

²² Gram-Schmidt

²³ Residual

²⁴ Salients

²⁵ Orthonormal

²⁶ Virtual Dimensionality

²⁷ Minimum Noise Fraction

²⁸ Principle Component Analysis

²⁹ Harsanyi Farrand Chang

³⁰ Simplex

³¹ Virtual-type endmembers

³² Unconstrained unmixing

³³ Spectral Library

³⁴ Spectral Angle Mapper

³⁵ Spectral Feature Fitting

³⁶ United States Geological Survey

³⁷ Spectral Library Resampling

³⁸ Abundance Map

³⁹ Gray-scale image

⁴⁰ Root Mean Squares

⁴¹ Rule Classifier