

علمی- تخصصی

شناسایی آلتراسیون‌ها و ساختارهای زمین‌ساختی مرتبط با کانسارهای گرمابی با استفاده از تکنیک‌های مختلف پردازش تصاویر ماهواره‌ای (مورد مطالعاتی: شمال شرقی زون زمین‌شناسی ماکو-تبریز)

امین حافظی^{۱*}، مسعود اسماعیل زاده^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه سمنان، ^۲ دانشجوی دکتری معدن، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰)

چکیده

امروزه دورسنجی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با هدف پی‌جویی مواد معدنی یکی از مهم‌ترین مراحل اکتشاف می‌باشد. در این راستا بررسی و شناخت روش‌های مختلف و نوین به دلیل بالابردن احتمال اکتشاف و کاهش ریسک، حائز اهمیت است. روش‌هایی که در عین سادگی و کارایی بالا، باعث کاهش هزینه‌های اکتشافی نیز گردند. جهت مطالعات دورسنجی در محدوده مورد مطالعه بعد از تهیه اطلاعات مورد نیاز از جمله تصاویر ماهواره‌ای (تصاویر ماهواره‌های استر و لندست ۸ (OLI)) و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سیهرود، پایگاه داده‌ای شامل تمامی اطلاعات مورد نیاز تشکیل گردید. برای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات اکتشافی در ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم متناسب با نوع ماهواره به کار گرفته شده، بر روی تصاویر پیاده‌سازی شد. از جمله این پیش‌پردازش‌ها می‌توان به تصحیحات هم‌سنجی، تصحیحات رادیومتریک، تصحیحات اتمسفری، تصحیحات هندسی و حذف اثر پوشش‌های گیاهی از طریق شاخص پوشش گیاهی (NDVI) اشاره نمود. سپس برای تفکیک و تشخیص شواهد کنترل‌کننده کانی‌سازی اعم از تیپ سنگ‌شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی، آلتراسیون‌ها (از جمله آلتراسیون‌های آرژیلیک، فلیک، پروپیلیتیک، سیلیس و اکسیدهای آهن) و خطواره‌ها از روش‌های پردازش تصویر همچون نسبت‌بندی (BR)، ترکیب رنگی کاذب (FCC)، آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی (SPCA)، فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF)، فیلتر راستایی و فرکانسی (FFT) بهره گرفته شد. در نهایت نقشه‌های نهایی آلتراسیون‌ها و همچنین نقشه ساختارهای زمین‌شناسی تهیه گردید و مناطق مهم تحت تأثیر آلتراسیون‌ها مشخص شدند.

کلید واژه‌ها: پی‌جویی، دورسنجی، ماهواره، آلتراسیون، زمین‌شناسی

۱. مقدمه

تولید نقشه، از مقیاس منطقه‌ای به محلی است که در هر مقیاسی از آن، با جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و ادغام مجموعه‌ای از داده‌ها همراه است. هدف از این کار به دست آوردن اطلاعات مکانی از آنومالی‌های زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی در ارتباط با نوع کانسار مورد نظر می‌باشد و در نهایت به معین کردن منطقه مورد پی‌جویی پرداخته می‌شود که تمامی این فرآیندها را می‌توان نوعی از مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده محسوب نمود [۲]. یکی از این فعالیت‌ها با هدف پی‌جویی مواد معدنی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در امر دورسنجی اکتشافی است. علم دورسنجی به اندازه‌گیری ویژگی اجسام مورد نظر روی سطح

اکتشاف مواد معدنی یک فعالیت چند مرحله‌ای محسوب می‌گردد که از مقیاس کوچک شروع و به مقیاس بزرگ می‌رسد و در نهایت منجر به انتخاب مناطقی به‌عنوان هدف برای حفاری در کانسار مورد نظر خواهد شد [۱]. در این راستا همواره تلاش می‌گردد تا کانسارهایی که دارای مقدار قابل توجهی ماده معدنی هستند، با اهدافی مشخص، مورد اکتشاف قرار گیرند که شامل چهار مرحله: (۱) انتخاب منطقه (۲) تولید هدف (۳) ارزیابی منابع (۴) تعریف ذخایر می‌باشد. یکی از مهم‌ترین تلاش‌ها، مشخص کردن هدف خواهد بود که در واقع یک فعالیت چندمرحله‌ای از

درب‌گرفتن کانی‌های شاخص بیشتر، که مرتبط با سیستم کانی‌زایی هستند معرفی نمود. در تصاویر ماهواره‌ای بنا به شیوه کار و نوع ماده معدنی مورد پی‌جویی، از ماهواره‌ها و سنجنده‌های گوناگونی استفاده می‌شود. قبل از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای جهت اکتشاف کانسارها می‌بایست پیش‌پردازش‌ها و پردازش‌هایی با توجه به موارد مورد استفاده بر روی آن‌ها صورت گیرد که با توجه به نوع ماهواره به کار برده شده متفاوت خواهد بود. طی سال‌های اخیر با توسعه تکنیک‌های پردازش تصاویر، از آن‌ها برای تفکیک و تشخیص شواهد کنترل‌کننده کانی‌سازی (تیپ سنگ‌شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی، آلتراسیون‌ها و خطواره‌ها) استفاده شده‌است. هر یک از این تکنیک‌ها با توجه به ساختار خود عملکرد متفاوتی را در به تصویر کشیدن اهداف مورد نظر نشان می‌دهند که از لحاظ کارایی می‌توانند بسیار متفاوت نسبت به یکدیگر ظاهر شوند. از جمله روش‌های رایج در پردازش تصاویر که کاربردهای وسیعی در زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی دارند، می‌توان به ترکیب رنگی کاذب (FCC)، نسبت‌بندی (BR)، آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی (SPCA) و فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF) اشاره نمود که جهت آشکارسازی آلتراسیون‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله فیلترهایی که در آشکارسازی ساختارهای زمین‌ساختی نظیر خطواره‌ها و گسل‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند، فیلترهای راستایی (Directional) و فرکانسی (FFT) هستند که در هموارسازی تصاویر، برجسته کردن حاشیه‌ها، تصویر، تعیین حاشیه و خطوط تصاویر کاربرد دارند.

در این پژوهش با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای استر (Aster) و لندست ۸ (OLI) و انجام پیش‌پردازش‌های لازم بر روی آن‌ها، تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر جهت شناسایی زون‌های مختلف آلتراسیون بر روی محدوده مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند.

۲. زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه قسمتی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی سیه‌رود می‌باشد که در بین طول شرقی ۴۶°۱۱' تا ۴۶°۲۹' و عرض شمالی ۳۸°۳۳' تا ۳۸°۵۲' قرار دارد. این محدوده که شامل کوه‌های قره‌داغ و ارسباران است، در زون زمین‌ساختی البرز-آذربایجان و ادامه زون ولکانیک ارومیه-دختر قرار گرفته‌است که می‌توان آن را قسمتی از زون زمین‌شناسی ماکو-تبریز به حساب آورد. از لحاظ سنگ‌شناسی فعالیت‌های ماگمایی نقش عمده‌ای را در محدوده مورد مطالعه ایفا می‌کنند. این فعالیت‌ها که عموماً مربوط به دوره بعد از ائوسن می‌باشند، به صورت گنبد‌های آذرین بسیار بزرگ در محدوده گسترش یافته‌اند. فعالیت آذرین در زمان اولیگوسن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به‌طوری‌که در نواحی شمال خاوری محدوده مورد مطالعه این‌گونه

زمین با استفاده از داده‌های نصب شده بر روی هواپیما و ماهواره‌ها به تناسب اهدافی که دنبال می‌گردد اطلاق می‌شود [۳]. این علم تلاشی برای اندازه‌گیری بر جا است. با توجه به این که همواره دسترسی مستقیم به اهداف مورد نظر بر روی سطح زمین مقدور نیست، بایستی بر سیگنال منتشر شده از آن‌ها برای انجام مطالعات مورد نیاز استفاده کرد. دستگاه‌های دورسنجی (سنجنده‌ها) به‌خصوص آن‌هایی که بر روی ماهواره‌ها مستقر هستند، دیدی مکرر و یکنواخت از سطح زمین را ارائه می‌دهند که برای نظارت تغییرات زمین در کوتاه مدت و بلند مدت بسیار مفید هستند [۴]. با پرتاب اولین ماهواره به فضا انسان توانست از منظر دیگری به جهان هستی نظر بیفکند. با تغییر این موقعیت دید بسیاری از پدیده‌ها به صورتی متفاوت به نظر می‌رسند، که سبب تشخیص دقیق‌تر ماهیت آن‌ها می‌شود. با دسترس قرار گرفتن اطلاعات جامع‌تر، گویاتر و گسترده‌تر موضوعات مدیریتی مربوط به کره زمین، وضعیت کره زمین به صورت علمی تری تحت نظر قرار می‌گیرد و این سبب تسهیل و تسریع در اداره امور مربوط به زمین می‌شود [۴]. طی سال‌های اخیر، کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در علم سنجش از دور، در اکتشاف ذخایر مواد معدنی گسترش یافته‌است. مهم‌ترین قابلیت ماهواره‌ها در اکتشافات معدنی، شناسایی و تفکیک زون‌های آلتراسیون می‌باشد. از آن جایی که آلتراسیون‌های محلی ارتباط مستقیمی با کانی‌زایی و ذخایر معدنی دارند، شناسایی آن‌ها باعث پایین آمدن هزینه‌های اکتشاف و کاهش زمان پی‌جویی خواهد شد [۴]. اواخر دهه ۸۰ و ابتدای دهه ۹۰ میلادی، توسعه قابل توجه ساخت‌افزارها و نرم‌افزارهای رایانه‌ای زمینه‌ساز پیشرفت‌های گسترده و سریعی در زمینه استفاده از روش‌های محاسباتی برای بهینه‌سازی فرآیند تشخیص اهداف اکتشافی گردید و افزایش توانایی و بازدهی این روش‌ها را به دنبال داشت [۵]. به طوری‌که برای نخستین بار در سال ۱۹۹۹ از تصاویر ماهواره‌ای (ماهواره لندست ۵ (TM)) جهت تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، گسل‌ها و همچنین شناسایی سنگ‌های تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمالی بهره گرفته شد [۶]. با توجه به این که تصاویر ماهواره‌ای از لحاظ دقت‌های طیفی (تعداد باندهای بازتابی) و مکانی (وسعت در برگیرنده‌ی هر پیکسل) دارای محدودیت‌های بسیاری می‌باشند از این رو نمی‌توان به صورت مستقیم سعی در شناسایی کانی‌های مورد نظر داشت، زیرا در بعضی موارد هم وسعت گسترش کانی‌ها در حدی نیست که شامل دقت مکانی ماهواره باشد و هم طول موج‌هایی که ماهواره‌ها در آن دامنه برداشت می‌کنند، نمی‌توانند شاخص‌های مناسب بازتابی و یا جذبی آن کانی را ثبت نمایند. بنابراین آلتراسیون‌هایی که در اثر فعالیت‌های هیدروترمالی و ماگمایی به وجود آمده‌اند از اهمیت بالایی برخوردار هستند. دلیل آن را می‌توان وسعت مکانی بالای آلتراسیون‌ها و همچنین

۳. روش مطالعه

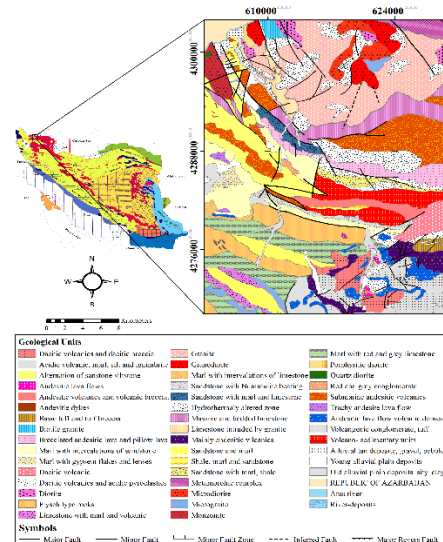
امروزه از تکنیک‌های دورسنجی در جهان استفاده‌های زیادی می‌شود که یکی از کاربردهای مهم آن در اکتشاف ذخایر معدنی می‌باشد. تکنیک‌های دورسنجی امکان شناسایی و اکتشاف مقدماتی یک محدوده وسیع را با دقت و سرعت بالا و هزینه کم میسر می‌سازد. در اکتشاف ذخایر معدنی از روش‌های مختلف آشکارسازی برای تفکیک و تشخیص شواهد کنترل‌کننده کانی‌سازی (تیپ سنگ‌شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی و آلتراسیون) استفاده می‌گردد. از این رو تجزیه و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای با هدف آشکارسازی شواهد کانی‌سازی امر بسیار مهمی در بحث دورسنجی اکتشافی محسوب می‌شود [۸].

در این مطالعه ابتدا تمامی داده‌های مورد نیاز از جمله تصاویر ماهواره‌ای، نقشه زمین‌شناسی رقومی شده، اندیس‌ها و کانسارهای شناسایی شده در محدوده و تمامی اطلاعات مورد نیاز جمع‌آوری شدند و پایگاه داده‌ای جهت بررسی لایه‌های مختلف اکتشافی تشکیل گردید. سپس تمامی پیش‌پردازش‌های لازم جهت آماده‌سازی داده‌های ماهواره‌ای برای پردازش آن‌ها انجام پذیرفت. پردازش تصاویر نیز متناسب با هدف پژوهش با بهره‌گیری از تکنیک‌های مختلف برای تهیه نقشه‌های آلتراسیون بر روی تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفت و در نهایت با استفاده از اندیس‌ها و کانسارهای شناسایی شده مورد راستی‌آزمایی قرار گرفتند. بعد از جمع‌بندی و بررسی نقشه‌های مختلف به دست آمده، محدوده‌های پرتانسیل معدنی جهت اکتشافات بعدی معرفی شدند.

۳-۱. تهیه تصاویر ماهواره‌ای

در این مطالعه از تصاویر مربوط به سنجنده‌های لندست ۸ (Landsat 8 (OLI)) و استر (Aster) استفاده شده است. تصاویر استر مورد استفاده دارای سطح تصحیحاتی Level-1T هستند که نسبت به سطح تصحیحاتی Level-1B دارای تصحیحات رادیومتریک اولیه بوده و از لحاظ هندسی دارای مختصات دقیقی در سیستم مختصات UTM می‌باشند [۹]. لازم به ذکر است در این تصاویر از نقاط کنترل زمینی (GCPs) جهت بالابردن دقت توپوگرافی استفاده گردیده است. تصاویر لندست ۸ نیز دارای سطح تصحیحاتی Level 1 بوده که از لحاظ رادیومتریک دارای تصحیحات سیستماتیک هستند و با استفاده از نقاط کنترل زمینی (GCPs)، تصحیحات هندسی بر روی آن‌ها صورت پذیرفته است. تمامی تصاویر مورد استفاده تاحدامکان بدون ابر و دارای کمترین پوشش گیاهی و برف در محدوده مورد مطالعه می‌باشند. تصاویر مورد استفاده از سایت سازمان هوانوردی و فضایی ملی آمریکا (ناسا) بارگیری شده است. لازم به ذکر است تمامی پیش‌پردازش‌ها و پردازش‌های تصاویر ماهواره‌ای نیز در نرم‌افزار

فعالیت‌ها به صورت سنگ‌های نفوذی (گرانیت، میکروگرانیت، مونزونیت، گرانودیوریت و ...)، در بخش مرکزی به صورت فعالیت‌های آتشفشانی (گدازه‌های برشی شده آندزیتی و گدازه‌های بالشی) و در نواحی جنوب باختری به صورت سنگ‌های آتشفشانی برشی (سنگ‌های آتشفشانی داسیتی، برش‌های داسیتی، سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی و ...) گسترش یافته‌اند. بیشتر این واحدها در قسمت‌های مختلف تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال قرار گرفته‌اند و دچار دگرسانی شده‌اند. در شمال شرق محدوده مجموعه‌ای از واحدهای متامورفیک قابل مشاهده است که بیشتر شامل سنگ‌های متادیاپاز-گابرو، آمفیبولیت، بیوتیت-شیمست و مرمر می‌باشند. سنگ‌های آتشفشانی بیشتر در میان نهشته‌های مربوط به پالئوسن گسترش یافته‌اند، اما این نهشته‌ها در محدوده دارای گسترش چندانی نبوده و بیشتر رخنمون‌های آن در نواحی مرکزی و جنوب باختری قابل مشاهده است. بیشتر این واحدها شامل رخساره‌های تیپ فیلیش، ماسه سنگ‌های آهکی، مارن و سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی با ترکیب اسیدی تا متوسط می‌شوند [۷]. از لحاظ زمین‌شناسی ساختمانی روند عمومی محور ناودیس‌ها و تاق‌دیس‌ها و راستای گسل‌های اصلی مبین تحمیل نیروی فشاری در راستای تقریباً شمالی-جنوبی به واحدهای رسوبی و آذرین است. تأثیر و عملکرد نیروها بر نهشته‌های رسوبی یا آذرین منطقه به شکل چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی ظاهر می‌گردد. روند گسل‌های اصلی منطقه منطبق با روند محوری تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها می‌باشند. عمده گسل‌های اصلی دارای روند شمال باختر-جنوب خاوری و خاوری-باختری است [۷].



شکل (۱). موقعیت منطقه از لحاظ زمین‌ساختی و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ سیهرود) [۷].

Envi 5.3 صورت پذیرفته است.

۳-۲. پیش پردازش‌های تصاویر ماهواره‌ای

پیش از پردازش داده‌های سنجنش از دور می‌بایست یک سری تصحیحات بر روی داده‌های خام اولیه صورت پذیرد. انجام این تصحیحات باعث حذف اثرات نویزهای احتمالی، تفکیک بهتر عارضه‌های سطحی، حذف اثر توپوگرافی بر روی داده‌ها و همچنین مختصات‌دار کردن تصاویر ماهواره‌ای می‌گردد. این مرحله را می‌توان مرحله پیش‌پردازش داده‌های خام اولیه جهت فراهم آوردن داده‌ها برای پردازش اصلی نامید. این تصحیحات شامل تصحیح هندسی، تصحیح رادیومتریک، تصحیح اتمسفری و غیره می‌شود. لازم به ذکر است نوع پیش‌پردازش‌های به کار گرفته شده در تصاویر ماهواره‌های مختلف متفاوت است.

• تصحیح هندسی

به علت ایجاد برخی خطاها در هنگام برداشت تصاویر ماهواره‌ای مانند خطای تجهیزات، گردش زمین، عدم ثبات سکوها نیازمند آن هستیم که این تصاویر را تصحیح نماییم. از آنجایی که تصاویر سنجنش از دور نقشه نیستند، دارای مقیاس و سیستم تصویر نمی‌باشند، لذا زمانی که نیاز است در قالب نقشه یا در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به کار گرفته شوند، بایستی آن‌ها را به شیوه‌های مناسبی دارای مقیاس و سیستم تصویر نمود. به نحوه تغییر و تبدیل یک تصویر سنجنش از دور به گونه‌ای که دارای مقیاس و سیستم تصویر بشود، تصحیحات هندسی گفته می‌شود. روشی مشابه تصحیحات هندسی که عمل آن تطبیق و یکسان‌سازی سیستم مختصات تصویر با سیستم مختصات نقشه یا تصویر دیگری است، تطبیق‌سازی گفته می‌شود [۱۰].

داده‌های ماهواره‌ای در مرحله تصحیح هندسی با توجه به نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای دقت بالا دارای مختصات در قالب شبکه مختصات UTM قرار می‌گیرند. این تصحیحات براساس انتخاب تعدادی نقطه کنترل زمینی (GCP) بر روی تصاویر مختصات‌دار و مشابه‌یابی آن بر روی داده‌های ماهواره‌ای مورد نظر انجام می‌شود. در این مرحله با استفاده از روش‌های آماری لازم و با توجه به نقاط انتخاب شده، خطاهای موجود بین مختصات تصاویر و مختصات زمینی پدیده‌ها به حداقل می‌رسد. داده‌های دیگر نیز براساس داده‌های ماهواره‌ای تصحیح شده، با استفاده از روش مشابه‌یابی تصویر به تصویر می‌گردند و در نتیجه محدوده‌های مورد نیاز بریده شده و قطعه‌بندی می‌شوند.

• تصحیح رادیومتریک

ارزش عددی هر پیکسل در داده‌های ماهواره‌ای، میزان بازتابندگی واقعی آن پدیده در سطح زمین نبوده و از عواملی مانند جذب و پراکنش جوی، زاویه تابش خورشید، حساسیت سنجنده، سایه و ... تأثیر پذیرفته است. در محدوده طول موج

مرئی، امواج الکترومغناطیس در هنگام عبور از جو به میزان بیشتر جذب و پراکنده می‌شوند. بنابراین اطلاعاتی که در باندهای مختلف طیف مرئی و فروسرخ نزدیک ثبت می‌گردند، بازتاب واقعی پدیده‌ها نبوده و باید تصحیح گردند [۱۰].

• تصحیح اتمسفری

انرژی الکترومغناطیس شنا سایی شده با ابزار سنجنش از دور شامل ترکیبی از انرژی منعکس شده یا ساطع شده از سطح زمین و انرژی است که در جو پراکنده شده و یا از آن ساطع می‌شود. مقدار انرژی الکترومغناطیسی در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک طیف که توسط یک حسگر بالاتر از جو تشخیص داده می‌شود، وابسته به مقدار انرژی خورشیدی ورودی است که توسط فرایند جذب جوی و ویژگی‌های بازتابی سطح زمین تضعیف می‌شود. از این رو، انرژی دریافت شده توسط حسگر، تابعی از انرژی تابشی، قابلیت بازتاب هدف، انرژی پراکنش جوی و جذب جوی است. تفسیر و تحلیل تصاویر سنجنش از دور در ناحیه نور طیفی براساس این فرض است که مقادیر مربوط به پیکسل‌های تصویر به طور دقیق نشان‌دهنده توزیع مکانی بازتابی سطح زمین می‌باشند و میزان چنین بازتابی وابسته به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی سطح زمین است. مقدار ثبت شده برای هر پیکسل در تصویر سنجنش از دوری، تابعی از تابش تشخیص داده شده توسط حسگر است. با توجه به برهم‌کنش جوی، این تابش آشکار ترکیبی از سهم جسم هدف و اثرات جوی است. مقدار ثبت شده برای هر پیکسل در تصاویر سنجنش از دوری تابع رادیانس سنسور تشخیص داده شده است. با توجه به اثرات متقابل جو، رادیانس ظاهر شده ترکیبی از توزیع جسم هدف و تأثیر جو است [۱۰].

تصحیح اتمسفری به دو روش تجربی (نسبی) و مدل انتقال پیچیده (مطلق) قابل انجام است. روش‌های تصحیح نسبی نیازی به خصوصیات و پارامترهای جوی ندارند بلکه از اطلاعات موجود در خود تصویر استفاده کرده و عمل تصحیح اتمسفری را انجام می‌دهند. در روش مطلق به پارامترهای متفاوتی در پروفیل جوی نیاز دارد. در این روش بازتاب‌های زمینی تحت شرایط مختلف جوی، ارتفاعی و هندسه بین خورشید و ماهواره قادر به ارزیابی خواهد بود [۱۰]. روش تصحیح FLAASH جز روش‌های مطلق محسوب می‌گردد. الگوریتم FLAASH یک مدل انتقال تابشی برای کالیبراسیون جوی است که براساس مدل انتقال جوی یا توان تفکیک متوسط توسعه یافته است. این الگوریتم از مدل انتقال تابشی MODTRAN استفاده می‌کند که شامل تصحیح و حذف اثرات بازتابی پیکسل‌های اطراف در پیکسل مورد نظر است. از مزایای استفاده از این الگوریتم می‌توان به اصلاح اثرات پیکسل‌های مجاور و کالیبراسیون طیفی اتوماتیک اشاره کرد [۱۱]

استفاده می شود:

$$BV_{ijr} = \frac{BV_{ijk}}{BV_{iji}} \quad (1)$$

در این رابطه BV_{ijr} مقدار پیکسل سطر i ام و ستون r تصویر نسبتی حاصل می باشد. BV_{ijk} مقدار پیکسل سطر i ام و ستون k و BV_{iji} مقدار پیکسل سطر i ام و ستون i می باشد. اگر بر اساس شدت بازتاب و جذب طیفی کانی های دگر سانی در باندهای خاص روش نسبت گیری باندی اعمال گردد، می تواند جهت بارسازی آن ها استفاده شود [۱۴].

در جدول (۱) نسبت باندی های گردآوری شده و مهم در شناسایی زون ها و آلتراسیون ها مختلف ذکر شده است.

جدول (۱). نسبت های باندی مورد استفاده در شناسایی کانی ها و آلتراسیون های داده های ماهواره ای استر (ASTER).

نسبت باندی	نوع آلتراسیون	نسبت باندی	نوع آلتراسیون
$\frac{B2}{B1}$	اکسید آهن	$\frac{B4+B7}{B6}$	آرژلیک
$\frac{B13}{B12}$	سیلیس	$\frac{B5+B7}{B6}$	فیلیک
$\frac{B4 \times 3}{B5+B6+B7}$	کانی های هیدروکسیل	$\frac{B7+B9}{B8}$	پروپیلیتیک

ترکیب رنگی کاذب

از آن جایی که اغلب تصاویر ماهواره ای در فرمت های چند باندی موجود است بررسی داده های یک باند در یک برهه از زمان حداکثر اطلاعات را به دست نمی دهد. آگاهی از روابط متقابل بین طول موج های مختلف برای شناسایی عوارض و انواع مختلف پوشش زمین بسیار مهم است و نمایش دادن بیش از یک باند بطور همزمان بر روی سیستم پردازش تصویر و تهیه نسخه چاپی چند باندی سودمند و ثمربخش خواهد بود. این کار اغلب از طریق به کارگیری تصاویر ترکیبی رنگی میسر است.

در این حالت سه باند از داده ها به رنگ های آبی، سبز و قرمز نمایش داده می شوند. همچنان که در بخش های قبلی گفته شد در ساخت ترکیب های رنگی کاذب بهتر است از باندهایی که همبستگی کمتری نسبت به هم دارند استفاده شود. یک روش برای مشخص کردن باندهای سه گانه استفاده از فاکتور شاخص بهینه (OIF) به صورت زیر می باشد:

$$OIF = \frac{\sum_{k=0}^3 S_k}{\sum_{j=0}^3 r_j} \quad (2)$$

• تصحیح هم شنوی

سیستم مادون قرمز کوتاه سنجنده استر تحت تأثیر مشکل تداخل سیگنال (Crosstalk) قرار دارد که منشأ اصلی این مشکل بخش های آلومینیمی آشکار ساز باند ۱۴ است که طیف بازتاب شده از آن به سمت آشکار سازهای دیگر هدایت می شود. باندهای ۵ و ۹ به دلیل نزدیکی بیشتر به این آشکار ساز بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته و این امر سبب ایجاد تداخل در بازتاب های طیفی این باندها شده است. تصحیح تداخل سیگنال بر روی داده های تولید شده پیش از سال ۲۰۰۱ میلادی الزامی است. برای این تصحیحات، می توان از نرم افزاری که شرکت ERSDAC ارائه می دهد، استفاده کرد [۱۲].

• موزاییک کردن تصاویر

تصاویر ماهواره ای که دارای توان تفکیک مکانی متوسط (بین ۱۰ تا ۹۰ متر) هستند معمولاً و سعت مکانی تصاویر آن ها پایین است. همین امر منجر به این می شود که بسیاری از کاربران با محدودیت پوشش مناطق وسیع در یک تصویر مواجه شوند. بر همین اساس تکنیک های موزاییک سازی تصاویر ماهواره ای به منظور رفع این مشکل عرضه شده است. با استفاده از این تکنیک ها می توان تصاویر ماهواره ای جدا از یکدیگر را با استفاده از موزاییک سازی تصاویر به یکدیگر اصطلاحاً چسباند تا منطقه وسیع تر به خوبی پوشش داده شود.

۳-۳. پردازش های تصاویر ماهواره ای

با استفاده از تکنیک های پردازش داده های ماهواره ای می توان عوارض تصویر را واضح و کارایی تصویر حاصله را زیاد کرد. در اکتشاف ذخایر معدنی از روش های مختلف آشکار سازی برای تفکیک و تشخیص شواهد کنترل کننده کانی سازی (تیپ سنگ شناسی، ساختارهای زمین شناسی، آلتراسیون ها و خطواره ها) استفاده می گردد که در ادامه توضیحات فراوانی در مورد مبانی این روش ها ارائه می شود.

• نسبت باندی

یکی از روش های رایج در پردازش تصاویر ماهواره ای کاربرد وسیعی در زمین شناسی دارد روش نسبت باندی می باشد. در این روش دو باند برهم تقسیم می شود به گونه ای که برای تشخیص هدف مشخص با توجه به نمودار طیفی آن، باندی که دارای بیشترین تابش است در صورت کسر و باندی که بیشترین جذب را دارد در مخرج کسر قرار می گیرد. بدین صورت برای مشخص کردن مناطق دگرسانی با توجه به ویژگی های طیفی کانی های شاخص در هر نوع دگر سانی، می توان نسبت های باندی را تعریف کرد [۱۳]. بر اساس رابطه زیر از تقسیم باندها جهت محاسبه مقدار باندی هر پیکسل و شناسایی پدیده های هدف

فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده

روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF) را می‌توان یک روش ترکیبی براساس ترکیب جزئی و مبتنی بر ترکیبی از روش‌های پردازش سیگنال و تئوری مخلوط خطی به حساب آورد. این روش، توسعه یافته روش فیلترگذاری تطبیقی (MF) (بدون نیاز به دانستن همه عضوهای انتهایی) با محدودیت‌های فیزیکی می‌باشد که تصاویر عدم امکان نیز به آن اضافه شده است [۱۸]. در واقع MTMF در مرحله اول برای تخمین فراوانی، مقدار MF در مرحله دوم برای شناسایی و رد نتایج مثبت کاذب، اختلاط تعدیلی را محاسبه می‌کند. مقادیر MF برای هر پیکسل با پیش‌بینی داده‌های تبدیل شده MNF بر روی یک بردار MF محاسبه می‌شود. این تضمین می‌کند که بردار MF دارای طول واحد باشد و با اجزای هدف از ۰٪ تا ۱۰۰٪ مطابقت داشته باشد. به صورتی که تصویر MF، میانگینی از برآورد نسبی درجه انطباق برای طیف مرجع و فراوانی تقریبی از زیر پیکسل، با ارزش‌های صفر تا یک تولید کرده که در آن ارزش‌های پایین نشان‌دهنده پس زمینه و ارزش‌های بالا نشان‌دهنده پیکسل هدف است. تعریف ریاضی بردار MF در معادله زیر بیان شده است:

$$\vec{v} = \frac{[C_{MNF}]^{-1} \# \vec{t}_{MNF}}{(\vec{t}_{MNF})^T \# [C_{MNF}]^{-1} \# \vec{t}_{MNF}} \quad (3)$$

که در این معادله، بردار MF، $[C_{MNF}]^{-1}$ معکوس ماتریس کوواریانس MNF و بردار طیف هدف در فضای MNF است [۱۹]. از نظر ریاضی نیز فیلترهای انطباقی معادل حداقل نمودن انرژی محدود است. امتیاز شاخص در الگوریتم فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF)، در مرحله دوم آن است، که در آن یک عدد محاسبه شد که می‌توان آن را به عنوان میزان امکان‌پذیری و یا به عبارت دیگر معیاری برای تعیین میزان درستی انطباق هر پیکسل طبقه‌بندی شده توسط روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده تعبیر نمود [۱۹].

نتایج MTMF شامل دو مجموعه از تصاویر سیاه و سفید برای هر عضو انتهایی شامل تصویر مقادیر MF و تصویر عدم امکان است. تصاویر MF وسیله‌ای برای برآورد درجه نسبی مطابقت با طیف مرجع و فراوانی تقریبی زیر پیکسل، با مقادیر ۰ تا ۱ است. تصاویر عدم امکان، برای کاهش تعداد پاسخ‌های کاذبی است که در تصاویر MF یافت شده‌اند. پیکسل‌هایی که مقادیر عدم امکان پایین و MF بالا دارند به عنوان پیکسل صحیح بوده‌اند [۲۰]. در این روش از تصاویر تبدیل کاهش بخش تصادفی (MNF) به عنوان ورودی استفاده گردیده است. جهت شناسایی

که در آن S_k انحراف معیار باند k و T_j ضریب همبستگی دو باند از ترکیب سه باند می‌باشد. هر چه شاخص OIF بالا باشد باندهای سه گانه ترکیب رنگی کاذب جهت تفکیک مناسب‌تر می‌باشند [۱۴].

تصاویر رنگی مرکب تصاویری هستند که از تلفیق سه باند به وجود می‌آید. به‌طور مثال اگر باند ۱ به گان آبی و باند ۲ به گان سبز و باند ۳ به گان قرمز نسبت داده شود، تصویر حاصله تصویری با $RGB=321$ نامیده شده و نشان‌دهنده رنگ واقعی منطقه است؛ به ترکیب $RGB=321$ True Color گفته می‌شود تمامی حالات به غیر از False color، $RGB=321$ و یا ترکیب رنگی کاذب نامیده می‌شود.

• آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی (کروستا)

روش کروستا یکی از روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی است. در این روش چند باند به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود، سپس به همان تعداد مؤلفه اصلی ارائه می‌شود که هر مؤلفه برای هر باند دارای مقادیری از -۱ تا +۱ است [۱۵]. کاهش تعداد باندها برای تحلیل مؤلفه اصلی محققان را مطمئن می‌سازد تا پدیده‌های معینی را شنا سایی کرده و احتمال ترسیم محدوده مورد نظر را در یکی از مؤلفه‌های اصلی فراهم سازد. کروستا و همکارانش از این تکنیک برای شناسایی کانی‌های دگرسان در باندهای SWIR سنجنده استر استفاده کردند [۱۶].

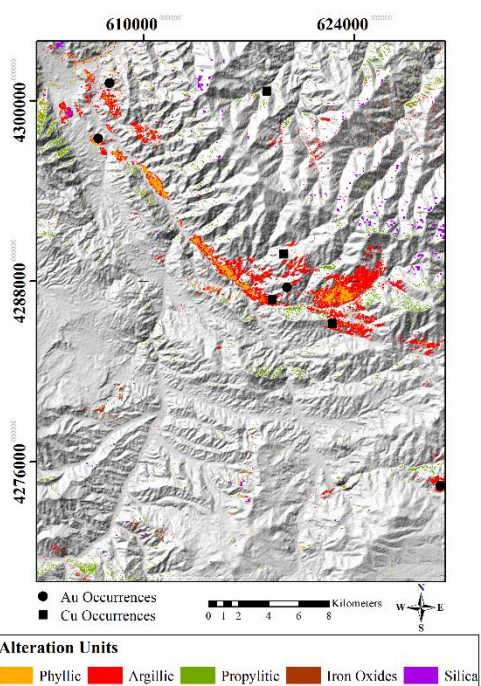
از بین باندهای ورودی باندهایی که تابش و جذب بیشتری برای کانی مورد نظر دارند مبنای تصمیم‌گیری بعدی هستند، بدین صورت که مؤلفه‌ای که دارای بیشترین اختلاف بین دو باند مذکور باشد، جهت نمایش خاکستری انتخاب می‌شود.

از این طریق می‌توان اطمینان حاصل کرد که پدیده‌هایی نظیر پوشش گیاهی در به نقشه درآوردن کانی‌های هدف ظاهر نخواهند شد و همچنین می‌توان اطلاعات طیفی پدیده هدف را به کمک یک مؤلفه اصلی خاص به نمایش درآورد [۱۶].

جدول (۲) باندهای انتخاب شده به عنوان ورودی برای اجرای روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی را جهت شناسایی آلتراسیون‌های مختلف با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر نشان می‌دهد [۱۷].

جدول (۲). نسبت‌های باندی مورد استفاده در شناسایی کانی‌ها و آلتراسیون‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای استر (ASTER).

نوع آلتراسیون	باندهای انتخاب شده ورودی
آرژلیک	۷-۶-۴-۱
فیلیک	۶-۵-۳-۱
پروپیلتیک	۸-۵-۳-۱
کانی‌های گروه هیدروکسیل	۶-۴-۳-۱
اکسیدهای آهن	۴-۳-۲-۱



شکل (۲). نقشه نهایی آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک،

پروپیلیتیک، اکسیدهای آهن و سیلیس تهیه شده به وسیله روش نسبت بانندی در محدوده مورد مطالعه.

از آن جایی که روش کروستا یکی از روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی است. در این روش چند باند به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود، سپس به همان تعداد مؤلفه اصلی ارائه می‌شود. برای پیاده‌سازی این تکنیک پردازش تصویر و تهیه نقشه پراکندگی هر کدام از انواع آلتراسیون‌ها، باندهایی ذکر شده در جدول (۲) به کار گرفته شد. جدول (۳) مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده (۱، ۴، ۶ و ۷) برای نمایش آلتراسیون آرژیلیک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی را در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقادیر باندهای ۶ و ۷ در PC4 دارای حداکثر اختلاف می‌باشند، پس می‌توان از PC4 جهت نمایش آلتراسیون آرژیلیک استفاده نمود.

جدول (۳). مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده برای

نمایش آلتراسیون آرژیلیک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

Eigenvectors	B 1	B 4	B 6	B 7
PC 1	0.32	0.6	0.51	0.51
PC 2	0.91	-0.4	-0.09	0.0
PC 3	0.25	0.68	-0.43	-0.55
PC 4	-0.04	0.08	-0.75	0.67

کانی‌های مهم نیز از عضوهای انتهایی که از روش‌های اندیس خلوص پیک سلی (PPI) و نمای شگر n بعدی و همچنین تحلیل گر طیفی بهره گرفته شد [۲۱].

• فیلترهای مکانی

فیلترها را می‌توان در بسیاری از فرآیندهای مختلف بر روی تصاویر ماهواره‌ای با هدف‌های گوناگون به کار برد. فیلترهایی که در این مطالعه اهمیت ویژه‌ای دارند، فیلترهایی هستند که در هموارسازی تصویر، برجسته کردن حاشیه تصویر، فیلتر خطی و تعیین حاشیه و خطوط تصاویر مورد استفاده قرار می‌گیرند. فیلترها به صورت ماتریسی می‌باشند که بر روی تصاویر پیاده‌سازی شده و آن‌ها را به محیط جدیدی تبدیل می‌نمایند. یک فیلتر ماتریسی با تعداد سطر و ستون فرد می‌باشد. به ازای هر موقعیت جدید ماتریس بر روی یک تصویر یک مقدار جدید برای موقعیت ماتریس مرکزی در تصویر پدید می‌آورد که براساس مقدارهای وزنی کلیه پیکسل‌های پوشیده شده توسط ماتریس در تصویر اولیه است [۲۲]. در این مطالعه برای شناسایی خطواره‌ها و گسل‌های احتمالی علاوه بر استفاده از گسل‌های نقشه‌های زمین‌شناسی، از اجرای این فیلترها بر روی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده‌است. بدین منظور دو فیلتر راستایی (Directional) و فرکانسی (FFT) بر روی تصاویر باند پانکروماتیک لندست ۸ (OLI) در محدوده‌های مطالعاتی مختلف اعمال گردید و با توجه به ساختارهای به دست آمده، گسل‌ها و خطواره‌های احتمالی ترسیم شدند.

۴. نتایج و بحث

از آن جایی که یکی از پرکاربردترین روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای با هدف اکتشافی، روش نسبت بانندی می‌باشد، با استفاده از نسبت‌های بانندی معرفی شده در جدول (۱)، نقشه آلتراسیون‌های مختلف نظیر آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک، اکسیدهای آهن، سیلیس و کانی‌های هیدروکسیل تهیه شد.

نکته حائز اهمیت در بررسی محدوده‌های پرتانسیل از لحاظ اکتشافی بررسی آلتراسیون‌ها در کنار هم می‌باشد، از این رو تهیه نقشه‌ای که تمامی آلتراسیون‌ها را در کنار هم نشان دهد بسیار مهم ارزیابی می‌شود. در شکل (۲) تمامی آلتراسیون‌های شناسایی شده در کنار هم قابل مشاهده‌اند. با توجه به نقشه به‌دست آمده بیشتر آلتراسیون‌های مرتبط با کانی‌سازی‌های احتمالی (آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک) در یک امتداد شمال غرب-جنوب شرق در شمال محدوده قابل رویت می‌باشند.

انتخابی در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

Eigenvectors	B 1	B 2	B 3	B 4
PC 1	0.33	0.47	0.52	0.63
PC 2	0.52	0.64	-0.42	-0.40
PC 3	-0.07	-0.01	-0.75	0.67
PC 4	0.79	-0.62	-0.02	0.05

جدول (۷) مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده (۱، ۳،

۴ و ۶) برای نمایش کانی‌های گروه هیدروکسیل با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی را در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. با استفاده از PC4 و اختلافی که بین باندهای ۴ و ۶ وجود دارد می‌توان کانی‌های گروه هیدروکسیل را در تصویر این PC مشخص نمود.

جدول (۷). مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده برای

نمایش کانی‌های گروه هیدروکسیل با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

Eigenvectors	B 1	B 3	B 4	B 6
PC 1	0.33	0.51	0.62	0.50
PC 2	-0.05	-0.82	0.31	0.47
PC 3	0.91	-0.17	-0.37	0.04
PC 4	0.24	-0.19	0.62	-0.72

شکل (۳) نقشه نهایی آلتراسیون‌های آرژیلک، فیلک،

پروپیلیتیک، اکسیدهای آهن و کانی‌های گروه هیدروکسیل را که به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی با استفاده از داده‌های ماهواره استر (Aster) به دست آمده‌اند، در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقایسه نقشه به دست آمده با شکل (۲) که نتایج روش نسبت باندی را بر روی تصاویر استر نشان می‌دهد، بیانگر این نکته می‌باشد که روند آلتراسیون در شمال محدوده می‌تواند از لحاظ کانی‌سازی بسیار مهم تلقی شود زیرا شامل آلتراسیون‌های آرژیلک، فیلک و پروپیلیتیک می‌باشد. آلتراسیون‌های به دست آمده با استفاده از این روش دارای کم‌ترین نویز در تصاویر است و می‌توان آلتراسیون‌ها را با شدت و دقت بالایی قابل تشخیص داد.

جدول (۴) مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده (۱، ۳، ۵ و ۶) برای نمایش آلتراسیون فیلک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی را در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به این که کانی‌های معرف آلتراسیون فیلک دارای انعکاس بالا در باند ۵ و جذب بالا در باند ۶ می‌باشند و اختلاف مقادیر این دو باند در PC4 بیشترین است پس می‌توان برای نمایش این آلتراسیون PC4 را انتخاب نمود.

جدول (۴). مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده برای

نمایش آلتراسیون فیلک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

Eigenvectors	B 1	B 3	B 5	B 6
PC 1	0.35	0.54	0.55	0.55
PC 2	0.02	0.82	-0.42	-0.41
PC 3	0.94	-0.22	-0.18	-0.21
PC 4	-0.02	0.00	-0.71	0.71

جدول (۵) مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده (۱، ۳،

۵ و ۸) برای نمایش آلتراسیون پروپیلیتیک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی را در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. آلتراسیون‌های پروپیلیتیک با توجه به اختلاف بین باند ۵ و ۸، در PC4 آشکار شده‌اند. البته با در نظر گرفتن این که کانی‌های معرف این آلتراسیون در باند ۵ انعکاس بالایی دارند و اینجا علامت این باند منفی می‌باشد می‌بایست تصویر PC4 را معکوس نمود.

جدول (۵). مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده برای

نمایش آلتراسیون پروپیلیتیک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

Eigenvectors	B 1	B 3	B 5	B 8
PC 1	0.35	0.55	0.56	0.51
PC 2	0.02	-0.81	0.40	0.44
PC 3	0.94	-0.20	-0.25	-0.17
PC 4	0.04	0.63	-0.69	0.72

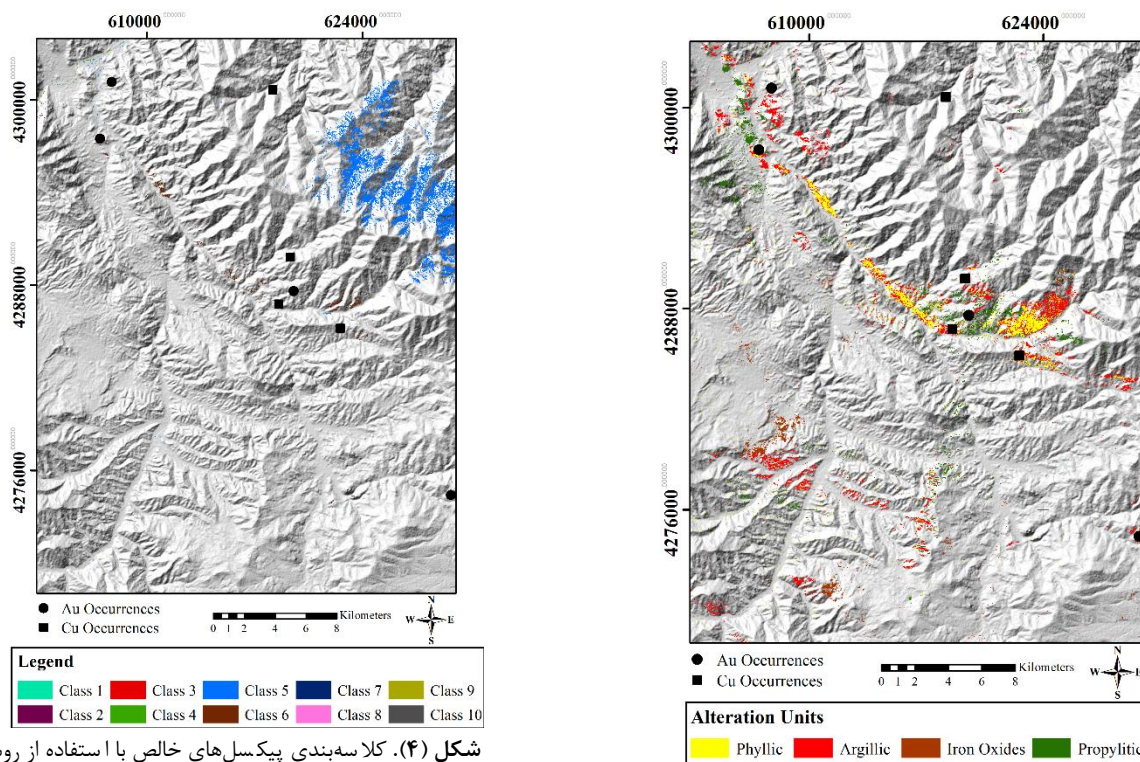
جدول (۶) مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده (۱، ۲،

۳ و ۴) برای نمایش اکسیدهای آهن با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی را در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقادیر بردارهای ویژه در PC4 بین باندهای ۲ و ۱ دارای بیشترین تغییرات بوده و علامت باندها مخالف هم می‌باشد پس بنابراین می‌توان از این PC جهت نمایش اکسیدهای آهن استفاده نمود.

جدول (۶). مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده برای

نمایش اکسیدهای آهن با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی

شامل می‌شوند ممکن است به وضوح قابل مشاهده نباشند.



شکل (۴). کلاسه‌بندی پیکسل‌های خالص با استفاده از روش نمایشگر n بعدی بر روی تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

با اعمال روش تحلیل‌گر طیفی (SA) بر روی میانگین طیفی هر کلاسه مطابق با جدول‌های (۸) تا (۱۱) می‌توان کلاسه ۶ را به کانی کائولینیت و کلاسه ۷ را به کانی پیگنایت که مربوط به سنگ‌های ولکانیکی است، نسبت داد. همچنین در کلاسه ۹ کانی کلسیت و در کلاسه ۱۰ کانی‌های کلریت و اپیدوت نمایش داده شده‌اند. با مقایسه میانگین رفتار طیفی بقیه کلاسه‌ها، کانی مهمی دیگری در این محدوده شناسایی نشد.

جدول (۸). جدول به دست‌آمده از روش تحلیل‌گر طیفی و بررسی درصد تشابه میانگین طیفی کلاسه ۶ با طیف‌های موجود در کتابخانه طیفی در محدوده مورد مطالعه.

شکل (۳). نقشه نهایی تهیه شده از آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک، اکسیدهای آهن و کانی‌های گروه هیدروکسیل به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی با استفاده از داده‌های ماهواره استر در محدوده مورد مطالعه.

جهت اجرای روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF)، ابتدا روش اندیس خلوص پیکسلی (PPI) بر روی نتیجه روش تبدیل کاهش بخش تصادفی (MNF) اجرا شد و خروجی آن به عنوان ورودی نمایشگر n بعدی به کار گرفته شد [۲۴، ۲۳].

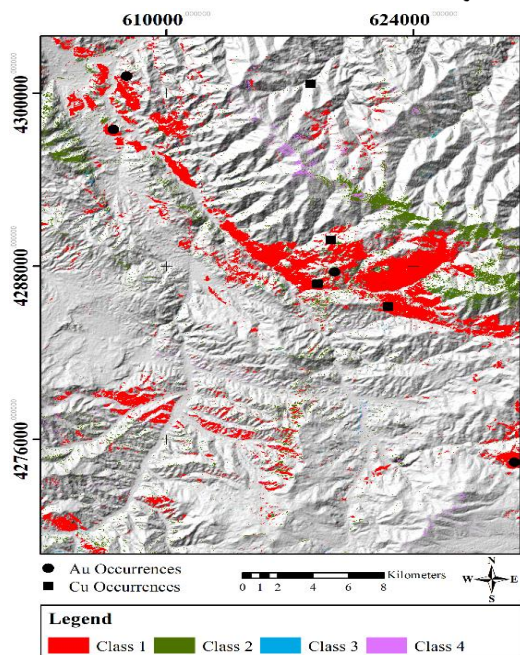
در مرحله بعد به وسیله تحلیل‌گر طیفی (SA) شباهت میانگین طیف‌های موجود در آن کلاسه با کانی‌های موجود در کتابخانه طیفی مورد مقایسه قرار گرفت و کانی‌هایی که بیشترین شباهت را با کلاسه مورد نظر داشتند به ترتیب در صد تشابه، به عنوان کانی معرف آن کلاسه در نظر گرفته شدند. در نهایت نیز برای اجرای روش MTMF از عضوهای انتهایی کانی‌های معرف به دست‌آمده استفاده گردید و نقشه نهایی ترسیم شد.

شکل (۴) نتایج حاصل از کلاسه‌بندی پیکسل‌های خالص را با استفاده از روش نمایشگر n بعدی بر روی تصاویر ماهواره‌ای استر (Aster) نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که پیکسل‌های خالص به ۱۰ کلاسه تقسیم شده‌اند. در این تصویر بسیاری از کلاسه‌ها به دلیل این که پیکسل‌های محدودی را

Unknown: n_D Class #10		
Library Spectrum	Score	SFF
desertv1.spc Desert_	[0.809]:	{0.809}
celsian.spc Celsian	[0.754]:	{0.754}
mizzoni4.spc Mizzoni	[0.752]:	{0.752}
dipyre.spc Dipyre BM	[0.741]:	{0.741}
meionit2.spc Meionit	[0.670]:	{0.670}
grossul3.spc Grossul	[0.645]:	{0.645}
epidote3.spc Epidote	[0.640]:	{0.640}
epidote2.spc Epidote	[0.630]:	{0.630}
vermicu4.spc Vermicu	[0.622]:	{0.622}
grossul1.spc Grossul	[0.603]:	{0.603}
mizzoni2.spc Mizzoni	[0.602]:	{0.602}
anorthi3.spc Anorthi	[0.596]:	{0.596}
chrysoti.spc Chrysot	[0.593]:	{0.593}
czoisite.spc Clinozo	[0.592]:	{0.592}
richter1.spc Richter	[0.591]:	{0.591}
phlogop2.spc Phlogop	[0.591]:	{0.591}
epidotel.spc Epidote	[0.590]:	{0.590}

Unknown: n_D Class #6		
Library Spectrum	Score	SFF
cookeit2.spc Cookeit	[0.924]:	{0.924}
paragoni.spc Paragon	[0.902]:	{0.902}
topaz1.spc Topaz Wig	[0.900]:	{0.900}
cookeit1.spc Cookeit	[0.898]:	{0.898}
lepidol1.spc Lepidol	[0.890]:	{0.890}
rectori2.spc Rectori	[0.886]:	{0.886}
kaolini4.spc Kaolini	[0.867]:	{0.867}
rectori1.spc Rectori	[0.864]:	{0.864}
kaolini7.spc Kaolini	[0.863]:	{0.863}
kaolini5.spc Kaolini	[0.860]:	{0.860}
kaolini6.spc Kaolini	[0.859]:	{0.859}
halloys5.spc Halloys	[0.859]:	{0.859}
halloys1.spc Halloys	[0.858]:	{0.858}
kaolini8.spc Kaolini	[0.852]:	{0.852}
kaolini3.spc Kaolini	[0.852]:	{0.852}

شکل (۵) نتایج حاصل از روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF) بر روی داده‌های تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این محدوده با توجه به اعمال روش‌های اندیس خلوص پیکسلی (PPI) و نمایشگر n بعدی از میان کلاس‌های شناسایی شده در محدوده چهار کلاس دارای اهمیت اکتشافی بودند که با توجه به تحلیل گر طیفی، کلاس ۱ نمایانگر کانی‌های کائولینیت-ایلپیت و به طور کلی کانی‌های رسی، کلاس ۲ نمایانگر کانی‌های اپیدوت-کلریت، کلاس ۳ نمایانگر کانی کلسیت و کلاس ۴ نمایانگر کانی پیگنایت در محدوده مطالعاتی می‌باشند. از این رو از رفتار طیفی آن‌ها می‌توان جهت شناسایی محدوده‌های دارای آلتراسیون آرژبلیک، آلتراسیون پروپیلیتیک، کانی کلسیت و سنگ‌های ولکانیکی استفاده نمود.



شکل (۵). نقشه پراکندگی کلاس‌های به دست آمده با استفاده از روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF) بر روی تصاویر استر (Aster) در محدوده مورد مطالعه.

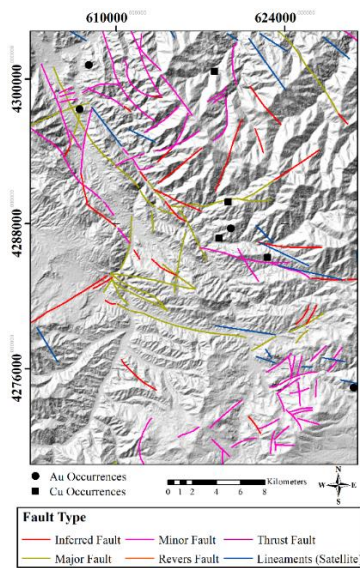
جدول (۹). جدول به دست آمده از روش تحلیل گر طیفی و بررسی درصد تشابه میانگین طیفی کلاس ۷ با طیف‌های موجود در کتابخانه طیفی در محدوده مورد مطالعه.

Unknown: n_D Class #7		
Library Spectrum	Score	SFF
pigeonit.spc Pigeoni	[0.915]:	{0.915}
pectolil.spc Pectoli	[0.848]:	{0.848}
mascagn2.spc Mascagn	[0.846]:	{0.846}
topazi.spc Topaz HS1	[0.845]:	{0.845}
budding1.spc Budding	[0.843]:	{0.843}
rectori2.spc Rectori	[0.842]:	{0.842}
topaz1.spc Topaz Wig	[0.842]:	{0.842}
sbicarbo.spc Sodium_	[0.840]:	{0.840}
topaz6.spc Topaz Wig	[0.839]:	{0.839}
topaz4.spc Topaz Wig	[0.837]:	{0.837}
budding2.spc Budding	[0.834]:	{0.834}
cookeit1.spc Cookeit	[0.825]:	{0.825}
topaz5.spc Topaz Wig	[0.823]:	{0.823}
augitel.spc Augite N	[0.820]:	{0.820}

جدول (۱۰). جدول به دست آمده از روش تحلیل گر طیفی و بررسی درصد تشابه میانگین طیفی کلاس ۹ با طیف‌های موجود در کتابخانه طیفی در محدوده مورد مطالعه.

Unknown: n_D Class #9		
Library Spectrum	Score	SFF
calcite2.spc Calcite	[0.835]:	{0.835}
rhodoch2.spc Rhodoch	[0.820]:	{0.820}
calcitel.spc Calcite	[0.819]:	{0.819}
strontia.spc Stronti	[0.811]:	{0.811}
calcite3.spc Calcite	[0.804]:	{0.804}
czoisite.spc Clinozo	[0.795]:	{0.795}
rhodoch1.spc Rhodoch	[0.788]:	{0.788}
siderite.spc Siderit	[0.788]:	{0.788}
anorthi3.spc Anorthi	[0.785]:	{0.785}
phlogop2.spc Phlogop	[0.775]:	{0.775}
lizardi3.spc Lizardi	[0.774]:	{0.774}
epidote2.spc Epidote	[0.773]:	{0.773}
chrysoti.spc Chrysot	[0.771]:	{0.771}
epidote3.spc Epidote	[0.768]:	{0.768}
lizardi2.spc Lizardi	[0.766]:	{0.766}

جدول (۱۱). جدول به دست آمده از روش تحلیل گر طیفی و بررسی درصد تشابه میانگین طیفی کلاس ۱۰ با طیف‌های موجود در کتابخانه طیفی در محدوده مورد مطالعه.



شکل (۷). نقشه کلی گسل های ترسیمی محدوده مورد مطالعه.

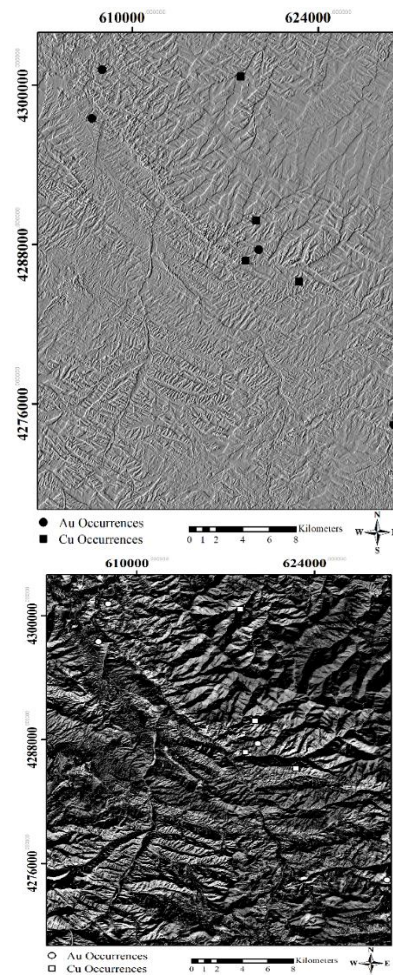
۵. نتیجه گیری

با مقایسه نتایج به دست آمده از روش های مختلف پردازش می توان به این نکته اشاره نمود که تقریباً تمامی روش های به کار گرفته شده بر روی تصاویر ا ستر (Aster) نتایج یکسانی را ارائه می دهند و به طور قطع نمی توان در مورد عملکرد بهتر هر کدام از روش ها تصمیم گرفت چرا که هر کدام از روش ها دارای محاسن و معایب متعددی هستند.

روش نسبت بانندی (BR) با توجه به ترکیب باندهای مختلف عملکرد خوبی در شناسایی کانی ها و آلتراسیون های مختلف دارد و به دلیل این که با تقسیم باندها بر یکدیگر باعث کاهش نویزها و اثر توپوگرافی در محدوده می شود، می تواند نتایج قابل قبولی را از خود به نمایش بگذارد. در این محدوده نیز استفاده از این روش با توجه به پیشینه استفاده از آن در مطالعات قبلی، آلتراسیون ها را با شدت بالایی شناسایی نموده است. روش آنالیز مؤلفه های اصلی انتخابی (SPCA) در مقایسه با آنالیز مؤلفه های اصلی (PCA) برای نمایش هر آلتراسیون از باندهایی که تابش و جذب بیشتری برای کانی مورد نظر دارند استفاده می کند از این رو نتایج آن قابل اعتمادتر می باشد. در این مطالعه نیز نقشه آلتراسیون تهیه شده با این روش در مقایسه با روش های دیگر دارای شدت آلتراسیون کمتری می باشد ولی قدرت نمایش مناطق آنومال به مراتب بالاتر از بقیه روش ها است چرا که با کاهش تعداد باندهای تصویر و استفاده از باندهای مهم باعث جلوگیری از بروز آلتراسیون های کاذب شده است. روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF) نیز با توجه به این که ورودی آن را تصاویر تبدیل کاهش بخش تصادفی (MNF) تشکیل داده است می تواند در

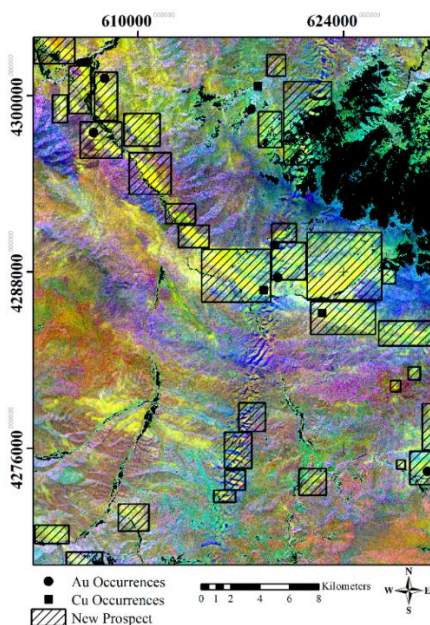
جهت شناسایی ساختارهای موجود در محدوده مطالعه و تشخیص انواع خطواره ها از جمله گسل ها، دو فیلتر راستایی (Directional) و فرکانسی (FFT) بر روی تصویر باند پانکروماتیک تصاویر لندست ۸ (OLI) پیاده سازی شد. بارز سازی خطوط توسط فیلترها در تصاویر محدوده مطالعاتی باعث نمایش ساختارهای خطی و خطواره ها شده است (شکل (۶)).

شکل (۷) نقشه نهایی گسل های محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد. در این تصویر برای ترسیم گسل ها از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی سیه رود و همچنین خطواره های حاصل از پردازش تصاویر ماهواره ای استفاده شده است. با توجه به ساختارهای نمایش داده شده در تصاویر حاصل از اعمال فیلترهای مکانی، بیشتر گسل های اصلی و همچنین خطواره ها دارای روند شمال غرب-جنوب شرق می باشند.



شکل (۶). اعمال فیلتر راستایی (شکل بالا) و فرکانسی (شکل پایین) بر روی تصویر باند پانکروماتیک ماهواره لندست ۸ در محدوده مطالعاتی.

آتشفشانی نیز بسیار پرتانسیل ارزیابی می‌شود. با توجه به شناسایی گسل‌ها از طریق تصاویر ماهواره‌ای و همچنین گسل‌های ترسیمی در نقشه زمین‌شناسی محدوده، این گسل‌ها در هدایت محلول‌های هیدروترمال و در نهایت تشکیل آلتراسیون‌ها بسیار تأثیرگذار مشاهده شده‌اند. شکل (۸) ترکیب رنگی کاذب باندهای $R: \frac{5+7}{6}, G: \frac{4+7}{6}, B: \frac{7+9}{8}$ را به همراه اندیس‌ها و کانسارهای مس و طلا و همچنین مناطق پرتانسیل شناسایی شده در این مطالعه، نشان می‌دهد.



شکل (۸). نقشه نهایی ترکیب رنگی کاذب باندهای $R: \frac{5+7}{6}, G: \frac{4+7}{6}, B: \frac{7+9}{8}$ بر روی تصاویر استر (Aster) به همراه محدوده‌های پرتانسیل و محل اندیس‌ها و کانسارهای معدنی.

در اینجا آلتراسیون‌های فیلیک به رنگ قرمز تا قهوه‌ای، آلتراسیون آرژیلیک به رنگ زرد تا سبز و آلتراسیون پروپیلیتیک به رنگ آبی نمایش داده شده‌اند. در این تصویر مخلوطی از آلتراسیون‌های آرژیلیک و فیلیک به رنگ زرد و در اطراف آن‌ها آلتراسیون‌های پروپیلیتیک به رنگ آبی به وضوح به چشم می‌خورند. بیشتر نواحی که به رنگ سبز نشان داده شده‌اند در اطراف پوشش‌های گیاهی می‌باشند که به رنگ مشکی ماسک شده‌اند و می‌توان آن‌ها را به خاک‌های غنی از کانی‌های رسی نسبت داد. در محدوده‌های پرتانسیل معرفی شده، با توجه به حضور واحدهای زمین‌شناسی نفوذی از جمله سنگ‌های دیوریتی و مونزونیتی و همچنین گسل‌های فراوان در آن‌ها، پیدایش کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری از نوع دیوریتی و مونزونیتی، کانسارهای اپی‌ترمال از نوع سولفیداسیون بالا و سولفیداسیون پایین و همچنین کانسارهای اسکارن به دلیل همبری این واحدهای نفوذی با سنگ‌های کربناته بسیار محتمل است.

تشخیص کانی‌ها بسیار خوب عمل کند ولی از آنجایی که از عضوهای انتهایی (Endmember) به دست آمده از روش‌های اندیس خلوص پیکسلی (PPI)، نمایشگر n بعدی و همچنین تحلیل‌گر طیفی برای شناسایی کانی‌های مشابه استفاده شده‌است، در شناسایی کانی‌ها در بعضی از محدوده‌ها ناتوان مانده‌است. پس می‌توان نتایج آن را در گروهی روش اندیس خلوص پیکسلی (PPI) دانست و این‌که تا چه میزان این روش عضوهای انتهایی را به خوبی تشخیص دهد. به طور کلی روش‌های پردازشی که از عضوهای انتهایی برای شناسایی آلتراسیون‌ها و کانی‌ها استفاده می‌کنند، در تصاویر ماهواره‌ای که دارای تعداد باندهای محدودی هستند مانند ماهواره استر (Aster)، عملکرد چندانی خوبی را به نمایش نمی‌گذارند. در صورتی که اگر از تصاویر ماهواره‌های ابرطیفی برای این‌گونه روش‌ها استفاده گردد عملکرد بهتر و غیر قابل مقایسه‌ای را ارائه می‌نمایند. همان‌گونه که در ابتدا اشاره شد نمی‌توان در مورد عملکرد بهتر هر کدام از روش‌ها بحث نمود چراکه که هدف این مطالعه استفاده از روش‌های مختلف برای نمایش آنومالی‌های واقعی و پرهیز از آنومالی‌های کاذب است ولی با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته و با در نظر گرفتن محاسن و معایب هر کدام از روش‌ها و نقشه‌های تولیدشده توسط آن‌ها می‌توان نتایج حاصل از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی (SPCA) را در این محدوده مناسب‌تر بقیه روش‌ها ارزیابی نمود. با توجه به آلتراسیون‌های به دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصویر، می‌توان پرتانسیل‌ترین مناطق را نواحی مرکزی تا شمال‌غرب محدوده معرفی نمود. در این نواحی آلتراسیون‌های فیلیک بیشتر در مرکز و آلتراسیون‌های آرژیلیک در اطراف آن قابل تشخیص می‌باشد. آلتراسیون‌های پروپیلیتیک نیز با توجه به محدوده تأثیر بیشتر آن در اطراف این دو آلتراسیون گسترش یافته‌اند. جهت ارزیابی نتایج به دست آمده، از ۸ اندیس مربوط به کانی‌زایی طلا و مس استفاده شده‌است. تمامی اندیس‌ها و کانسارهای شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه دارای ارتباط بسیار نزدیکی با آلتراسیون‌های به دست آمده می‌باشند و می‌توان از آن‌ها جهت اعتبارسنجی پژوهش استفاده نمود. این اندیس‌ها بیشتر مربوط به کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال می‌باشند که در محدوده شناسایی شده‌اند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این پژوهش تعیین واحدهای زمین‌شناسی درگیر در پیدایش آلتراسیون‌ها می‌باشد. از جمله واحدهای زمین‌شناسی مهم که در ارتباط با اندیس‌ها و آلتراسیون‌های شناسایی شده هستند، می‌توان به گدازه‌های برشی شده آندزیتی، گدازه‌های بالشی، سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، برش‌های آتشفشانی و همچنین واحدهای دیوریتی، مونزونیتی، گرانیتی و میکرودیوریتی اشاره نمود. در قسمت‌های مرکزی محدوده نیز کنتاکت‌های زمین‌شناسی بین واحدهای ماسه سنگی نازک لایه و سنگ‌های

Environment, vol 65(3), pp. 367-375, 1998.

۶. مراجع

[12] A. Iwasaki, H. Tonooka, "Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR," IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 43(12), pp. 2747-2751, 2005.

[13] M. Maleki, Sh. Niroomand, E. Farahbakhsh, S. Modabberi, & H. A. Tajeddin, "Hydrothermal alteration and structural mapping of the Qolqoleh-Kasnazan shear zone in Iran using remote sensing data," Arabian Journal of Geosciences, vol 14(16), pp. 1-14, 2021.

[14] M. Traore, J. D. T. Wambo, C. P. Ndepete, S. Tekin, A. Beiranvand Pour, & A. M. Muslim, "Lithological and alteration mineral mapping for alluvial gold exploration in the south east of Birao area, Central African Republic using Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) data," Journal of African Earth Sciences, vol 170, 2020.

[15] H. Ranjbar, M. Honarmand, Z. Moezifar, "Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt," Journal of Asian Earth Sciences, vol 24(2), pp. 237-243, 2004.

[16] A. A. Rasooli, "Basics of applied remote sensing (with emphasis on satellite image processing)," University of Tabriz Publications, p. 790, 2014. (In Persian)

[17] A. P. Crosta, C. R. De Souza Filho, F. Azevedo, C. Brodie, "Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis," International journal of Remote sensing, vol 24(21), pp. 4233-4240, 2003.

[18] R. Dos Reis Salles, C. R. De Souza Filho, T. Cudahy, L. E. Vicente, "Hyperspectral remote sensing applied to uranium exploration: A case study at the Mary Kathleen metamorphic-hydrothermal U-REE deposit, NW, Queensland, Australia," Journal of Geochemical Exploration, vol 179, pp. 36-50, 2017.

[19] J. T. Mundt, D. R. Streutker, N. F. Glenn, "Partial unmixing of hyperspectral imagery: theory and methods," Proceedings of the American Society of photogrammetry and remote sensing, ASPRS Tampa, FL, USA, 2017.

[20] M. Hosseinjani, M. H. Tangestani, "Mapping alteration minerals using sub-pixel unmixing of ASTER data in the Sarduiyeh area, SE Kerman, Iran," International Journal of Digital Earth, vol 4(6), pp. 487-504, 2011.

[1] G. F. Bonham-Carter, "Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS," Computer methods in the geoscientists, vol. 13, p. 398, 1994.

[2] E. J. M. Carranza, "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS," 2008.

[3] L. Wald, "Definitions and terms of reference in data fusion," Joint EARSeL/ISPRS Workshop "fusion of sensor data, knowledge sources and algorithms for extraction and classification of topographic objects", vol. 32, pp. 2-6, 1999, ISPRS.

[4] R. Nouri, M. R. Jafari, M. Arain, & F. Feizi, "Hydrothermal alteration zones identification based on remote sensing data in the Mahin Area, West of Qazvin Province, Iran," International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, vol 6(7), pp. 382-385, 2012.

[5] E. J. M. Carranza, "Geocomputation of mineral exploration targets," Computers & Geosciences, vol. 37(12), pp. 1907-1916, 2011.

[6] F. F. Sabins, "Remote sensing for mineral exploration," Ore geology reviews, vol. 14(3-4), pp. 157-183, 1999.

[7] M. Mehrpartou, M. Mirzaei, M. H. Emami & M. Bahreghmand, "Geological map of Siah Rud," 1:100,000, Sheet No 5267, Geological Survey of Iran, 1997.

[8] H. A. Rabiei, "Remote Sensing (Principles and Applications)," Organization of study and compilation of humanities books in universities, p. 302, 2018. (In Persian)

[9] K. Duda, J. Daucsavage, D. Siemonsma, B. Brooks, & R. Oleson, "Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (aster) level 1 precision terrain corrected registered at-sensor radiance product (ast_11t)," US Geological Survey, USA, 2015.

[10] S. B. Fatemi, Y. Rezaei, "Fundamentals of Remote Sensing," Azadeh Publications, p. 350, 2017. (In Persian)

[11] A. Berk, L. S. Bernstein, G. P. Anderson, P. K. Acharya, D. C. Robertson, & J. H. Chetwynd, "MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS," Remote sensing of

[21]S. Saed, H. Azizi, N. Daneshvar, P. Afzal, S. A. Whattam, & Y. Mohammad, "Hydrothermal alteration mapping using ASTER data, Takab-Baneh area, NW Iran: A key for further exploration of polymetal deposits," Geocarto International, pp. 1-25, 2022.

[22]R. A. Schowengerdt, "Techniques for image processing and classifications in remote sensing," Academic Press, 2012.

[23]A. Guha, "Mineral exploration using hyperspectral data," Hyperspectral Remote Sensing, pp. 293-318, 2020.

[24]R. G. Rejith, M. Sundararajan, S. Venkatesan, M. A. Mohammed-Aslam, "Remote sensing for exploring heavy mineral deposits: a case study of Chavara and Manavalakurichi deposits, southwest coast of India," Remote Sensing of Ocean and Coastal Environments, pp. 177-188, 2021.