



سجش از دور

و
GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۲
Vol.5, No.2, Summer 2013

۵۳-۶۴

شناسایی هاله‌های دگرسانی همراه با کانه‌زایی مس پورفیری در کوه هنزا با استفاده از تصاویر ASTER

آیدا محبی^{۱*}، مهرداد بهزادی^۲، حسن میرنژاد^۳، حسین تقی‌زاده^۴

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳. دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران
۴. کارشناس ارشد تکتونیک، مجتمع مس سرچشمه

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۵/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۴/۱

چکیده

در تحقیق حاضر، احتمال کانه‌زایی مس پورفیری در محدوده کوه هنزا در حوالی روستای درب بهشت واقع در بخش جنوبی زون دهج - ساردوئیه با استفاده از تصاویر استر بررسی شده است. در این منطقه کانه‌زایی مس پورفیری در مناطق رمشک، بندر هنزا، سوراخ مار، و گروه شناخته شده است. به منظور شناسایی هاله‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک که معمولاً در اطراف کانسارهای مس پورفیری وجود دارند، از دو الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) و عملگر منطقی استفاده شده است. روش عملگر منطقی مجموعه‌ای از نسبت‌های بانندی است که در بخش نخست آن نواحی پوشش گیاهی حذف گردیدند و به دنبال آن با کمک نسبت‌های بانندی هاله‌های دگرسانی استخراج از یکدیگر متمایز شدند. در روش SAM با توجه به ویژگی‌های طیفی کانی‌های دگرسان‌شده در باندهای مناطق دگرسانی آرژیلیک و فیلیک با استفاده از کانی‌های خاص، این نوع دگرسانی‌ها - همانند کائولینیت و مسکویت - مشخص شدند. محاسبه ضریب تشابه در دو روش مذکور نشان می‌دهد که میزان تشابه در آن‌ها در حد متوسط، و ضریب تشابه نقاط معدنی با نواحی تأییدشده با هر دو روش بسیار مناسب است. بنابراین، نواحی‌ای که در آن هر دو روش SAM و الگوریتم عملگر منطقی همدیگر را تأیید می‌کنند بیشترین احتمال کانه‌زایی مس پورفیری را دارند.

کلیدواژه‌ها: مس پورفیری، دگرسانی آرژیلیک و فیلیک، تصویر استر.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تلفن: ۰۹۱۲۲۲۷۴۱۷۲

۱- مقدمه

فناوری دورسنجی نقش مهمی در مراحل اولیه اکتشافات معدنی به‌ویژه برای نواحی خشک و نیمه‌خشک دارد؛ به‌گونه‌ای که، برای شناسایی مناطق دگرسانی و اکتشافات کانسارهای مس از ابزارهای دورسنجی به‌طور گسترده و موفقیت‌آمیزی استفاده می‌شود. طیف‌سنج استر^۱ (طیف‌سنج بازتابی و گرمایی فضابرد پیشرفته) ابزار قدرتمندی در مقیاس ناحیه‌ای و محلی است که در اکتشافات معدنی و مطالعات تحقیقاتی سیستم‌های کانه‌زایی و هیدروترمالی برای شناسایی محدوده‌های دگرسانی و ارتباط ساختارهای ناحیه‌ای و توده‌های نفوذی اهمیت فراوان دارد (Piranjino 2009). داده‌های استر به صورت مشترک بین ناسا و وزارت اقتصاد، صنعت و تجارت ژاپن تهیه می‌شود. سنجه استر، تصویربردار چندطیفی ۱۴ باندهای است که بر فضابرد پیشرفته ترا^۲ سوار است و اطلاعات منابع زمینی را در سه محدوده طیف مرئی، فروسرخ نزدیک^۳ (NVIR)، فروسرخ موج کوتاه^۴ (SWIR)، و فروسرخ گرمایی^۵ (TIR) دریافت می‌کند. سه باند NVIR با طول موج بین ۰/۵۲ و ۰/۸۶ میکرومتر با تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند در محدوده فروسرخ کوتاه با SWIR با طول موج بین ۲/۴۳ تا ۱/۶ میکرومتر با تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند فروسرخ گرمایی (TIR) با طول موجی در محدوده ۱۱/۶۵ و ۸/۱۲۵ میکرومتر با تفکیک مکانی ۶۰ متر قرار دارند. محدوده هر سین داده استر، ۶۰ در ۶۰ کیلومتر است که این وسعت برای اکتشافات ناحیه‌ای مناسب به نظر می‌رسد (Abrams, 2000; Yamaguchi et al., 1999). علاوه بر این، طول موج طیف داده‌های مرئی و فروسرخ نزدیک و فروسرخ گرمایی برای شناسایی پوشش گیاهی، کانی‌های اکسید آهن، کربنات‌ها، و سیلیکات‌ها بسیار اهمیت دارند. دگرسانی در کانسارهای مس پورفیری به‌صورت هم‌مرکز در اطراف توده‌های نفوذی تشکیل می‌شود و سیستم‌های کانه‌زایی مس پورفیری را به همراه داد. تأثیرات دگرسانی هیدروترمالی و کانه‌زایی در حجم وسیعی از سنگ‌های اطراف و بالای توده نفوذی

دید می‌شود (Pirajno, 2009). سیستم‌های مس پورفیری معمولاً با زون‌های دگرسانی هیدروترمالی مشخص می‌شوند (Guilbert, Lowell, 1970)، که در آن‌ها زون پتاسیک با کانی‌های کوارتز و پتاسیم‌دار در بخش مرکزی یا هسته تشکیل شده است. زون دگرسانی فیلیک در اطراف زون پتاسیک قرار دارد و حاوی کانی‌های ایلیت و مسکویت است. این کانی‌ها که بنیان Al-OH دارند، دارای جذب بالا در طول موج ۲/۲۰ میکرومتر هستند که باند ۶ استر را در بر می‌گیرند (Rown, Mars, 2006). زون آرژیلیکی نیز متشکل از کائولینیت و آلونیت است. این کانی‌ها بنیان Al-OH دارند و جذب در طول موج ۲/۱۷ میکرومتر را منطبق بر باند ۵ استر نشان می‌دهند (Rowan, Mars, 2006).

بیشتر کانسارهای مس پورفیری ایران در کمربند ولکانیکی ارومیه‌دختر با روند شمال غرب - جنوب شرق قرار گرفته‌اند. منطقه مطالعه‌شده در شمال برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردوئیه و در مختصات ۳° ۵۷' تا ۲۵° ۵۷' شرقی و ۳۰° ۲۹' تا ۱۰° ۲۹' شمالی، در بخش جنوبی زون ارومیه‌دختر، در زون دهج - ساردوئیه در نزدیکی روستای درب بهشت و در کوه هنزا قرار دارد. برخی نشانه‌های معدنی و کانسار مس پورفیری که در این محدوده وجود دارند عبارت‌اند از: بندر هنزا، سرمشک، گروه، و سوراخ مار. هدف از این تحقیق شناسایی مناطق دگرسانی هیدروترمالی همراه با کانه‌زایی مس پورفیری با استفاده از الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی^۶ (SAM) و عملگر منطقی^۷ و مقایسه آن‌ها با نواحی شناخته‌شده کانه‌زایی مس

1. The Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)
2. Terra Satellite
3. Visible and Near Infrared Radiation
4. Shortwave Infrared Radiation
5. Thermal Infrared Radiation
6. Spectral Angle Mapper
7. Logical Operator

تعدادی دایک که با این توده‌ها مرتبط‌اند، بعضی از آن‌ها دیوریتی‌اند و برخی دیگر از نوع سنگ‌های پورفیری گرانیتوئیدی، سنگ‌های پورفیری دیوریتی، و سنگ‌های پورفیری کوارتز دیوریتی هستند. نشانه‌های معدن و کانسارهای مس پورفیری هم داخل توده‌های نفوذی کوچک و فرعی، و هم داخل توده اصلی قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین آن‌ها سرمشک، بندر هنزا، سوراخ مار، و گروه هستند.

نشانه معدنی سرمشک در نزدیکی روستای سرمشک و حدود ۵ کیلومتری جنوب شرق کانسار در آلو قرار گرفته است. در معدن سرمشک، توده‌ای نفوذی از جنس پورفیریت کوارتز دیوریت قرار دارد که محدوده‌ای با وسعت ۲ کیلومتر مربع را اشغال کرده و به‌گونه‌ای باعث دگرسانی مجاورتی و هیدروترمالی در اطراف سنگ‌های آتشفشانی شده است که بخش‌های وسیعی از منطقه هورنفلسی شده‌اند. دگرسانی هیدروترمالی بیشتر سیلیسی شدن است و آرژیلی شدن نیز به‌طور محلی دیده می‌شود. رخنمون‌هایی از کانه‌زایی مس ثانویه در سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده هیدروترمالی یا هورنفلسی شده دیده می‌شود.

کانسار بندر هنزا در بخش شمالی زون در آلو، سرمشک و در ۱۵ کیلومتری آن قرار دارد. این زون با ساختاری گسلی مشخص شده است و در امتداد آن دگرسانی هیدروترمال و تعداد زیادی نشانه‌های کانه‌زایی مس دیده می‌شود. کانسار بندر هنزا در توده‌ای از کوارتزیت - کوارتز دیوریت به اندازه ۱۵۰۰ در ۳۰۰ متر قرار دارد که در مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده است. توده نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی اطراف آن به شدت سیلیسی، سربستی، و آرژیلیتی شده‌اند و در نتیجه هوازدگی، به‌طور محلی لیمونیتی هستند. در این منطقه توده‌ای آذرین با ترکیب دیوریت روشن‌رنگ وجود دارد که در مجموعه‌ای از توف و آگلومرای ائوسن نفوذ کرده است. توده نفوذی به‌وسیله تعدادی گسل با جهت شرق - شمال شرق قطع شده است. مالاکیت و کالکوپیریت در داخل توده نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی و در زون‌های گسله دیده می‌شود.

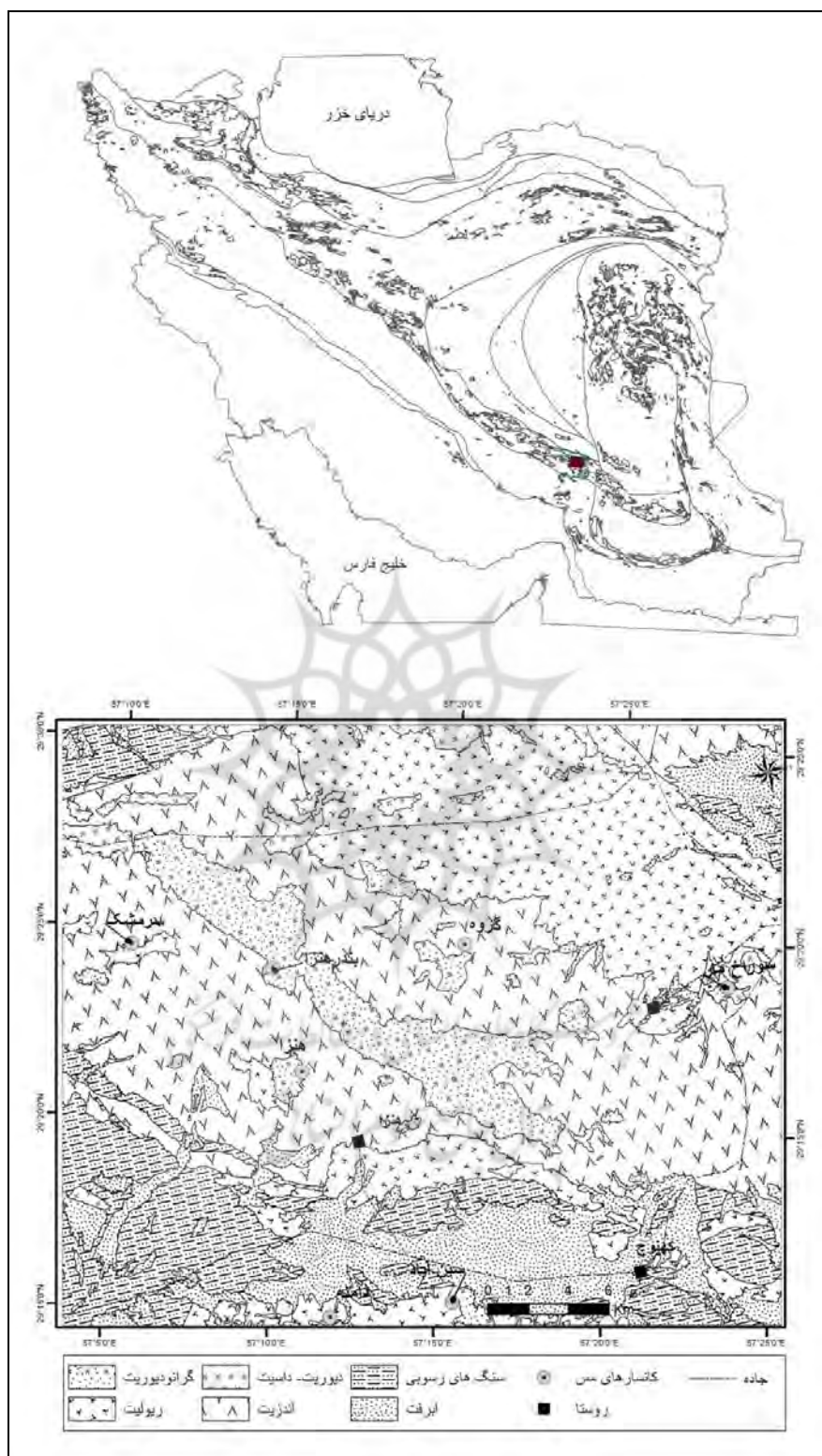
پورفیری در منطقه مطالعاتی است. در گذشته نیز تحقیقاتی به کمک تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی هاله‌های دگرسانی در اطراف کانسارهای مس پورفیری در بخش‌های گوناگون ایران انجام شده است (Ranjbar et al., 2004؛ Tangestani, 2002؛ Beiranvand, 2011؛ Rowan, Mars Pour, 2006).

۲- موقعیت زمین‌شناسی و کانسارها

کمر بند ماگمایی ارومیه‌دختر با طول عمر ترشیری تا پلیو - کواترنری (UDMA) در نتیجه فعالیت ماگمایی طولانی مدت (بیشتر از ۱۵۰ میلیون سال) تشکیل شده که به موازات رواندگی اصلی زاگرس قرار گرفته است (Omran, 2008). این زون از شمال غرب تا جنوب شرق ایران و در سراسر بخش مرکزی آن گسترش یافته است (Richards et al., 2012). زون دهج - ساردوئیه در بخش جنوبی زون ارومیه‌دختر واقع است و منطقه مطالعه‌شده در بخش جنوبی این زون در شمال برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی ساردوئیه و در کوه هنزا قرار دارد (شکل ۱). ناحیه کوه هنزا ساختاری منوکلاین دارد که به‌وسیله گسل‌های طولی و امتدادلغز به بلوک‌هایی تقسیم شده است. توده گرانیتوئیدی کوه هنزا در امتداد منطقه‌های طولی ضعیف جایگیر شده است. در زمان فازهای چین‌خوردگی بعد از ائوسن، کمپلکس ائوسن پایینی به دلیل ترکیب ولکانیکی‌اش به صورت توده‌ای مستحکم عمل کرده است (Djokovic, 1973).

ترکیب سنگ‌شناسی کوه هنزا، آندزیت و آندزیت - بازالت است. در این منطقه سنگ‌های آذرآواری و کمی رسوبی دیده می‌شود. ساختارها دارای روندی به سمت شمال غرب‌اند و شیب آن‌ها در جهت شمال شرق است. توده‌های آذرین دارای سن الیگوسن - میوسن به داخل توالی‌های ولکانیکی نفوذ کرده‌اند. توده آذرین اصلی با طول در حدود ۳۰ کیلومتر و پهنای در حدود ۴-۲ کیلومتر در جهت شمال غرب - جنوب شرق کشیده شده و خط‌الرأس کوه هنزا را تشکیل داده است. چند توده نفوذی دیگر با گستردگی کمتر هم وجود دارد و

آبدا محبی و همکاران



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعه شده در زون ارومیه دختر در جنوب شرق ایران بر روی نقشه ساختاری ایران (سهندی و همکاران، ۲۰۰۹) و نقشه زمین شناسی منطقه مطالعه شده، بر اساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردوئیه روی نقشه موقعیت کانسارهای مس پورفیری مشخص شده اند.

Reflectance و Log Residuals انجام شد. در روش IAR Reflectance تصویر در مقایسه با متوسط طیفی سین نرمال می‌شود (Ben-Dor, 1995) و در روش Log Residuals تصویر انعکاسی کاذبی ایجاد می‌شود که برای تشخیص سیماهای جذب کانی‌ها مناسب است.

۳-۲- تکنیک‌های پردازش تصویر

آنالیز طیفی تصاویر ASTER ابزار مفیدی در شناسایی انواع گوناگون آلتراسیون نظیر آرژیلیک، آرژیلیک پیشرفته، سرسیتیک، پروپیلیتیک، سیلیسی شدن، و اکسیدهای آهن است. در عمل، توانایی این ابزار به فاکتورهای زیادی وابسته است که یکی از آنها وجود پوشش گیاهی است؛ به طوری که شدیداً بر خصوصیات طیفی مناطق دگرسانی تأثیر می‌گذارد. روش‌های آنالیز طیفی متعددی برای پردازش تصاویر ASTER در زمینه شناسایی مناطق دگرسانی وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌های فیلترگذاری تطبیقی (MF)، نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)، انطباق سیمای طیفی (SFF)، و روش پیش‌بینی خطی باند (LS-fit) اشاره کرد. تکنیک‌های پردازش استفاده‌شده شامل آنالیز SAM (Kruse, 2003) و عملگرهای منطقی (Mars et al., 2006) است.

۴- بحث

۴-۱- روش SAM

روش SAM را بوردمن برای اندازه‌گیری تشابه طیفی بین طیف مرجع و طیفی که متعلق به هر پیکسل است، ارائه کرده است (Kurse et al., 2003). در تحقیق حاضر، در روش SAM طیف هر پیکسل تصویر استر با اندازه‌های خاص به نام end-member که حداکثر جذب در کانی مورد نظر است، مقایسه می‌شود. برای دستیابی به end-member از کانی‌های گوناگونی از کتابخانه طیفی USGS استفاده شده است.

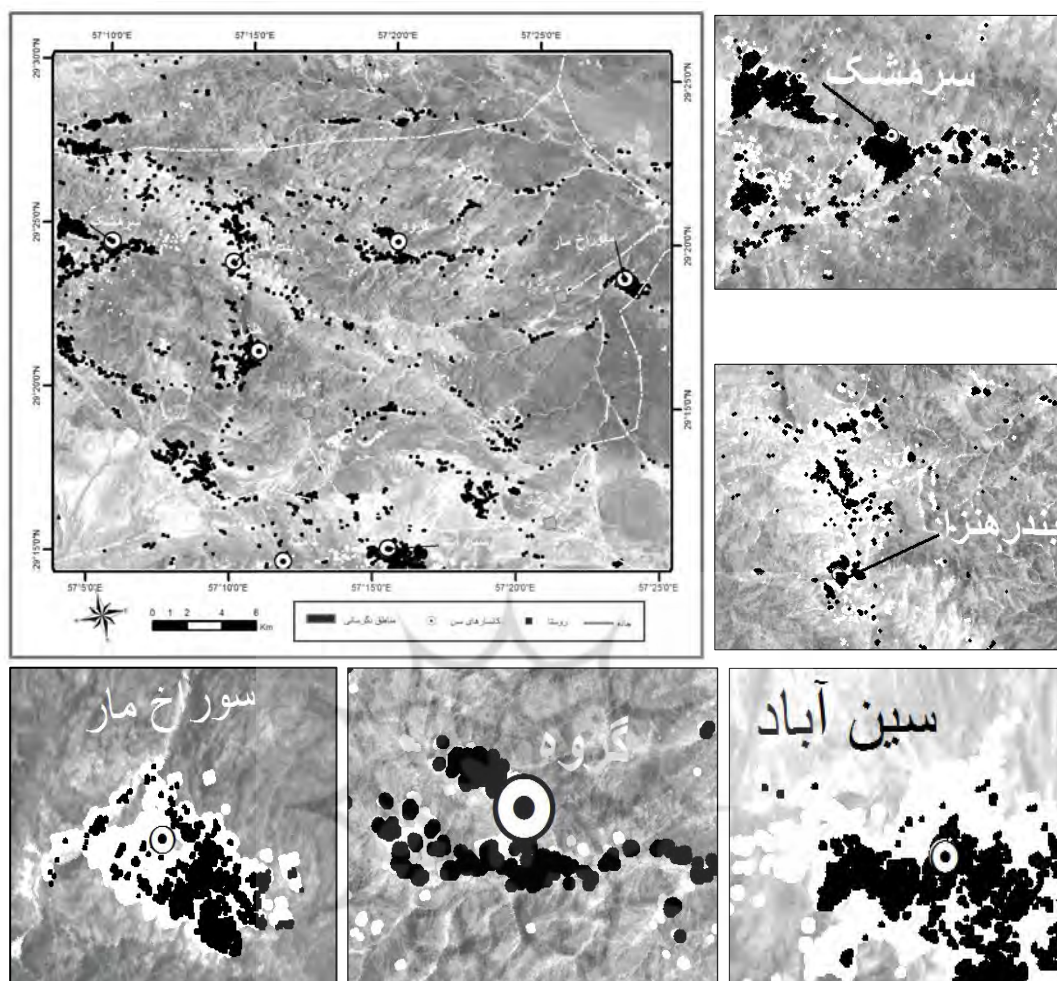
نشانه معدنی گروه در شیب‌های شرقی کوه هنزا و حدود ۸ کیلومتری روستای گروه قرار دارد. توده دیوریتی بزرگی در محدوده‌ای به وسعت ۳ کیلومتر مربع در سنگ‌های آتشفشانی و آذراواری نفوذ کرده است و همگی به وسیله تعداد زیادی دایک میکرودیوریتی قطع شده‌اند. یک زون دگرسانی هیدروترمالی با وسعت ۸۰۰ در ۷۰۰ متر و طول‌شدگی شمال غرب - جنوب شرق در توده نفوذی گسترش یافته است. سیلیسی شدن به‌طور گسترده دیده می‌شود، آرژیلی شدن در جنوب شرق منطقه و اپیدوتی شدن در سراسر منطقه وجود دارد. یک زون گسله به طول ۱۰ کیلومتر از داخل توده تا درون سنگ‌های آتشفشانی به سمت شرق گسترش یافته است، که در آن مالاکیت و کالکوپیریت به‌طور محلی پیدا می‌شود (Djokovic, 1973).

۳- مواد و روش‌ها

تاکنون شناسایی هاله‌های دگرسانی به کمک تصاویر ماهواره‌ای در بسیاری از تحقیقات، انجام گرفته است. در تحقیق حاضر، از تصاویر استر و روش‌های SAM و الگوریتم منطقی برای شناسایی هاله‌های دگرسانی استفاده شده است. مقایسه موقعیت کانسارهای مس پورفیری شناسایی شده در محدوده مطالعه‌شده، به ارزیابی صحت پردازش انجام گرفته، کمک می‌کند.

۳-۱- پیش‌پردازش تصاویر استر

تصاویر استری استفاده‌شده در این تحقیق، در مرکز آنالیز داده‌های زمین و سنجش از دور (ERSDAC) ژاپن در تاریخ ۲۰۰۱/۸/۱۲ برداشت شده و شامل سین استری با سطح 1B برای محدوده مطالعاتی است. تصویر به‌دست آمده دارای سیستم مختصات UTM زون ۴۰ شمالی و دیتوم WGS-84 است. تصحیحات با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ و DEM با اندازه پیکسل ۱۰ متر منطقه به‌صورت ۳ بعدی انجام گرفت. تصحیحات اتمسفری با دو روش IAR



شکل ۲. مناطق استخراج شده با استفاده از روش SAM برای دگرسانی آرژیلیک به رنگ سیاه و فیلیک به رنگ سفید. محدوده کانسارهای موجود در منطقه با بزرگ‌نمایی در اطراف نقشه اصلی نمایش داده شده است.

کانی کائولینیت باندهای ۵ و ۶ (۲/۲۲۵-۲/۱۴۶ میکرومتر) و باندهای ۶ و ۷ (۲/۲۸۵-۲/۱۸۵) بوده است. نتیجه‌ای که از تصویر SAM حاصل می‌شود تصویری سیاه سفید است که میزان شدت رنگ آن به صورت معکوس به تشابه بین عدد End-member و طیف هر پیکسل خاص تصویر بستگی دارد (Gabr et al., 2010). هاله‌های دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک روی شکل ۲ مشخص شدند که نتایج آن با نواحی کانه‌زایی سرمشک، بندر هنزا، گروه، سوراخ مار، و مانند این‌ها هم‌خوانی دارد.

ویژگی‌های طیفی کانی‌های دگرسان شده محدود در باندهای SWIR تصاویر استر، این امکان را فراهم می‌آورد که مناطق دگرسانی هیدروترمالی با استفاده از کانی‌هایی که مختص آن نوع دگرسانی هستند مشخص شوند. کانی مسکویت (K A12 (Si A13) O10 (OH, F) 2) به عنوان شاخص زون فیلیک و کانی کائولینیت (A12 Si2 O5 (OH)4) به عنوان کانی مشخصه زون آرژیلیک هستند. کانسارهای منطقه با بزرگ‌نمایی بیشتر در اطراف نقشه اصلی نمایش داده شده است. در این تحقیق End-member به کار برده شده برای

۴-۲- روش عملگرهای منطقی

عملگرهای منطقی ابزار نسبتاً جدیدی هستند که برای طبقه‌بندی تصویر به کار می‌روند. در عملگر منطقی که در این تحقیق استفاده شده است، عملگر adding یا and و مجموعه‌ای از فیلترها به کار گرفته شده است؛ به این ترتیب که ماتریکس آن در پنجره‌ای ۵ در ۵ روی تصویر حرکت می‌کند و برای جدا کردن موضوعات از ماسک‌های منطقه‌ای استفاده می‌شود. هر بخش از الگوریتم عملگر منطقی مجموعه‌ای از نسبت‌های باندی را نمایش می‌دهد. در عملگر منطقی ارزش درست یا غلط را به کمک مقایسه باندی با حد آستانه تعیین می‌کند. در نهایت، تصویر صفر و یکی درست می‌شود که عدد یک بیشترین صحت را دارد و محل دگرسانی‌ها را نشان می‌دهد و هر چقدر ارزش پیکسل به یک نزدیک‌تر باشد احتمال دگرسانی در آن پیکسل بیشتر است. این روش به دلیل کاهش خطای ناشی از پوشش گیاهی بسیار مناسب است، ولی در آن نمی‌توان از عددی معین برای جدا کردن دگرسانی‌های گوناگون استفاده کرد و برای مناطق جغرافیایی متفاوت و براساس وسعت منطقه مطالعه‌شده، اعداد یکسان نیستند. پیش از این نیز از این روش در زاگرس، کوپریست، و نوادا برای جدا کردن مناطق دگرسانی استفاده شده و نتایج خوبی منطبق بر مناطق کانه‌زایی به‌دست آمده است (Mars, 2006).

۴-۲-۱- الگوریتم منطقی نسبت باندی دگرسانی آرژیلیکی

در این تحقیق، از الگوریتم منطقی که مارس و روان در سال ۲۰۰۶ ارائه کردند برای شناسایی دگرسانی آرژیلیکی استفاده شد. الگوریتم اصلی در ادامه شرح داده می‌شود.

$((float (b3)/b2) le 1.35) and (b4 gt 260) and ((float (b4) / b5)gt 1.25) and ((float(b5)/b6)le 1.05) and ((float (b7)/b6) ge 1.03)$

ولی همان‌طور که می‌بینید در بخش دوم این فرمول

and (b4 gt 260) آورده شده است که در آن هیچ پیکسلی با ارزش بزرگ‌تر از ۲۶۰ وجود ندارد و وجود and در این فرمول باعث صفرشدن کل نتیجه حاصل از فرمول می‌شود؛ از این رو، این بخش از فرمول حذف شد. در مقاله مارس و روان (۲۰۰۶) آمده است که این بخش فرمول برای حذف پیکسل‌های سیاه است. در حین پردازش، هر بخش از فرمول، جداگانه اعمال شد و با توجه به ویژگی‌های تصویر اعداد، حد مرزی ۹۷ درصد برای آن اعمال شد. این عدد برحسب نوع پوشش گیاهی و ویژگی‌های زمین‌شناسی در هر منطقه می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین، برای استخراج دگرسانی آرژیلیکی از الگوریتمی که از الگوریتم مارس و روان اقتباس شده است، استفاده شد:

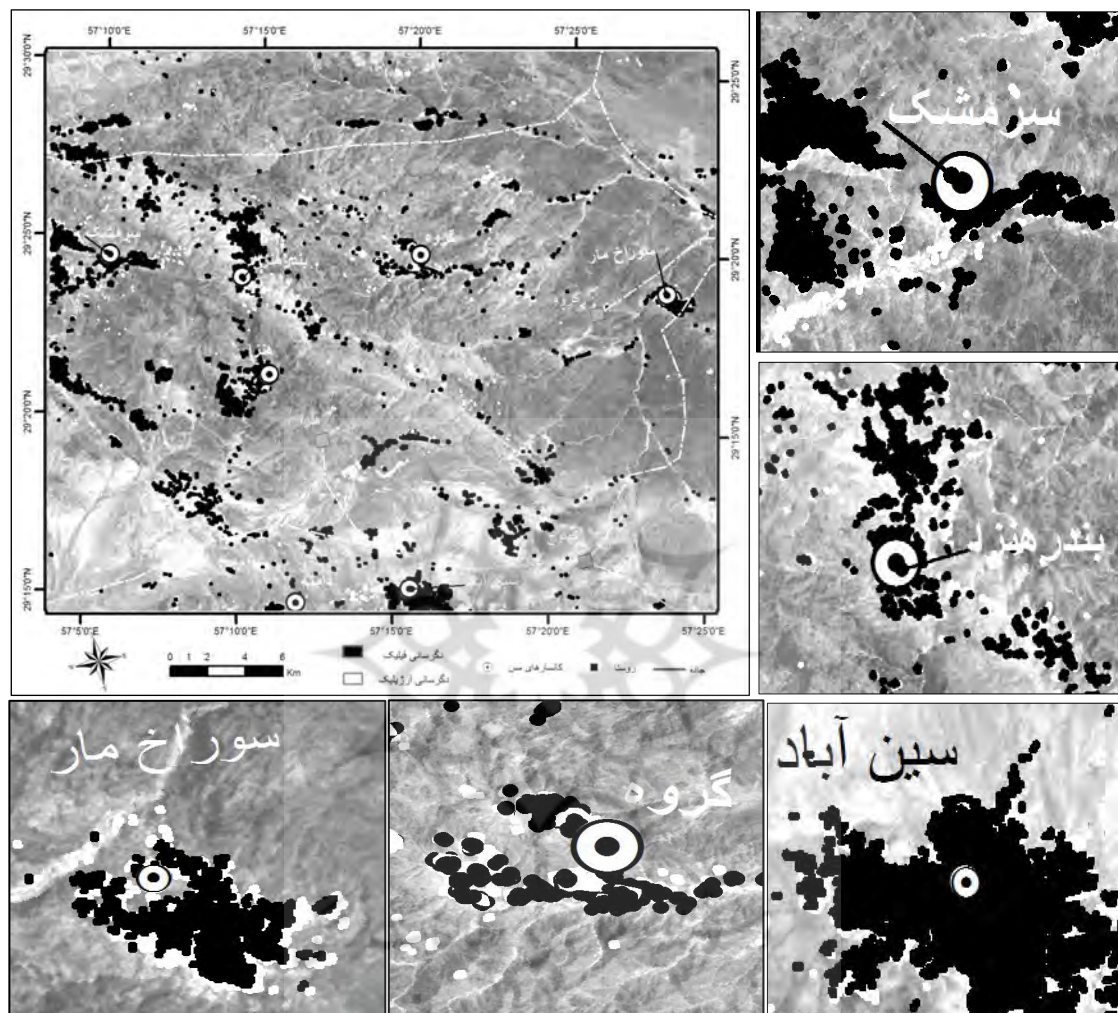
$((float (b3)/b2) le 1.35) and ((float (b4) / b5)gt 1.25) and ((float (b5) / b6) le 1.05) and ((float (b7) / b6)ge 1.03)$

بخش اول فرمول نسبت باندی ۳ به ۲ را مشخص و حذف می‌کند که پوشش گیاهان سبز را نشان می‌دهد. با استفاده از آنالیز طیفی تصویر و کتابخانه طیفی، مقدار حد آستانه برای نسبت باندی ۳ به ۲، عدد ۱/۳۵ است که پوشش گیاهی را حذف می‌کند. این نسبت باندی گیاهان مرده را که نسبت باندی آنها بین ۲/۱۷ و ۲/۳۳ است، حذف نمی‌کند.

با توجه به کتابخانه طیفی، نسبت‌های باندی ۴ به ۵، ۵ به ۶، و ۶ به ۷ به‌منظور نمایش سیماهای جذب بین طول موج‌های ۲/۱۷ و ۲/۲ برای نشان دادن سنگ‌هایی که دگرسانی فیلیک و آرژیلیک دارند، مناسب است. نسبت‌های باندی ۴ به ۵ و ۵ به ۶ به ترتیب دارای سیماهای جذب ۲/۱۶۵ و ۲/۲ هستند. آنالیزهای طیفی مربوط به طیف استر نشان می‌دهد که باند ۵ نسبت به باند ۶ به مقدار ۵ درصد کمتر سنگ‌های با دگرسانی آرژیلیکی را مشخص می‌کند. به همین دلیل از نسبت ۵ به ۶ برای تشخیص سنگ‌های با دگرسانی آرژیلیک از سنگ‌های با دگرسانی فیلیک استفاده شده است. از طرفی طیف استر سنگ‌های دگرسان آرژیلیکی نشان می‌دهد که باند ۴ در مجموع

۱/۲۵ بیشتر است، و بیشتر و مساوی با ۳ درصد است که در نتیجه، باعث طبقه‌بندی پیکسل‌ها به‌عنوان دگرسانی آرژیلیکی می‌شود (شکل ۳).

۲۵ درصد از باند ۵ کمتر و باند ۷ به میزان ۳ درصد از باند ۶ بیشتر است. بنابراین مقدار الگوریتمی که برای نسبت‌های باندی ۴ به ۵ و ۷ به ۶ باید باشد، از مقدار



شکل ۳. مناطق استخراج‌شده با استفاده از روش عملگر منطقی برای دگرسانی آرژیلیک به رنگ سیاه و فیلیک به رنگ سفید مشخص شده است. محدوده کانسارهای موجود در منطقه با بزرگ‌نمایی در اطراف نقشه اصلی نمایش داده شده است.

$((float(b4)/b6) > 1.25)$ and $((float(b5)/b6) > 1.05)$ and $((float(b7)/b6) \geq 1.03)$

مشکلی که در بخش دوم فرمول قبلی وجود داشت، در این بخش نیز دیده می‌شود به طوری که در این بخش $(b4 > 260)$ آورده شده است که هیچ پیکسلی با ارزش بزرگ‌تر از ۲۶۰ در تصویر وجود ندارد و وجود and در آن باعث می‌شود کل نتیجه حاصل از فرمول، صفر شود. از این رو، مجدداً این بخش از فرمول حذف شد. لازم به

۴-۲-۲- الگوریتم منطقی نسبت باندی دگرسانی

فیلیک

با روش مشابه جداسازی دگرسانی آرژیلیک، برای شناسایی دگرسانی فیلیک نیز از الگوریتم منطقی‌ای که مارس و روان در سال ۲۰۰۶ ارائه کردند، استفاده شد.

الگوریتم اصلی به شرح زیر است:

$((float(b3)/b2) \leq 1.35)$ and $(b4 > 260)$ and

$$C_j = \frac{T_{11}}{T_{12} + T_{21} + T_{11}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این فرمول T_{11} تعداد پیکسل‌هایی است که هم‌پوشانی مثبت دارند، و T_{12} و T_{21} پیکسل‌هایی هستند که با هم مطابقت ندارند. مناطقی که هم‌پوشانی منفی دارند مناطقی هستند که احتمال دگرسانی در آن‌ها کمتر است. ضریب Jaccard بین صفر (مناطق منفی) که تشابهی ندارند) و یک (مناطق مثبت) که کاملاً مشابه‌اند) تغییر می‌کند. ضریب حداقل ۰/۶۶ به‌عنوان ضریب خوب و ضریب ۰/۳۳ تا ۰/۶۶ به‌عنوان ضریب متوسط و ضرایب زیر ۰/۳۳ به‌منزله ضریب ضعیف به‌شمار می‌آیند (Carreanza, 2002).

برای به‌دست آوردن میزان اشتراک و اختلاف بین نتایج به‌دست‌آمده از روش SAM و الگوریتم عملگر منطقی از عملگر "Combinatorial and" استفاده شد. این عملگر می‌تواند تعداد پیکسل‌های مشابه و غیرمشابه در دو فایل رستری گوناگون را محاسبه کند. ضریب تشابه^۱ در دو روش استفاده‌شده در پردازش تصویر استر، برای مناطق دگرسانی آرژیلیک ۰/۴۲ و برای مناطق با دگرسانی فیلیک ۰/۳۵ است، که نشان می‌دهد میزان تشابه در این دو روش در حد متوسط است. سپس با همین روش، میزان تشابه نقاط معدنی شناخته‌شده با نواحی‌ای که به کمک هر دو روش تأیید شده است، محاسبه شد. میزان ضریب تشابه برای دگرسانی فیلیک ۰/۷۱ و برای دگرسانی آرژیلیک ۰/۶۹ به‌دست آمد. بنابراین، نواحی‌ای که در آن هر دو روش SAM و الگوریتم عملگر منطقی هم‌دیگر را تأیید می‌کنند دارای بیشترین احتمال کانه‌زایی هستند. در شکل ۴ مناطق دگرسانی فیلیک و آرژیلیک نشان داده شده است که بیشترین هم‌پوشانی را در دو روش SAM و الگوریتم عملگر منطقی دارند.

ذکر است که در مقاله مارس و روان (۲۰۰۶) آمده است که این بخش فرمول برای حذف پیکسل‌های سیاه است. در حین پردازش، هر بخش از فرمول جداگانه روی تصویر اعمال شد و با توجه به ویژگی‌های تصویر اعداد، حدمرزی ۹۷ درصد اعمال شد. این عدد با توجه به نوع پوشش گیاهی و ویژگی‌های زمین‌شناسی در هر منطقه می‌تواند متفاوت باشد.

برای استخراج دگرسانی فیلیک از این الگوریتم استفاده شد:

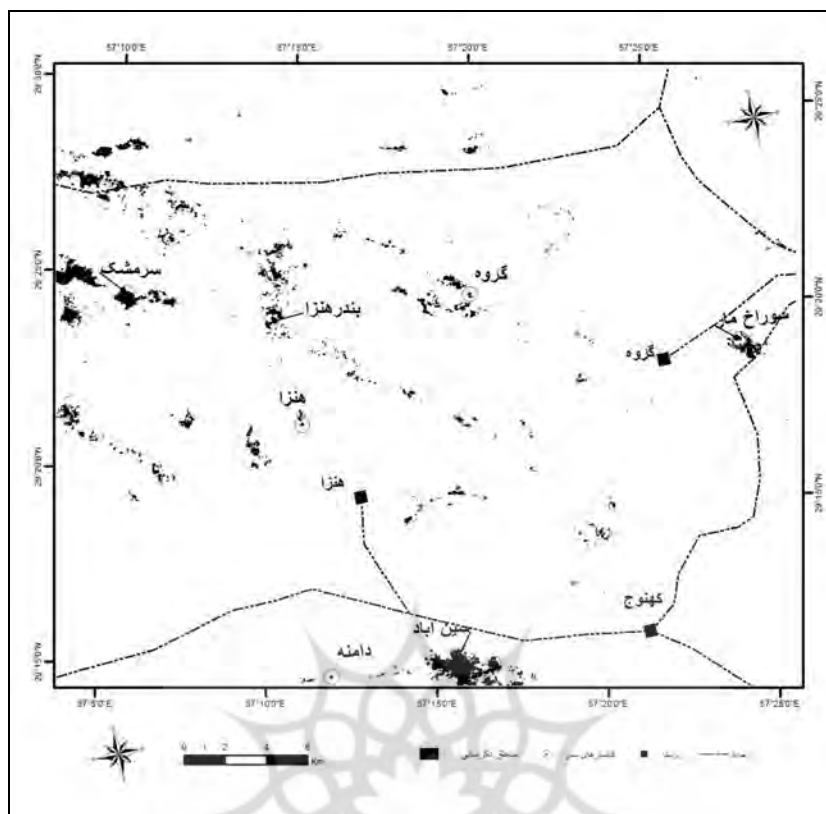
((float(b3)/b2) le 1.35) and ((float(b4)/b6) gt 1.25) and ((float(b5)/b6) gt 1.05) and ((float(b7)/b6) ge 1.03)

طیف استر در سنگ‌های دگرسانی فیلیک نشان می‌دهد که باند ۵ در آنها ۵ درصد بیشتر از باند ۶ است که در الگوریتم به‌منظور طبقه‌بندی همه مقادیر نسبت باندهای ۵ به ۶ که از عدد ۱/۰۱ بیشتر هستند، برای نمایش سنگ‌های با دگرسانی فیلیک استفاده می‌شود. طیف استر نشان می‌دهد که باند ۶ حداقل ۲۵ درصد از باند ۴ کمتر است و باند ۷ حداقل ۳ درصد از باند ۶ بیشتر است. در الگوریتم برای جداسازی دگرسانی فیلیک از آرژیلیک از نسبت‌های باندهای ۴ به ۶ و ۷ به ۶ به ترتیب بیشتر از ۱/۰۱ و بیشتر یا مساوی ۳ درصد استفاده شده است (اقتباس از مارس و همکاران، ۲۰۱۱). به دلیل شرایط جغرافیایی و پوشش گیاهی، تغییراتی در فرمول اصلی اعمال شده است (شکل ۳).

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک با دو روش SAM و الگوریتم عملگر منطقی صورت پذیرفت. برای تشخیص میزان تأیید این نتایج به‌وسیله یکدیگر، از روش آنالیز مقایسه‌ای استفاده شد. پیش از این برای اندازه‌گیری میزان مشابهت و اختلاف نواحی استخراج‌شده نقشه‌های دوتایی، در نقشه‌های پتانسیل‌یابی معدنی از ضریب مشابهت $Jaccard (C_i)$ استفاده شده است (Carter, 1994).

1. Similarity coefficient



شکل ۴. موقعیت مکانی دگرسانی‌های آرژیلیک و فلیک را نشان می‌دهد که بیشترین هم‌پوشانی را در دو روش SAM و الگوریتم عملگر منطقی دارند. این مناطق انطباق خوبی با نواحی کانه‌زایی مس پورفیری شناخته شده در منطقه دارند.

ارزیابی بهتر، ۴ نمونه از منطقه برای آنالیز XRD و شناسایی کانی‌ها به آزمایشگاه زراژما فرستاده شد که نتایج آن در ادامه آورده شده است. نمونه ZBND_91 منطبق بر دگرسانی آرژیلیک و سه نقطه دیگر منطبق بر دگرسانی فلیک هستند.

پس از بررسی و انجام مطالعات دفتری، برخی از مناطق کنترل صحرائی شدند. یکی از این مناطق منطبق بر کانسار بندر هنزا است که روش پردازش آن به خوبی این منطقه را نشان داده است. در تصویر می‌توان دگرسانی‌های فلیک و آرژیلیک را با رنگ‌های به ترتیب تیره و روشن به آسانی تشخیص داد. برای

جدول ۱. آنالیز XOR و شناسایی کانی‌ها

شماره نمونه	فاز اصلی	فاز فرعی	فاز کمیاب
ZBND-4	Al, Qz	Mus-III, Orth	...
ZBND-75	Al, Qz	...	Mus-III
ZBND-91	Qz	Ab, Mus-III, Chl	...
ZBND-109	Qz	Ab, Mag	...

Qz=Quartz, Al=Albite, Mus=Muscovite, III=Illite, Mag=Magnetite, Orth=Orthoclase



شکل ۵. موقعیت دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک در محدوده کانسارهای بندر هنزا

۶- منابع

Abrams, M., 2000, **The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform**, Int. J. Remote Sens, 21, PP. 847-859.

Beiranvand Pour, Amin, Hashim, Mazlan, 2011, **Identifying Areas of High Economic-Potential Copper Mineralization Using ASTER Data in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt, Iran**, Adv. Space Res.

Bonham-Carter, Graeme, 1994, **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS**, Elsevier Science, P.398.

Carranza, E.J.M. and Hale, M., 2002, **Spatial Association of Mineral Occurrences and Curvilinear Geological Features**, Mathematical Geology: the official journal of the International Association for Mathematical Geology, 34 (2002)2, PP. 199-217.

نتایج حاصل از مقایسه بازدید زمینی مناطق دگرسان و مناطق به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر استر مؤید این نظریه است که این روش‌ها به‌خوبی منطبق بر نواحی دگرسانی هستند و ابزار مناسبی برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری به‌شمار می‌آیند. معمولاً در کانسارهای مس پورفیری دگرسانی فیلیک در مرکز قرار می‌گیرد و دگرسانی آرژیلیک آن را احاطه می‌کند، از این رو، مناطقی که روش نقشه به‌صورت موقعیت‌های هم‌مرکز از دگرسانی فیلیک و آرژیلیک به‌دست آمده بهترین مناطق برای مطالعات تکمیلی است. باتوجه به نقشه‌های به‌دست‌آمده و میزان هم‌پوشانی آن‌ها با مناطق کانه‌زایی مس پورفیری، به‌نظر می‌رسد که روش SAM و عملگر منطقی و یافتن مناطقی که این دو روش همدیگر را پوشش می‌دهند، برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری بسیار مناسب است. از برتری‌های روش الگوریتم منطقی بر روش‌های دیگر، حذف پوشش گیاهی است. از آن‌جا که بخش‌های زیادی از نواحی محدوده مطالعاتی پوشیده از اراضی باغی است، استفاده از این روش بسیار کاربردی است. انطباق بالای مناطق دگرسانی به‌دست‌آمده با محل کانسارهای مس پورفیری که اکنون در محدوده مطالعاتی وجود دارند، روش به‌کار رفته را کاملاً تأیید می‌کند.

- Djokovic, I., Dimitrijevic, M.N., Cvetic, S., and Dimitrijevic, M.D., 1973, **Geological Map of Iran sheet 7448—Sarduiye: Tehran**, Geological Survey of Iran, Offset Press Incorporated, scale 1:100,000.
- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T., 2010, **Detecting Areas of High-potential Gold mineralization using ASTER data**, Ore Geo. Rev. 38, PP. 59–69.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., and Huntington, J.F., 2003, **Comparison of Airborne Hyperspectral data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping: Institute of Electrical and Electronics Engineers**, Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 6, PP. 1388–1400, doi: 10.1109/TGRS.2003.812908.
- Lowell, J.D., and Guilbert, J.M., 1970, **Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry ore Deposits: Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists**, Vol. 65, No. 4, PP. 373–408.
- Mars, John C., Rowan, Lawrence 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**, Geosphere 2, PP. 61-186.
- Richardsm, P., Jeremy, Spellpell, Terry, Rameh, Esmail, Raziq, Abdul, Fletcher, Tim, 2012, **High Sr/Y Magmas Reflect Arc Maturity, High Magmatic Water Content, and Porphyry Cu ± Mo ± Au Potential: Examples from the Tethyan Arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan**, Economic Geology, Vol. 107, PP. 295–332.
- Pirajno, Franco, 2009, **Hydrothermal Processing and Mineral Systems**, Springer, Australia.
- Ranjbar, H. et al., 2004, **Application of the Crosta Technique for Porphyry Copper Alteration Mapping, Using ETM⁺ Data in the Southern Part of the Iranian Volcanic Sedimentary belt**, Journal of Asian Earth Sciences, Volume 24, Issue 2, November, PP. 237-243.
- Tangestani, MH., Moore, F., 2002, **Porphyry Copper Alteration Mapping at the Meiduk Area, Iran**, Int. J. Rem. Sens., 23 (22), PP. 4815-4825.
- Yamaguchi, Y.I., Fujisada, H., Kudoh, M., Kawakami, T., et al., 1999, **ASTER Instrument Characterization and Operation Scnorio**, Adv. Space Res. 23 (8), PP. 1415–1424.
- Yamaguchi, Y.I., Fujisada, H., Kahle, A.B., Tsu, H. et al., 2001, **ASTER instrument Performance, Operation Status, and Application to Earth Sciences**, IEEE Trans. Geos. Remote Sens., PP. 1215–1216.