

علمی - تخصصی

شناسایی آلتراسیون ها و ساختارهای زمین ساختی مرتبط با کانسارهای گرمابی با استفاده از تکنیک های مختلف پردازش تصاویر ماهواره ای (مورد مطالعاتی: شمال شرق زون زمین شناسی 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 ماهواره ای با هدف پی جویی مواد معدنی یکی از مهم ترین مراحل اکتشاف می باشد. در این راستا بررسی و شناخت روش های مختلف و نوین به دلیل بالابردن احتمال اکتشاف و کاهش ریسک، حائز اهمیت است. روش هایی که در عین سادگی و کارایی بالا، باعث کاهش هزینه های اکتشافی نیز گردند. جهت مطالعات دورسنجی در محدوده مورد مطالعه بعد از تهیه اطلاعات مورد نیاز از جمله تصاویر ماهواره ای (تصاویر ماهواره های استر و لندست ۸ (OLI)) و نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سیه رود، پایگاه داده ای شامل تمامی اطلاعات مورد نیاز تشکیل گردید. برای استفاده از تصاویر ماهواره ای در مطالعات اکتشافی در ابتدا پیش پردازش های لازم متناسب با نوع ماهواره به کار گرفته شده، بر روی تصاویر پیاده سازی شد. از جمله این پیش پردازش ها می توان به تصحیحات هم شنوی، تصحیحات رادیومتری، تصحیحات اتمسفری، تصحیحات هندسی و حذف اثر پوشش های گیاهی از طریق شاخص پوشش گیاهی (NDVI) اشاره نمود. سپس برای تفکیک و تشخیص شواهد کنترل کننده کانی سازی اعم از تیپ سنگ شناسی، ساختارهای زمین شناسی، آلتراسیون ها (از جمله آلتراسیون های آرژلیک، فلیک، پروپیلیتیک، سیلیس و اکسیدهای آهن) و خطواره ها از روش های پردازش تصویر همچون نسبت باندی (BR)، ترکیب رنگی کاذب (FCC)، آنالیز مؤلفه های اصلی انتخابی (SPCA)، فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF)، فیلتر راستایی و فرکانسی (FFT) بهره گرفته شد. در نهایت نقشه های نهایی آلتراسیون ها و همچنین نقشه ساختارهای زمین شناسی تهیه گردید و مناطق مهم تحت تأثیر آلتراسیون ها مشخص شدند.

کلید واژه ها: پی جویی، دورسنجی، ماهواره، آلتراسیون، زمین شناسی

۱. مقدمه

چند مرحله ای از تولید نقشه، از مقیاس منطقه ای به محلی است که در هر مقیاسی از آن، با جمع آوری، تجزیه و تحلیل و ادغام مجموعه ای از داده ها همراه است. هدف از این کار به دست آوردن اطلاعات مکانی از آنومالی های زمین شناسی، دورسنجی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی در ارتباط با نوع کانسار مورد نظر می باشد و در نهایت به معین کردن منطقه مورد پی جویی پرداخته می شود که تمامی این فرآیندها را می توان نوعی از مدل سازی پیش بینی کننده محسوب نمود [۲]. یکی از این فعالیت ها با هدف پی جویی مواد معدنی، استفاده از تصاویر ماهواره ای در امر دورسنجی اکتشافی است. علم دورسنجی به اندازه گیری ویژگی اجسام مورد نظر روی سطح زمین با استفاده از داده های نصب

اکتشاف مواد معدنی یک فعالیت چند مرحله ای محسوب می گردد که از مقیاس کوچک شروع و به مقیاس بزرگ می رسد و در نهایت منجر به انتخاب مناطقی به عنوان هدف برای حفاری در کانسار مورد نظر خواهد شد [۱]. در این راستا همواره تلاش می گردد 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 می باشد. یکی از مهم ترین تلاش ها، مشخص کردن هدف خواهد بود که در واقع یک فعالیت

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 علمی‌تری 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 یافته است. 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 سخت‌افزارها 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 طوری که 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 دربرگرفتن

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 خطوطاره‌ها) 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 خطوطاره‌ها و گسل‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند، فیلترهای راستایی (Directional) و فرکانسی (FFT) هستند که در هموارسازی تصویر، برجسته کردن حاشیه 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 به طوری که در نواحی شمال خاوری محدوده مورد

۳. روش مطالعه

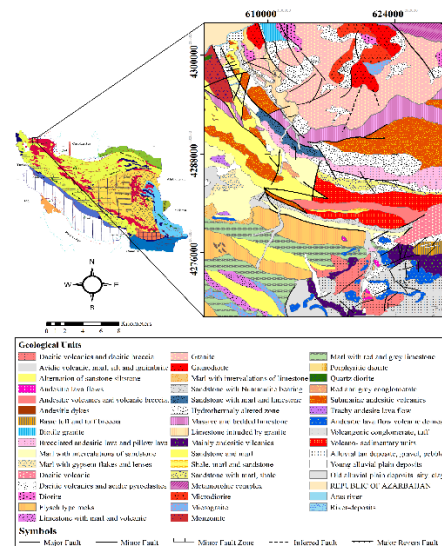
امروزه از تکنیک های دورسنجی در جهان استفاده های زیادی می شود که یکی از کاربردهای مهم آن در اکتشاف ذخایر معدنی می باشد. تکنیک های دورسنجی امکان شناسایی و اکتشاف مقدماتی یک محدوده وسیع را با دقت و سرعت بالا و هزینه کم میسر می سازد. در اکتشاف ذخایر معدنی از روش های مختلف آشکارسازی برای تفکیک و تشخیص شواهد کنترل کننده کانی سازی (تیپ سنگ شناسی، ساختارهای زمین شناسی و آلتراسیون) استفاده می گردد. از این رو تجزیه و تحلیل داده های ماهواره ای با هدف آشکارسازی شواهد کانی سازی امر بسیار مهمی در بحث دورسنجی اکتشافی محسوب می شود [۸].

در این مطالعه ابتدا تمامی داده های مورد نیاز از جمله تصاویر ماهواره ای، نقشه زمین شناسی رقومی شده، اندیس ها و کانسارهای شناسایی شده در محدوده و تمامی اطلاعات مورد نیاز جمع آوری شدند و پایگاه داده ای جهت بررسی لایه های مختلف اکتشافی تشکیل گردید. سپس تمامی پیش پردازش های لازم جهت آماده سازی داده های ماهواره ای برای پردازش آن ها انجام پذیرفت. پردازش تصاویر نیز متناسب با هدف پژوهش با بهره گیری از تکنیک های مختلف برای تهیه نقشه های آلتراسیون بر روی تصاویر ماهواره ای صورت گرفت و در نهایت با استفاده از اندیس ها و کانسارهای شناسایی شده مورد راستی آزمایی قرار گرفتند. بعد از جمع بندی و بررسی نقشه های مختلف به دست آمده، محدوده های پرمپتانسیل معدنی جهت اکتشافات بعدی معرفی شدند.

۳-۱. تهیه تصاویر ماهواره ای

در این مطالعه از تصاویر مربوط به سنجنده های 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 مختصاتی UTM می باشند [9]. 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 نقاط کنترل زمینی (GCPs)، تصحیحات هندسی بر روی آن ها صورت پذیرفته است. تمامی تصاویر مورد استفاده تا حد امکان بدون ابر و دارای کمترین پوشش گیاهی و برف در محدوده مورد مطالعه می باشند. تصاویر مورد استفاده از سایت سازمان هوانوردی و فضایی ملی آمریکا (ناسا) بارگیری شده است. لازم به ذکر است تمامی پیش پردازش ها و پردازش های تصاویر ماهواره ای

مطالعه این گونه فعالیت ها به صورت سنگ های نفوذی (گرانیت، میکروگرانیت، مونزونیت، گرانودیوریت و ...)، در بخش مرکزی به صورت فعالیت های آتشفشانی (گدازه های برشی شده آندزیتی و گدازه های بالشی) و در نواحی جنوب باختری به صورت سنگ های آتشفشان برشی (سنگ های آتشفشانی داسیتی، برش های داسیتی، سنگ های آتشفشانی آندزیتی و ...) گسترش یافته اند. بیشتر این واحدها در قسمت های مختلف تحت تأثیر محلول های هیدروترمال قرار گرفته اند و دچار دگرسانی شده اند. در شمال شرق محدوده مجموعه ای از واحدهای متامورفیک قابل مشاهده است که بیشتر شامل سنگ های متاداباز-گابرو، آمفیبولیت، بیوتیت-شیست و مرمر می باشند. سنگ های آتشفشانی بیشتر در میان نهشته های مربوط به پالئوسن گسترش یافته اند، اما این نهشته ها در محدوده دارای گسترش چندانی نبوده و بیشتر رخنمون های آن در نواحی مرکزی و جنوب باختری قابل مشاهده است. بیشتر این واحدها شامل رخساره های تیپ فیلیش، ماسه سنگ های آهکی، مارن و سنگ های آتشفشانی زیردریایی با ترکیب اسیدی تا متوسط می شوند [۷]. از لحاظ زمین شناسی ساختمانی روند عمومی محور ناودیس ها و تاقدیس ها و راستای گسل های اصلی مبین تحمیل نیروی فشاری در راستای تقریباً شمالی-جنوبی به واحدهای رسوبی و آذرین است. تأثیر و عملکرد نیروها بر نهشته های رسوبی یا آذرین منطقه به شکل چین خوردگی و گسل خوردگی ظاهر می گردد. روند گسل های اصلی منطقه منطبق با روند محوری تاقدیس ها و ناودیس ها می باشد. عمده گسل های اصلی دارای روند شمال باختر-جنوب خاوری و خاوری-باختری است [۷].



شکل (۱). موقعیت منطقه از لحاظ زمین ساختی و نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سیه رود) [۷].

نیز در نرم افزار Envi 5.3 صورت پذیرفته است.

۳-۲. پیش پردازش های تصاویر ماهواره ای

پیش از پردازش داده های سنجش از دور می بایست یک سری تصحیحات بر روی داده های خام اولیه صورت پذیرد. انجام این تصحیحات باعث حذف اثرات نویزهای احتمالی، تفکیک بهتر عارضه های سطحی، حذف اثر توپوگرافی بر روی داده ها و همچنین مختصات دار کردن تصاویر ماهواره ای می گردد. این مرحله را می توان مرحله پیش پردازش داده های خام اولیه جهت فراهم آوردن داده ها برای پردازش اصلی نامید. این تصحیحات شامل تصحیح هندسی، تصحیح رادیومتریک، تصحیح اتمسفری و غیره می شود. لازم به ذکر است نوع پیش پردازش های به کار گرفته شده در تصاویر ماهواره های مختلف متفاوت است.

• تصحیح هندسی

به علت ایجاد برخی خطاها در هنگام برداشت تصاویر ماهواره ای مانند خطای تجهیزات، گردش زمین، عدم ثبات سکوها نیازمند آن هستیم که این تصاویر را تصحیح نماییم. از آنجایی که تصاویر سنجش از دور نقشه نیستند، دارای مقیاس و سیستم تصویر نمی باشند، لذا زمانی که نیاز است در قالب نقشه یا در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به کار گرفته شوند، بایستی آن ها را به شیوه های مناسبی دارای مقیاس و سیستم تصویر نمود. به نحوه تغییر و تبدیل یک تصویر سنجش از دور به گونه ای که دارای مقیاس و سیستم تصویر بشود، تصحیحات هندسی گفته می شود. روشی مشابه تصحیحات هندسی که عمل آن تطبیق و یکسان سازی سیستم مختصات تصویر با سیستم مختصات نقشه یا تصویر دیگری است، تطبیق سازی گفته می شود [۱۰].

داده های ماهواره ای در مرحله تصحیح هندسی با توجه به نقشه های توپوگرافی و تصاویر ماهواره ای دقت بالا دارای مختصات در قالب شبکه مختصات UTM قرار می گیرند. این تصحیحات براساس انتخاب تعدادی نقطه کنترل زمینی (GCP) بر روی تصاویر مختصات دار و مشابه یابی آن بر روی داده های ماهواره ای مورد نظر انجام می شود. در این مرحله با استفاده از روش های آماری لازم و با توجه به نقاط انتخاب شده، خطاهای موجود بین مختصات تصاویر و مختصات زمینی پدیده ها به حداقل می رسد. داده های دیگر نیز براساس داده های ماهواره ای تصحیح شده، با استفاده از روش مشابه یابی تصویر به تصویر می گردند و در نتیجه محدوده های مورد نیاز بریده شده و قطعه بندی می شوند.

• تصحیح رادیومتریک

ارزش عددی هر پیکسل در داده های ماهواره ای، 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 می شوند. بنابراین اطلاعاتی که در باندهای مختلف طیف مرئی و فروسرخ نزدیک ثبت می گردند، بازتاب واقعی پدیده ها نبوده و باید تصحیح گردند [۱۰].

• تصحیح اتمسفری

انرژی الکترومغناطیس شناسایی شده با ابزار سنجش 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 می شود. مقدار انرژی الکترومغناطیسی در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک طیف که توسط یک حسگر بالاتر از جو تشخیص داده می شود، وابسته به مقدار انرژی خورشیدی ورودی است که توسط فرایند جذب جوی و ویژگی های بازتابی سطح زمین تضعیف می شود. 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 سنجش از دور در ناحیه نور طیفی براساس این فرض است که مقادیر مربوط به پیکسل های تصویر به طور دقیق نشان دهنده توزیع مکانی بازتابی سطح زمین می باشند و میزان چنین بازتابی وابسته به ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیکی سطح زمین است. مقدار ثبت شده برای هر پیکسل در تصویر سنجش از دوری، تابعی از تابش تشخیص داده شده توسط حسگر است. با توجه به برهم کنش جوی، این تابش آشکار ترکیبی از سهم جسم هدف و اثرات جوی است. مقدار ثبت شده برای هر پیکسل در تصاویر سنجش از دوری تابع رادیانس سنسور تشخیص داده شده است. با توجه به اثرات متقابل جو، رادیانس ظاهر شده ترکیبی از توزیع جسم هدف و تاثیر جو است [۱۰].

تصحیح اتمسفری به دو روش تجربی (نسبی) و مدل انتقال پیچیده (مطلق) قابل انجام است. روش های تصحیح نسبی نیازی به خصوصیات و پارامترهای جوی ندارند بلکه از اطلاعات موجود در خود تصویر استفاده کرده و عمل تصحیح اتمسفری را انجام می دهند. در روش مطلق به پارامترهای متفاوتی در پروفیل جوی نیاز دارد. در این روش بازتاب های زمینی تحت شرایط مختلف جوی، ارتفاعی و هندسه بین خورشید و ماهواره قادر به ارزیابی خواهد بود [۱۰]. روش تصحیح FLAASH جز روش های مطلق محسوب می گردد. 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 می کند که شامل تصحیح و حذف اثرات بازتابی پیکسل های اطراف در پیکسل مورد نظر است. از مزایای استفاده از این الگوریتم می توان به اصلاح اثرات پیکسل های مجاور و کالیبراسیون طیفی اتوماتیک اشاره کرد

استفاده می شود:

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

در این رابطه BV_{ijr} مقدار پیکسل سطر i ام و ستون j تصویر نسبتی حاصل می باشد. BV_{ijk} مقدار پیکسل سطر i ام و ستون k باشد و BV_{iji} مقدار پیکسل سطر i ام و ستون j باشد. اگر براساس شدت بازتاب و جذب طیفی کانی های دگرسانی 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).

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

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:

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

• 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 آشکارساز باند ۴ است که طیف بازتاب شده از آن به سمت آشکارسازهای دیگر هدایت می شود. باندهای ۵ و ۹ به دلیل نزدیکی بیشتر به این آشکارساز 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 وسعت 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 آشکارسازی 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 که 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 دگرسانی، 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 می توان یک روش ترکیبی براساس ترکیب جزئی و مبتنی بر ترکیبی از روش های 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 محدودیت های فیزیکی می باشد 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 می کند. مقادیر MF برای هر پیکسل با پیش بینی داده های تبدیل شده MNF بر روی یک بردار MF محاسبه می شود. این تضمین می کند 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 ارزش های صفر تا یک تولید کرده که در آن ارزش های پایین نشان دهنده پس زمینه و ارزش های بالا نشان دهنده پیکسل هدف است. تعریف ریاضی بردار MF 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، $\vec{v}$ بردار MF، $[C_{MNF}]^{-1}$ معکوس ماتریس کوواریانس MNF و $\vec{t}_{MNF}$ 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 می توان آن را به عنوان میزان امکان پذیری و یا به عبارت دیگر معیاری برای تعیین میزان درستی انطباق هر پیکسل طبقه بندی 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 وسیله ای 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 پاسخ های کاذبی است که در تصاویر MF یافت شده اند. پیکسل هایی که مقادیر عدم امکان پایین و MF بالا دارند به عنوان پیکسل صحیح بوده اند [۲۰]. در این روش از تصاویر تبدیل کاهش بخش تصادفی (MNF) به عنوان ورودی استفاده گردیده است. جهت شناسایی کانی های مهم نیز از عضوهای انتهایی که از روش های اندیس خلوص پیکسلی (PPI) و نمایشگر n بعدی و همچنین تحلیل گر طیفی بهره گرفته شد [۲۱].

که در آن S_k انحراف معیار باند k و r_j ضریب همبستگی دو باند از ترکیب سه باند می باشد. هر چه شاخص OIF بالا باشد باندهای سه گانه ترکیب رنگی کاذب جهت تفکیک مناسب تر می باشند [۱۴].

تصاویر رنگی مرکب تصاویری هستند که از تلفیق سه باند به وجود می آید. به طور 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 نشان دهنده رنگ واقعی منطقه است؛ به ترکیب $RGB=321$ True Color گفته می شود تمامی حالات به غیر از $RGB=321$ False color و یا ترکیب رنگی کاذب نامیده می شود.

• آنالیز مؤلفه های اصلی انتخابی (کروستا)

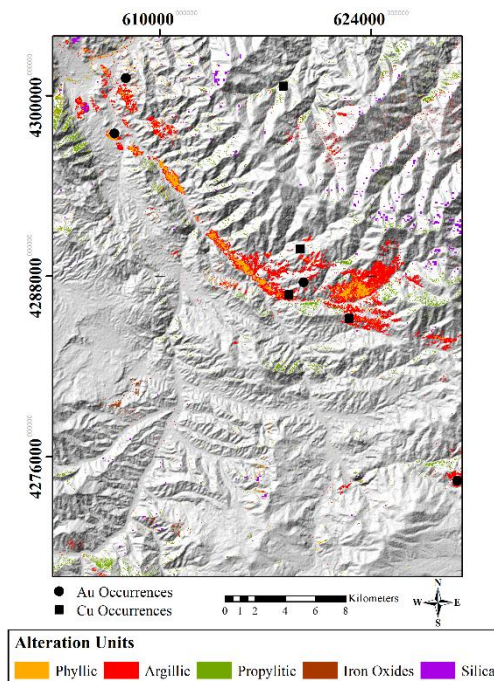
روش کروستا یکی از روش های آنالیز مؤلفه های اصلی انتخابی است. در این روش چند باند به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود، سپس به همان تعداد مؤلفه اصلی ارائه می شود که هر مؤلفه برای هر باند دارای مقادیری از ۱- تا ۱+ است [۱۵]. کاهش تعداد باندها برای تحلیل مؤلفه اصلی محققان را مطمئن می سازد تا پدیده های معینی را شناسایی کرده و احتمال ترسیم محدوده مورد نظر را در یکی از مؤلفه های اصلی فراهم سازد. کروستا و همکارانش از این تکنیک برای شناسایی کانی های 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 تصمیم گیری بعدی هستند، بدین صورت که مؤلفه ای که دارای بیشترین اختلاف بین دو باند مذکور باشد، جهت نمایش خاکستری انتخاب می شود.

از این طریق می توان اطمینان حاصل کرد که پدیده هایی نظیر پوشش گیاهی در به نقشه درآوردن کانی های هدف ظاهر نخواهند شد و همچنین می توان 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 مؤلفه های اصلی انتخابی را جهت شناسایی آلتراسیون های مختلف با استفاده از تصاویر ماهواره ای استر نشان می دهد [۱۷].

جدول (۲). نسبت های باندی مورد استفاده در شناسایی کانی ها و آلتراسیون ها با استفاده از داده های ماهواره ای استر (ASTER).

نوع آلتراسیون	باندهای انتخاب شده ورودی
آرژلیک	۷-۴-۱
فیلیک	۶-۵-۳-۱
پروپلیتیک	۸-۵-۳-۱
کانی های گروه هیدروکسید	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 باندی 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

• 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 مقادیر 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 شده است. 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 نسبت‌بندی می‌باشد، با استفاده از نسبت‌های باندی 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.

اکسیدهای آهن استفاده نمود.

جدول (۶). مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخاب شده برای نمایش اکسیدهای آهن با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی 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 آرژیلیک، فلیک، پروپیلیتیک، اکسیدهای آهن و کانی‌های گروه هیدروکسیل را که به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی با استفاده از داده‌های ماهواره استر (Aster) به‌دست 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 آرژیلیک، فلیک 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 فلیک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی را در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به این‌که کانی‌های معرف آلتراسیون فلیک 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 فلیک با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی در تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

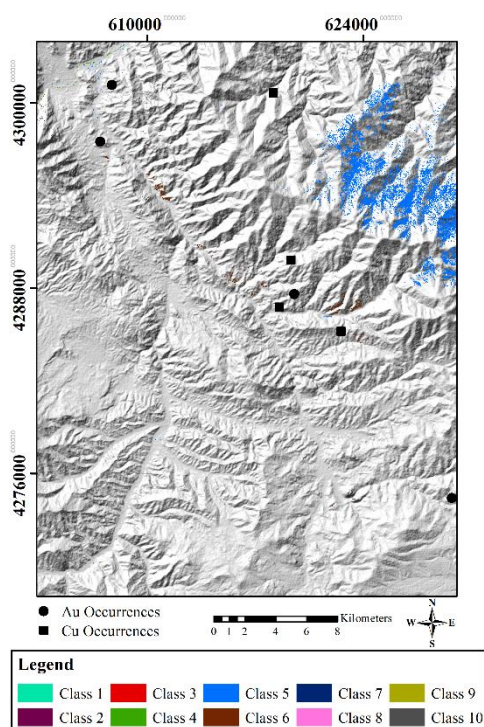
Eigenvectors	B 1	B 3	B 5	B 6
PC 1	0.35	0.54	0.55	0.55
PC 2	0.02	0.82	-0.42	-0.41
PC 3	0.94	-0.22	-0.18	-0.21
PC 4	-0.02	0.00	-0.71	0.71

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 این‌که 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

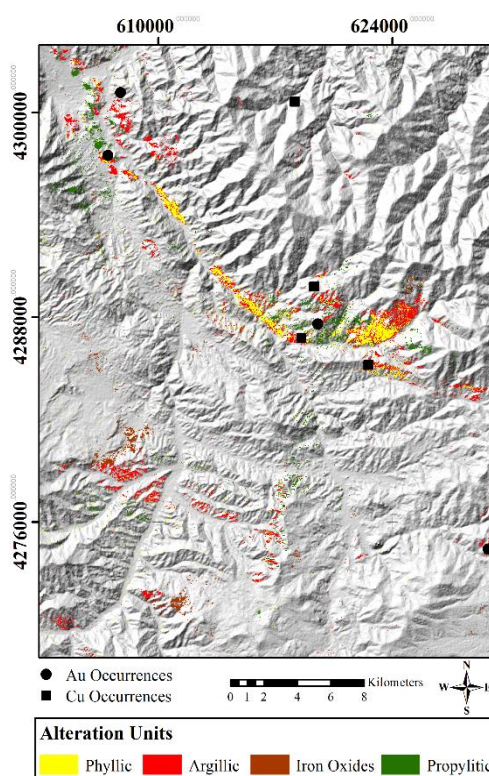


شکل (۴). کلاسه‌بندی پیکسل‌های خالص با استفاده از روش نمایشگر n بعدی بر روی تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه.

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.

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	[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}



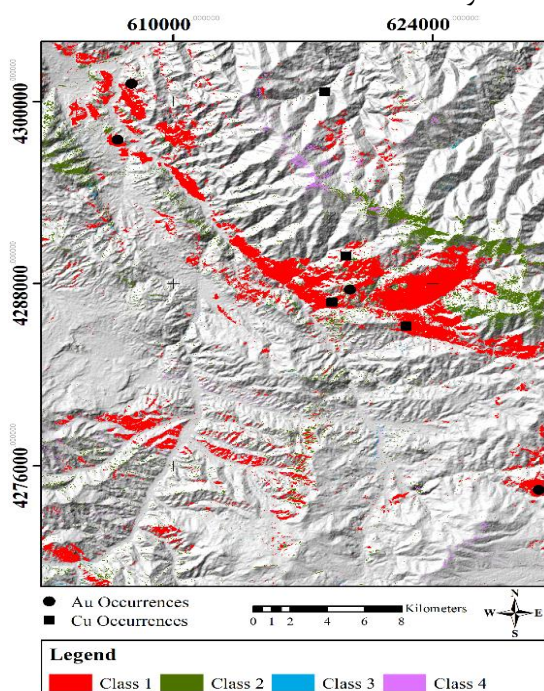
شکل (۳). نقشه نهایی تهیه‌شده از آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک، اکسیدهای آهن و کانی‌های گروه هیدروکسیل به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی با استفاده از داده‌های ماهواره استر در محدوده مورد مطالعه.

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 درصد 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 شامل می‌شوند ممکن است به وضوح قابل مشاهده نباشند.

میان کلاسه های شناسایی شده در محدوده چهار کلاسه دارای اهمیت اکتشافی بودند که با توجه به تحلیل گر طیفی، کلاسه ۱ نمایان گر کانی های کائولینیت-ایلیت و به طور کلی کانی های رسی، کلاسه ۲ نمایان گر کانی های اپیدوت-کلریت، کلاسه ۳ نمایانگر کانی کلسیت و کلاسه ۴ نمایان گر کانی پیگنایت در محدوده مطالعاتی می باشند. از این رو از رفتار طیفی آن ها می توان جهت شناسایی محدوده های دارای آلتراسیون آرژلیک، آلتراسیون پروپیلیتیک، کانی کلسیت و سنگ های ولکانیکی استفاده نمود.



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

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 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.

جدول (۹). جدول به دست آمده از روش تحلیل گر طیفی و بررسی درصد تشابه میانگین طیفی کلاسه ۷ با طیف های 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}
topazi1.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 کلاسه ۹ با طیف های 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 کلاسه ۱۰ با طیف های موجود در کتابخانه طیفی در محدوده مورد مطالعه.

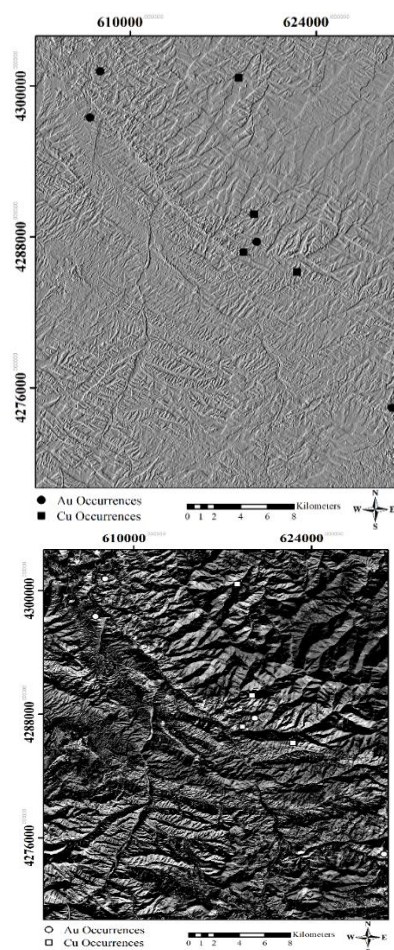
Unknown: n_D Class #10	Library Spectrum	Score	SFF
desertv1.spc	Desert	[0.809]:	{0.809}
celsian.spc	Celsian	[0.754]:	{0.754}
mizzoni4.spc	Mizzoni	[0.752]:	{0.752}
dipyre.spc	Dipyre BM	[0.741]:	{0.741}
meionit2.spc	Meionit	[0.670]:	{0.670}
grossul3.spc	Grossul	[0.645]:	{0.645}
epidote3.spc	Epidote	[0.640]:	{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}

شکل (۵) نتایج حاصل از روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF) بر روی داده های تصاویر استر (Aster) محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد. در این محدوده با توجه به اعمال روش های اندیس خلوص پیکسلی (PPI) و نمایشگر n بعدی از

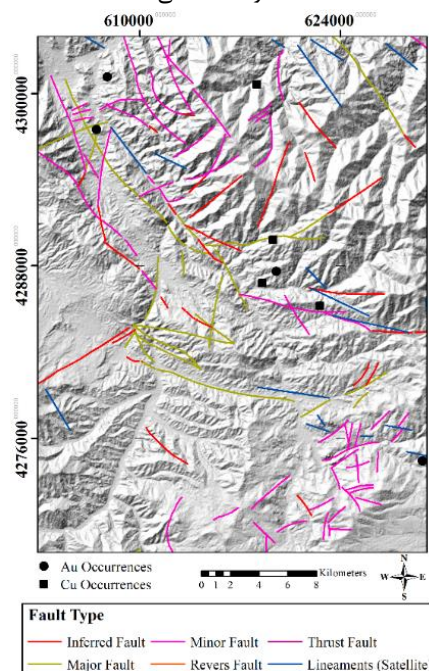
۵. نتیجه‌گیری

با مقایسه نتایج به دست‌آمده از روش‌های مختلف پردازش می‌توان به این نکته اشاره نمود که تقریباً تمامی روش‌های به کار گرفته شده بر روی تصاویر استر (Aster) نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند و به طور قطع نمی‌توان در مورد عملکرد بهتر هر کدام از روش‌ها تصمیم گرفت چرا که هر کدام از روش‌ها دارای محاسن و معایب متعددی هستند.

روش نسبت بانندی (BR) با توجه به ترکیب باندهای مختلف عملکرد خوبی در شناسایی کانیه‌ها و آلتراسیون‌های مختلف دارد و به دلیل این‌که با تقسیم باندها بر یکدیگر باعث کاهش نویزها و اثر توپوگرافی در محدوده می‌شود، می‌تواند 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، آلتراسیون‌ها را با شدت بالایی شناسایی نموده است. روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی (SPCA) در مقایسه با آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای نمایش هر آلتراسیون از باندهایی که تابش و جذب بیشتری برای کانی موردنظر دارند استفاده می‌کند از این رو نتایج آن قابل اعتمادتر می‌باشد. در این مطالعه نیز نقشه آلتراسیون تهیه‌شده با این روش در مقایسه با روش‌های دیگر دارای شدت آلتراسیون کمتری می‌باشد ولی قدرت نمایش مناطق آنومال به مراتب بالاتر از بقیه روش‌ها است چرا که با کاهش تعداد باندهای تصویر و استفاده از باندهای مهم باعث جلوگیری از بروز آلتراسیون‌های کاذب شده‌است. روش فیلتر تطبیقی ترکیبی تعدیل شده (MTMF) نیز با توجه به این‌که ورودی آن را تصاویر تبدیل کاهش بخش تصادفی (MNF) تشکیل داده است می‌تواند در تشخیص کانی‌ها بسیار خوب عمل کند ولی از آن‌جایی‌که از عضوهای انتهایی (Endmember) به‌دست‌آمده از روش‌های اندیس خلوص پیکسلی (PPI)، نمایشگر n بعدی و همچنین تحلیل گر طیفی برای شناسایی کانی‌های مشابه استفاده شده‌است، در شناسایی کانی‌ها در بعضی از محدوده‌ها ناتوان مانده است. پس می‌توان نتایج آن را در گروه 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

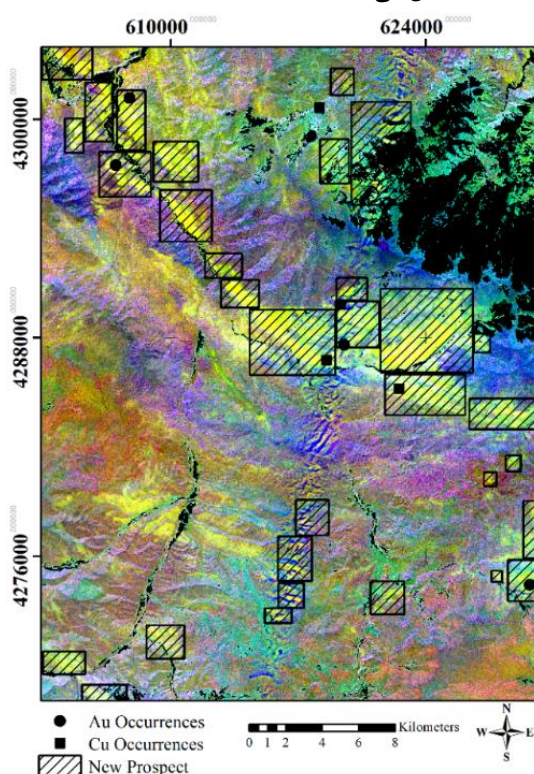


شکل (۶). اعمال فیلتر راستایی (شکل بالا) و فرکانسی (شکل پایین) بر روی تصویر باند پانکروماتیک ماهواره لندست ۸ در محدوده مطالعاتی.



شکل (۷). نقشه کلی گسل‌های ترسیمی محدوده مورد مطالعه.

بین واحدهای ماسه سنگی نازک لایه و سنگ های آتشفشانی نیز بسیار پرتانسیل ارزیابی می شود. با توجه به شناسایی گسل ها از طریق تصاویر ماهواره ای و همچنین گسل های ترسیمی در نقشه زمین شناسی محدوده، این گسل ها در هدایت محلول های هیدروترمال و در نهایت تشکیل آلتراسیون ها بسیار تأثیرگذار مشاهده شده اند. شکل (۸) ترکیب رنگی کاذب باندهای $R: \frac{5+7}{6}, G: \frac{4+7}{6}, B: \frac{7+9}{8}$ را به همراه اندیس ها و کانسارهای مس و طلا و همچنین مناطق پرتانسیل شناسایی شده در این مطالعه، نشان می دهد.



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 محدوده های پرتانسیل و محل اندیس ها و کانسارهای معدنی.

در اینجا آلتراسیون های فیلیک به رنگ قرمز تا قهوه ای، آلتراسیون آرژیلیک به رنگ زرد تا سبز و آلتراسیون پروپیلیتیک به رنگ آبی نمایش داده شده اند. در این تصویر مخلوطی از آلتراسیون های آرژیلیک و فیلیک به رنگ زرد و در اطراف آنها آلتراسیون های پروپیلیتیک به رنگ آبی به وضوح به چشم می خورند. بیشتر نواحی که به رنگ سبز نشان داده شده اند در اطراف پوشش های گیاهی می باشند که به رنگ مشکی ماسک شده اند و می توان آنها را به خاک های غنی از کانی های رسی

عضوهای انتهایی برای شناسایی آلتراسیون ها و کانی ها استفاده می کنند، در تصاویر ماهواره ای که دارای تعداد باندهای محدودی هستند مانند ماهواره استر (Aster)، عملکرد چندان خوبی را به نمایش نمی گذارند. در صورتی که اگر از تصاویر ماهواره های ابرطیفی برای این گونه روش ها استفاده گردد عملکرد بهتر و غیر قابل مقایسه ای را ارائه می نمایند. همان گونه که در ابتدا اشاره شد نمی توان در مورد عملکرد بهتر هر کدام از روش ها بحث نمود چرا که هدف این مطالعه استفاده از روش های مختلف برای نمایش آنومالی های واقعی و پرهیز از آنومالی های کاذب است ولی با توجه به مقایسه های صورت گرفته و با در نظر گرفتن محاسن و معایب هر کدام از روش ها و نقشه های تولید شده توسط آنها می توان نتایج حاصل از روش آنالیز مؤلفه های اصلی انتخابی (SPCA) را در این محدوده مناسب تر بقیه روش ها ارزیابی نمود. با توجه به آلتراسیون های به دست آمده با استفاده از روش های مختلف پردازش تصویر، می توان پرتانسیل ترین مناطق را نواحی مرکزی تا شمال غرب محدوده معرفی نمود. در این نواحی آلتراسیون های فیلیک بیشتر در مرکز و آلتراسیون های آرژیلیک در اطراف آن قابل تشخیص می باشد. آلتراسیون های پروپیلیتیک نیز با توجه به محدوده تأثیر بیشتر آن در اطراف این دو آلتراسیون گسترش یافته اند. جهت ارزیابی نتایج به دست آمده، از ۸ اندیس مربوط به کانی زایی طلا و مس استفاده شده است. تمامی اندیس ها و کانسارهای شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه دارای ارتباط بسیار نزدیکی با آلتراسیون های به دست آمده می باشند و می توان از آنها جهت اعتبارسنجی پژوهش استفاده نمود. این اندیس ها بیشتر مربوط به کانسارهای پورفیری و اپی ترمال می باشند که در محدوده شناسایی شده اند. یکی از مهم ترین ویژگی های این پژوهش تعیین واحدهای زمین شناسی در گیر در پیدایش آلتراسیون ها می باشد. از جمله واحدهای زمین شناسی مهم که در ارتباط با اندیس ها و آلتراسیون های شناسایی شده هستند، می توان به گدازه های برشی شده آندزیتی، گدازه های بالشی، سنگ های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، برش های آتشفشانی و همچنین واحدهای دیوریتی، مونزونیتی، گرانیتی و میکرودیوریتی اشاره نمود. در قسمت های مرکزی محدوده نیز کنتاکت های زمین شناسی

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

[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.

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 همبندی این واحدهای نفوذی با سنگ‌های کربناته بسیار محتمل است.

۶. مراجع

[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. Bahrehmand, "Geological map of Siahroud," 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.

- [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. Hosseini, 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.
- [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.