



سنجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال چهاردهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.14, No. 3, Autumn 2022

۴۷-۷۴

مقاله پژوهشی



بررسی نواحی دگرسانی کانسار مس پورفیری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی

(سنتینل-۲، لندست-۸ و استر) و کنترل‌های زمینی

(مطالعه موردی: کانسار مس مسجدداغی-شمال غرب ایران)

مریم‌سادات احمدی^۱ و عباس مالیان^{۲*}

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲. عضو هیأت علمی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۳

چکیده

طراحی الگوریتم‌های سنجش از دور و توسعه روش‌های گوناگون پردازش تصاویر ماهواره‌ای، برای شناسایی کانسارهای مس پورفیری، از جمله موضوعات مهم مطالعات در زمینه ارزیابی منابع معدنی و بهره‌برداری بهینه از آنهاست. به این منظور، تعیین نواحی دگرسانی ابزار مناسبی به منظور طراحی الگوهای مورد قبول اکتشافی فراهم می‌آورد. در این پژوهش، با راهبردی جامع و با استفاده از تعیین حدود دگرسانی‌های مرتبط با کانسار مس پورفیری بر مبنای مدل لوول و گیلبرت با سه نوع راهبرد متفاوت (پردازش‌های بصری، طیفی و آماری) و همچنین استخراج خطواره‌ها در منطقه مورد مطالعه، محدوده تمرکز ماده معدنی برای حفاری پیشنهاد شد. منطقه مورد مطالعه، در این مقاله، کانسار مس پورفیری مسجدداغی در شمال شرق استان آذربایجان شرقی است. در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی استر، سنجنده OLI لندست-۸ و سنتینل-۲ برای پردازش‌های گوناگون مانند ترکیبات نسبت‌های باندی، تحلیل مؤلفه اصلی و روش‌های پردازش طیفی پیکسل مینا و زیرپیکسلی، از جمله SAM و MTMF و پردازش‌های آماری مبتنی بر الگوریتم عملگر منطقی استفاده شد. در نهایت، با فازی‌سازی و تلفیق لایه‌های حاصل از پردازش‌های تصاویر ماهواره‌ای با ساختارهای هندسی منطقه (خطواره‌ها) که روی داده‌های سنتینل-۲ به دو روش خودکار و نیمه‌خودکار استخراج شدند، نتایج در فضای GIS تحلیل شد و پس از مقایسه نتایج ارائه شده با تحلیل نمونه‌های زمینی، صحت و تطابق مناطق مورد نظر تأیید شد. دقت کاربر و سازنده در مورد محدوده دارای اولویت به ترتیب ۷۸/۵۴٪ و ۷۸/۳۶٪ به دست آمد که معیار سنجش مناسب‌تری برای معرفی محدوده مرکز حفاری است.

کلیدواژه‌ها: کانسار مس پورفیری، نواحی دگرسانی، SAM، MTMF، منطق فازی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران. تلفن: ۰۹۱۲۳۲۷۲۶۳۳۵

۱- مقدمه

به تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که تحت تأثیر آب‌های ماگمایی و یا گرمایی در سنگ‌ها ایجاد شود، دگرسانی می‌گویند. از دگرسانی‌های مهم می‌توان پتاسیک، پروپلیتیک، سربسیتیک، آرژیلیک، آلونیتی، گرایزن، سیلیسی، ژئولیتی، فنیتیک، کلریتی، تورمالینزه و آلبیتی را نام برد. شناسایی و ارزیابی دگرسانی ساده‌ترین، ارزان‌ترین و مناسب‌ترین راه در اکتشاف مواد معدنی است. بهترین روش پیدا کردن دگرسانی‌ها کمک‌گرفتن از پردازش داده‌های ماهواره‌ای، به‌ویژه در مرحله اکتشافات مقدماتی است. تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی حاصل از دگرسانی سنگ‌ها میزان انرژی منعکس شده و یا جذب شده در این سنگ‌ها را تغییر می‌دهد. با توجه به اینکه این انرژی‌ها در مورد پدیده‌های گوناگون برای یک طول موج و متقابلاً در مورد یک پدیده در طول موج‌های گوناگون متفاوت است، با پردازش داده‌های ماهواره‌ای، امکان شناسایی و بررسی حضور و یا نبود کانی‌های شاخص برخی از دگرسانی‌ها نیز میسر می‌شود.

اغلب کانسارهای پورفیری شناخته شده در دنیا الگوی پهنه‌بندی مناسبی در مورد کانی‌سازی و دگرسانی نشان می‌دهند (شکل ۱). از آن‌جا که کانی‌سازی کانسارهای فلزی رابطه نزدیکی با فعالیت‌های گرمایی دارد و تأثیرات فعالیت‌های گرمایی را نمی‌توان مستقیماً روی نقشه زمین‌شناسی نشان داد و گاه نیز تشخیص آن روی زمین مشکل است، شناسایی این‌گونه پدیده‌ها در انتخاب محل کانی‌سازی و بررسی محدوده کانی‌سازی، با استفاده از شیوه‌های سنجش از دور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای، می‌تواند بسیار مفید و مناسب باشد (Roshan Rovani, 2013). لوول و گیلبرت^۱ توده معدنی سان مانوئل- کلامازو را توصیف و یافته‌های خویش را با ۲۷ کانسار مس پورفیری دیگر مقایسه کردند. براساس ادعای آنها، معمولاً چهار منطقه دگرسانی وجود دارد و این مناطق اغلب، به‌منزله راهنما در اکتشاف ذخایر مس پورفیری، استفاده می‌شوند (Panjomi et al., 2012). این مناطق در مدل لوول- گیلبرت (شکل ۱) عبارت است از:

منطقه پتاسیک^۲. این منطقه همیشه وجود ندارد

و در صورت وجود، با تشکیل ارتوکلاز و بیوتیت ثانویه یا تشکیل ارتوکلاز- بیوتیت- کلریت شناسایی می‌شود. ممکن است در آن سربسیت نیز وجود داشته باشد. این کانی‌های ثانویه جانشین ارتوکلاز، پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک اولیه توده نفوذی می‌شوند. در این منطقه، امکان دارد انیدریت غالب باشد.

منطقه فیلیک^۳. نوعی دگرسانی است که در ذخایر

دیگر، با عنوان سربسیتی شدن و دگرسانی آرژیلیک پیشرفته شناخته می‌شود. این منطقه با توجه به وجود مجموعه کوارتز- سربسیت- پیریت مشخص می‌شود و معمولاً دارای مقادیر کم کلریت، ایلیت و روتیل است. سربسیتی شدن در فلدسپارها و بیوتیت اولیه تأثیر می‌گذارد و دگرسانی بیوتیت سبب ایجاد اندکی روتیل می‌شود. این دگرسانی‌ها واکنش‌هایی سیلیسی‌زا هستند و به همین دلیل، کوارتز بسیاری تشکیل می‌شود (سیلیسی شدن). سطح تماس این منطقه، با منطقه پتاسیک، سطح تماسی تدریجی با ضخامت بیش از ده‌ها متر است. منطقه فیلیک، در صورت وجود، بیشترین گسترش پیریت افشان و رگچه‌ای را دارد.

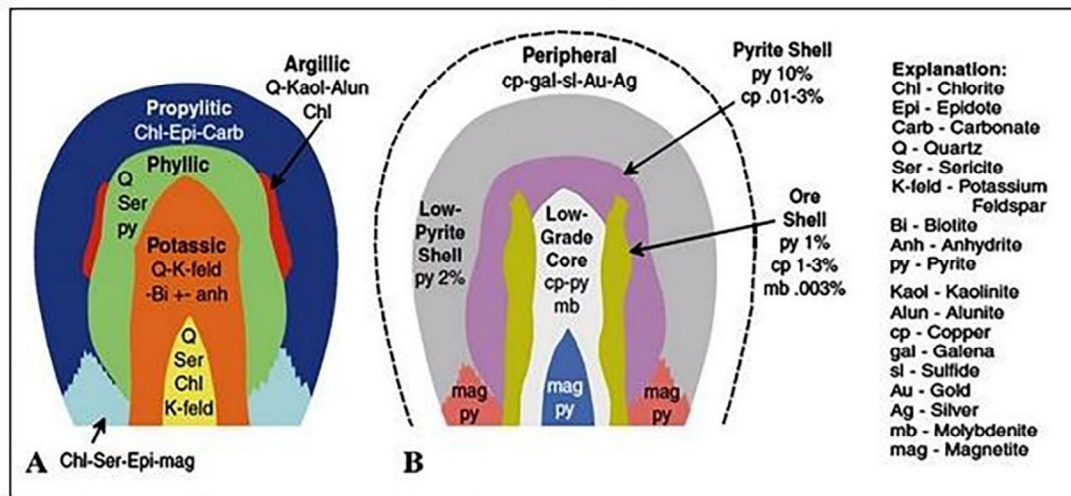
منطقه آرژیلیک^۴. وجود کانی‌های رسی از ویژگی

این منطقه است و با نزدیک‌تر شدن به توده معدنی کائولن و دور شدن از آن، مونتموریونیت افزایش می‌یابد.

منطقه پروپلیتیک^۵. این منطقه که خارجی‌ترین

منطقه است، همواره وجود دارد. کلریت رایج‌ترین کانی این منطقه محسوب می‌شود و پیریت، کلسیت و اپیدوت نیز با آن همراه است. کانی‌های مافیک اولیه (بیوتیت و هورنبلند) به‌طور کامل، یا فقط بخشی از آنها، به کلریت و کربنات تبدیل می‌شود و پلاژیوکلاز ممکن است بدون تغییر باقی بماند. این منطقه، در طول صدها متر به سمت سنگ‌های احاطه‌کننده آن، محو می‌شود.

1. Lowell & Guilbert
2. Potassic Zone
3. Phyllic Zone
4. Argillic Zone
5. Propylitic Zone



شکل ۱. مناطق دگرسانی موجود در یک کانسار مس پورفیری

منبع: Panjomi et al., 2012

۲- پیشینه تحقیق

کانسارهای مس پورفیری از مهم‌ترین منابع معدنی در جهان و ایران به‌شمار می‌روند. برای پی‌بردن به نوع کار و تحقیقات در زمینه سنجش از دور در مهم‌ترین منابع پورفیری داخل و خارج کشور، برخی تحقیقات شاخص انجام شده در مورد سه منطقه معدنی مس پورفیری سرچشمه، سونگون و مسجدداغی، را در ادامه بررسی می‌کنیم.

بخشده^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، با استفاده از سی مجموعه داده و الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM)^۲ و تخمینگر بردار پشتیبان (SVR)^۳، به نقشه‌سازی ناحیه‌های دگرسانی در منطقه مطالعاتی و تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی شده زیرپیکسل پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که مزیت اصلی SVR توانایی بسیار در طبقه‌بندی مسائل با ابعاد بزرگ است؛ به ویژه اگر داده‌های زمین واقعی برای گام آموزشی مناسب نباشد. آقازاده و قلی‌زاده^۴ (۲۰۱۵)، با استفاده از روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک برای تقریب گرادیان تصویر و یافتن لبه‌ها، روشی برای تشخیص لبه براساس تبدیل موجک پیشنهاد کردند. نتایج تجربی نشان داد الگوریتم آنها مطمئن‌تر از روش سنتی است. دُرّانی و

محمودی^۵ (۲۰۱۶)، با استفاده از تصاویر نويزدار و الگوریتم کلونی مورچه^۶ و از طریق بهینه‌سازی کلونی مورچگان، لبه‌ها را تشخیص دادند و از آن الگوریتم برای تشخیص لبه تصاویر نويزدار، با نویز گاوسی و نویز نمک و فلفل استفاده کردند. هادی و ارفع‌نیا^۷ (۲۰۱۷)، با به‌کارگیری داده‌های استر و سنجنده OLI و الگوریتم فیلتر تطبیقی استخراج طیف هدف، نقشه زمین‌شناسی و تشخیص واحدهای سنگی را تهیه کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای تهیه نقشه زمین‌شناسی، علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه، منجر به افزایش دقت می‌شود. الدوسوکی^۸ و همکاران (۲۰۱۷) از داده‌های مغناطیس‌سنجی و سنجنده لندست-۸، با نسبت بانندی و روش کروستات^۹ و تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی^{۱۰} بهره

1. Bakhshandeh
2. Support Vector Machine
3. Support Vector Regression
4. Aghazadeh & Gholizadeh
5. Dorrani & Mahmoodi
6. ACO
7. Hadi & Arfania
8. Eldosouky
9. Crosta
10. PCA

مناطق طرفیت بالای ذخایر مس و طلا را داشته است. بی بی^۵ و همکاران (۲۰۱۷)، نقشه‌های طبقه‌بندی سنگ‌شناسی حاصل از تصاویر WorldView-3، استر و لندست-۸ را با استفاده از الگوریتم SVM (ماشین بردار پشتیبان) برای اولین بار مقایسه کردند و دقت و تفسیر بصری بالاتر نقشه طبقه‌بندی شده از داده‌های WV-3 را نشان دادند. سپس نتایج طبقه‌بندی سنگ‌شناسی داده‌های استر و OLI را برای اولین بار مقایسه کردند. مدبری^۶ و همکاران (۲۰۱۷) از داده‌های استر و الگوریتم فیلتر تطبیقی آمیخته (MTMF)، برای استخراج طیف هدف، در نقشه‌سازی زیرپیکسل از مواد معدنی بهره بردند. آنها با استفاده از الگوریتم فیلتر تطبیقی آمیخته و طیف‌سنجی ASD، خواص طیفی نمونه‌های میدان را اندازه گرفتند و طیف نمونه‌ها را از راه مقایسه بصری با کتابخانه طیفی USGS، تجزیه و تحلیل کردند. سلیمی^۷ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از داده‌های ابرطیفی هایپریون^۸ الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، به تحلیل رگرسیون چندمتغیری (MVRA) و روابط تجربی، و الگوریتم لونبرگ مارکوارت^۹ برای آموزش شبکه به‌منظور برآورد پارامترهای PPV و MVRA پرداختند و توانایی و دقت بالای شبکه MLP در برآورد PPV را مقایسه کردند. آنها توانایی بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی را در مقایسه با دو مدل دیگر، نشان دادند و اثبات کردند که روابط تجربی، به دلیل ماهیت غیرخطی، قابلیت کمتری از دیگر مدل‌ها دارند؛ انعطاف‌پذیری‌شان بالاتر و خطایشان کمتر است. همچنین این محققان، به کمک روش‌های

بردند تا مناطق دارای ظرفیت کانی‌سازی در وادی الهی، صحرای جنوب‌شرق مصر، و نواحی دگرسانی هیدروترمال را شناسایی کنند. این پژوهشگران، در نهایت، یکپارچگی بین اطلاعات سنجش از دور، ژئوفیزیک و زمین‌شناسی را راهی مفید برای نقشه‌برداری از ظرفیت‌های معدنی در منطقه وادی الهی دانستند. بیرانوندپور^۱ و همکاران (۲۰۱۷) از داده‌های استر الگوریتم انحراف معیار محدود انرژی (CEM)، الگوریتم تخمینی زیربنای متعامد (OSP) و برآورد سازگاری سازگار (ACE) برای تشخیص مجموعه‌های کانی دگرسانی و سنگ‌شناسی، در محیط‌های قطب جنوب، استفاده کردند. آنها روشی در نقشه‌سازی زمین‌شناسی، مبتنی بر سنجش از دور، با استفاده از باندهای طیفی استر را برای تشخیص واحدهای سنگ‌شناسی و دگرسانی کانی‌ها در منطقه نیز به کار بردند. محبوبی‌نیا^۲ و همکاران (۲۰۱۷) با بهره‌گیری از داده‌های ژئوشیمیایی، زمین‌شناسی، ساختاری و تصاویر ماهواره‌ای استر به تجزیه و تحلیل داده‌های مختلف پرداختند. سپس با استفاده از روش AHP-OWA، الگوریتم‌های عمق باند نسبی (RBD)، نسبت نويز کمینه (MNF) و حداقل مربعات (LS-Fit)، نقشه‌های زمین‌شناسی، گسل‌ها و شکستگی‌ها، تشخیص مناطق دگرسانی هیدروترمال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر را تولید کردند. دائی^۳ و همکاران (۲۰۱۷) داده‌های استر، نسبت باندهای بهبود روشنایی و نگاشت زاویه طیفی (SAM) را در استخراج ناحیه‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک، و تهیه نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۵۰۰۰ به کار بردند. آنها نشان دادند این منطقه ظرفیت چشمگیری برای سنگ معدن دارد. استفاده از داده‌های استر برای نشان دادن ناحیه‌های دگرسانی هیدروترمال در کانسار Duolong Cu-Au در کمربند بانگونگ-کو-نوجیانگ^۴، در شناسایی مناطق وسیع دگرسانی فیلیک و آرژیلیک موفق بوده و برای پیش‌بینی مناطق مناسب‌تر است و نشان می‌دهد آن

1. BeiranvandPour
2. MahboubyNiya
3. Dai
4. Bangongco-Nujiang
5. Bei
6. Modabberi
7. Salimi
8. Hyperion
9. Levenberg-Marquardt algorithm

گستره‌ای وسیع رخ داده است. شریفی^۵ و همکاران (۲۰۱۸) با به‌کارگیری مجموعه روش‌های استخراج خط، از جمله الگوریتم EDline در منطقه ونارچ، روشی جدید برای افزایش دقت و کاهش خطر، پیش از هر عملیات، پیشنهاد دادند و نقشه خطی منطقه مورد مطالعه را تهیه کردند. احمدی و اویگوچگیل^۶ (۲۰۲۱) با استفاده از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست و به‌کمک ترکیبات و نسبت‌های بانندی و همچنین روش‌های PCA و SAM، اکسیدهای آهن در بلوک کابل در افغانستان را شناسایی کردند و مناطق مطلوب احتمالی حاوی آهن را پیشنهاد دادند.

در جمع‌بندی، برای مطالعه هر منطقه با استفاده از روش‌های سنجش از دور، با توجه به محدوده منطقه و معلوم یا مجهول بودن ماده معدنی، دو رویکرد را می‌توان مطرح کرد:

۱) اگر فرض شود محدوده‌ای که به‌منزله محدوده معدنی ثبت شده بسیار بزرگ است و مطالعات میدانی اولیه و تعیین کانی‌های اقتصادی در آن بسیار هزینه‌بر است، برای کاهش حداکثری هزینه‌ها و مشخص کردن کانی‌های اقتصادی منطقه از روش سنجش از دور، با هدف شناسایی و ظرفیت‌یابی کانی‌های اقتصادی استفاده می‌شود؛

۲) اگر فرض شود محدوده ثبت‌شده به‌منزله محدوده معدنی محدوده‌ای کوچک است و مطالعات میدانی اولیه از سوی کارشناس زمین‌شناسی انجام شده است، کانی یا مجموعه کانی‌های اقتصادی منطقه مشخص‌اند و برای تعیین صحت یا صحت‌نداشتن ماده اقتصادی و در نتیجه، تعیین مرکز ذخیره کانی اقتصادی و پس از آن، تعیین نقاط امیدبخش برای حفاری، از روش سنجش از دور استفاده می‌شود.

1. Mohebbi
2. Yang
3. Kunlun
4. Mohammadi
5. Sharifi
6. Ahmadi & Uygucgil

SVM و SVR به نقشه‌سازی نواحی دگرسانی در منطقه مطالعاتی پرداختند و با تهیه نقشه‌های نهایی طبقه‌بندی‌شده زیرپیکسل از سه کانی شاخص کلریت (پروپیلیتیک)، مسکوویت (فیلیک) و کائولینیت (آرژلیک)، ارزیابی عملکرد SVR را هنگامی که در طبقه‌بندی داده‌های ابرطیفی هایپریون با تعداد اندک نمونه‌های آموزشی به‌کار می‌رود، نشان دادند. محبی^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، با به‌کارگیری شیوه‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک، روش‌های جمع‌آوری داده‌های سنتی و نداشتن انسجام ساختاری آنها را بررسی کردند. این پژوهشگران معایب این روش‌ها را براساس تجزیه و تحلیل تصویر ماهواره‌ای، در مطالعه‌ای روی معدن آهن چغارت، بیان کردند. یانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست-۸ و استر، نقشه‌های زمین‌شناسی و طیف‌سنجی آزمایشگاهی، روش‌های نسبت بانندی، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و روش‌های فیلترگری تطبیق طیفی، عملیات میدانی و کار آزمایشگاهی، ترکیبات معدنی و ویژگی‌های طیفی، ترکیبات رنگی و مؤلفه‌های اصلی، به تهیه تصویر حاوی اطلاعات مفید برای نقشه سنگ‌شناسی در کمربند کانلوم^۳ غربی پرداختند. محمدی^۴ (۲۰۰۱؛ ۲۰۰۶) اطلاعات گمانه‌های حفرشده در منطقه مسجدداغی و عیار میانگین حاصل از آنها را بررسی کرد و نتیجه گرفت یک رگه اصلی اپی‌ترمال در آن ناحیه وجود دارد که به‌دلیل وضعیت توپوگرافی منطقه، استخراج روباز، آسان و کم‌هزینه می‌تواند مورد توجه معدن‌کاری قرار گیرد. آنچه بر اهمیت کانه‌زایی در منطقه مسجدداغی افزوده است، علاوه بر کانه‌زایی اپی‌ترمال، حضور کانه‌زایی پورفیری است. این محقق، با نمونه‌برداری ژئوشیمیایی از خاک و سنگ منطقه و انجام‌دادن عملیات ژئوفیزیک و حفر هجده ترانشه و شانزده گمانه، به تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی اکتشافی با مقیاس ۱:۵۰۰ و ۱:۱۰۰۰ از آن منطقه نیز اقدام کرد و با توجه به تحلیل نمونه‌برداری‌های گوناگون و مطالعات XRD، به این نتیجه رسید که کانه‌زایی در منطقه مسجدداغی در

طول‌های $45^{\circ}58'29''$ و $45^{\circ}56'05''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $38^{\circ}53'22''$ و $38^{\circ}52'03''$ شمالی واقع شده است. منطقه کانه‌دار مسجدداغی، در بردارنده کانی‌سازی‌های مس پورفیری و طلای اپی‌ترمال با ابعاد $3/5 \times 2/5$ کیلومتر و مساحتی در حدود $8/5$ کیلومترمربع در جلفا، در شمال غرب ایران و کوه‌های البرز غربی-آذربایجان قرار دارد (ImamAlipour, 2019).

۳-۲- داده‌های مورد استفاده

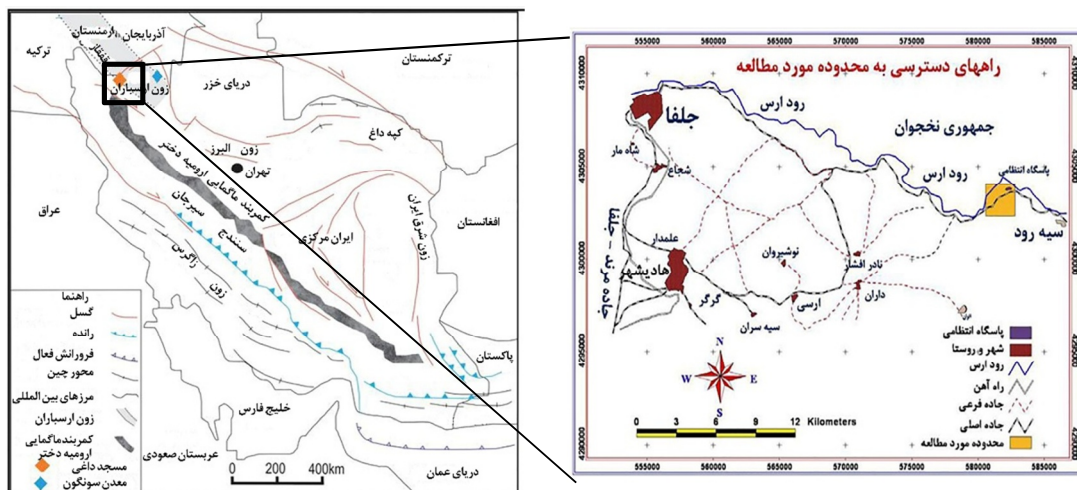
داده‌های سنجش از دور مورد استفاده در این پژوهش عبارت‌اند از باندهای سطح B بخش‌های SWIR و VNIR سنجنده استر، سنجنده OLI ماهواره لندست-۸ و باندهای سطح Level-1C ماهواره سنتینل-۲ که به ترتیب، در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ از منطقه مورد مطالعه دریافت شده است. همچنین از نقشه زمین‌شناسی و گزارش اکتشافی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی (شامل نمونه‌های سنگی و تحلیل آزمایش‌های XRD) منطقه مورد مطالعه، برای صحت‌سنجی نتایج دگرسانی‌ها استفاده شد. با هدف

با توجه به مطالب ذکرشده، سنجش از دور در حالت دوم کاربردی‌تر است و کاهش احتمال جانمایی نادرست در اکتشاف منابع معدنی، با استفاده از پردازش و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای، نتیجه مهم آن شمرده می‌شود. این امر نیز نیازمند مطالعات تکمیلی زمینی، از جمله مطالعات ژئوشیمی، ژئوفیزیک، سیالات درگیر و چنین مواردی است. در این مقاله، با استفاده از مفاهیم زمین‌شناسی اقتصادی و روش‌های سنجش از دور، ساختارهای هندسی و نواحی دگرسانی کانسارهای مس پورفیری دارای مقدار بالا، عیار پایین، غیرهم‌زاد و درون‌زاد را که از طریق روش‌های معدن‌کاری بزرگ‌مقیاس قابل بهره‌برداری‌اند (Shahabpour, 2014)، همراه با کنترل‌های زمینی، بررسی و مطالعه می‌کنیم.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده کانه‌زایی مسجدداغی در ناحیه ارسباران، در ۳۵ کیلومتری شرق جلفا و ۵ کیلومتری غرب سیه‌رود و در حاشیه رود مرزی ارس در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. این منطقه در مختصات جغرافیایی



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی کانسار مس پورفیری- طلای اپی‌ترمال مسجدداغی
منبع: Hasanpour & Alirezaei, 2016

شکل ۳. نقشه پهنه‌های ساختاری- زمین‌شناسی ایران، با نمایش موقعیت کانی‌سازی منطقه مسجدداغی
منبع: ImamAlipour, 2019

1. Sentinel-2

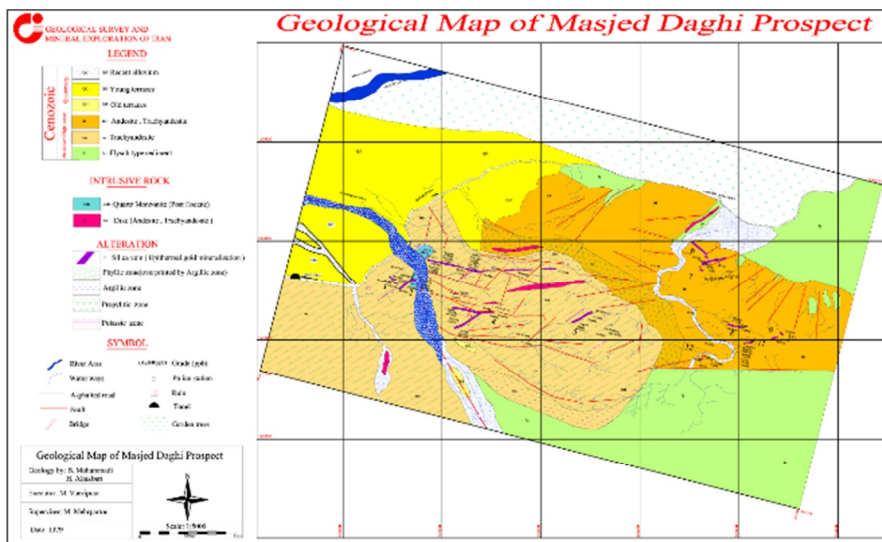
۳-۳-۱- راهبرد نخست

در راهبرد نخست، با هدف تفکیک واحدهای سنگی، با توجه به مقیاس مورد نظر برای خروجی و انتخاب محدوده پردازش شده، اطلاعات ماهواره‌ای پردازش شد. پس از تصحیحات لازم، روش‌های پردازشی ترکیبات کاذب رنگی، نسبت بانندی، ترکیبات نسبت بانندی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، به منظور آشکارسازی دگرسانی‌ها انجام شد و نقشه محدوده لازم به دست آمد. تصاویر ماهواره‌ای را می‌توان با باندهای گوناگونی مشاهده کرد که در هر یک، پدیده‌ها رنگ خاصی به خود می‌گیرند. این ویژگی حالت‌ها و رنگ‌های متفاوتی را برای تشخیص دگرسانی‌های منطقه، تفکیک گسل‌ها و ساختارهای موجود در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا بتوان به سهولت آنها را شناسایی و تفکیک کرد. روش نسبت بانندی یکی از روش‌های کاربردی در سنجش از دور، برای شناسایی مناطق کانی‌سازی است و با استفاده از این روش، مرز جدایش واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مشخص می‌شود.

دریافت اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای، لازم است پیش از استفاده از آنها، پیش‌پردازش‌هایی به منظور تصحیح و بارزنمودن تغییرات انجام شود. تصحیحاتی که پیش از پردازش روی تصاویر ماهواره‌ای صورت می‌گیرد شامل مواردی از قبیل تصحیحات هندسی، رادیومتری و اتمسفری (تصحیح اثر جو به روش QUAC¹) است.

۳-۳-۲- روش تحقیق

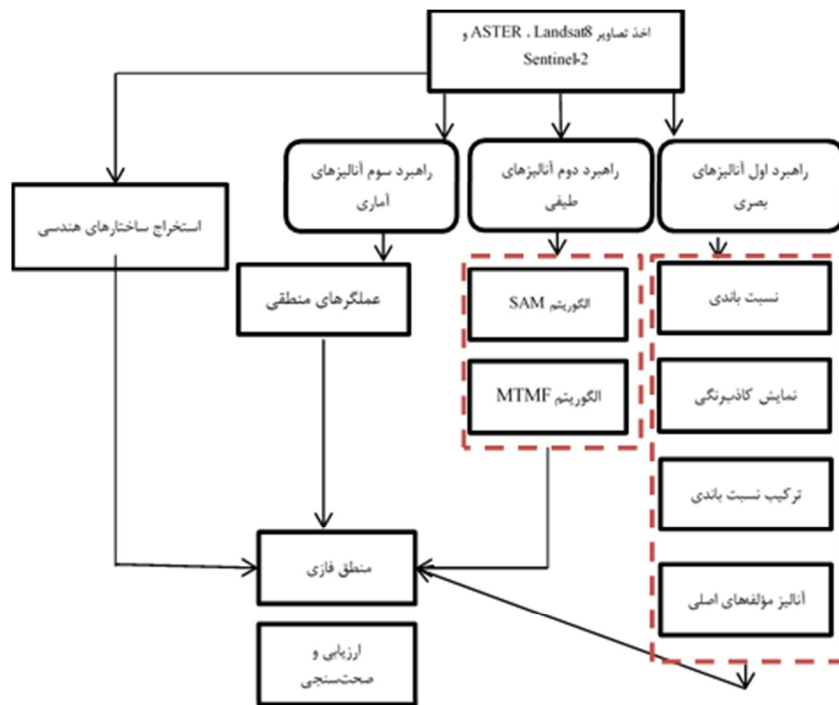
همان‌طور که در بخش پیشین اشاره شد، تحقیقات نسبتاً جامعی دربارهٔ اکتشاف منابع معدنی و دگرسانی‌ها، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، انجام شده است. در بیشتر این تحقیقات، روش‌های محدودی برای ظرفیت‌یابی و اکتشاف به کار رفته و دربارهٔ آن بحث شده است. در مقاله حاضر، با استفاده از سه نوع راهبرد متفاوت و همچنین سه گونه تصویر ماهواره‌ای چندطیفی (شکل ۵)، در زمینه شناسایی ناحیه‌های دگرسانی مس پورفیری اطلاعات جامعی از منطقه مورد مطالعه به دست آمد. در نهایت، با افزودن ساختارهای هندسی منطقه، مرکز سامانه پورفیری معرفی و نتایج با نمونه‌های زمینی کنترل شد.



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه

منبع: Mohammadi, 2001

1. Quick Atmospheric Correction



شکل ۵. نمودار چرخه کار و روش تحقیق

۳-۳-۲- راهبرد دوم

در این راهبرد، پردازش‌های طیفی به صورت پیکسل مبنا و زیرپیکسلی انجام می‌شود. هر یک از این روش‌ها با به‌کارگیری الگوریتم‌های گوناگونی انجام‌پذیر است. در این مقاله، الگوریتم‌های SAM و MTNF که جزء کاربردی‌ترین الگوریتم‌ها هستند (Salimi et al., 2017; Yang et al., 2018; Modabberi et al., 2017; Dai et al., 2017) به ترتیب برای پردازش‌های پیکسل مبنا و زیرپیکسلی به کار می‌روند.

۳-۳-۱- طبقه‌بندی به روش نگاهت زاویه طیفی (SAM)

در تحلیل تصاویر چندطیفی از جمله تصویر OLI، جداسازی پیکسل‌های خالص و آمیخته از یکدیگر کاری ضروری است زیرا، از طریق پیکسل‌های خالص، عضوهای خالص استخراج می‌شوند. در مقاله حاضر، برای انتخاب عضوهای خالص تصویر ماهواره‌ای، روش SMACC^۱ به کار گرفته شد. در این روش، اجزای

به‌منظور بازسازی نواحی دگرسانی در محدوده مورد مطالعه نیز، از روش ترکیبات نسبت‌های بانندی روی داده‌های ماهواره‌ای گردآمده استفاده می‌شود. هر تصویر مؤلفه اصلی دارای اطلاعاتی از همه باندهای طیفی است و مانند تصاویر نسبتی، می‌توان آنها را به‌منزله تصویر جداگانه تحلیل کرد و یا هر سه تصویر مؤلفه اصلی را برای تشکیل یک ترکیب رنگی، با یکدیگر ترکیب کرد؛ در این حالت، بیشترین واریانس n باند طیفی در هر تصویر ترکیب رنگی مشاهده می‌شود. این واریانس بیشتر از واریانس است که در ترکیب رنگی باندهای طیفی معمولی ایجاد می‌شود و جزئیات بیشتری از اختلاف طیفی پدیده‌های گوناگون زمین‌شناسی، مانند واحدهای سنگی و دگرسانی، نمایش می‌دهد؛ همچنین به مشخص شدن مرز بین مناطقی که در تصاویر ترکیب رنگی حاصل از باندهای خام تشخیص داده نمی‌شوند، کمک می‌کند. به‌علاوه، کاربر می‌تواند مناطق کوچکی را که از نظر طیفی، کاملاً متفاوت از کل صحنه‌اند (مانند مناطق دگرسان‌شده)، شناسایی کند.

1. Sequential Maximum Angle Convex Cone

تعیین شده از مقادیر حد آستانه تعیین می‌کند. اگر همه نسبت‌ها در الگوریتم درست باشند، مقدار ۱ به تصویر اختصاص می‌یابد؛ در غیر این صورت، مقدار ۰ تولید می‌شود. بنابراین تصویر متشکل از ۰ و ۱‌هایی است که با این الگوریتم ایجاد می‌شود. عملگرهای منطقی توسط مارس^۱ و همکاران (۲۰۰۶)، همراه با نسبت‌های بانندی، به منظور ساده‌سازی نقشه‌های منطقه‌ای و حد آستانه‌گذاری نسبت‌های بانندی در نقشه سنگ‌های دگرسانی استفاده شد.

به کمک پردازش‌های آماری، فرمول‌های عملگر منطقی به کار رفت و دگرسانی‌ها، بر مبنای مجموعه کانی‌های شناسایی شده معرفی شدند.

۳-۳-۴- استخراج ساختارهای هندسی

خطواره‌ها اغلب نقش مهمی در مهاجرت محلول‌های حاوی کانی دارند. شکستگی‌ها و به‌ویژه گسل‌ها عامل مهم و اساسی در تشکیل ذخایر معدنی‌اند. شناخت عناصر ساختاری مانند گسل‌ها، که محل مناسبی برای نفوذ ماگما و سپس کانه‌زایی است، بنابراین شناخت عناصر ساختاری حائز اهمیت است. یکی از بهترین راه‌های مشاهده گسل‌ها استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. تجربه نشان داده بسیاری از دگرسانی‌های مهم و کانی‌سازی‌ها در محل تقاطع گسل‌ها و یا ساختارهای حلقوی رخ داده است؛ از این رو شناخت و ترسیم آنها در تصاویر ماهواره‌ای کمک شایان توجهی به اکتشاف ظرفیت‌های معدنی خواهد کرد.

۴- نتایج و بحث

در این بخش، با استفاده از سه راهبرد و نیز سه گونه تصویر ماهواره‌ای چندطیفی که در بخش پیشین به آنها اشاره شد، به اجرای شیوه‌ها و بیان نتایج می‌پردازیم و اطلاعات جامعی در زمینه شناسایی ناحیه‌های دگرسانی

خالص مستقیماً از مجموعه‌های داده انتخاب می‌شوند. نگاشت زاویه طیفی از روش‌های مرسوم طبقه‌بندی نظارت‌شده است که از بانک اطلاعات کتابخانه طیفی استفاده می‌کند. در این شیوه، مقادیر هر پیکسل با اطلاعات موجود از طیف کانی‌های متفاوت سنجیده و پیکسل‌های مشابه به‌منزله آن رده انتخاب می‌شوند و با تشابه طیفی بین طیف‌های بازتابی تصویر و مرجع، موقعیت کانی‌های مورد نظر در تصویر مشخص می‌شود. در این مقاله، الگوریتم SAM با استفاده از طیف‌های کتابخانه‌های USGS عضوهای نهایی که از روش SMACC به دست آمده است، روی تصویر مورد نظر اجرا می‌شود.

۳-۳-۲- فیلتر تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته (MTMF) عضوهای خالص نهایی استخراج‌شده از روش SMACC به‌منزله عضوهای مرجع، در طبقه‌بندی زیرپیکسل نیز استفاده می‌شود. فیلتر تطبیقی آمیخته، با به‌کاربردن روش غیرآمیخته جزئی، فراوانی عضوهای خالص نهایی را که کانی‌های مورد نظر ما هستند، می‌یابد. این فن، برای پیشینه‌کردن واکنش عضو خالص شناخته‌شده و کنترل واکنش زمینه شناخته‌شده، فیلتر تطبیقی را به کار می‌برد. عملکرد فیلتر تطبیقی تأثیر سریع و واضحی در آشکار کردن مواد ویژه براساس تطابق با کتابخانه‌های طیفی یا عضوهای خالص و منحنی‌های طیفی برداشت‌شده از تصویر دارد که در آن، به شناخت همه عضوهای خالص تصویر نیازی نیست و این مهم‌ترین مزیت این روش بر الگوریتم‌های دیگر است (Hashemi Tangestani, 2009).

۳-۳-۳- راهبرد سوم

در این راهبرد، الگوریتم برای هر پیکسل، عملگر منطقی تعدادی نسبت بانندی را اجرا می‌کند. هر عملگر منطقی مقداری درست یا غلط برای هر نسبت را با مقایسه نسبت بانندی برای محدوده‌ای از پیش

1. Mars

کانی‌های رسی) کاربرد بسیاری در زمین‌شناسی دارد و گاه بهترین ترکیب برای تفکیک واحدهای سنگی است و می‌توان آن را در تفکیک دگرسانی‌ها نیز به کار گرفت (شکل ۷).

داده‌ی لندست OLI، با وجود تفکیک خوب واحدها، قادر به جداسازی دقیق انواع دگرسانی‌ها از قبیل دگرسانی‌های پروپیلیتیکی، آرژیلیکی و فیلیک نیست و بیشتر به دلیل محدودیت باندی، فقط نواحی واجد دگرسانی‌های رسی و نواحی دارای دگرسانی‌های اکسیدهای آهن را مشخص می‌نماید. از این رو، در مرحله‌ی بعدی پردازش اطلاعات، سعی بر این بود که با استفاده از داده‌های استر و مطالعات دقیق و دارای جزئیات بیشتر (مطالعات موضوعی)، دگرسانی‌های گوناگون در محدوده‌ی معرفی شده تفکیک شود.

در پردازش داده‌های استر، ابتدا از ترکیب‌های باندی شناخته شده، مانند ۵ و ۳ و ۱ استفاده شد. این ترکیب باندی، به دلیل استفاده از باند ۳ برای بارزسازی اکسید آهن و باند ۵ برای بارزسازی کانی‌های رسی، کاربرد زمین‌شناسی دارد و گاه بهترین ترکیب در تفکیک واحدهای سنگی است و می‌توان آن را در تفکیک دگرسانی‌ها نیز به کار برد (شکل ۸). در ترکیب باندی تقریباً مشابه ۶ و ۲ و ۱، نواحی به رنگ قرمز مناطق با احتمال وجود ناحیه‌ی گوسان و اکسیدهای آهن و مناطق سبزرنگ نواحی واجد دگرسانی رسی و نواحی آبی‌رنگ نیز سنگ میزبان را به نمایش می‌گذارند (شکل ۱۰). با استفاده از ترکیب باندی ۴ و ۶ و ۸، دگرسانی‌های پروپیلیتیکی و آرژیلیکی تفکیک شد. همان‌طور که در شکل مشخص می‌شود، نواحی با رنگ سبز دارای دو تفکیک سبز پررنگ و سبز کم‌رنگ است. هر یک از این بخش‌ها ممکن است ترکیب‌های معدنی متفاوت را شامل شود که به مطالعات بیشتری نیاز دارد. بخش‌های زردرنگ نواحی دارای کربنات و احتمالاً اسکارن را نشان می‌دهد. بخش‌های سبزرنگ دگرسانی پروپیلیتیکی یا واحدهای مافیک و بخش‌های صورتی دگرسانی آرژیلیکی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱).

کانسار مس پورفیری از منطقه‌ی مورد مطالعه مطرح می‌کنیم. در نهایت، با افزودن ساختارهای هندسی منطقه، مرکز سامانه‌ی پورفیری معرفی و نتایج با نمونه‌های زمینی کنترل می‌شود.

۴-۱- راهبرد نخست (تحلیل نسبت‌ها و ترکیب‌های باندی)

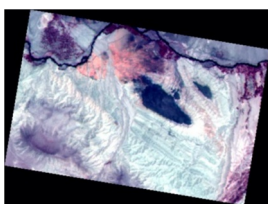
نتایج پردازش‌های روش‌های ترکیب رنگی، نسبت باندی و تحلیل مؤلفه‌ی اصلی که به منظور آشکارسازی دگرسانی‌ها انجام شده است، از محدوده‌ی مورد مطالعه با استفاده از داده‌های سنجنده‌ی OLI ماهواره‌ی لندست- ۸ استخراج شدند.

به‌طور کلی، برای هر چه بهتر بارزکردن واحدها، تصاویر متعدد باندهای گوناگون به کار می‌رود. برای تفکیک واحدهای سنگی و تهیه‌ی نقشه‌ی عکسی (فتومپ) منطقه‌ی مورد مطالعه، از ترکیب باندهای متفاوتی استفاده شد و در نهایت، دو ترکیب باندی انتخاب شد: ترکیب باندی ۳ و ۵ و ۷ که بیشترین تفکیک واحدهای سنگی را دربر داشت و پوشش گیاهی آن به رنگ سبز مشخص است (شکل ۶) و ترکیب باندی ۲ و ۴ و ۶ که اغلب بهترین ترکیب برای تفکیک واحدهای سنگی را دارد. ترکیب باندی ۲ و ۵ و ۷، به منظور تفکیک واحدهای زمین‌شناسی در مناطق خشک و لم‌یزرع، نتایج بهتری از مناطق دارای پوشش گیاهی دربر دارد. در این ترکیب باندی، واحدهای رسوبی و واحدهای ولکانیکی را می‌توان از یکدیگر تفکیک کرد و کانی‌های رسی روشن‌تر از بقیه‌ی واحدها ظاهر می‌شوند. همچنین معمولاً گرانیته‌ها و واحدهای حاوی MnO و FeO به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز مشخص می‌شوند و مونوزوگرانیته، در صورت وجود، به رنگ سبز خاکستری و واحدهای رسوبی به رنگ آبی خاکستری نمایش داده می‌شوند. از مشخصه‌های اصلی این ترکیب باندی این است که پوشش گیاهی در آن سبز دیده می‌شود. ترکیب باندی ۲ و ۴ و ۶، به دلیل استفاده از باند ۴ (بارزسازی اکسیدهای آهن) و باند ۶ (بارزسازی

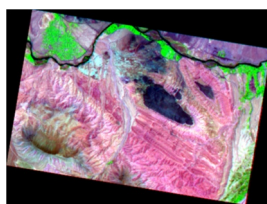
اکسیدهای آهن و نواحی واجد دگرسانی رسی و کانی‌های رسی به نمایش گذاشته می‌شود (شکل ۱۳). نسبت باندی، در واقع، عملیات ریاضی اعمال شده بر تصاویر ماهواره‌ای، به منظور کاهش تغییرات انعکاس طیفی ناشی از توپوگرافی یا تغییرات فصلی برای استخراج پاسخ‌های طیفی خاص است. نسبت باندی شیوه بسیار مفیدی برای برجسته کردن ویژگی‌ها یا مواد خاصی است که در باندهای اولیه نمی‌توان شناسایی کرد. کانی‌های گوناگون، در طول موج‌های متفاوت، دارای جذب و انعکاس متفاوت‌اند و از این ویژگی برای آشکارسازی آنها استفاده می‌شود. مجموعه کانی‌هایی که در ناحیه آرژیلیک تشکیل می‌شوند از جمله کائولینیت، ایلیت، مونت‌موریلونیت و آلونیت، در باند ۶ ماهواره لندست- ۸ (OLI) دارای بیشترین انعکاس و در باند ۷ بیشترین جذب را دارند؛ بنابراین برای آشکارسازی کانی‌های یادشده که در دگرسانی آرژیلیک و سربستیک قرار می‌گیرند، می‌توان از نسبت باندی ۶/۷ استفاده کرد. میزان انعکاس این نوع کانی‌ها در باند ۶ و ۷ یکسان است؛ حال آنکه در سنگ دگرسان شده، این میزان در باند ۶ بسیار بیشتر از باند ۷ است. از این تفاوت نسبت دو باند در سنگ‌های دگرسان شده و

از آن‌جا که در پردازش قبلی، تفکیک کاملی میان دگرسانی فیلیک و دگرسانی آرژیلیک مشاهده نشد، برای جدایش این دگرسانی‌ها، از ترکیب باندی باندهای ۴ و ۵ و ۶ استفاده شد. با استفاده از این ترکیب، دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک تا حدودی تفکیک می‌شود. دگرسانی‌های آرژیلیک و سربستی، اگر وجود داشته باشند، به ترتیب به رنگ صورتی و نارنجی تا نارنجی مایل به زرد تفکیک شده‌اند. نواحی سبز رنگ در این تصویر نیز احتمالاً واحدهای دگرسانی پروپیلیتیک را نشان می‌دهند. البته برای تأیید وجود قطعی این دگرسانی‌ها، به بررسی‌های زمین‌شناسی دقیق در منطقه نیاز است (شکل ۹).

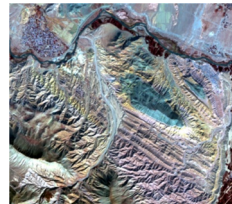
در پردازش داده‌های سنتینل- ۲، ابتدا از ترکیب‌های باندی شناخته شده استفاده شد. در مرحله نخست، ترکیب باندی ۱۲ و ۸ و ۳ به کار رفت. این ترکیب باندی، به دلیل استفاده از باند ۳ در بازسازی اکسید آهن و باند ۱۲ در بازسازی کانی‌های رسی، کاربرد زمین‌شناسی دارد و گاه بهترین ترکیب برای تفکیک واحدهای سنگی است و می‌تواند برای تفکیک دگرسانی‌ها نیز استفاده شود (شکل ۱۲). در ترکیب باندی تقریباً مشابه ۱۱ و ۴ و ۲، نواحی با احتمال وجود



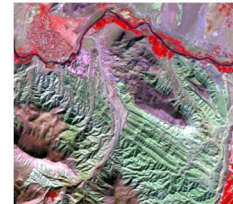
شکل ۹. ترکیب باندی ۴ و ۵ و ۶ داده‌های استر



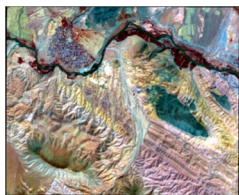
شکل ۸. ترکیب باندی ۵ و ۳ و ۱ داده‌های استر



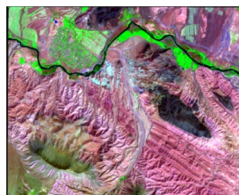
شکل ۷. ترکیب باندی ۲ و ۴ و ۶ (باند ۶ در کانال قرمز، باند ۴ در کانال سبز و باند ۲ در کانال آبی)



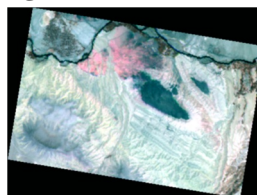
شکل ۶. ترکیب باندی ۳ و ۵ و ۷ (باند ۷ در کانال قرمز، باند ۵ در کانال سبز و باند ۳ در کانال آبی)



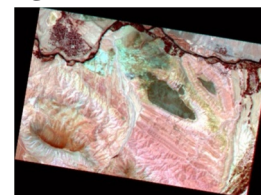
شکل ۱۳. ترکیب باندی ۱۱ و ۴ و ۲ داده‌های سنتینل- ۲



شکل ۱۲. ترکیب باندی ۱۲ و ۸ و ۳ داده‌های سنتینل- ۲



شکل ۱۱. ترکیب باندی ۴ و ۶ و ۸ داده‌های استر



شکل ۱۰. ترکیب باندی ۶ و ۲ و ۱ داده‌های استر

دگرسان نشده، برای آشکارسازی ناحیه آرژیلیک استفاده می‌شود. با توجه به نمودار بازتاب طیفی کانی‌های دگرسانی فیلیک، بیشترین جذب در باند ۶ و بیشترین انعکاس در باند ۴ اتفاق می‌افتد. نسبت باندهای ۴/۶ احتمال این دگرسانی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بازتاب طیفی کانی‌های دگرسانی آرژیلیک، بیشترین جذب در باند ۱۲ و بیشترین انعکاس در باند ۱۱ اتفاق می‌افتد. نسبت باندهای ۱۱/۱۲ احتمال این دگرسانی را نشان می‌دهد. همچنین نسبت باندهای ۴/۲ کانی‌های هماتیت و گوئتیت را بارزسازی می‌کند.

به منظور بارزسازی نواحی دگرسانی در محدوده مورد مطالعه، در این مرحله، از روش ترکیب باندهای داده‌های لندست OLI استفاده شده است. ابتدا با استفاده از روش نسبت باندهای ۶ به ۷ در کانال قرمز، ۴ به ۳ در کانال سبز و ۵ به ۶ در کانال آبی پردازش شد. با اعمال این نسبت باندهای مناطق دارای احتمال وجود دگرسانی و کانی‌های رسی به رنگ قرمز تا صورتی نمایش داده شده، نواحی به رنگ زرد و نارنجی نواحی غنی از رس و حاوی اکسیدهای آهن است و نواحی دارای اکسید آهن به رنگ سبز مشاهده می‌شود (شکل ۱۴). سپس از نسبت‌های باندهای ۷ به ۵ در کانال قرمز، ۵ به ۴ در کانال سبز و ۶ به ۷ در کانال آبی استفاده شد. با اعمال این نسبت‌های باندهای مناطق با کانی‌های دارای یون‌های آهن به رنگ قرمز تا صورتی نمایش داده می‌شود، پوشش گیاهی به رنگ سبز درمی‌آید و کانی‌های حاوی هیدروکسیل، SO_4 ، OH/H_2O و کانی‌های حاوی CO به رنگ آبی مشاهده می‌شود (شکل ۱۵). سپس نسبت باندهای معروف به آبرام، با استفاده از نسبت ۶ به ۷ در کانال قرمز، و نسبت ۶ به ۵ در کانال سبز و نسبت ۴ به ۲ نیز در کانال آبی استفاده شد. بدین ترتیب مناطقی با کانی‌سازی رسی به رنگ قرمز تا صورتی و اکسیدهای آهن به رنگ سبز دیده می‌شود و رنگ آبی اکسیدهای فریک را نشان می‌دهد (شکل ۱۶). از دیگر ویژگی‌های داده‌های استر، به خصوص باندهای SWIR، بارزسازی

کانی‌های محتوی هیدروکسیل آلومینیوم (ALOH) است که در زمینه اکتشاف مواد معدنی کاربرد فراوان دارد. ترکیب باندهای $(B7+B9)/B8$ ، $(B4+B6)/B5$ و $(B5+B7)/B6$ برای شناسایی مناطق به ترتیب دگرسانی آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک استفاده شد. ناحیه دگرسانی آرژیلیک شامل کانی‌های کائولینیت و آلونیت، و دگرسانی فیلیک شامل مسکوویت و ایلیت است که وجود کانی‌های دارای پیوند $Al-OH$ را نشان می‌دهد. دگرسانی پروپیلیتیک شامل گروه کانی‌های با پیوند $Mg-OH$ ، مانند کانی‌های کلریت و اپیدوت است. این ترکیب باندهای روی باندهای SWIR سنجنده استر اعمال شد که در محدوده رنگ بنفش خودنمایی می‌کند؛ بدین معنی که دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک در این ناحیه حضور دارند و با دایره‌ای کوچک در شکل ۱۷ مشخص شده است. از دیگر سو، رنگ سبز نشان‌دهنده دگرسانی پروپیلیتیک است که در شکل، با بیضی کشیده مشخص شده است و دگرسانی چندان قدرتمندی نیست. با توجه به این موارد، می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده مورد مطالعه سامانه مس پورفیری ضعیفی وجود دارد اما صحت و میزان ضعف و قوت این سامانه به کنترل‌های زمینی نیاز دارد. بهترین نتیجه، به منظور تشخیص مناطق دارای دگرسانی، تصویر حاصل از نسبت باندهای به صورت $4/7$ ، $4/6$ ، $4/5$: RGB بوده است (Di Tommaso & Rubinstein, 2006). در این ترکیب، کانی‌های حاوی پیوند $Al-OH$ در تصاویر $4/5$ و $4/6$ و کانی‌های با پیوند $Fe-OH$ در نسبت باندهای $4/7$ بارز و به رنگ روشن مشاهده می‌شوند. نواحی سفیدرنگ، در واقع، پاسخ باند ۵ و ۶ برای پیوند $Al-OH$ و باند ۷ برای پیوند $Fe-OH$ را نشان می‌دهد. این نواحی، از نظر تطابق کامل مکانی با شاخص‌های شناخته‌شده، باید در عملیات صحرائی بررسی شود (شکل ۱۸). ترکیب نسبت باندهای $11/12$ و $4/3$ و $8/11$ مختص بارزسازی کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن است که در بحث اکتشاف، کاربرد فراوان دارد (شکل ۱۹). همچنین از تلفیق روش‌های

سنجش از دور و GIS ایران
سال چهاردهم = شماره سوم = پاییز ۱۴۰۱

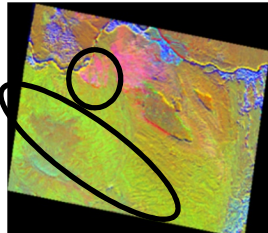
انتخاب شده براساس ویژگی‌های طیفی کانی‌های دگرسان و پوشش گیاهی است. جدول ۱ نتیجه تحلیل مؤلفه‌های اصلی روی تصویر OLI را برای مشخص نمودن نواحی با میزان دگرسانی بالا طبق روش PCA انتخابی در منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، هرچه اختلاف بین دو باند ۶ و ۷ بیشتر باشد، تفکیک کانی‌های رسی بهتر انجام می‌شود و همچنین، هرچه اختلاف بین دو باند ۴ و ۲ بیشتر باشد، تفکیک کانی‌های آهن بهتر صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۱، برای نمایش بهتر توزیع و تفکیک کانی‌های رسی، باید از باند PC5 و در مورد کانی‌های اکسید آهن، باید از باند PC7 استفاده کرد. در تصویر خروجی این روش، مناطق قرمز بیانگر نواحی دارای اکسید آهن و مناطق سبز نشان‌دهنده نواحی تجمع کانی‌های رسی است (شکل ۲۲).

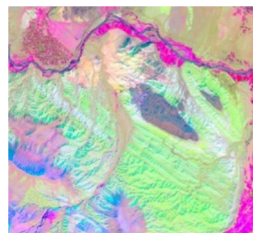
نسبت باندی و ترکیب باندی به صورت ۱۲/۸ در کانال R، ۸/۴ در کانال G و ۱۱/۱۲ در کانال B برای آشکارسازی یون‌های آهن و کانی‌های حاوی هیدروکسیل (شکل ۲۰) و از ترکیب باندی ۱۱/۱۲ و ۱۱/۸ و ۴/۲ برای آشکارسازی کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن فریک استفاده شد (شکل ۲۱).

۴-۱-۱- تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

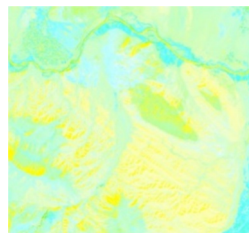
در این مرحله از پردازش تصویر OLI منطقه مورد مطالعه، روش تحلیل‌های استاندارد و انتخابی مؤلفه‌های اصلی (PCA) به کار رفت. تحلیل مؤلفه اصلی انتخابی (کروستا) روشی ساده و جدید برای نقشه‌برداری دگرسانی‌ها، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. روش کروستا براساس شش باند لندست و همچنین چهار باند



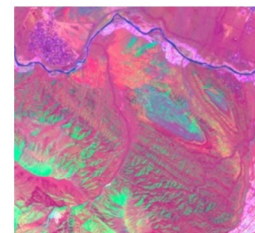
شکل ۱۷. استخراج دگرسانی‌های اشاره شده در جدول ۴ با استفاده از داده‌های استر (رنگ قرمز: فیلیک، رنگ آبی: آرژیلیک و رنگ سبز: پروپیلیتیک)



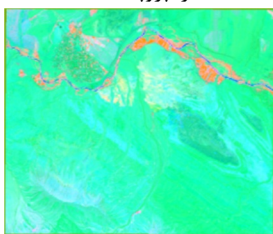
شکل ۱۶. ترکیب نسبت‌های باندی به صورت ۶/۷، ۶/۵ و ۴/۲ داده‌های OLI



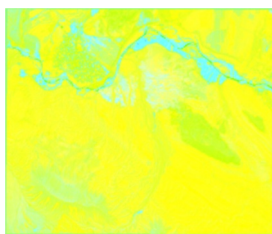
شکل ۱۵. ترکیب نسبت‌های باندی به صورت ۷/۵، ۵/۴ و ۶/۷ داده‌های OLI



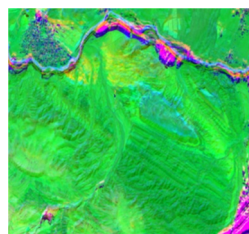
شکل ۱۴. ترکیب نسبت‌های باندی به صورت ۶/۷، ۴/۳ و ۵/۶ داده‌های OLI



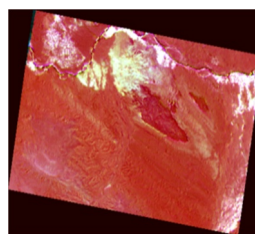
شکل ۲۱. ترکیب نسبت‌های باندی ۱۱/۱۲، ۱۱/۸ و ۴/۲ داده‌های سنتینل-۲



شکل ۲۰. ترکیب نسبت‌های باندی ۱۲/۸، ۸/۴ و ۱۱/۱۲ داده‌های سنتینل-۲



شکل ۱۹. ترکیب نسبت‌های باندی ۱۱/۱۲، ۴/۳ و ۸/۱۱ داده‌های سنتینل-۲



شکل ۱۸. ترکیب نسبت‌های باندی به صورت ۴/۷، ۴/۶ و ۴/۵ داده‌های استر

فرایند تحلیل مؤلفه اصلی روی باندهای مورد نظر انجام و نتایج در جدول ۲ آمده است. هرچه اختلاف بین دو باند ۱۱ و ۱۲ بیشتر باشد، تفکیک کانی‌های رسی بهتر انجام می‌شود و هرچه اختلاف بین دو باند ۴ و ۲ بیشتر باشد، تفکیک کانی‌های آهن بهتر انجام می‌شود. با توجه به نتایج جدول ۲، برای نمایش بهتر توزیع و تفکیک کانی‌های رسی، باید از باند PC6 و درمورد کانی‌های اکسید آهن، باید از باند PC9 استفاده کرد. در شکل ۲۳، رنگ صورتی مایل به قرمز نشان‌دهنده کانی‌های رسی دگرسان شده و رنگ سبز تیره نشان‌دهنده کانی‌های اکسید آهن است.

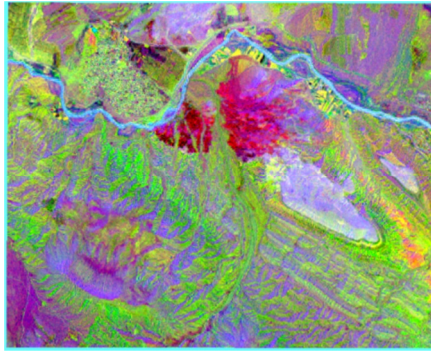
با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی طبق داده‌های سنتینل-۲، دگرسانی‌های اکسید آهن، کانی‌های رسی و فیلیک در این بخش بررسی شد. از آن جاکه کانی‌های حاوی اکسید آهن در باند ۴، انعکاس بالا و در باند ۲ جذب بالا دارند، از نسبت ۴ به ۲ برای شناسایی این مناطق استفاده شده است. کانی‌های رسی بیشترین بازتاب را در باند ۱۱ و بیشترین جذب را در باند ۱۲ دارند؛ از این رو این کانی‌ها را می‌توان، با نسبت باندی ۱۱ به ۱۲، آشکارسازی کرد. برای شناسایی ناحیه دگرسانی فیلیک، از روش تحلیل مؤلفه اصلی استفاده شد. پس از بررسی پروفیل طیفی دگرسانی فیلیک،

جدول ۱. مقادیر بردار ویژه باندهای PC استخراج شده از تصویر چندطیفی OLI

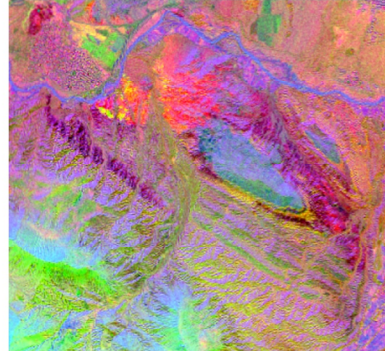
Eigenvector	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B4-B2	B6-B7
PC1	-0.18911	-0.21656	-0.31415	-0.29829	-0.42521	-0.62228	-0.40204	-0.08173	-0.22024
PC2	0.124993	0.133479	0.143578	0.152991	-0.8895	0.171184	0.319413	0.019512	-0.14823
PC3	-0.49369	-0.46782	-0.38002	-0.25996	-0.05939	0.512122	0.244182	0.207855	0.26794
PC4	-0.30608	-0.18974	0.224623	0.558432	-0.11811	0.276247	-0.64634	0.748169	0.922583
PC5	0.394213	0.295932	-0.21323	-0.44876	-0.09844	0.49425	-0.50616	-0.74469	1.000407
PC6	-0.24011	-0.0822	0.790693	-0.55362	-0.02829	0.020549	-0.05174	-0.47142	0.072293
PC7	-0.63099	0.765571	-0.12313	-0.01748	0.004258	-0.01331	0.009709	-0.78305	-0.02302

جدول ۲. مقادیر بردار ویژه باندهای PC استخراج شده از تصویر چندطیفی سنتینل-۲

Eigenvector	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	B4-B2	B10-B9
PC1	-0.24473	-0.25281	-0.26855	-0.35215	-0.28848	-0.33433	-0.35776	-0.35188	-0.37497	-0.30439	-0.09935	0.070571
PC2	-0.21338	-0.21678	-0.2999	0.383311	-0.17308	0.229342	0.360804	0.415695	-0.31623	-0.4302	0.600091	-0.11397
PC3	-0.49446	-0.36936	-0.3461	-0.04239	-0.15486	-0.02621	0.022816	0.114394	0.528034	0.424736	0.326969	-0.1033
PC4	0.40951	0.200341	-0.26775	0.391292	-0.60861	-0.24794	-0.10704	0.024203	-0.08592	0.340685	0.190951	0.426608
PC5	0.418623	-0.03814	-0.42964	-0.64974	0.04136	0.201545	0.25772	0.234321	-0.14908	0.175125	-0.6116	0.324201
PC6	-0.3935	0.120315	0.122887	0.027554	0.076637	0.117273	0.172255	-0.12434	-0.63097	0.593249	-0.09276	1.224215
PC7	0.207609	-0.47228	-0.00081	0.188195	0.451119	-0.30616	-0.39087	0.403978	-0.22474	0.18629	0.660478	0.411033
PC8	-0.11368	-0.014	0.574854	-0.33304	-0.43354	-0.24801	0.060519	0.540179	-0.02425	-0.00129	-0.31904	0.022963
PC9	0.29757	-0.64591	0.292961	0.069828	-0.13776	-0.04387	0.462375	-0.40537	-0.00428	0.067143	0.715739	0.071425
PC10	-0.08789	0.236968	-0.17462	0.005251	0.272787	-0.74962	0.513348	-0.00432	0.041713	-0.06308	-0.23172	-0.1048



شکل ۲۳. ترکیب مؤلفه‌های PCA (۹ و ۶ و ۱) داده‌های سنیتیل-۲



شکل ۲۲. ترکیب مؤلفه‌های PCA (۷ و ۵ و ۱) داده‌های OLI

۴-۲- راهبرد دوم (پردازش‌های طیفی)

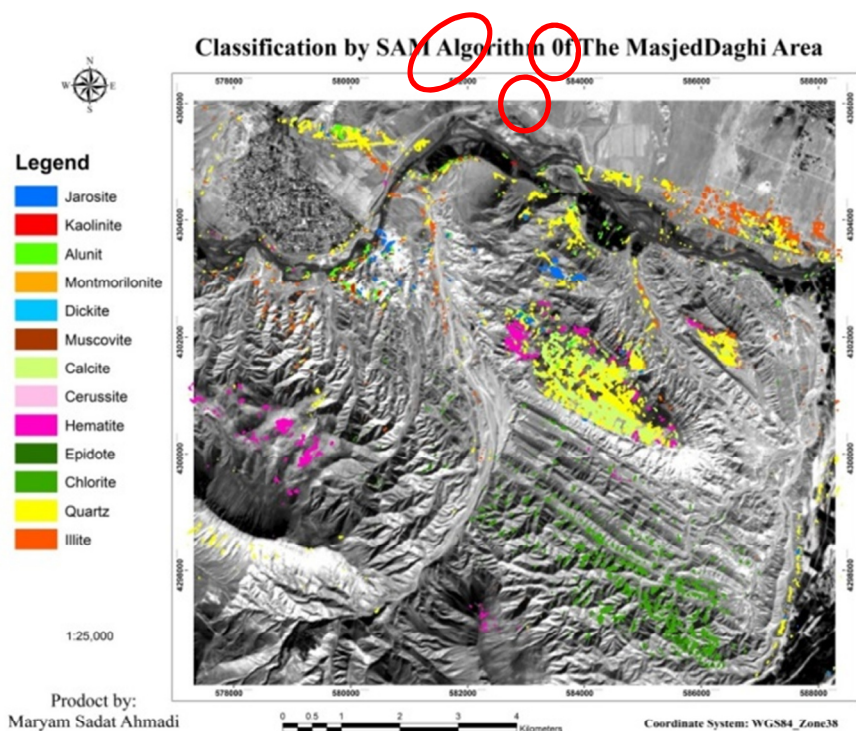
پردازش‌های طیفی به صورت پیکسل مینا و زیرپیکسلی صورت می‌گیرد و هر یک از این روش‌ها با استفاده از الگوریتم‌های گوناگون انجام پذیر است. در این مقاله، الگوریتم SAM برای روش پیکسل مینا و الگوریتم MTNF برای روش زیرپیکسلی به کار رفت که جزء روش‌های کارآمد محسوب می‌شوند.

۴-۲-۱- روش SAM

در طبقه‌بندی نظارت‌شده با روش SAM که از کتابخانه طیفی جزئی به‌منزله داده آموزشی استفاده می‌کند، کانی کوارتز در جایگاه شاخص دگرسانی فیلیک، کانی هماتیت به‌منزله شاخص اکسیدهای آهن، کانی کائولینیت در جایگاه شاخص دگرسانی آرژیلیک و کانی کلریت در جایگاه شاخص دگرسانی پروپیلیتیک شناخته می‌شود که در خروجی روش طبقه‌بندی SAM نواحی، با احتمال این دگرسانی‌ها نشان داده شده است؛ البته به‌علت ضعف تصویر OLI در محدوده SWIR، دگرسانی‌های رسی و فیلیک به‌صورت ایده‌آل شناسایی و تفکیک نشده است. روش طبقه‌بندی نگاشت زاویه طیفی روی داده‌های استر نیز اجرا شد. البته پیش از طبقه‌بندی روش SMACC، مطابق قبل، برای استخراج اعضای کتابخانه طیفی جزئی در این بخش روی

داده‌های استر اجرا شد. کلریت، کائولینیت، دیکیت، ژاروسیت، مسکوویت، آلونیت، کوارتز، هماتیت، ایلیت، کلسیت، سریسیت، مونت‌موریلونیت و اپیدوت از جمله کانی‌هایی‌اند که در این بخش، به‌منزله اعضای نهایی کتابخانه طیفی انتخاب شدند. به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده از اجرای انواع روش‌های آشکارسازی دگرسانی‌ها روی تصویر چندطیفی استر نیز، همانند تصویر OLI، بیانگر وجود کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن در محدوده مورد مطالعه است. به‌دلیل قدرت تفکیک طیفی بالای سنجنده استر در قیاس با OLI، این تصویر قادر به شناسایی دگرسانی‌های دارای تشابه طیفی نیز است؛ البته برای بررسی‌های بیشتر، مطالعات میدانی لازم است. شکل ۲۴ نتیجه طبقه‌بندی به‌روش نگاشت زاویه طیفی (SAM) روی تصویر چندطیفی استر را نمایش می‌دهد.

با توجه به هندسه مناطق پورفیری در حاشیه، دگرسانی پروپیلیتیک ضعیف است؛ درون منطقه کانی‌های کائولینیت، ژاروسیت و آلونیت به‌صورت تکه‌تکه نشان‌دهنده دگرسانی آرژیلیک پیشرفته است و برای بررسی بیشتر، باید به نمونه‌های زمینی در منطقه دسترسی داشت. این مناطق در شکل ۲۴ مشخص شده است.

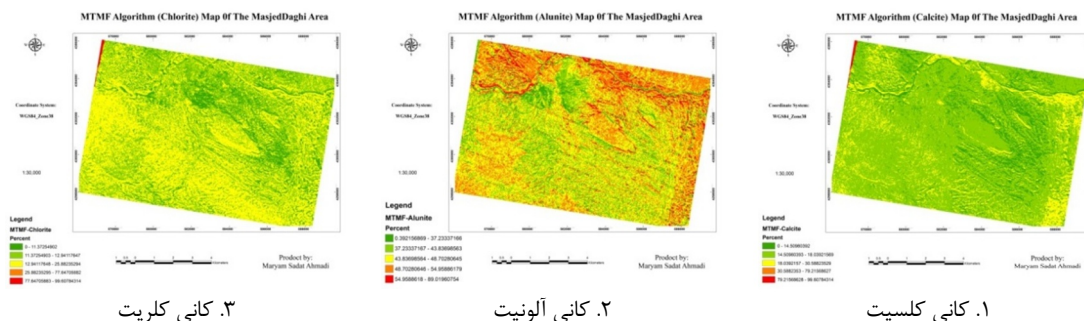


شکل ۲۴. نتیجه اعمال روش نگاشت زاویه طیفی (SAM) روی تصویر استر از منطقه مورد مطالعه

درجه نسبی تطابق طیف‌های مرجع با تصویر را بیان می‌کند اما تصویر غیرعملی مشخص‌کننده انحراف معیار نویز و عملی بودن فیلترهای تطبیقی است. نتایج الگوریتم MTMF در مورد کانی‌های شاخص، در شکل ۲۵، به صورت درصد نمایش داده شده است و افزایش درصد نشان از حضور بیشتر کانی مورد نظر دارد.

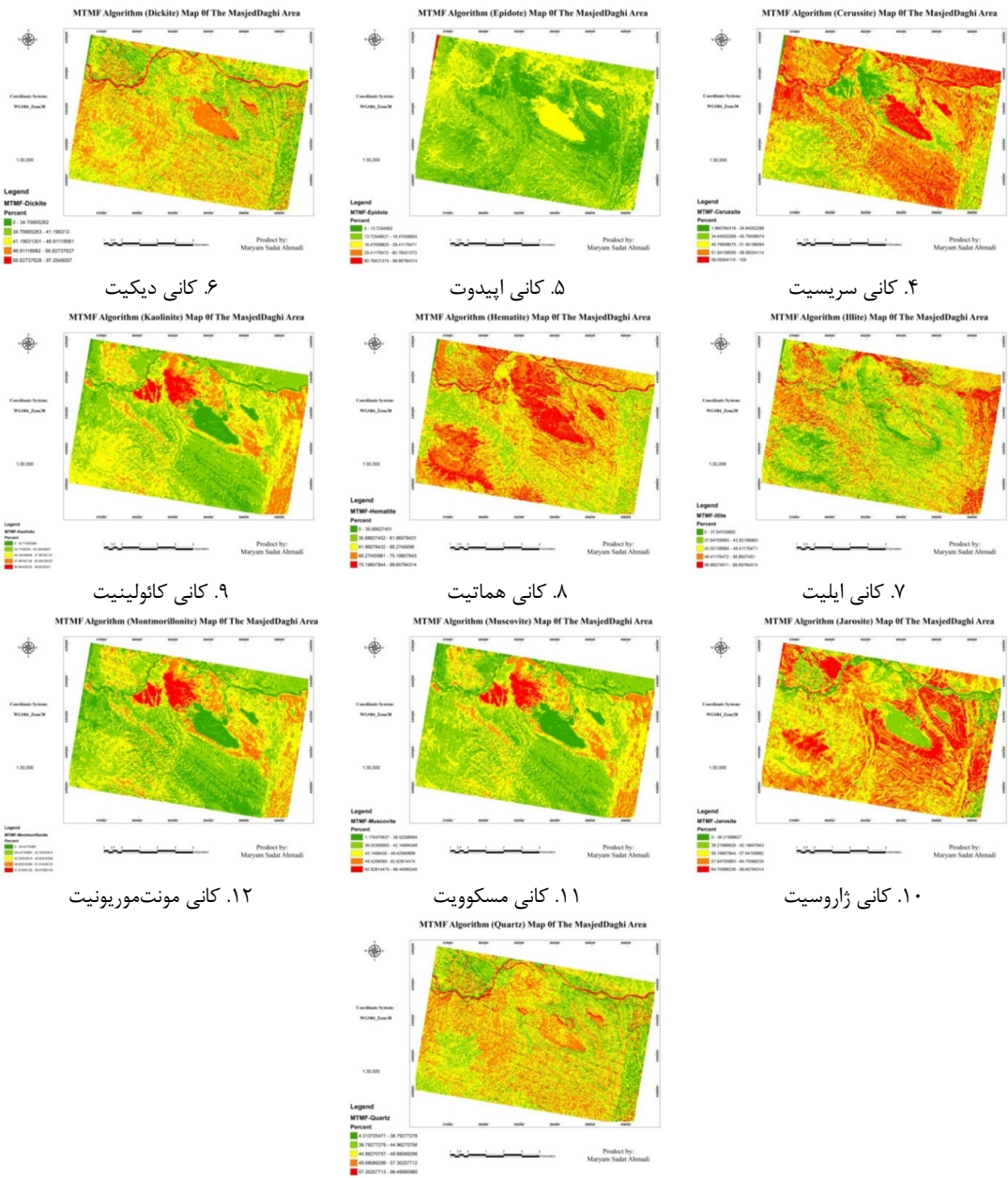
۴-۲-۲- روش MTMF

در فیلتر تطبیقی آمیخته (MTMF)، خروجی نهایی روش دو نوع تصویر است؛ یکی تصویر قاعده و دیگری تصاویر غیرعملی که به تعداد عضوهای خالص ورودی برای هریک از دو تصویر، خروجی خواهد داد. تصاویر قاعده شبیه فیلترهای تطبیقی است. تصاویر قاعده



شکل ۲۵. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم MTMF در مورد کانی‌های شاخص ناحیه‌های دگرسانی

بررسی نواحی دگرسانی کانسار مس پورفیری ...



ادامه شکل ۲۵. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم MTMF در مورد کانی‌های شاخص ناحیه‌های دگرسانی

۴-۳- راهبرد سوم (پردازش‌های آماری)

باندی اعمال می‌شوند تا پوشش گیاهی و پیکسل‌های تحت تأثیر تداخل و نقشه ناحیه‌های دگرسانی را فیلتر کنند. عملگرهای منطقی نسبت‌های باندی ۴/۵، ۵/۶ و ۶/۷ سنجنده استر با ویژگی‌های جذب در محدوده طول موج ۲/۲۰-۲/۱۷ میکرومتر را به کار می‌برند.

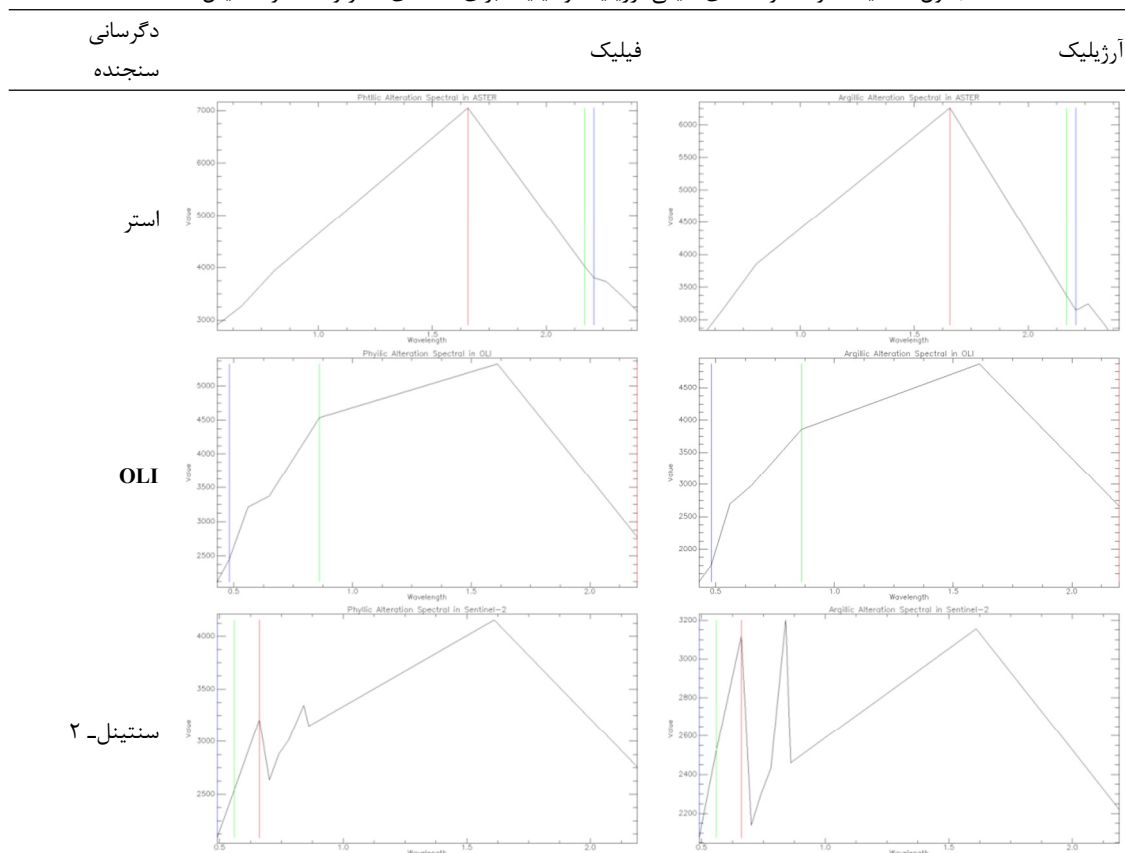
عملگرهای منطقی نقش مؤثری در استخراج نقشه ناحیه‌های دگرسانی آرژلیک و فلیک از داده‌های استر، OLI و سنتینل-۲ و یا داده‌های دیگر، همچون داده‌های میدانی، یا آزمایشگاه‌های طیفی دارند. این عملگرها بر نسبت‌های باندی چندگانه و حد آستانه‌های

۴-۴- نتایج تحلیل نمونه‌های سنگی

طبق گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (Mohammadi, 2006)، دگرسانی در منطقه مسجدداغی گسترش وسیعی دارد و انواع متنوع دگرسانی را می‌توان در این منطقه تفکیک کرد. با توجه به اهمیت نواحی دگرسانی در اکتشاف، به‌منظور تفکیک کامل و دقیق مناطق دگرسان‌شده در نقشه ۱:۵۰۰۰ کارهایی صورت گرفت اما، به‌علت نبود امکان شناسایی دقیق برخی کانی‌ها به‌روش اشعه ایکس، به‌ویژه تفکیک و شناسایی دقیق کانی‌های رسی، از واژه‌های عمومی مانند دگرسانی آرژیلیک استفاده شده است؛ هرچند امروزه نام‌گذاری مناطق دگرسانی با توجه به کانی شاخص هر منطقه انجام می‌شود.

الگوریتم این عملگرها، درمورد داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست- ۸ و سنتینل- ۲ نیز، نسبت بانندی را اجرا می‌کند و به‌ترتیب، با استفاده از باندهای ۴، ۵، ۶ و ۷ باندهای ۴، ۸، ۱۱ و ۱۲ این سنجنده‌ها توانست دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک را پس از ماسک پوشش گیاهی و پیکسل‌های تیره، نشان دهد اما در تشخیص و تفکیک دگرسانی‌های آرژیلیک از فیلیک موفقیتی به‌دست نیامد. مقادیر نسبت استاندارد از داده‌های تصویر استر، OLI و سنتینل- ۲ در جدول ۳، براساس کتابخانه‌های طیفی تعیین می‌شود.

جدول ۳. طیف متوسط واحدهای طیفی آرژیلیک و فیلیک برای داده‌های استر و OLI و سنتینل- ۲



دگرسانی فیلیک

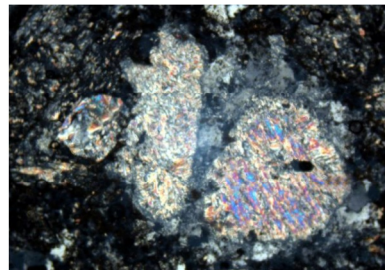
این دگرسانی در منطقه مسجدداغی گسترش بسیار دارد و در برخی موارد، موجب ازبین رفتن دگرسانی پتاسیک اولیه شده است. دگرسانی فیلیک در حاشیه رودخانه آرپاجای وجود دارد. در این دگرسانی، فلدسپات‌ها و پلاژیوکلازها با سریسیت، کانی‌های رسی و کوارتز جانشین شده و در برخی موارد نیز، سنگ بافت خود را از دست داده است. نمونه سنگی این دگرسانی با مختصات جغرافیایی $38^{\circ}52'31.66''$ شمالی و $45^{\circ}55'50.65''$ شرقی در شکل ۲۶ نشان داده شده است.

دگرسانی آرژیلیک

این دگرسانی از گسترده‌ترین گونه در منطقه معدنی مسجدداغی است و همراهی مکانی نزدیکی با کانه‌زایی نوع اپیترمال نشان می‌دهد. ترکیب کانی‌شناسی از طریق مطالعات XRD کوارتز، کائولینیت و ایلیت مشخص شده است (شکل ۲۷). این دگرسانی در اطراف مجموعه‌های کانه‌زایی اپیترمال منطقه توسعه یافته است و به تدریج به دگرسانی پروپیلیتیک تبدیل می‌گردد (شکل ۲۸). با توجه به تأثیر گسترده هوازدگی، منشأ کائولینیت اولیه یا ثانویه مشخص نیست. نمونه سنگی این نوع دگرسانی، با مختصات جغرافیایی $38^{\circ}52'15.37''$ شمالی و $45^{\circ}56'41.67''$ شرقی، در شکل ۲۸ نشان داده شده است.



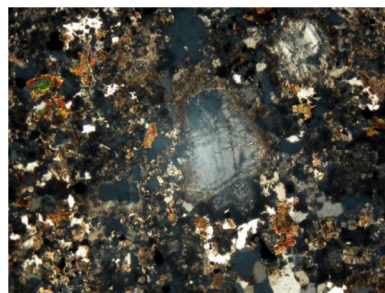
شکل ۲۷. دگرسانی آرژیلیک که در اطراف رگه اصلی منطقه گسترش یافته است. کائولینیت- ایلیت کانی شاخص این ناحیه است



شکل ۲۶. دگرسانی فیلیک در مقیاس میکروسکوپی که باعث جایگزینی کامل پلاژیوکلاز با سریسیت و کوارتز شده است (نور پلاریزه، بزرگ‌نمایی ۴۰)



(ب)



(الف)

شکل ۲۸. دگرسانی آرژیلیک که از اطراف، بلور پلاژیوکلاز را جایگزین کرده است. رگچه کوارتز در تصویر مشاهده می‌شود (الف)؛ جایگزینی کامل پلاژیوکلازها با کانی‌های رسی، بر اثر دگرسانی آرژیلیک رگچه‌های کوارتز در تصویر دیده می‌شود (نور پلاریزه، بزرگ‌نمایی ۴۰) (ب)

دگرسانی آرژیلیک پیشرفته

این دگرسانی در برخی مناطق معدنی که سولفیدها، به‌ویژه پیریت، در سنگ‌ها افزایش می‌یابد، در امتداد شکستگی‌ها و آبراهه‌ها گسترش یافته است. در برخی مناطق، به‌ویژه نزدیک قله‌ها (شکل ۲۹)، میزان پیریت در سنگ‌ها افزایش درخور توجهی دارد. این پیریت‌ها، از نظر شکل و دانه، پراکنده و فاقد کانه‌زایی‌اند.

هوازگی سنگ‌های غنی از پیریت و مناطق کانه‌زایی‌شده و اکسیده‌شدن سولفیدها سبب ایجاد اسید سولفوریک می‌شود که تأثیر آن در سنگ‌ها موجب توسعه دگرسانی آرژیلیک پیشرفته شده است. این دگرسانی در XRD با مجموعه کائولینیت، ایلیت و ژپس مشخص شده است. این دگرسانی به‌شدت در سطح سولفیدها تأثیر می‌گذارد؛ به‌طوری‌که دگرسانی‌های اولیه و سولفیدها را نمی‌توان شناسایی کرد. مطالعه مغزه‌ها نیز نشان‌دهنده تأثیر این دگرسانی تا اعماق پنجاه تا شصت متری است؛ به‌صورتی‌که در اغلب گمانه‌ها، تا اعماق ذکرشده، سولفیدها متلاشی شده‌اند و فقط می‌توان اکسیدهای آهن را مشاهده کرد.

دگرسانی سیلیسی

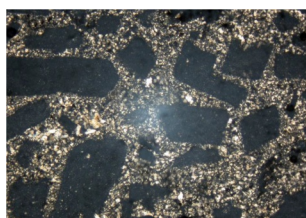
این دگرسانی از شاخص‌ترین دگرسانی‌های منطقه معدنی مسجدداغی است، با افزوده‌شدن سیلیس^۱ به سنگ صورت می‌گیرد و در اغلب موارد، دگرسانی سیلیس بازماندی را همراهی می‌کند. در برخی موارد، نمونه‌های منطقه کاملاً از سیلیس تشکیل شده است (شکل ۳۰) و میزان سیلیس به بیش از ۹۵٪ می‌رسد که حاصل تأثیر دگرسانی سیلیس بازماندی و اضافه‌شدن سیلیس است. این دگرسانی می‌تواند راهنمای اکتشافی خوبی در منطقه باشد. نمونه سنگی این دگرسانی، با مختصات جغرافیایی "38°52'32.53 شمالی و "45°57'3.82 شرقی، در شکل ۳۰ نشان داده شده است.

دگرسانی پروپیلیتیک

این دگرسانی از طریق جان‌شینی آمفیبول و پیروکسن با کلسیت و نیز کلریت پلاژیوکلازها با کلسیت و کانی‌های رسی مشخص می‌شود؛ اغلب به‌صورت هاله‌هایی در اطراف نواحی دگرسانی مرتبط با کانه‌زایی دیده می‌شود و بیشتر واحدهای سنگی منطقه را متأثر کرده است.



شکل ۲۹. دگرسانی آرژیلیک پیشرفته (بخش‌های روشن) در منطقه مسجدداغی که در ارتفاعات و سنگ‌های غنی از پیریت گسترش یافته است



(ب)



(الف)

شکل ۳۰. الف) کوارتز حفره‌ای حاصل از شست‌وشوی سنگ با محلول‌های اسیدی، در مقیاس نمونه دستی (الف)؛ تصویر میکروسکوپی از کوارتز حفره‌ای. حفره‌های خالی پلاژیوکلازها با کوارتز جایگزین شده است (نور پلاریزه، بزرگ‌نمایی ۴۰) (ب)

1. Silica addition

ساختارهای هندسی منطقه تولید شد. روش دیگر، در استخراج بصری خطوط، استفاده از ترکیبات رنگی کاذب گوناگون روی داده OLI است. مناسبترین ترکیبات رنگی کاذب از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست که به استخراج و تجزیه و تحلیل ساختارها و خطوط آنها کمک می‌کند، در جدول ۴ آمده است. خطوط شناسایی شده در منطقه، در شکل ۳۲، مشخص شده است.

جدول ۴. ترکیبات رنگی مطلوب در زمینه آشکارسازی خطوط، در کانال RGB، با استفاده از سنجنده OLI ماهواره لندست

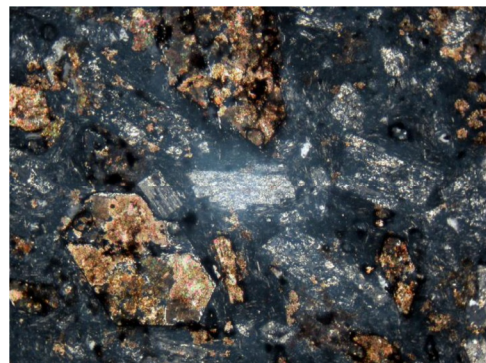
ترکیب باندی	توضیحات
۶۵۲	بهترین تفسیر بصری خطوط را فراهم می‌کند؛ تنوع رنگی بیشتر بین واحدهای متنوع لیتولوژیکی به شناسایی خطوط کمک می‌کند
۷۵۳ و ۲۳۴	تحلیل ساختمان‌های ناحیه‌ای
۷۵۲	استخراج خطوط
۷۶۵	استخراج ساختارها، تجزیه آنها و استخراج روند خطوط

۴-۶- صحت‌سنجی نتایج دگرسانی

با توجه به خروجی‌های به‌دست‌آمده از راهبردهای روش تحقیق (شکل‌های ۶ تا ۲۳) که نواحی دگرسانی منطقه را تفکیک کرد، در نهایت، نمونه‌های میدانی چهار ناحیه دگرسانی اصلی منطقه براساس گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور بررسی شد (Mohammadi, 2006). این مسئله تأییدکننده نتایج دگرسانی‌های تفکیکی حاصل از روش پیشنهادی در این مقاله بود. در شکل ۳۳، موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده از نواحی دگرسانی گوناگون، به‌همراه نقاط گمانه‌های حفاری، در نقشه عکسی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

1. Digital Elevation Model
2. Break Line

نمونه سنگی این دگرسانی، با مختصات جغرافیایی "38°52'34.21" شمالی و "45°57'58.24" شرقی، در شکل ۳۱ نشان داده شده است. نمونه‌های سنگی تحلیل‌شده در این بخش نشان‌دهنده تطابق مکانی با نتایج دگرسانی‌های حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای است.

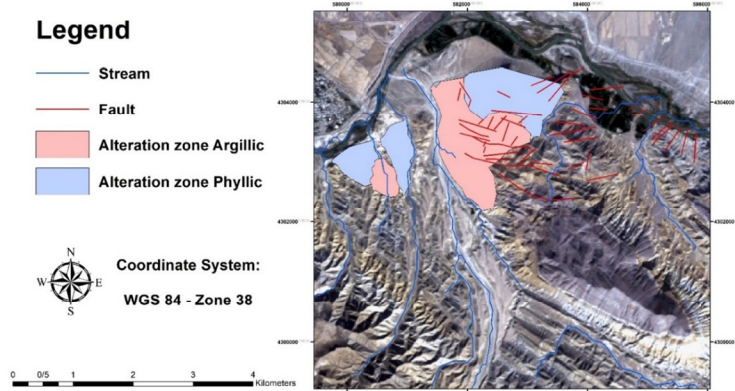


شکل ۳۱. دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای منطقه که سبب جایگزینی آمفیبول‌ها با کربنات‌ها و نیز پلاژیوکلازها با کانی‌های رسی و کربنات‌ها شده است (نور پلاریزه، بزرگ‌نمایی ۴۰)

۴-۵- استخراج ساختارهای هندسی منطقه

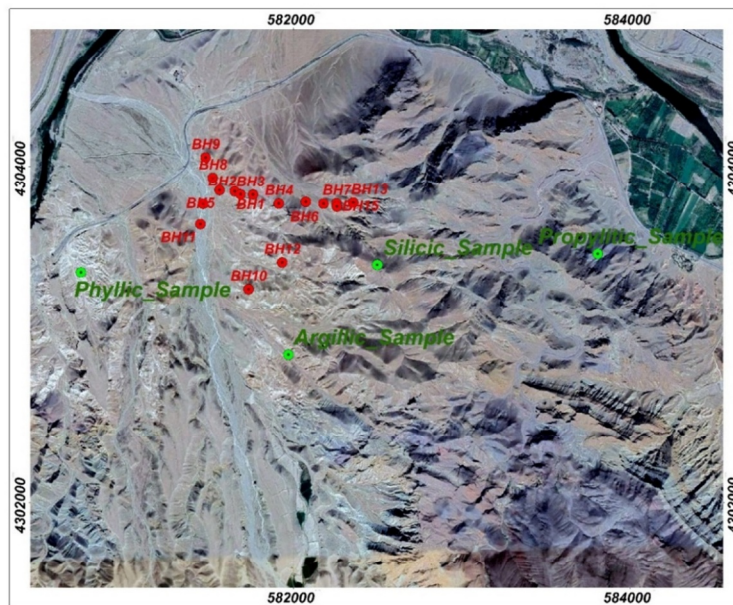
ساختارهای هندسی منطقه، روی داده‌های سن‌تینل-۲ (به دلیل قدرت تفکیک مکانی بیشتر از دیگر تصاویر به‌کاررفته در این مقاله)، به دو روش خودکار (با استفاده از فیلترهای پردازش تصاویر) یا نیمه‌خودکار (با استفاده از قواعد فتوگرامتری) استخراج شد. در حالت خودکار، از فیلترهای گوناگونی همچون لاپلاسی، سوبل، روبرت و فیلترهای جهتی استفاده شد و فیلتر جهتی، با زاویه ۴۵ درجه، مناسب‌ترین فیلتر برای استخراج خطوط منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. در حالت نیمه‌خودکار، با استفاده از تصاویر هوایی منطقه و نیز قاعده فتوگرامتری، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)^۱ منطقه استخراج شد. سپس این مدل ارتفاعی در نرم‌افزار ArcGIS پردازش شد و پس از فیلترکردن برخی عوارض منطقه، مانند جاده‌ها، خطوط و خطوط شکست^۲ در منطقه مورد مطالعه استخراج شدند. از اجتماع این دو محصول، خروجی نهایی

Structure Map of the Masjed Daghi Area



شکل ۳۲. نقشه خطواره‌های شناسایی شده از منطقه مورد مطالعه

Samples and BoreHoles Location Photo Map Of The Masjed Daghi Area



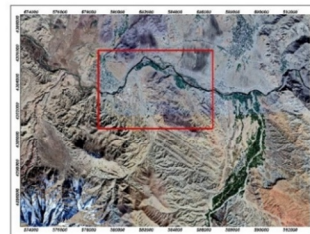
Legend

- Sample Location
- Bore Holes
- Target Area



0 250 500 1,000 1,500 2,000 Meters

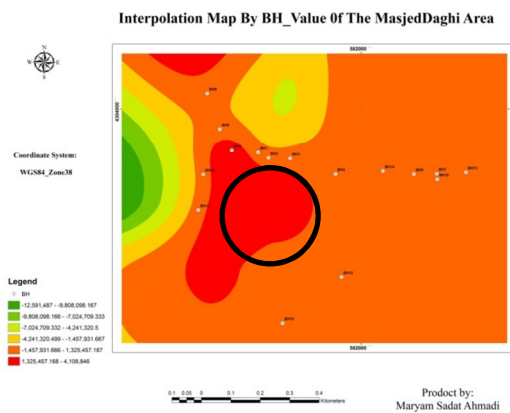
Index of Target Photo Map



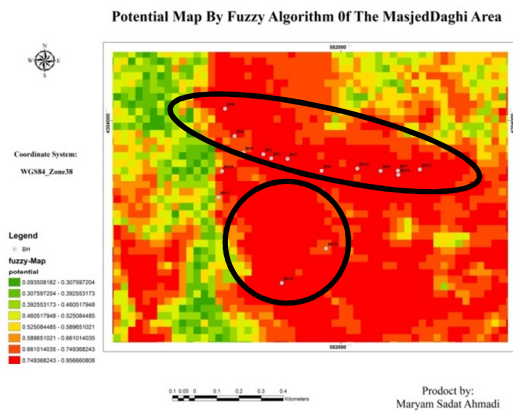
شکل ۳۳. موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده از دگرسانی‌های گوناگون و گمانه‌های حفاری، روی نقشه عکسی منطقه مورد مطالعه

با صحت کلی ۶۱/۳۹٪ است؛ هرچند این صحت مورد قبول است، ماتریس دقت کاربر و تولیدکننده معیار سنجش مناسب‌تری شمرده می‌شود که در مورد محدوده دارای اولویت، به ترتیب برابر با ۷۸/۵۴٪ و ۷۸/۳۶٪ است. در نتیجه، این محدوده که در شکل ۳۶ با دایره سیاه مشخص شده است، منطقه با امیدبخشی بیشتر برای مرکز حفاری پیشنهاد می‌شود.

محدوده مرکزی که با دایره سیاه، با مساحت حدود سیزده هکتار، مشخص شده است تطابق نمونه‌های زمینی با نتایج روش مطرح‌شده در این مقاله را نشان می‌دهد. جدول‌های ۵ و ۶ ماتریس ابهام و ماتریس دقت کاربر و سازنده را برحسب اولویت مناطق، از اول تا چهارم، نشان می‌دهند. در ماتریس ابهام، وزن بیشتر به محدوده اول بازمی‌گردد که به دلیل وسعت بیشتر آن و



شکل ۳۶. نقشه گمانه‌های حفاری



شکل ۳۵. نقشه فازی منطقه مورد مطالعه

جدول ۵. ماتریس ابهام (برحسب درصد)

Class Region	Ground Truth (%)				Total
	Region#1	Region#2	Region#3	Region#4	
Region#1	۷۸/۳۶	۶۹/۲۳	۲۴/۳۶	۲/۷۴	۷۱/۸۹
Region#2	۱۳/۶۸	۱۱/۶۷	۱۰/۹۷	۲۳/۷۷	۱۳/۳۳
Region#3	۵/۵۹	۹/۴۳	۳۲/۲۲	۴۲/۴۴	۸/۶۴
Region#4	۲/۳۷	۹/۶۶	۳۲/۴۵	۳۱/۰۶	۶/۱۵
Total	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

Accuracy Overall = 61.29%

جدول ۶. ماتریس دقت کاربر و سازنده

Class Region	Prod. Acc. (%)	User Acc. (%)
Region#1	۷۸/۳۶	۷۸/۵۴
Region#2	۱۱/۶۷	۱۷/۶۸
Region#3	۳۲/۲۲	۲۱/۴۳
Region#4	۳۱/۰۶	۱۰/۲۰

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مقاله، درباره منطقه مورد مطالعه، به شرح زیر است:

- ۱) سنجنده OLI ماهواره لندست مناطقی با کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن و اکسیدهای فریک را به خوبی از هم تفکیک کرد؛
- ۲) محدوده SWIR سنجنده استر، به ترتیب مناطق دگرسانی آرژیلیک، فلیک و پروپیلیتیک را به خوبی شناسایی کرد؛
- ۳) ترکیب نسبت بانندی سنتینل-۲ برای بارزسازی کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن است. همچنین، با تلفیق روش‌های نسبت بانندی، یون‌های آهن و کانی‌های حاوی هیدروکسیل و کانی‌های رسی به خوبی آشکارسازی شدند؛

۴) تحلیل مؤلفه اصلی، با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، توزیع و تفکیک کانی‌های رسی از کانی‌های حاوی اکسید آهن را بهتر از تصویر مؤلفه اصلی حاصل از سنجنده OLI ماهواره لندست-۸ نشان داد؛

۵) در طبقه‌بندی نظارت‌شده با روش SAM، کانی کوارتز به‌منزله شاخص دگرسانی فلیک، کانی هماتیت به‌منزله شاخص اکسیدهای آهن، کانی کائولینیت به‌منزله شاخص دگرسانی آرژیلیک و کانی کلریت به‌منزله شاخص دگرسانی پروپیلیتیک شناخته شدند و به‌علت ضعف تصویر OLI در محدوده SWIR، دگرسانی‌های رسی و فلیک به‌صورت مطلوب شناسایی و تفکیک نشدند؛

۶) مناطق معرفی‌شده، در نقشه ظرفیت نهایی، انطباق خوبی با موقعیت شناخته‌شده کانی‌سازی مسجدداغی در منطقه دارد که نشان‌دهنده کارایی مدل تلفیق در شناسایی کانی‌سازی مس پورفیری منطقه یادشده است.

۶- پیشنهادها

برای ادامه تحقیقات در این زمینه، موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱) علاوه بر کنترل‌های زمینی انجام‌شده در این تحقیق، پیشنهاد می‌شود برای ارزیابی بیشتر کارایی مدل ایجادشده در تلفیق داده‌ها، از سایر روش‌های کنترلی مثل مغناطیس‌سنجی و ژئوشیمی، در ارزیابی مناطق امیدبخش معرفی‌شده استفاده شود. هرچند کنترل صحرایی انجام‌شده در این تحقیق تطابق مطلوبی با نتایج به‌دست‌آمده داشت؛
- ۲) برای مطالعات دور‌کاوی، پیشنهاد می‌شود از روش‌های تصویربرداری دقیق‌تر به‌منظور ایجاد نقشه‌های دارای جزئیات بیشتر استفاده شود. استفاده از تصاویر فراطیفی با توان تفکیک مکانی و طیفی بالاتر می‌تواند سبب ایجاد نقشه‌های دگرسانی دارای دقتی بیشتر شود.

۷- سپاسگزاری

نویسندگان از جناب آقای بهزاد محمدی، مسئول اکتشاف سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، بابت در اختیار قراردادن داده‌های آزمایش‌های پراش پرتو ایکس در زمینه تحلیل نمونه کانی‌های منطقه مورد مطالعه و همچنین از جناب آقای حجت‌الله جهانگیری، مسئول گروه فرآوری مواد معدنی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، بابت کمک به برخی از تحلیل‌های زمین‌شناسی مورد نیاز در این پژوهش، سپاسگزاری می‌کنند.

۷- منابع

- Aghazadeh, N. & Gholizade Atani, Y., 2015, **Edge Detection with Hessian Matrix Property Based on Wavelet Transform**, Journal of Sciences Islamic Republic of Iran, 26(2), PP. 163-170.
- Ahmadi, H. & Uygucgil, H., 2021, **Targeting Iron Prospective within the Kabul Block (SE Afghanistan) via Hydrothermal Alteration Mapping Using Remote Sensing Techniques**, Arabian Journal of Geosciences, 14(3), PP. 1-22.

- Bakhshandeh, Amnieh, H., Mohammadi, A. & Mozdianfard, M., 2013, **Predicting Peak Particle Velocity by Artificial Neural Networks and Multivariate Regression Analysis - Sarcheshmeh Copper Mine, Kerman, Iran**, Journal of Mining & Environment, 4(2), PP. 125-132.
- Behnia P. & Karami J., 2016, **Application of Hyperspectral Images in the Preparation of Mineral Distribution Maps**, the 25th Seminar on Earth Sciences, National Geological Organization, Tehran.
- Bei, Y., Tian, S., Ge, J. & Sun, Y., 2017, **Assessment of WorldView-3 Data for Lithological Mapping**, Remote Sensing, 9, P. 1132.
- Beiranvand Pour, A., Hashim, M., Park, Y. & Kuk Hong, J., 2017, **Mapping Alteration Mineral Zones and Lithological Units in Antarctic Regions Using Spectral Bands of ASTER Remote Sensing Data**, Geocarto International, 33(12), PP. 1281-1306.
- Dai, J., Qu, X. & Song, Y., 2017, **Porphyry Copper Deposit Prognosis in the Middle Region of the Bangonghu–Nujiang Metallogenic Belt, Tibet**, Using ASTER Remote Sensing Data, Resource Geology, 68(1), PP. 65-82.
- Di Tommaso, I.M. & Rubinstein, N., 2006, **Hydrothermal Alteration Mapping Using ASTER Data in the Infiernillo Porphyry Deposit, Argentina**, Journal of Ore Geology Reviews, 29, PP. 1-16.
- Dorrani, Z. & Mahmoodi, M.S., 2016, **Noisy Images Edge Detection: Ant Colony Optimization Algorithm**, Journal of AI and Data Mining, 4 (1), PP. 77-83.
- Eldosouky, A.M., Abdelkareem, M. & Elkhateeb, S.O., 2017, **Integration of Remote Sensing and Aeromagnetic Data for Mapping Structural Features and Hydrothermal Alteration Zones in Wadi Allaqi Area, South Eastern Desert of Egypt**, Journal of African Earth Sciences, 130, PP. 28-37.
- Hadi Vinchek, Z. & Arfania, R., 2017, **Lithological Mapping from OLI and ASTER Multispectral Data Using Matched Filtering and Spectral Analogues Techniques in the Pasab-e-Bala Area, Central Iran**, Journal of Geology, 7, PP. 1494-1508.
- Hasanpour, Sh. & Alirezai, S., 2016, **Eocene Copper-Gold Porphyry Deposit of Masjid Daghi, North-Western Iran, an Example of Arc Islands Type Porphyry Deposits**, Journal of Earth Sciences, 26th Year, No. 104, PP. 43-58.
- Hashemi Tangestani M., 2009, **Detection of the Abundance Fraction and Spatial Distribution of Clay Minerals using Sub-Pixel Classification of ASTER Data in Esteghlal Abadeh Mine**, Journal of Economic Geology, 2(1), PP. 39-49.
- Hooseinjanizadeh, M. & Tangestani, M.H., 2014, **Mineral Exploration and Alteration Zone Mapping Using Mixture Tuned Matched Filtering Approach on ASTER Data at the Central Part of Dehaj-Sarduiyeh Copper Belt, SE Iran**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(1), PP. 284-289.
- Imamalipour A., Abdoli Islamlou, H. & Haj Alilo, B., 2019, **Geochemical Investigation of Hydrothermal Changes Related to Epithermal Gold Mineralization in Daghi Mosque Area, East of Jolfa, North West of Iran**, Journal of Economic Geology, 3(2), PP. 199-213.
- Min, Y., 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), P. 1, 026018.
- Mahboubyniya, M., Jafarirad, A., Karami, J. & Jabbari, S., 2017, **Copper, Zinc, and Lead Mineral Prospectivity Mapping in the North of Tafresh, Markazi Province, Central Iran**, Using the AHP-OWA Method, Open Journal of Geology, 7(4), PP. 533-558.

- Mars, J., Lawrence, C. & Rowan, C., 2006, **Regional Mapping of Phyllic- and Argillic-Altered Rocks in the Zagros Magmatic Arc, Iran, Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Data and Logical Operator Algorithms**, Journal of Geological Society of America, 2(3), PP. 161-186.
- Modabberi, S., Ahmadi, A. & Tangestani, M.H., 2017, **Sub-Pixel Mapping of Alunite and Jarosite Using ASTER Data; A Case Study from North of Semnan, North Central Iran**, Ore Geology Reviews, 80, PP. 429-436.
- Mohammadi, B., 2001, **Semi-Detailed Exploration of Gold-Copper and Molybdenum Porphyry in Masjid Daghi Area**, National Geological and Mineral Exploration Organization, Management of the NorthEastern Region of Iran.
- Mohammadi, B., 2006, **1:1000 Geological Map Report and Excavations Carried Out in Masjid Daghi Region (Siah Rood Jolfa)**, National Geological and Mineral Exploration Organization, Management of the NorthEastern Region of Iran.
- Mohebbi, M., Yarahmadi Bafghi, A.R., Fatehi Miji, M. & Gholamnejad, J., 2017, **Rock Mass Structural Data Analysis Using Image Processing Techniques (Case Study: Choghart Iron Ore Mine Northern Slopes)**, Journal of Mining & Environment, 8(1), PP. 61-74.
- Panjomi, M., Tabatabai, S.H. & Esadi Harouni, H., 2012, **Identification and Separation of Hydrothermal Alteration Zones in Jolfa Sheet 1:100000 Using ASTER Data**, 17th Conference of Geological Society of Iran, PP. 80-89.
- Roshan Rovani, J., 2013, **Remote Sensing Report of Bejestan City**, National Geology and Mineral Exploration Organization, Management of the NorthEastern Region of Iran.
- Salimi, A., Ziari, M., Amiri, A. & Hosseinjanizadeh, M., 2017, **Sub-Pixel Classification of Hydrothermal Alteration Zones Using a Kernel-Based Method and Hyperspectral Data; A Case Study of Sarcheshmeh Porphyry Copper Mine and Surrounding Area, Kerman, Iran**, Journal of Mining & Environment, 8(4), PP. 555-565.
- Shahabpour, J., 2014, **Economic Geology**, Shahid Bahonar University Press, Kerman.
- Sharifi, A., Malian, A. & Soltani, A., 2018, **Efficiency Evaluating of Automatic Lineament Extraction by Means of Remote Sensing (Case Study: Venarch, Iran)**, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 46(9), PP. 1507-1518.
- 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.



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال چهاردهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱
Vol.14, No. 3, Autumn 2022 Iranian Remote Sensing & GIS

47-74

Investigation of Alteration Deposit Zones of Porphyry Copper Ore Using Multispectral Satellite Imagery (Aster, Landsat-8 and Sentinel-2) and Ground Controls (Case study: MasjedDaghi copper deposit - NW Iran)

Ahmadi M.S.¹ and Malian A.^{2*}

1. M.Sc. OF Remote Sensing, Dep. of Geomatics Engineering, Shahid Rajae Teacher Training University, Tehran
2. Assistant Prof., Dep. of Geomatics Engineering, Shahid Rajae Teacher Training University, Tehran

Abstract

The design of Remote Sensing algorithms and the development of various methods of processing satellite images to identify porphyry copper deposits are among the important topics of studies in the field of mineral resource evaluation and their optimal exploitation. To this end, the determination of alteration zones provides a suitable tool for designing acceptable exploratory patterns. In this research with an almost comprehensive strategy and using the determination of alterations related to porphyry copper deposit based on Lowell and Gilbert model with three different strategies (visual, spectral and statistical processing) as well as the extraction of lineaments in the case area The study suggested the concentration range of the mineral for drilling. The study area in this article is Masjed Daghi porphyry copper deposit in the northeast of East Azerbaijan province, which consists of multispectral satellite images of ASTER, OLI of Landsat-8 and Sentinel-2 sensors for various processes including band ratio combinations, principal component analysis and pixel and subpixels basics spectral processing methods including SAM and MTMF, and statistical processing using the logical operator algorithm. Finally, by fuzzy and combining the layers of satellite image processing with geometric structures of the region (lineaments) which were extracted on Sentinel-2 data in two automatic and semi-automatic methods, the results were analyzed in GIS space and by comparing the presented results with the analysis of ground samples, the accuracy and conformity of the target areas were confirmed. User and producer accuracy for the area with the first priority were 78.54% and 78.36%, respectively, which are more appropriate criteria for introducing the area of the drilling center.

Keywords: Porphyry copper ore, Alteration, SAM, MTMF, Fuzzy logic.