

مطالعات دورسنجی با استفاده از آنالیز طیفی در محدوده معدنی کائولن زنوز به منظور تعیین گسترش ماده معدنی

توحید نوری^۱، راشد پورمیرزایی^{۲*}، فریدون ملایی کشکی^۳

^۱ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، t.nouri@uma.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، rashed.poormirzaee@gmail.com

^۳ مدیر امور معادن، شرکت صنایع خاک چینی ایران، fmkoshi77@yahoo.com

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۹)

چکیده

معرفی مناطق امیدبخش جدید در اطراف کانسارهای شناخته شده، یکی از اهداف مهم برای مدیران و صاحبان معادن فعال می‌باشد. در این راستا، استفاده از داده‌های دورسنجی چندطیفی به دلیل در دسترس بودن و هزینه‌های پایین آن‌ها در مطالعات زمین‌شناسی، اکتشاف کانی‌ها و به نقشه در آوردن آلتراسیون‌ها از طرف مهندسی اکتشاف از اولویت برخوردار است. در این مطالعه گسترش ماده معدنی در اطراف ذخیره اصلی کائولن زنوز با استفاده از دو نوع داده لندست ۸ و استر بررسی می‌شود. معدن کائولن زنوز به‌عنوان بزرگ‌ترین معدن کائولن خاورمیانه، در شهرستان مرند استان آذربایجان شرقی واقع شده است. در این مطالعه سعی شده است مقایسه‌ای بین نتایج داده لندست ۸، به‌عنوان یک داده چندطیفی جدید و تصاویر استر انجام گیرد. در مطالعه حاضر، ابتدا پیش‌پردازش داده‌ها شامل تصحیح اتمسفری و تصحیح توپوگرافی و حذف اثر پوشش گیاهی انجام شد. سپس با استفاده از آنالیز طیفی، طیف کانی‌های اصلی در منطقه (کائولینیت، کوارتز، و کانی‌های آهن‌دار) شناسایی شد و در نهایت با استفاده از روش کلاس‌بندی شبکه عصبی، به‌عنوان یک روش غیرخطی و نظارت شده فراوانی کانی‌ها به نقشه درآمد. نوع مدل شبکه عصبی مورد استفاده در این مطالعه تاکنون بر روی داده‌های لندست ۸ و استر استفاده نشده است. همچنین گستردگی ماده معدنی در اطراف معدن کائولن زنوز با استفاده از این داده‌ها تاکنون مطالعه نشده است و این مطالعه اولین مطالعه موردی از این نوع در این منطقه است. جهت اعتبار سنجی نتایج علاوه بر استفاده از نمونه‌های صحرایی، از روش اعتبار سنجی مجازی به‌عنوان یک روش اعتبارسنجی نتایج دورسنجی نیز استفاده شد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که استفاده از داده‌های لندست ۸ در اکتشاف کائولن بسیار موفقیت‌آمیز بوده و همچنین چند منطقه پر پتانسیل برای مطالعات تفصیلی پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی

لندست ۸، استر، کائولن، آنالیز طیفی، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مقدمه

منطقه گالی جاگیر^۲ پاکستان از روش‌های نسبت باندی و روش کلاس‌بندی بیشترین احتمال^۳ بر روی تصاویر استر استفاده کرده و نتایج را با داده‌های ETM+ مقایسه کردند. کائولینیت در این مطالعه با استفاده از این داده‌ها شناسایی شده است. تستا و همکاران [۱۱] از داده‌های استر برای شناسایی آلتراسیون‌های هیدروترمال مرتبط با زون‌های اپیترمال، پورفیری و برشی در منطقه آندین کوردیلرا^۴ در آرژانتین استفاده کردند. روش‌های مورد استفاده شامل نسبت باندی، عملگرهای منطقی^۵، شاخص کانیایی^۶ و آنالیز مؤلفه اصلی است. استخراج نقشه شاخص کائولینیت^۷ جزو نتایج این مطالعه می‌باشد. اورهزیف و همکاران [۱۲] داده‌های استر، و لندست ۸ را برای شناسایی کانی‌ها با استفاده از روش‌های نسبت باندی و ترکیب رنگی کاذب^۸ در منطقه ایمینی اونیلا^۹ در مراکش استفاده کردند. یانگ و همکاران [۱۳] با استفاده از روش‌های نسبت باندی، آنالیز مؤلفه اصلی^{۱۰} و فیلترینگ انطباق یافته^{۱۱} بر روی داده‌های استر و لندست ۸ کانی‌های منطقه را در جهت پتانسیل‌یابی ذخایر سرب و روی در منطقه کنلون غربی^{۱۲} در چین شناسایی کردند. بانرجی و همکاران [۱۴] در منطقه سینگیوم^{۱۳} هند از روش‌های عمق نسبی باند جذبی^{۱۴} و اختلاف اختلاف عمق باندی افزایشی^{۱۵} برای شناسایی زون‌های آلتراسیون هیدروترمال از تصاویر لندست ۸ استفاده کردند. صفری، مقصودی، و بیرانوندپور [۱۵] از داده‌های لندست ۸ و استر برای تشخیص زون‌های آلتراسیون هیدروترمال در منطقه شهر بابک ایران استفاده کردند. روش‌های مورد استفاده شامل ترکیب باندی^{۱۶} و آنالیز مؤلفه اصلی انتخابی پیشرفته^{۱۷} است. نتایج حاکی از توانایی بالای داده‌های لندست ۸ در شناسایی این نوع از آلتراسیون است.

در مطالعه حاضر هدف اصلی بررسی منطقه نوز شهرستان مرند واقع در استان آذربایجان شرقی، به‌منظور معرفی مناطق

با توجه به نیاز روز افزون زندگی بشر به کانی‌ها و مواد معدنی از یک سو و خاتمه یافتن کانسارهای شناخته شده در آینده نزدیک از سوی دیگر، اکتشاف ذخایر جدید یک ضرورت می‌باشد [۱ و ۲]. با توجه به یکسان بودن شرایط زمین‌شناسی و سایر پارامترهای کنترل کننده کانی‌زایی، مطالعه مناطق مجاور کانسارهای شناخته شده جهت اکتشاف ذخایر جدید بسیار محتمل به نظر می‌رسد. اگرچه ممکن است مطالعه مناطق مجاور کانسارهای شناخته شده لزوماً منجر به کشف ذخایر همسان با کانسار اصلی در منطقه نشود، اما این مطالعات می‌تواند منجر به شناخت ذخایر جدید شود [۳]. تنوع مطالعات قبلی در زمینه استفاده از داده‌های دورسنجی چندطیفی قابلیت این داده‌ها را در زمینه مطالعات کانی‌شناسی و به نقشه درآوردن آلتراسیون‌ها، نشان می‌دهد [۴]. در میان انواع داده‌های چندطیفی تصاویر لندست و استر^۱ به دلیل پوشش وسیع و نیز در دسترس بودن از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. با پیشرفت علوم کامپیوتر و الکترونیک، قابلیت طراحی‌های جدید در سنجنده سبب شده که محققین رشته‌های مختلف قادر به اندازه‌گیری طیف‌های مختلف باشند. در بخش علوم زمین مطالعات دورسنجی به طور موفقیت‌آمیزی در زمینه مطالعات زیست‌محیطی، اکتشاف نفت و اکتشاف کانی‌ها، اکتشاف منابع زمین‌گرمایی و به نقشه درآوردن واحدهای سنگی به کار گرفته شده است [۵ و ۶]. با توجه به اینکه ماهواره لندست ۸ یکی از ماهواره‌های نسبتاً جدید به شمار می‌رود، از این‌رو استفاده از این داده‌ها در اکتشاف کانی‌ها نسبتاً جدید می‌باشد. به استناد مطالعات مختلفی که صورت گرفته است نتایج مطالعات حاصل از داده‌های لندست ۸ نسبت به لندست ۷ از دقت بالاتری برخوردار بوده است [۷ و ۸]. تاکنون داده‌های چند طیفی به طور گسترده‌ای توسط محققین برای شناسایی کانی‌های شاخص سیستم‌های آلتراسیونی و به ویژه آلتراسیون هیدروترمال به کار گرفته شده‌اند که شناسایی کانی‌های رسی در بیشتر آنها مشاهده می‌شود. به‌عنوان نمونه‌هایی از کاربرد داده‌های چندطیفی در شناسایی کانی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

ژانگ و همکاران [۹] از تصاویر استر و لندست ۸ برای شناسایی کانی‌های مربوط به آلتراسیون هیدروترمال که شامل کائولینیت نیز می‌شود، در فلات تبت در چین استفاده کردند. فاتیما و همکاران [۱۰] برای شناسایی کانی‌های سطحی در

2-Gali Jagir

3-Maximum likelihood classification

4-Andean Cordillera

5-Logical operations

6-Mineral indices

7-Kaolinite index image

8-False color composite

9-Imini Ounilla

10-Principal component analysis

11-Matched filtering

12-West Kunlun

13-Singhbhum

14-Relative absorption band depth

15-Successive band depth difference

16-Band combination

17-Developed selective principal component analysis

1-Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer

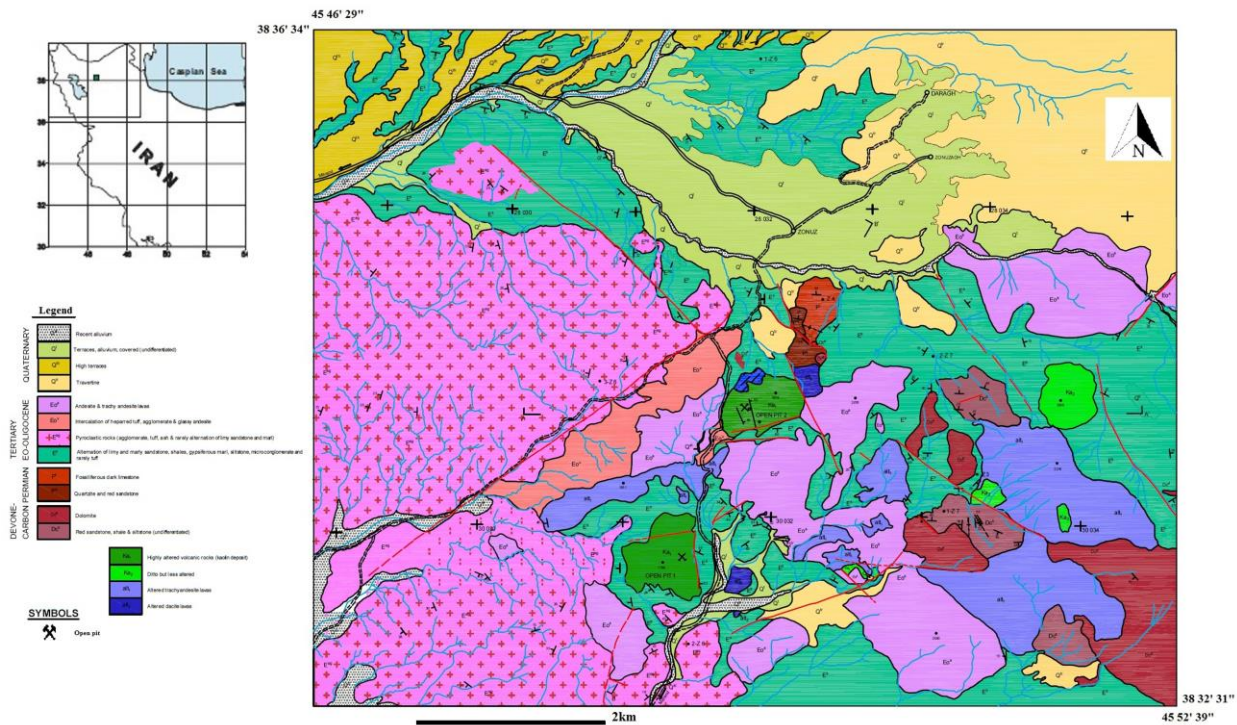
امیدبخش کائولن می‌باشد. به این منظور از تصاویر لندست ۸ و استر استفاده شد. در مطالعه حاضر از تصاویر استر و لندست ۸ جهت مطالعه کانی‌شناسی منطقه نیز استفاده شد.

در این مطالعه پس از پیش‌پردازش داده‌ها، شامل تصحیح اتمسفری و تصحیح توپوگرافی، کانی‌های موجود در منطقه با استفاده از آنالیز طیفی استخراج شده و در ادامه با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی کلاس‌بندی انجام گرفت. شبکه عصبی در زمینه کلاس‌بندی تصاویر دورسنجی بسیار موفق عمل کرده و در مطالعات گوناگون کارایی آن تأیید شده است [۱۶ و ۱۷]. یکی از مشکلات معمول در آنالیز طیفی و جداسازی طیفی خطی اختلاط مواد در سطح زمین است که باعث ایجاد تداخل چندگانه و انعکاس چندگانه می‌شود. این امر باعث می‌شود که طیف رسیده به سنسورها از سطح زمین از مدل اختلاط خطی فاصله بگیرد [۱۸]. مدل‌های غیر خطی متفاوتی برای نوع اختلاط پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده است [۱۹، ۲۰ و ۲۱] ولی به دلیل پیچیدگی‌های زیاد این مدل‌ها، کمتر از آن‌ها استفاده می‌شود و استفاده از روش‌های خطی رایج‌تر است [۲۲ و ۲۳]. روش شبکه عصبی مصنوعی یک روش غیر خطی به حساب می‌آید [۲۴]. ولی دشواری‌های روش‌های دیگر از این نوع را ندارد. در این مطالعه در راستای بهره‌مندی از مزایای مدل غیر خطی که به واقعیت نزدیک‌ترند، از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. از آنجایی که در مطالعات دورسنجی، اعتبارسنجی نتایج از اهمیت خاصی برخوردار بوده و از طرفی با توجه به گستردگی معمول مناطق مورد مطالعه جهت اکتشاف، نمونه‌برداری صحرائی با محدودیت‌هایی روبه‌رو است (محدودیت در تعداد نمونه‌ها و هزینه‌های بالای آنالیز). در مطالعه حاضر به منظور ارزیابی صحت کلاس‌بندی روش اعتبارسنجی مجازی معرفی شده است که می‌تواند در اعتبارسنجی نتایج مطالعات دورسنجی استفاده شود. همچنین در ادامه با توجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه معرفی مناطق امیدبخش کائولن بود، از مناطق معرفی شده به‌عنوان کائولن ۶ نمونه برداشت شد و آنالیز شیمیایی انجام گرفت.

۲- زمین‌شناسی منطقه زنون

منطقه مورد مطالعه در مختصات طول جغرافیایی $45^{\circ}41'$ تا $56^{\circ}45'$ شرقی و عرض جغرافیایی $38^{\circ}28'$ تا $38^{\circ}40'$ شمالی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌ساختی، طبق تقسیم‌بندی اشتوکلین [۲۵] در زون آتش‌فشانی ترشیر-کواترنز واقع است. در این ناحیه تشکیلات سلطانی، باروت و رسوبات ماسه‌سنگی، مارنی ژئوپس دار مربوط به ائوسن زیرین

توسط سنگ‌های آتش‌فشانی که به‌صورت گنبد‌های نمکی آتش‌فشانی، گدازه و آذرآواری رخنمون دارند، قطع گردیده‌اند [۲۶]. مطالعات سنگ‌شناختی نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه عمدتاً از دو نوع سنگ آندزیتی و داسیتی تشکیل شده است. این سنگ‌ها بشدت شکسته و تکتونیزه و کم و بیش دگرسان هستند که در برخی قسمت‌ها به علت بالا بودن درجه دگرسانی ذخایر با ارزش کائولن به وجود آمده است [۲۷]. سنگ‌های آذرآواری موجود در منطقه به صورت برش آتش‌فشانی بوده که دارای قطعات زاویه‌دار از آندزیت و داسیت به همراه توف می‌باشد و لایه‌بندی نیز در آن‌ها دیده می‌شود. مطالعات سنگ‌شناسی انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند که عمل آتش‌فشانی در منطقه با خروج سنگ‌های آذرآواری به‌صورت انفجاری شروع شده است، که به تدریج فوران انفجاری جای خود را به فوران آرام داده که نتیجه آن تشکیل گدازه‌ها و گنبد‌های آتش‌فشانی است [۲۸]. سازند سلطانی به شکل دولومیت‌های به رنگ خاکستری همراه با باندهای سیاه‌رنگ چرت مشاهده می‌شود. سازند باروت در منطقه به شکل شیل‌های میکادار به رنگ سیاه خاکستری، شیل سبز میکادار و ماسه سنگه که دارای میان لایه‌های نازکی از آهک سیاه‌رنگ همراه با کمی دولومیت خاکستری رنگ چرت دار است، که سن این واحد سنگی کامبرین زیرین می‌باشد. همچنین واحد مارن‌های ژئوپس دار و ماسه سنگ ائوسن، در اکثر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود که به همراه رسوبات باروت و سلطانی پی سنگ منطقه را تشکیل می‌دهند. این واحد شامل مارن‌های ژئوپس دار به رنگ قرمز و سبز و به همراه ماسه سنگ‌های قرمز می‌باشد. این واحد توسط واحد رسوبات پیروکلاستیکی ائوسن بالایی و گاهی به‌وسیله واحد جریان‌های اولیگوسن پوشیده می‌شوند. واحد گنبد‌ها و گدازه‌های داسیتی در منطقه که تحت تأثیر هوازدگی قرار گرفته رنگ سنگ را روشن‌تر نموده که در بخش‌هایی از این واحد به علت شدت هوازدگی کائولن ایجاد شده است. این واحد روی رسوبات پیروکلاستیکی ائوسن بالایی واقع شده است و سن اولیگوسن آغازین را دارد. واحد گنبد و گدازه‌های آندزیتی موجود در منطقه روی واحدهای گنبد‌ها و گدازه‌های داسیتی قرار گرفته است، که در نمونه‌های دستی به رنگ خاکستری تیره بوده و در قسمت‌هایی که تحت آلتراسیون قرار گرفته‌اند به رنگ سبز زیتونی درآمده‌اند. همچنین واحد تراس آبرفتی موجود در منطقه که عمدتاً زمین‌های کشاورزی در آن قرار دارد از رسوبات سیلت و رس تشکیل شده است [۲۷]. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه زنوز.

ماهواره‌های لندست ۸ و استر استفاده شد. ماهواره لندست ۸ دارای دو سنجنده تصویربرداری عملیاتی زمین (OLI^۱) و مادون قرمز حرارتی (TIRS^۲) است که در سال ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. این ماهواره دارای ۹ باند (۵ باند در محدوده طول موجی مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR^۳), ۲ باند در محدوده مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR^۴) و ۲ باند در محدوده طول موجی حرارتی (TIR^۵) با قدرت تفکیک مکانی مناسب می‌باشد (جدول ۱). لندست ۸ در مقایسه با لندست ۷، دارای ابزارالات حساس‌تر جهت اندازه‌گیری طیف‌ها است. همچنین در لندست ۸ پهنای باندها به گونه‌ای تصحیح شده‌اند که اثر اتمسفر روی آن‌ها حذف گردد، به گونه‌ای که ساختار جذبی اتمسفر در طول موج ۰/۸۲۵ میکرومتر که در لندست ۷ در میانه باند ۴ قرار گرفته، در لندست ۸ حذف شده است. تفاوت دیگر لندست ۸ نسبت به لندست ۷، اضافه شدن دو باند، یعنی باند ۱ (۰/۴۵۱-۰/۴۳۵ میکرومتر) و باند ۹ (۱/۳۸۴-۱/۳۶۳ میکرومتر) به لندست ۸ می‌باشد که این دو باند در مطالعات دقیق‌تر مناطق ساحلی دریاها و نیز مطالعات ابرها به کار برده می‌شوند. برتری

با توجه به زمین‌شناسی منطقه و همچنین مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته، می‌توان بیان داشت که یک دوره فعالیت هیدروترمالی به‌عنوان آخرین مرحله فعالیت ولکانیسم در منطقه رخ داده که ادامه آن به‌صورت فعالیت چشمه‌های آبگرم بوده است. بنابراین با توجه به این موضوع و نیز ضخامت و کیفیت کائولن‌های منطقه، به احتمال قوی کائولن زنوز منشأ هیدروترمالی داشته است که در آن نفوذ محلول‌های گرمایی باعث تجزیه و از هم پاشیدن شبکه ساختمانی سیلیکات‌های آلومینیم بخصوص فلدسپات‌های قلیایی (آلکالن) گردیده است (عمومی‌ترین نوع تجزیه هیدروترمال) و نتیجه این تجزیه از دست دادن تقریباً کامل مواد آلکالن و تشکیل یک نوع کانی رسی اصلی بنام کائولینیت است [۲۷ و ۲۹]. کانسنگ کائولن منطقه در نمونه دستی سفید تا زرد کم‌رنگ بوده و بلورهای درشت بیوتیت و مسکویت و کوارتز در آن‌ها قابل مشاهده می‌باشند. همچنین در زیر میکروسکوپ کانی‌های رسی، کوارتز، کلسیت، سریسیت و بلورهای بیوتیت و مسکویت در نمونه‌ها دیده می‌شوند.

۳- پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و استر

هدف اصلی در این مطالعه بررسی منطقه زنوز واقع در شهرستان مرند در استان آذربایجان شرقی، به منظور معرفی مناطق امیدبخش کائولن می‌باشد که در این راستا از داده‌های

1-Operational Land Imager
2-Thermal infrared sensor
3-Visible Near Infrared
4-Short wave infrared
5-Thermal Infrared

در مطالعه حاضر پردازش تصاویر در دو مرحله انجام گرفت. ابتدا پیش پردازش تصاویر انجام شد. در مرحله بعد با استفاده از آنالیز طیفی اعضای انتهایی^۲ یا کانی‌های اصلی در تصاویر لندست ۸ و استر استخراج شدند، و در ادامه گسترش کانی‌های استخراج شده با استفاده از روش شبکه عصبی به نقشه درآمد. در بخش‌های بعدی به جزئیات روش‌های استفاده شده جهت پردازش داده‌های استر و لندست ۸ پرداخته می‌شود.

۳-۱- پیش پردازش داده‌ها

پیش پردازش تصاویر شامل تصحیح هندسی، تصحیح رادیومتری، حذف اثر اتمسفری، تصحیح توپوگرافی، ماسک کردن پوشش گیاهی و همچنین بی‌اثر کردن سایر عوامل ناخواسته نظیر اثر نواری^۳ (که در داده‌های مورد استفاده مشاهده نگردید) روی تصاویر به منظور افزایش کیفیت داده‌های دورسنجی است. به عبارت دیگر پیش پردازش داده‌ها یک مرحله مهم و لازم برای پردازش داده‌های دورسنجی است تا وضوح و کیفیت این داده‌ها افزایش یابد [۳۲]. در حین گذر امواج الکترومغناطیس از اتمسفر، با توجه به حضور گازهای مختلف، ذرات ریز و بخار آب این امواج تحت تأثیر قرار گرفته و

دیگر لندست ۸ نسبت به لندست ۷، نسبت بالای سیگنال به نویز (SNR) آن می‌باشد [۳۰]. همچنین در لندست ۸ نسبت به لندست ۷ که دارای یک باند حرارتی می‌باشد، دو باند حرارتی طراحی شده است که برای مطالعات اکتشافی زمین‌گرایی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

سنجده استر یک تصویرگر پیشرفته است که یک ناحیه طیفی وسیعی از مرئی تا مادون قرمز حرارتی را به وسیله ۱۴ باند طیفی با قدرت تفکیک مکانی، طیفی و رادیومتری بالایی پوشش می‌دهد که در سه زیر مجموعه طیفی مرئی-مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز موج کوتاه و مادون قرمز حرارتی به ترتیب دارای ۳، ۶ و ۵ باند است [۳۱]. وجود ۶ باند در محدوده مادون قرمز موج کوتاه به دلیل اینکه اکثر تیپ‌های پوشش زمین در این محدوده قرار دارند، کمک بسزایی را در شناسایی انواع آلتراسیون‌های هیدروترمال خواهد نمود. در مقایسه لندست ۸ با استر، واضح است که در محدوده مادون قرمز طول موج کوتاه و محدوده طول موج حرارتی استر دارای قدرت تفکیک طیفی بهتری است. اما در محدوده طیفی مرئی-مادون قرمز نزدیک لندست ۸ دارای قدرت تفکیک طیفی بهتری می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات سنجده‌های استر و لندست ۸ [۳۰ و ۳۱].

Sensor	Subsystem	Band number	Spectral range (micrometer)	Spatial resolution	Swath width (km)	Coverage interval	Altitude (km)
ASTER	VNIR	band 1	0.52-0.60	15	60	16 days	705
		band 2	0.63-0.69				
		band 3	0.78-0.86				
	SWIR	band 4	1.600-1.700	30			
		band 5	2.145-2.185				
		band 6	2.185-2.225				
		band 7	2.235-2.285				
		band 8	2.295-2.365				
		band 9	2.360-2.430				
	TIR	band 10	8.125-8.475	90			
		band 11	8.475-8.825				
		band 12	8.925-9.275				
		band 13	10.25-10.95				
		band 14	10.95-11.65				
Landsat-8	OLI	band 1	0.435-0.451	30	190	16 days	705
		band 2	0.452-0.512				
		band 3	0.533-0.590				
		band 4	0.636-0.673				
		band 5	0.851-0.879				
		band 6	1.566-1.651				
		band 7	2.107-2.294				
		band 9	1.363-1.384				
		band 8 Pan	0.503-0.676				
	TIR	band 10	10.60-11.19	100			
		band 11	11.50-12.51				

2-Endmembers
3-Stripping effect

1-Signal to Noise Ratio

کنندگی خطا روی آن‌ها اعمال شده، انجام می‌شود. در خروجی این مرحله باندها اصلاً با هم همبستگی ندارند و بر حسب کاهش محتوای اطلاعات مرتب شده‌اند؛ به نحوی که باندهای اول بیشترین اطلاعات از داده‌ها را در برداشته و باندهای انتهایی اغلب شامل نوفه هستند [۳۸، ۳۹ و ۴۰]. تعیین ابعاد واقعی تصویر با بررسی مقادیر ویژه صورت می‌گیرد. مقادیر ویژه محاسبه شده برای باندهای تصویر خروجی MNF در طی فرآیند اجرای این روش نشانگر محتوی اطلاعات باندهای خروجی است. اجرای تصویر MNF با مقادیر ویژه کمتر از ۱، به‌عنوان خطا، از داده‌ها جدا می‌شوند تا نتایج بهبود یابد [۳۹] که این مرحله همان کاهش ابعاد داده‌هاست. در شکل ۳ مقادیر ویژه مربوط به اجرای MNF بر روی داده‌های استر و لندست ۸ نشان داده شده است. با بررسی مقادیر ویژه از هر کدام از تصاویر خروجی MNF مربوط به داده‌های استر و لندست ۸ یک باند (باند آخر به دلیل مقدار ویژه کمتر از ۱) به‌عنوان نوفه حذف شد. در شکل ۴ تصاویر مربوط به باندهای ۱ و ۹ تصویر MNF مربوط به داده‌های استر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، باند انتهایی با نوفه بالایی همراه است.

در مرحله بعد تشخیص پیکسل‌های خالص در تصویر با استفاده از روش PPI^۱ انجام می‌گیرد. پیکسل‌های خالص در ارتباط با طیف‌های مرجع موجود در تصویر می‌باشند. PPI روشی است که اجزای خالص را از داخل خود داده‌ها استخراج می‌کند. با توجه به ابعاد پیکسل‌ها در داده‌های مورد استفاده، احتمال حضور پیکسلی خالص که فقط در بر دارنده یک نوع کانی باشد بسیار پایین است. در نتیجه در روش PPI خالص‌ترین پیکسل‌ها نسبت به پیکسل‌های دیگر انتخاب می‌شوند و این یک حالت نسبی است. در مطالعه حاضر روش MNF در محدوده طول موجی ۰/۴ تا ۲/۵ میکرومتر انجام گرفت. در این محدوده طول موجی VNIR و همچنین SWIR شکل کلی پروفیل طیفی را برای مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد. محدوده VNIR در بر گیرنده ساختارهای جذبی یون آهن فریک و کلروفیل است و محدوده SWIR، به‌منظور تشخیص ساختارهای جذبی OH، HOH و CO_3^{2-} بکار می‌رود [۴۱]. همچنین کانی ژاروسیت در محدوده SWIR دارای ساختار جذبی در طول موج‌های ۲/۲۶۵ میکرومتر و ۲/۲۱۵ میکرومتر می‌باشد [۴۲]. خالص‌ترین طیف‌های موجود در منطقه مورد مطالعه از طریق اجرای روش PPI بر روی باندهای MNF، تعیین شد. در ادامه از طریق بررسی توزیع پیکسل‌های اصلی یا خالص در فضای ۲، ۳ و ۴ بعدی به‌صورت بصری کانی‌های

در برخی از طول موج‌ها جذب و یا پراکنش اتفاق می‌افتد. به منظور حذف این اثرات در مطالعه حاضر داده‌های لندست ۸ و استر با استفاده از الگوریتم FLAASH تصحیح اتمسفری شدند. علاوه بر اثر اتمسفر داده‌های دورسنجی تحت تأثیر پستی و بلندی‌های منطقه نیز قرار می‌گیرند، که جهت حذف این اثر تصحیح توپوگرافی لازم می‌باشد. ضرورت انجام تصحیح توپوگرافی به این دلیل است که شیب قسمت‌های مختلف (پیکسل‌های تصویر) یکسان نیستند. این امر سبب می‌شود که زاویه تابش و بازتابش، و در نتیجه شدت انعکاس از پیکسل‌ها با موقعیت‌های مختلف، متفاوت باشد [۳۳]. در این مطالعه تصحیح توپوگرافی تصاویر لندست ۸ و استر با استفاده از روش لامبرترین [۳۴] انجام گرفت. همچنین به‌منظور حذف اثر پوشش گیاهی در پردازش داده‌ها، ابتدا تصویر NDVI^۱ ایجاد شد و سپس پیکسل‌های با NDVI بالا ماسک شدند. پس از پیش‌پردازش داده‌ها، جهت به‌نقشه درآوردن کانی‌های منطقه، از روش آنالیز طیفی استفاده شد. تصحیحات رادیومتری و هندسی قبلاً بر روی داده‌های مورد استفاده انجام گرفته بود.

۳-۲- آنالیز طیفی تصاویر

به‌منظور آنالیز طیفی تصاویر دورسنجی، به دو طریق می‌توان طیف مرجع یا عضو انتهایی را شناسایی نمود. روش اول انتخاب طیف مرجع از کتابخانه‌های طیفی موجود و روش دوم استخراج طیف مرجع از تصاویر دورسنجی از طریق پردازش آن‌ها به وسیله روش‌های مختلف استخراج اعضای انتهایی^۲ است. روش دوم به دلیل آنکه طیف مرجع در شرایط مشابهی از نظر شرایط اتمسفری با تصویر اصلی، استخراج شده از اولویت بالاتری برخوردار می‌باشد [۳۵]. در این مطالعه، طیف مرجع یا عضو انتهایی با استفاده از الگوریتمی که توسط کروزر و همکاران [۳۶] ارائه شده است، استخراج گردید. این الگوریتم به‌صورت گام به گام (شکل ۲) در نرم‌افزار ENVI 4.7 جهت پردازش داده‌های دورسنجی قابل استفاده می‌باشد. به منظور استخراج صحیح طیف‌های مرجع در تصویر لازم است که ابتدا نوفه از داده جدا شود. برای کاهش نوفه از روش آماری MNF^۳ [۳۷] استفاده شد. تبدیل MNF متشکل از دو تبدیل مؤلفه اصلی متوالی است. ابتدا سفید کنندگی نوفه^۴ انجام می‌شود که عبارت از غیر همبسته کردن^۵ و به‌نقشه درآوردن نوفه در داده‌هاست. در مرحله دوم آنالیز مؤلفه اصلی استاندارد بر روی داده‌هایی که عملیات سفید

1-Normalized difference vegetation index

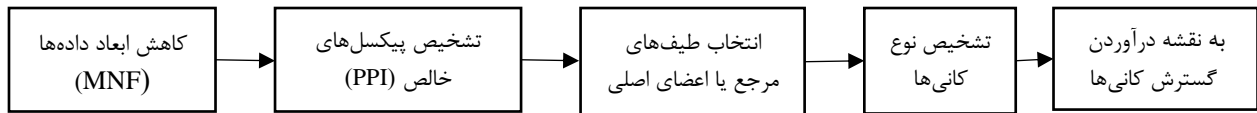
2-Endmember extraction algorithms

3-Minimum noise fraction

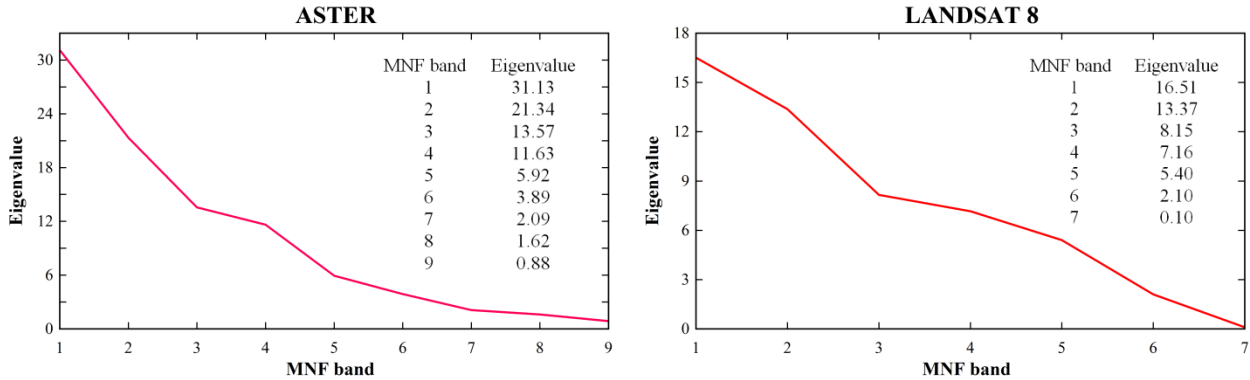
4-Noise whitening

5-Decorrelation

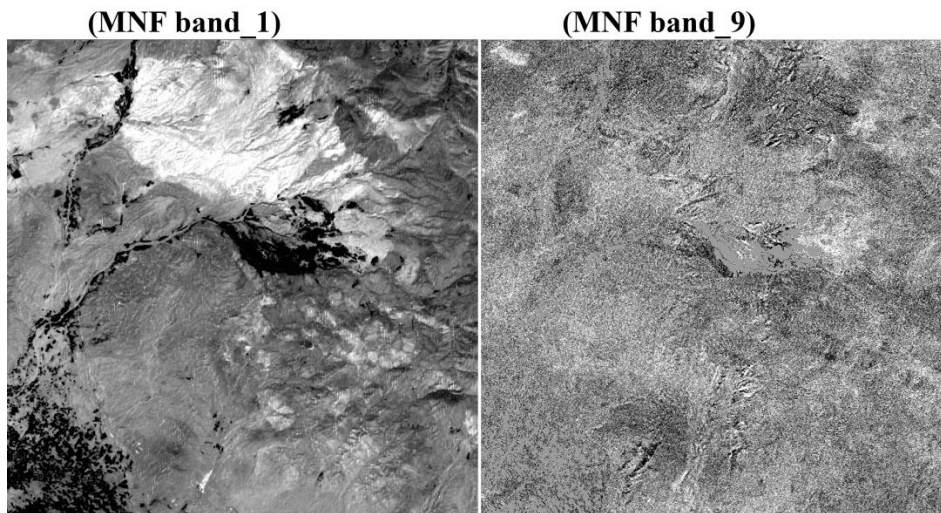
6-Pixel purity index



شکل ۲- دیاگرام فرآیند آنالیز طیفی.



شکل ۳- نمودارهای مقادیر ویژه مربوط به داده‌های استر و لندست ۸.



شکل ۴- تصاویر باندهای ۱ و ۹ تصویر MNF مربوط به داده‌های استر.

استفاده شد [۳۹ و ۴۳]. روش SAM میزان شباهت بین دو طیف مورد بررسی را بر اساس محاسبه زاویه طیفی بین آن‌ها مشخص می‌کند. طیف ناشناخته و طیف مرجع به صورت یک بردار با بعد n (برابر با تعداد باندهای تصویر مورد بررسی) در نظر گرفته می‌شوند. زاویه طیفی (θ) بین بردار طیف مرجع کتابخانه‌ای (s) و بردار طیف ناشناخته (x) که در اینجا منظور طیف یک عضو انتهایی استخراج شده است، در فضای n بعدی با استفاده از رابطه زیر بر حسب رادیان محاسبه می‌شود:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n s_i x_i}{\left(\sum_{i=1}^n s_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (1)$$

2-Spectral feature fitting

اصلی (کلاس‌های اصلی) مشخص گردید (جدول ۲). سرانجام میانگین پروفیل طیفی هر کلاس به‌عنوان طیف آن کلاس یا کانی در نظر گرفته شد. طیف‌های میانگین به دست آمده در حقیقت اعضای انتهایی تصویر هستند. به‌منظور تشخیص نوع هر کلاس عضو انتهایی استخراج شده، آنالیز طیفی به‌وسیله کتابخانه طیفی موجود در نرم‌افزار ENVI انجام شد. به طوری که طیف میانگین هر کلاس در منطقه مورد مطالعه از لحاظ تطابق با پروفیل‌های طیفی کانی‌های مختلف موجود در کتابخانه طیفی بررسی شد و طیف‌های با بیشترین امتیاز از لحاظ تطابق، به کلاس مشخص شده نسبت داده شد. برای مقایسه طیفی از دو روش نقشه‌بردار زاویه طیفی^۱ (SAM) و برازش سازی ساختار طیفی (SFF)^۲

1-Spectral angle mapper

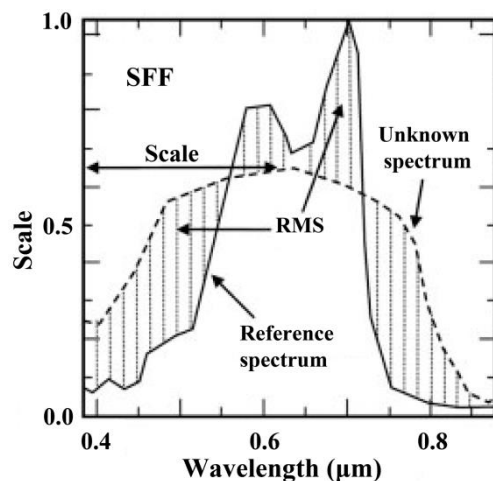
جدول ۲- تعداد اعضای اصلی حاصل از تصاویر پردازش شده.

Sensor	Wavelength range (μm)	Number of bands	Number of endmember/minerals
ASTER	0.4-2.4	9	3 (Kaolinite, Quartz and jarosite)
LANDSAT8	0.4-2.4	7	3 (Kaolinite, Quartz, Hematite)

نمودارهای طیفی اعضای انتهایی استخراج شده (طیف میانگین کلاس‌ها) همراه با نمودارهای طیفی استاندارد انطباق یافته با هر یک از آن‌ها نشان داده شده است.

در ادامه به منظور به نقشه درآوردن گسترش هریک از کلاس‌های تعیین شده، کلاس‌بندی تصویر با استفاده از روش شبکه عصبی انجام گرفت (شکل ۸). شبکه‌های عصبی مصنوعی که بر اساس استنباط از سیستم عصبی بیولوژیکی انسان پایه‌ریزی شده‌اند، تاکنون در مسائل مختلف مهندسی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند که می‌توان به کاربرد آن‌ها در زمینه، پردازش تصویر، مدل‌سازی، تشخیص الگو، پیش‌بینی سری‌های زمانی اشاره نمود [۴۵]. اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را نرون‌ها، به‌عنوان کوچک‌ترین واحد پردازشگر اطلاعات، تشکیل می‌دهند. تعداد این نرون‌ها و نحوه اتصال آن‌ها به یکدیگر می‌تواند بسیار متغیر باشد. در ساختار شبکه عصبی، برای آموزش شبکه، نمونه‌های انتخاب شده برای آموزش از طریق لایه ورودی وارد شبکه شده و سپس از طریق ضرب مقادیر عددی در آن‌ها وارد لایه میانی یا مخفی می‌شوند. در لایه مخفی تابع انتقال یا تابع فعالیت بر روی داده‌های ورودی اعمال شده و در ادامه مقادیر محاسبه شده به لایه خروجی ارسال می‌شود. جهت مدل‌سازی صحیح، خروجی شبکه با مقادیر مطلوبی که مدنظر می‌باشد مقایسه می‌شود، و در صورتی که با مقدار مطلوب موردنظر اختلاف داشته باشد با تغییر وزن‌های ارتباط دهنده نرون‌ها در شبکه تعدیل می‌شود. این فرایند تا حصول میزان خطای مورد قبول که قبلاً برای شبکه تعیین شده انجام می‌گیرد [۴۶] جهت کلاس‌بندی کانی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، از شبکه عصبی پیشخور^۴ دو لایه استفاده شد. تعداد داده ورودی برابر با تعداد باندها در نظر گرفته شد، که برای کلاس‌بندی داده‌های لندست ۸ تعداد ۷ باند و برای داده استر تعداد ۹ باند به‌عنوان داده ورودی استفاده شد. در لایه میانی شبکه عصبی از تابع انتقال سیگموئید استفاده شد. تعداد خروجی در لایه آخر برابر با تعداد کلاس‌ها در نظر گرفته شد. ساختار شبکه عصبی برای داده لندست ۸ در شکل ۹ نشان داده شده است. بعد از اجرای ANN در نرم‌افزار متلب، خروجی آن به صورت تصویر با فرمت "bsq" ذخیره شده و وارد نرم‌افزار ENVI شد. سپس کلاس‌بندی نهایی

روش دیگری که برای مقایسه طیفی استفاده شد SFF است که این روش مواد را مستقیماً به وسیله برازش یا انطباق طیف ناشناخته با طیف‌های مرجع شناسایی می‌کند. در این روش که بر اساس مقایسه ساختار جذبی استوار است، باید طیف انعکاس زمینه یا کانتینوم^۱ از هر دو طیف ناشناخته و مرجع حذف شده باشد تا ساختار جذبی طیف‌ها به‌صورت برجسته مشخص شود. برازش طیف ناشناخته با طیف مرجع در طول یک پروسه انطباق طیفی دو مرحله‌ای انجام می‌شود. در مرحله اول حالت ساختار جذبی طیف‌ها از مقدار ۱ کم شده و یک ساختار جدید ایجاد می‌شود. سپس برای طیف مرجع مورد بررسی یک ضریب تبدیل یا مقیاس برای انطباق (منظور بیشترین انطباق ممکن است) با طیف ناشناخته مشخص می‌شود. مرحله دوم محاسبه برازش حداقل مربعات^۲ بین طیف مرجع و طیف ناشناخته و محاسبه خطای میانگین حداقل مربعات (RMS)^۳ بین آن‌ها است. در نهایت نسبت ضریب تبدیل یا مقیاس به مقدار خطا (Scale/ RMS) به‌عنوان معیاری برای شباهت طیفی محاسبه می‌شود [۴۴]. شکل ۵ نحوه کار روش SFF را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نحوه کار روش SFF [۴۴].

لازم به ذکر است که علاوه بر در نظر گرفتن امتیازات تطبیقی این دو روش انطباقی پروفیل‌ها به صورت بصری نیز بررسی شده و برای هر طیف ناشناخته مناسب‌ترین کانی از بین کانی‌های موجود در کتابخانه طیفی USGS انتخاب شد. در شکل‌های ۶ و ۷

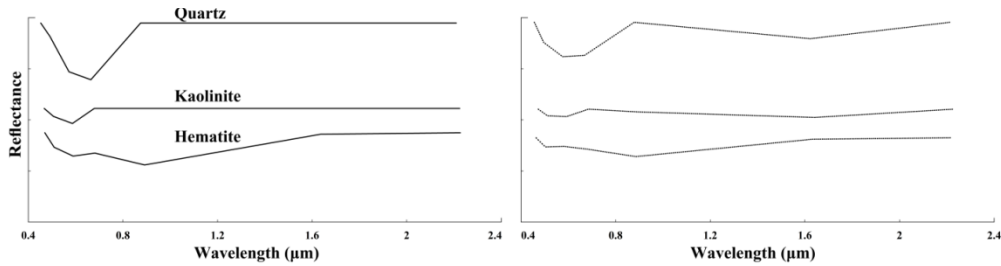
1-Continuum
2-Least square fitting
3-Root mean square error

4-Feedforward Neural Network

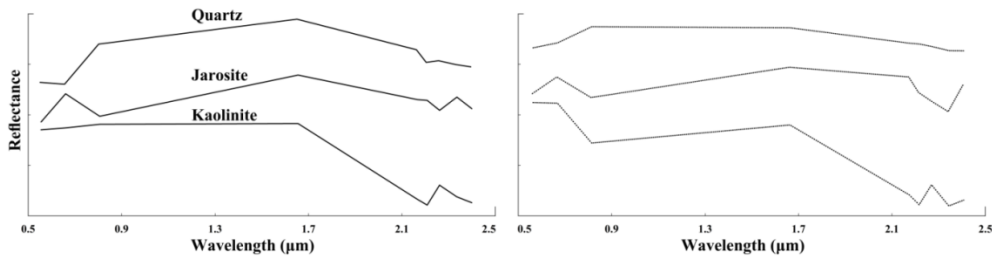
کائولینیت بود اما با توجه به استخراج سایر کانی‌ها در کنار کائولینیت در مرحله شناسایی پیکسل‌های خالص و تعیین جنس آن‌ها، پراکندگی تمام کانی‌ها به نقشه درآمد.

با استفاده از روش Rule Classifier در نرم‌افزار ENVI انجام گردید.

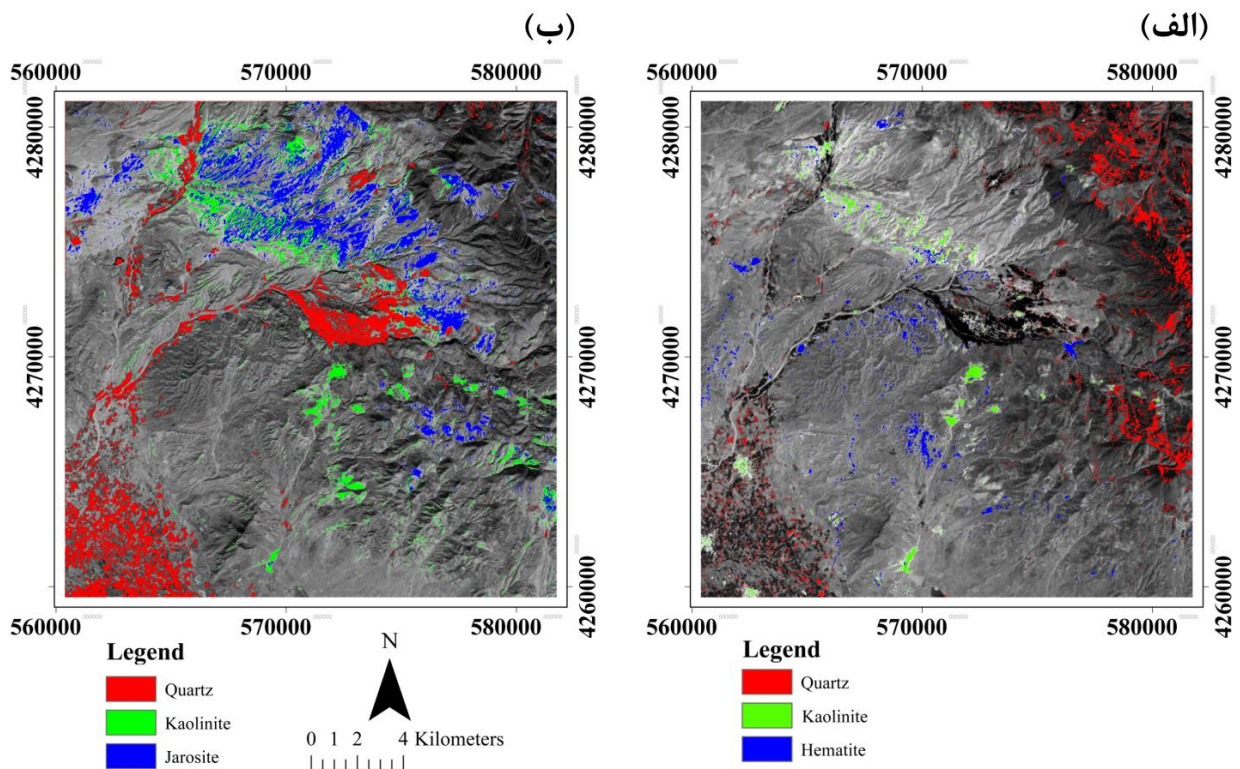
هرچند هدف اصلی این مطالعه، به نقشه درآوردن



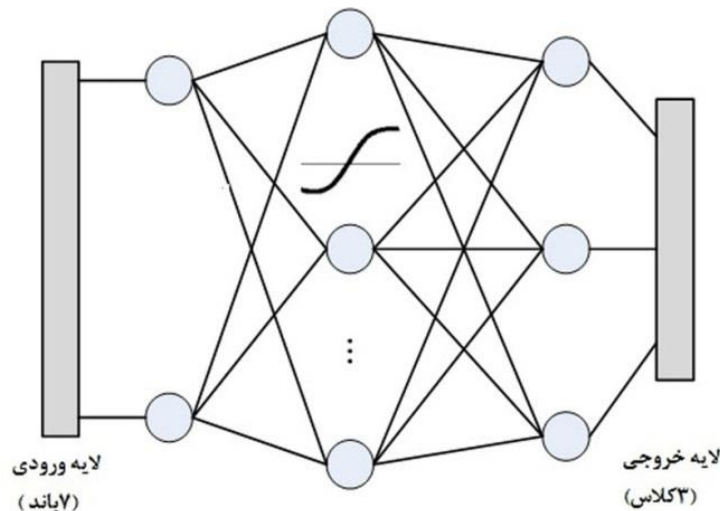
شکل ۶- نمودارهای طیفی اعضای انتهایی استخراج شده از تصاویر لندست ۸ (سمت راست)، همراه با نمودارهای طیفی استاندارد انطباق یافته با آن‌ها (سمت چپ).



شکل ۷- نمودارهای طیفی اعضای انتهایی استخراج شده از تصاویر استر (سمت راست)، همراه با نمودارهای طیفی استاندارد انطباق یافته با آن‌ها (سمت چپ).



شکل ۸- نقشه کلاس‌بندی تصاویر (الف- لندست ۸ و ب- استر) منطقه مورد مطالعه با استفاده از شبکه عصبی.

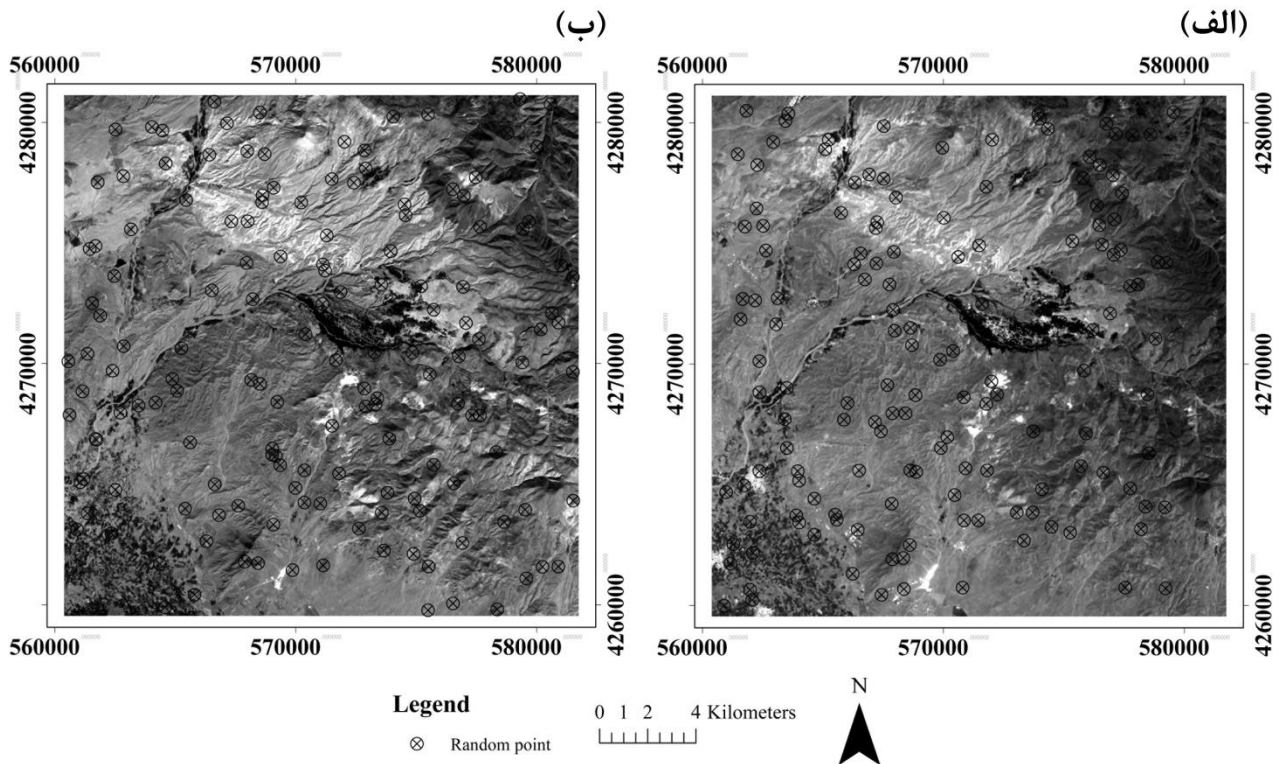


شکل ۹- ساختار شبکه عصبی به کار رفته در کلاس‌بندی تصاویر لندست ۸ برای منطقه مورد مطالعه.

۴- بحث و نتایج

دست آمد. تعداد کل پیکسل‌های استفاده شده در محاسبه صحت عبارت‌اند از مجموع تعداد پیکسل‌هایی که به درستی به نقشه درآمد‌اند، پیکسل‌هایی که اشتباه به نقشه درآمد‌اند و پیکسل‌هایی که به نقشه درنیامده‌اند. منظور از پیکسل‌هایی که به درستی به نقشه درآمد‌اند، پیکسل‌هایی می‌باشد که در نقشه کلاس‌بندی شده به یک کلاس یا عضو اصلی متعلق است و وجود آن عضو و یا کلاس از طریق اعتبارسنجی مجازی نیز تأیید شده است. به این صورت که با مقایسه مستقیم طیف یک پیکسل با طیف‌های مرجع موجود در کتابخانه طیفی، طیف کانی متناظر با کلاسی که در بر دارنده پیکسل مورد نظر است با طیف آن پیکسل انطباق یافته است. همچنین پیکسل‌هایی که به اشتباه به نقشه درآمد‌اند، پیکسل‌هایی هستند که در نقشه کلاس‌بندی شده متعلق به یک کلاس یا عضو اصلی هستند اما صحت محتوی طیفی آن پیکسل‌ها با روش اعتبارسنجی مجازی تأیید نشده است. پیکسل‌هایی که به نقشه در نیامده‌اند نیز، عبارت‌اند از پیکسل‌هایی که در نقشه کلاس‌بندی شده جزء هیچ یک از کلاس‌ها نیستند اما اعتبارسنجی مجازی وجود آن پیکسل‌ها را به‌عنوان یکی از اعضای کلاس‌های اصلی مشخص شده، تشخیص داده است. در جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب اعتبارسنجی مجازی برای تصاویر لندست ۸ و استر نشان داده شده است. صحت نتایج برای کلاس‌بندی تصاویر لندست ۸ برابر با $74/28$ درصد و استر برابر با $70/37$ درصد به دست آمد.

جهت ارزیابی نتایج مطالعات دورسنجی از دو روش اعتبارسنجی برجا و مجازی می‌توان استفاده نمود [۴۷]. اعتبارسنجی مجازی از طریق آزمون مستقیم اطلاعات حاصل از تصاویر دورسنجی به‌دست می‌آید. این در حالی است که برای اعتبارسنجی برجا باید اطلاعات حاصله از تصاویر دورسنجی را با آنالیز نمونه‌های برداشت شده از منطقه مورد مطالعه مقایسه نمود و یا از اسپکترومتر دستی استفاده نمود. با توجه به وسعت نسبتاً زیاد مناطق مورد مطالعه در عملیات‌های اکتشافی از یک سو و محدودیت‌های زیادی که در زمینه نمونه‌برداری برجا وجود دارد، روش اعتبارسنجی مجازی می‌تواند یک روش مناسب جهت ارزیابی نتایج در کنار سایر روش‌های اعتبارسنجی باشد. در مطالعه حاضر از روش اعتبارسنجی مجازی برای اعتبارسنجی کانی‌های تشخیص داده شده استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی بیشتر نتایج این مطالعه از چند نقطه از منطقه مورد مطالعه نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی انجام شد. برای اعتبارسنجی مجازی ابتدا ۱۵۰ پیکسل از تصاویر لندست ۸ و استر منطقه به‌صورت تصادفی انتخاب شد. موقعیت این نقاط در شکل ۱۰ نشان داده شده است. سپس با توجه به اطلاعات کتابخانه طیفی موجود در نرم‌افزار ENVI محتوی هر یک از پیکسل‌های انتخاب شده مشخص شد و با همان پیکسل در تصویر کلاس‌بندی شده (روش کلاس‌بندی بر مبنای شبکه عصبی) مقایسه انجام گرفت. صحت نتایج با استفاده از تقسیم تعداد پیکسل‌هایی که به درستی به نقشه درآمد‌اند بر تعداد کل پیکسل‌ها به



شکل ۱۰- موقعیت نقاط تصادفی انتخاب شده برای ارزیابی مجازی صحت کلاس‌بندی بر روی تصاویر (الف- لندست ۸ و ب- استر).

جدول ۳- ارزیابی صحت کلاس‌بندی عضوهای اصلی در تصاویر لندست ۸ به وسیله ارزیابی مجازی.

کائولینیت	هماتیت	کوارتز	کل	
۹	۱۰	۷	۲۶	پیکسل‌هایی که به درستی به نقشه درآمده‌اند
۰	۰	۰	۰	پیکسل‌هایی که به اشتباه به نقشه درآمده‌اند
۱	۴	۴	۹	پیکسل‌هایی که به نقشه در نیامده‌اند
۹۰	۷۱٫۴۲	۶۳٫۶۳	۷۴٫۲۸	صحت (%)

جدول ۴- ارزیابی صحت کلاس‌بندی عضوهای اصلی در تصاویر استر به وسیله ارزیابی مجازی.

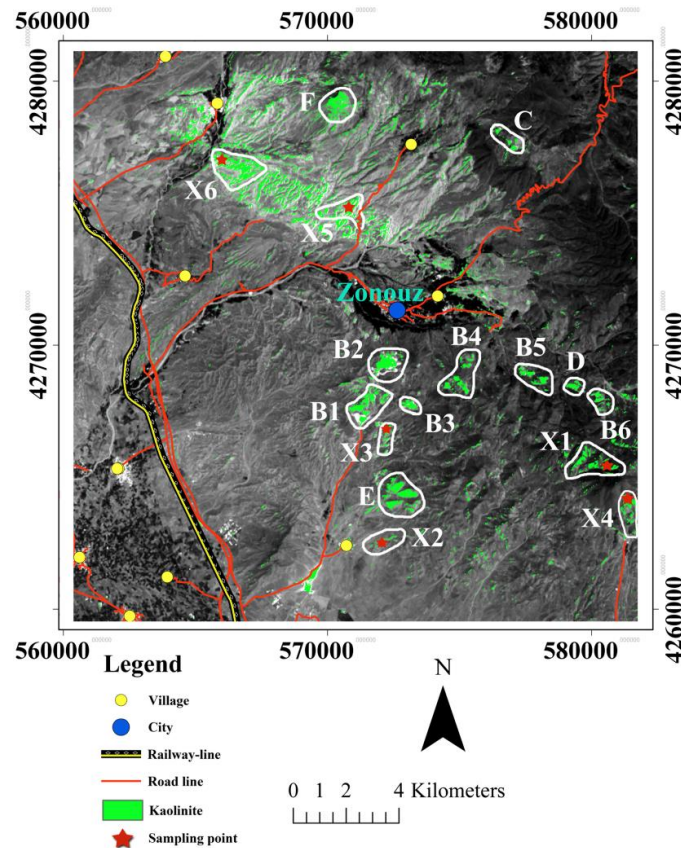
کائولینیت	ژاروسیت	کوارتز	کل	
۴	۱۱	۴	۱۹	پیکسل‌هایی که به درستی به نقشه درآمده‌اند
۰	۰	۱	۱	پیکسل‌هایی که به اشتباه به نقشه درآمده‌اند
۲	۴	۱	۷	پیکسل‌هایی که به نقشه در نیامده‌اند
۶۶٫۶۶	۷۳٫۳۳	۶۶٫۶۶	۷۰٫۳۷	صحت (%)

اکتشاف بودند. به طوری که مناطق B1, B2, B3, B4, B5, B6, C, D, E و F (مشخص شده در شکل ۱۱) جزو مناطق معدنی در حال بهره‌برداری و یا محدوده‌های در حال اکتشاف تفصیلی جهت استخراج کائولن می‌باشند. نمونه رخنمون کائولن در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۲ نشان داده شده است که مربوط به محدوده X3 است. همچنین رخنمونی از کائولن همراه با اکسیدهای آهن در

باتوجه به اینکه هدف اصلی در این مطالعه بررسی منطقه زنونز جهت معرفی مناطق امیدبخش جهت اکتشاف کائولن است، مناطق با گسترش بالای کائولن در تصویر کلاس‌بندی شده (شکل ۱۱)، به‌صورت صحرائی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نقشه کلاس‌بندی کائولن، تقریباً تمام نقاط معرفی شده به‌عنوان مناطق امیدبخش، شامل معادن در حال بهره‌برداری و یا مناطق در حال

موقعیت نمونه‌ها در شکل ۱۱ مشخص شده است. آنالیز آزمایشگاهی نمونه‌های مذکور در مرکز تحقیقات و کنترل کیفیت مواد شرکت صنایع خاک چینی ایران صورت گرفت که برخی از نتایج آن به شرح جدول ۵ می‌باشد. با توجه به مشاهدات صحرایی، در محدوده‌های X1، X2 و X4 کانی رسی غالب کائولینیت بوده ولی در محدوده‌های X3، X5 و X6 مونت‌موریلونیت نیز به همراه کائولن مشاهده شد.

شکل ۱۲-ب نشان داده شده است که این تصویر مربوط به منطقه شمال غربی B2 است. در مناطق معرفی شده، همچنین ۶ منطقه به‌عنوان مناطق امیدبخش جدید معرفی شد که حفرتراشه و نمونه‌برداری از آن‌ها پیشنهاد می‌شود (محدوده‌های X1، X2، X3، X4، X5 و X6). به‌منظور ارزیابی بیشتر نتایج در تصاویر لندست ۸ و استر از مناطق معرفی شده به‌عنوان مناطق حاوی کائولن نمونه‌برداری انجام گرفت و ترکیب شیمیایی آن‌ها مشخص شد.



شکل ۱۱- مناطق معرفی شده به‌عنوان مناطق حاوی کائولن همراه با موقعیت نمونه‌های برداشت شده در منطقه جهت انجام آنالیز شیمیایی.



شکل ۱۲-ب- نمونه تصویر از وجود اکسیدهای آهن (هماتیت) به همراه کائولن در منطقه شمال غربی محدوده B2.



شکل ۱۲-الف- نمونه تصویر از رخنمون کائولن در محدوده X3 (جهت عکس به سمت شمال).

جدول ۵- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از منطقه.

شماره نمونه	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
X1	۷۵٫۱۰	۱۶٫۷۰	۰٫۶۰	۱٫۷۰	۰٫۵۰	۲٫۸۰	۲٫۴۰
X2	۷۴٫۵۰	۱۵٫۵۰	۰٫۵۰	۲٫۳۰	۰٫۳۰	۳٫۷۰	۲٫۵۰
X3	۷۱٫۳۰	۱۱٫۹۰	۳٫۳۰	۲٫۸۰	۳٫۶۰	۲٫۹۰	۱٫۲۵
X4	۷۲٫۷۰	۱۱٫۷۰	۳٫۱۰	۲٫۹۱	۳٫۹۸	۳٫۱۱	۰٫۴۱
X5	۷۱٫۷۰	۱۲٫۱۰	۳٫۵۰	۲٫۲۰	۲٫۵۰	۳٫۸۰	۰٫۹۵
X6	۷۲٫۳۰	۱۲٫۶۰	۳٫۲۰	۳٫۲۰	۲٫۱۰	۳٫۴۰	۰٫۸۷

۵- نتیجه‌گیری

جدید برای اکتشاف تفصیلی (حفر ترانشه و نمونه‌برداری) پیشنهاد شد. به منظور ارزیابی بهتر نتایج و کیفیت کائولن منطقه، ۶ نمونه انتخاب و آنالیز شیمیایی شد. نتایج حاصل شده بیانگر صحت بالای نتایج حاصل شده می‌باشد.

یکی از دلایلی که سبب شد در این مطالعه از داده‌های لندست ۸ استفاده شود، این است که سنجنده استر از آوریل ۲۰۰۸ به بعد دچار مشکل شده و در محدوده طیفی SWIR قادر به اخذ داده نیست. بنابراین این سنجنده قابلیت اصلی خود را که شناسایی مواد سطحی به وسیله تعداد باندهای تقریباً زیاد خود در این محدوده طیفی بوده، از دست داده‌است. از طرف دیگر داده‌های قدیمی استر برای تمام مناطق قابل دسترسی نیست؛ به طوری که در برخی مناطق یا به کل موجود نبوده و یا اینکه از کیفیت مناسبی به دلیل پوشش بالای ابر برخوردار نیست. از طرف دیگر سهولت دسترسی به داده‌های لندست ۸ می‌تواند برای مطالعات اکتشافی بسیار کمک کننده باشد.

ژاروسیت و هماتیت جزو کانی‌های آهن‌دار می‌باشند که در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در داده‌های استر و لندست ۸ شناسایی شدند. یکی از مزیت‌های داده‌های لندست ۸ نسبت به استر این است که این نوع داده‌ها در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک (۰/۴ تا ۱ میکرومتر) تعداد باندهای بیشتری نسبت به استر دارند. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، کانی‌های آهن‌دار از جمله هماتیت در این محدوده ساختارهای طیفی منحصر به فردی دارند و اغلب به وسیله این ساختارهای جذبی شناسایی می‌شوند. لذا کانی هماتیت که از داده‌های لندست ۸ استخراج شده است نسبت به ژاروسیت که یکی از اعضای انتهایی استخراج شده از داده‌های استر است، اعتبار بیشتری دارد. مشاهدات صحرایی در منطقه مورد مطالعه نیز گسترش بالای هماتیت و عدم حضور قابل توجه ژاروسیت را تأیید می‌کند (شکل ۱۲-ب). در نتیجه لندست ۸ ابزار بهتری نسبت به استر برای به نقشه درآوردن کانی‌های آهن‌دار در این مطالعه بوده است.

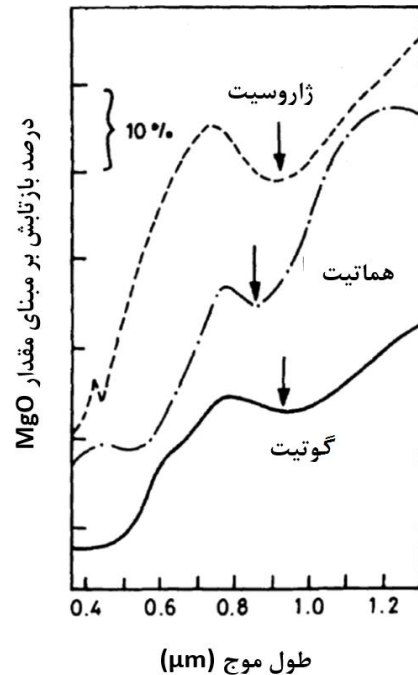
هدف از این مطالعه شناسایی مناطق امیدبخش جهت توسعه معادن کائولن زنون است. در این مطالعه از دو نوع داده دورسنجی استر و لندست ۸ استفاده شد. در این مطالعه پس از پیش‌پردازش داده‌ها، با استفاده از آنالیز طیفی، تصاویر مناطق مورد مطالعه پردازش شد. برای تصاویر لندست ۸ و استر هر کدام ۳ عضو انتهایی یا عضو خالص تشخیص داده شد. پس از کلاس‌بندی، تصاویر پراکندگی و گسترش کانی‌های تشخیص داده شده به دست آمد. به منظور ارزیابی نتایج این مطالعه از دو روش اعتبارسنجی مجازی و نمونه‌برداری از مناطق حاوی کائولن و آنالیز شیمیایی آن‌ها استفاده شد. اعتبارسنجی مجازی با صحت ۷۴/۲۸٪ برای لندست ۸ و ۷۰/۳۷٪ برای تصاویر استر بیانگر صحت قابل قبول پردازش تصاویر می‌باشد. هدف اصلی در این مطالعه شناسایی پراکندگی سطحی کائولن بوده اما به دلیل ماهیت روش مورد استفاده، دو کانی دیگر نیز در کنار کائولینیت شناسایی شدند. به این ترتیب که ابتدا اجزای خالص داده‌ها توسط PPI استخراج شدند و در مرحله شناسایی نوع طیف‌ها، کوارتز و کانی‌های آهن‌دار (هماتیت و ژاروسیت که به ترتیب از تصاویر لندست ۸ و استر استخراج شده‌اند) نیز شناسایی شدند. این دو کانی معمولاً جزو ناخالصی‌های ذخایر کائولن در بحث‌های مربوط به کاربردهای صنعتی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین در نقشه کلاس‌بندی شده مجاورت و در هم آمیختگی این کانی‌ها با کائولینیت می‌تواند یک پارامتر منفی در نظر گرفته شود. همین عامل دلیل عدم انتخاب محدوده بین X5 و X6 به‌عنوان منطقه امیدبخش است (شکل‌های ۸ و ۱۱) همچنین در تلفیق لایه‌ها در مطالعات آتی این لایه‌ها را می‌توان به‌عنوان عامل نامطلوب استفاده کرد.

با بررسی کلی گسترش کانی‌ها، تطابق بسیار خوبی بین پراکندگی کائولن در تصاویر و مطالعات صحرایی دیده شد. به طوری که مناطق در حال بهره‌برداری و یا در حال اکتشاف، به‌عنوان مناطق با گسترش مناسب کائولن در تصاویر پردازش شده تشخیص داده شد. اما در منطقه مورد مطالعه، ۶ محدوده

کتابخانه‌ای است. به‌عنوان مثال مناطقی که به کلاس مربوط به کوارتز اختصاص یافته‌اند (در داده‌های استر) در حقیقت به یک طیفی اختصاص یافته‌اند که خود قبلاً در طی مقایسه با طیف‌های استاندارد با روش‌های SAM و SF، به‌عنوان کوارتز تشخیص داده شده است. بنابراین روش ارزیابی مجازی صرفاً برای ارزیابی صحت فرآیند کلاس‌بندی است. و اگر فرضاً کلاس‌بندی پیکسل‌ها (در مورد کوارتز) صحیح نباشد، همانند آنچه در شکل ۸-ب به نظر می‌رسد اتفاق افتاده باشد، ایراد اصلی در مرحله مقایسه طیف میانگین استخراج شده (در مرحله ارزیابی پیکسل‌های خالص استخراج شده از PPI در فضای n بعدی) با طیف کتابخانه‌ای برای شناسایی جنس طیف میانگین است که کوارتز تشخیص داده شده است که ممکن است کوارتز نبوده و مربوط به یک ماده یا کانی دیگر باشد. در حالت کلی اعتبارسنجی نتایج با استفاده از اطلاعات صحیحی مناسب‌تر است.

برای شناسایی کائولن داده‌های لندست ۸ نتایج مشابهی با داده‌های استر داشته‌اند. به طوری که مناطق اصلی کائولن دار منطقه در هر دو نوع داده شناسایی شده‌اند. به دلیل اینکه ساختارهای جذبی کانی‌های رسی در محدوده طیفی SWIR واقع شده‌اند و در این محدوده داده‌های استر تعداد باندهای بیشتری نسبت به لندست ۸ دارند، نمی‌توان انتظار داشت که نتایج حاصل از داده‌های لندست ۸ در مورد کانی‌های رسی بهتر از استر باشد. با این وجود نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در منطقه زوز داده‌های لندست ۸ نتایج مشابهی با داده‌های استر در شناسایی کائولینیت داشته است. دلیل این امر می‌تواند کیفیت بالای تصویر لندست ۸ استفاده شده باشد. برای هر منطقه از سطح زمین داده‌های لندست ۸ اخذ شده در زمان‌های مختلف قابل دسترس بوده و این امر قدرت انتخاب داده‌ها را بالا می‌برد و می‌توان باکیفیت‌ترین داده را از بین داده‌های موجود انتخاب کرد. حال آنکه در مورد داده‌های استر معمولاً بیشتر از چند تصویر برای هر منطقه در دسترس نیست.

نقشه‌های استخراج شده در این مطالعه که مناطق پتانسیل دار کائولن و همچنین پراکندگی کوارتز/ سیلیس و کانی‌های آهن‌دار را در اطراف معدن کائولن زوز نمایش می‌دهند، از طریق دانش دورسنجی به دست آمده‌اند که می‌تواند یک ابزار مناسب برای پی‌جویی بیشتر انواع ذخایر معدنی باشد. در اکتشاف مواد معدنی، به منظور کاهش ریسک اکتشاف، از مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از نتایج روش‌های مختلف اکتشافی (مانند: دورسنجی، زمین‌شناسی،



شکل ۱۳- ساختارهای طیفی کانی‌های آهن‌دار در محدوده VNIR.

محدوده کلاس‌بندی شده به‌عنوان کانی کوارتز در موردی که از داده‌های لندست ۸ استفاده شده، نسبت به موردی که از داده‌های استر استفاده شده است متفاوت است. به طوری که دو محدوده مربوط به کوارتز اشتراک بسیار کمی با هم دارند (محدوده با رنگ قرمز در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب). مناطق کلاس‌بندی شده به‌عنوان کوارتز در داده‌های استر بیشتر در مجاورت با پیکسل‌هایی هستند که به دلیل پوشش گیاهی بالایشان ماسک شدند و بیشتر در دره‌های منطقه قرار دارند. پوشش سطحی در این مناطق معمولاً خاک است. مناطق طبقه‌بندی شده به‌عنوان کوارتز تعدادی از روستاها را نیز در جنوب غرب منطقه مورد مطالعه پوشش می‌دهد که این امر صحت پایین کلاس مربوط به کوارتز را در داده‌های استر نشان می‌دهد. در حالی که مناطق کلاس‌بندی شده به‌عنوان کوارتز در داده‌های لندست ۸ بیشتر در مناطق کوهستانی شمال شرق و شرق منطقه مورد مطالعه متمرکز شده‌اند که این مناطق از سنگ‌های آذرین تشکیل شده‌اند. بدیهی است که احتمال حضور کانی کوارتز در این مناطق بیشتر است. در نتیجه در مورد کانی کوارتز هم نتایج حاصل از داده‌های لندست ۸ در این مطالعه بهتر بوده است. در خصوص اینکه صحت برآورد شده در روش ارزیابی مجازی برای کوارتز در داده‌های استر بهتر از لندست ۸ است، لازم به ذکر است که روش ارزیابی مجازی مبتنی بر مقایسه طیف‌های پیکسل‌های تصادفی انتخاب شده در داخل تصویر با طیف‌های

منابع

- پورمیرزایی، راشد؛ ۱۳۹۶؛ "بررسی نقش صنعت معدنکاری و منابع معدنی در توسعه پایدار کشور". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دوم، شماره ۳، ۸۱-۹۲ ص
 - Dubinski, J., 2013. "Sustainable development of mining mineral resources". *Journal of Sustainable Mining* 12(1), 1-6.
 - Bickford, M.E., 2013. "the Impact of the geological science on society". the geological society of America, New York, USA.
 - Poormirzaee, R., Oskouei, M.M., 2010. "Use of spectral analysis for detection of alterations in ETM data, Yazd, Iran", *Appl Geomat*, 2: 147; <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0027-8>.
 - Pournamdary, M., Hashim, M., Pour, B.A., 2014. "Application of ASTER and Landsat TM data for geological mapping of Esfandagheh ophiolite complex, southern Iran". *Resource Geology*, 64(3), 233.
 - Nouri, T., Oskouei, M., 2012. "Detection of the geothermal alterations and thermal anomalies by processing of remote sensing data Sabalan, Iran". The 33RD Asian Conference on Remote Sensing, November 26-30, 2012.
 - Mwaniki, M.W., Moeller, M.S., Schellmann, G., 2015. "A comparison of Landsat8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualizing lineaments: A case study of central region Kenya". 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11-15 May 2015, Berlin, Germany.
 - BeiranvandPour, A., Hashim, M., 2015. "Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran". *Journal of Taibah University for Science*, 9, 155-166.
 - Zhang, T., Yi, G., Li, H., Wang, Z., Tang, J., Zhong, K., Li, Y., Wang, Q., Bie, X., 2016. "Integrating Data of ASTER and Landsat-8 OLI(AO) for Hydrothermal Alteration Mineral Mapping in Duolong Porphyry Cu-Au Deposit, Tibetan Plateau, China". *Remote Sensing*, 8(11), 890.
 - Fatima, K., Khattak, M.U.K., Kausar, A.B., Toqeer, M., Haider, N., Rehman, A.U., 2017. "Minerals identification and mapping using
- ژئوفیزیک و ژئوشیمی) به منظور معرفی نواحی هدف و شناسایی نواحی امیدبخش استفاده می‌شود. در مورد ذخیره معدنی مورد مطالعه در این تحقیق محدوده‌های مشخص شده به‌عنوان مناطق امید بخش کائولن و همچنین نقشه‌های پراکندگی دو کانی دیگر را (به‌عنوان پارامترهای منفی) با لایه‌های دیگر نظیر نقشه زمین‌شناسی، اطلاعات ژئوشیمیایی (درصد کائولن، درصد مواد مزاحم) و خواص فیزیکی کائولن (درخشندگی، لزجت، حد خمیری، مودول گسیختگی) که می‌توانند به‌صورت نقشه‌های درون‌یابی شده نمایش داده شوند، نقشه راه‌های دسترسی منطقه به‌صورت زون‌های بافر در اطراف آن‌ها، و همچنین لایه گسل‌های منطقه (به دلیل اینکه محلول‌های هیدروترمال که عامل اصلی شکل‌گیری کائولینیت هستند بیشتر از طریق شکستگی‌ها نفوذ می‌کنند) تلفیق نمود. در این راستا در روش‌های دانش محور نظیر AHP¹ عدم وجود معیار کمی قطعی و تخصیص وزن‌ها بر اساس نظر کارشناسان، خطای تصادفی را در بر خواهد داشت. در این نوع روش‌ها داده‌ها به گروه‌های جداگانه تقسیم می‌شود که این امر سبب ساده‌سازی محیط پیچیده زمین و در نتیجه سبب بروز خطا می‌شود [۴۸]. با در نظر گرفتن وزن‌ها به فواصل پیوسته می‌توان تا حدی از این خطاها جلوگیری کرد. در این راستا با توجه به بررسی کارایی روش‌های مختلف در مطالعات مرتبط، توابع لجستیکی غیر خطی^۲ [۴۸ و ۴۹] بسیار مفید خواهند بود. برای تلفیق لایه‌های وزن‌دار شده می‌توان از توابع مناسب نظیر روش تلفیق گاما یا میانگین هندسی استفاده کرد. در بین لایه‌های اشاره شده که برای پتانسیل‌یابی کائولن حائز اهمیت هستند وزن لایه یا لایه‌های ژئوشیمیایی و همچنین لایه‌های مربوط به خواص فیزیکی کائولن بایستی بالاتر از سایر لایه‌ها تعیین شود چرا که مهم‌ترین معیارها از نظر قابلیت کاربرد صنعتی کائولن می‌باشند. ولی باید توجه داشت که برای انتخاب نقاط نمونه‌برداری مناسب جهت استخراج پارامترهای فیزیکوشیمیایی، هیچ لایه اطلاعاتی نمی‌تواند به اندازه لایه حاصل از مطالعات دورسنجی کمک کننده باشد. بنابراین لایه دورسنجی هم در تولید لایه‌های دیگر نقش دارد و هم خود به‌عنوان لایه‌ای مجزا در فرآیند تلفیق شرکت داده می‌شود.
- در مطالعات آتی با تهیه نمونه‌هایی از منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری پارامترهای ذکر شده و تولید لایه‌های اطلاعاتی مربوطه می‌توان مطالعات تکمیلی در این منطقه انجام داد.

1-Analytic Hierarchy Process
2-Non-linear logistic function

19. Nascimento, J.M. and J.M. Bioucas-Dias, Nonlinear mixture model for hyperspectral unmixing. Proc. SPIE Image and Signal Processing for Remote Sensing XV, L. Bruzzone, C. Notarnicola, and F. Posa, Eds, 2009 .p. 74770I.
20. Chakravorty, S. and E. Shah. Application of non-linear spectral unmixing on hyperspectral data for species level classification of mangroves. in Communications and Signal Processing (ICCSP), 2013 International Conference on. 2013. IEEE.
21. Altmann, Y., N. Dobigeon and Tournet J. Y, Bilinear models for nonlinear unmixing of hyperspectral images. in Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 3rd Workshop on. IEEE, 2011.
22. Nouri, T. & Mohammady Oskouei, M. (2016) Processing of Hyperion data set for detection of indicative minerals using a hybrid method in Dost-Bayli, Iran. International journal of remote sensing, 37(20), 4923-4947.
23. ZEKRI, H., OSKOU EI M. M., NOORI, T., 2016. DETECTION OF END MEMBERS ON A SCENE OF HYPERION DATA USING ORASIS METHOD IN AGH-DAGH, ARDEBIL, IRANIAN JOURNAL OF MINING ENGINEERING (IRJME), 10(29), 1-19.
24. Heylen, R., M. Parente, and P. Gader, A review of nonlinear hyperspectral unmixing methods. 2014. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(6), 1844-1868.
25. Stoclin J.(1977),structural correlation of the Alpine ranges between Iran and central Asia, Mem.Ser.Soc. Geo.France,n8,333-335.
26. Eftekhar nezhad J., (1996), Geological map of Iran 1:100000 series sheet 5167 (Julfa), Geological survey of Iran, Tehran.
۲۷. فرید آزاد، مروت؛ عامری، علی؛ مجتهدی، منصور؛ ملک قاسمی، فرید؛ "مطالعه پترولوژیکی و زمین‌شناسی سنگ‌های آتشفشانی منطقه زنوز با نگرشی بر کائولن زائی آنها". سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۹-۱۱ شهریورماه ۱۳۷۸، شیراز.
۲۸. فرید آزاد، مروت؛ "پتروگرافی، ژئوشیمی عناصر اصلی و محیط تکتونیکی دایک بنموریتی موجود در محدوده در محدوده معدن کائولن زنوز، شمال مرند-آذربایجان ASTER satellite image". Journal of Applied Remote Sensing, 11(4), 046006.
11. Testa, F. J., Villanueva, C., Cooke, D. R., Zhang, L., 2018. "Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery". Remote Sensing, 10(2), 203.
12. Ourhzip, Z., Algouti, A., Algouti, A., Hadach, F., 2019. "Lithological mapping using Landsat 8 OLI and ASTER multispectral data in Imini-Ounilla district South High Atlas of Marrakech". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W13, 1255-1262.
13. Yang, M., Ren, G., Han, L., Yi, H., Gao, T., 2018. "Detection of Pb-Zn mineralization zones in west Kunlun using Landsat 8 and ASTER remote sensing data". Journal of Applied Remote Sensing, 12(2), 026018.
14. Banerjee, K., Jain, M. K., Panda, S., Jeyaseelan, A.T., 2019. "Landsat 8 OLI data for identification of hydrothermal alteration zone in Singhbhum Shear Zone using successive band depth difference technique - a new image processing approach". Current Science, 116(10), 1639-1647.
15. Safari, M., Maghsoudi, A., Beiranvand Pour, A., 2018. "Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: a case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran". Geocarto International, 33(11), 1186-1201.
16. Tayebi, M.H., Tangestani, M.H. & Roosta, H., 2013. "Mapping salt diapirs and salt diapir-affected areas using MLP neural network model and ASTER data". International Journal of Digital Earth, 6(2), 143-157.
17. Jianwen, M., Bagan, H., 2005. "Land-use classification using ASTER data and self-organized neural networks". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 7(3), 183-188.
18. Bioucas-Dias, J.M., Plaza, A., Dobigeon, N., Parente, M., Du, Q., Gader, P., and Chanussot, J., 2012. "Hyperspectral Unmixing Overview: Geometrical, Statistical, and Sparse Regression-Based Approaches". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(2), 354-379.

39. Qiu, F., Abdelsalam, M., Thakkar, P., 2006. "Spectral analysis of ASTER data covering part of the Neoproterozoic Allaqi-Heiani suture, Southern Egypt". *Journal of African Earth Sciences*, 44, 169–180.
40. Kariuki, P.C., Woldai, T., van der Meer, F., 2004. "The Role of Remote Sensing in Mapping Swelling Soils". *Asian Journal of Geoinformatics*, 5(1). 43-54.
41. Green, A. A., Berman, M., Switzer, B., Craig, M. D., 1988. "A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1), 65 - 74.
42. Clark, R.N., 1999. "Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy". In: Rencz, A.N. (Ed.), *Manual of Remote Sensing. Remote Sensing for the Earth Sciences*, John Wiley & Sons, New York, pp. 3–58.
43. Borengasser, M., Hungate, W.S., Watkins. R., 2008. "Hyperspectral Remote Sensing, Principles and Applications". CRC Press, Taylor & Francis Group.
44. Jain, R., Sharma, R.U., 2018. Mapping of Mineral Zones using the Spectral Feature Fitting Method in Jahazpur belt, Rajasthan, India". *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(1), 562-567.
45. منهاج، محمدباقر. ۱۳۸۹. "مبانی شبکه‌های عصبی". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
46. Atkison, P.M., Tatnall, A.R.L., 1997. "Neural networks in remote sensing". *international journal of remote sensing*, 18(4), 699-709.
47. King, T.V.V., Clark, R.N., 2000. "Verification of Remotely Sensed Data". *Remote Sensing for Site Characterization* (F. Kuehn, T. King, B. Hoerig, D. Pieters, eds.), Springer verlog, Berlin, p 59-61.
48. یوسفی، مهیار؛ فرخ زاده، بهنوش؛ بساطی، سمیرا؛ ۱۳۹۶. "اولویت بندی مناطق احداث سد زیرزمینی با استفاده از روش میانگین هندسی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی". *اکوهیدرولوژی، دوره چهارم، شماره ۳، ص. ۶۷۲-۶۶۳*.
49. Yousefi, M., Carranza, E.J.M., 2015. "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". *Computers & Geosciences*, 74, 97-109.
- شرقی". هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، ۱۹-۱۸ شهریورماه ۱۳۹۴، دامغان.
۲۹. ملائی کشکی، فریدون؛ صفری، مهدی؛ "شناسایی مناطق امید بخش معدنی در ارتباط با کانیه‌های رسی، با استفاده از داده‌های ETM+ و ASTER (مورد مطالعه در شهرستان مرند)". هفتمین همایش ملی تخصصی زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور، ۱-۲، آبان ۱۳۹۳، اراک.
30. Landsat8 handbook, www.landsat.usgs.gov.
31. ASTER User Handbook, version 2. www.landsat.usgs.gov.
32. Oskouei, M.M., Busch, W., 2008. "A geostatistically based preprocessing algorithm for hyperspectral data analysis". *GIScience and Remote Sensing*, 45, 356–368.
۳۳. پورمیرزائی، راشد؛ محمدی اسکویی، مجید؛ ۱۳۹۱؛ "تصحیح توپوگرافی داده‌های غرب آذربایجان شرقی". نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره هفتم، شماره ۱۵، ص. ۲۵-۳۳.
34. Riaño, D; Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I., 2003. "Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types". *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 41 (5), 1056-1061.
35. Molan, Y.E., Refahi, D., Tarashti, A.H., 2014. "Mineral mapping in the Maherabad area, eastern Iran, using the HyMap remote sensing data". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27, 117–127.
36. Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., 2003. "Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1388-1400. Doi:10.1109/tgrs.2003.812908.
37. Boardman, J. W., 1993. "Automated spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts". in *Summaries, Fourth JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 93-26*, 1, 11-14.
38. Pu, R., Gong, P., Michishita, R., Sasagawa, T., 2008. "spectral mixture analysis for mapping abundance of urban surface components from the Terra/ASTER data". *Remote Sensing of Environment*, 112, 939–954.