

# شناسایی کانی‌های دگرسانی گرمابی (هیدروترمالی) و بخش‌های سیلیسی همراه با کانی‌زایی طلا در ناحیه طلا دار هیرد (جنوب بیرجند) با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER

نوشته: معصومه علی‌محمدی\*، پوران بهنیا\*، احمد خاکزاد\* و محمدعلی قربانی\*\*

\* سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران  
\*\* دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران، ایران

## Mapping Hydrothermal Alteration Minerals and Silicic Parts Accompanied by Gold Mineralization using ASTER Data in Hired Area (South of Birjand )

By: M. Alimohammadi\*, P. Behnia\*, A. Khakzad\* & M. A. Ghorbani\*\*

\*Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran

\*\* Faculty of Geosciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۶/۰۹

### چکیده

ناحیه طلا دار هیرد در حاشیه شمال خاوری پهنه لوت و در مجاورت زمین‌درز سیستان (Sistan suture zone) یا زون فلیش خاور ایران واقع شده است. بخشی از توده‌های نفوذی موجود در این منطقه با سن پس از ائوسن در واحدهای آتشفشانی (ولکانیکی) و آذرآواری (پیروکلاستیکی) ائوسن نفوذ کرده و سبب دگرسانی و کانه‌زایی طلا، مس، سرب و روی شده‌اند. برای تشخیص کانی‌های دگرسان همراه با کانه‌زایی طلا در محدوده هیرد، از داده‌های سنجنده ASTER استفاده شده است. این سنجنده دارای ۳ باند مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR)، ۶ باند مادون قرمز کوتاه (SWIR) و ۵ باند مادون قرمز حرارتی (TIR) است. جذب در محدوده طول موج ۲/۲ میکرومتر (معادل باند ۶ ASTER)، با حضور کانی‌های رسی (ایلپیت، کائولینیت) و سریست مطابقت دارد که علت وقوع جذب در این محدوده، وجود عامل آنیونی Al-OH است. کانی‌های دارای عامل آنیونی Mg-OH و کربنات‌ها در طول موج ۲/۳ میکرومتر (معادل باند ۸ ASTER) جذب مشخصی نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از باند ۸ می‌توان کانی‌های کلریت، اپیدوت و کلسیت را تشخیص داد.

در این تحقیق، از روش‌های مختلف پردازش تصویر (ترکیب باندی، تبدیلات نسبت باندی و روش Binary Encoding) برای شناسایی و تفکیک کانی‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌زایی طلا استفاده شد و روش Binary Encoding به عنوان یک روش موفق برای تفکیک دقیق‌تر کانی‌های دگرسان تشخیص داده شد. به کمک تحلیل باندهای مادون قرمز حرارتی نیز می‌توان اطلاعات سنگ‌شناسی مفیدی به دست آورد؛ زیرا شناسایی سنگ‌های سیلیسی در محدوده VNIR+SWIR امکان‌پذیر نمی‌باشد که علت این امر، عدم وجود اشکال جذبی مشخص برای کوارتز در این محدوده طول موجی می‌باشد. در این مطالعه برای شناسایی بخش‌های سیلیسی همراه با کانه‌زایی طلا، از محدوده TIR سنجنده ASTER و از نسبت باندی  $Q_i = (b_{11} * b_{11}) / (b_{10} * b_{12})$  استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل از این پردازش‌ها با نتایج به دست آمده از مطالعه مقاطع نازک و پراش پرتو اشعه ایکس (XRD) مربوط به نمونه‌ها نشان داد که داده‌های ASTER قابلیت خوبی در شناسایی مناطق دگرسان دارند.

**کلید واژه‌ها:** طلای هیرد، زمین‌درز سیستان، پردازش تصویر، مادون قرمز حرارتی، تصاویر ASTER

## Abstract

Hired gold-bearing area is located to the northeast of the Lut zone and in the vicinity of the Sistan suture zone. Several post Eocene plutons have intruded into the Eocene volcanic and pyroclastic units and caused hydrothermal alteration and mineralization of gold, copper, lead and zinc. We have applied the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data including three visible and near infrared (VNIR), six shortwave infrared (SWIR) and five thermal infrared (TIR) bands to determine the alteration minerals of Hired gold-bearing area. Spectral analysis of the surface reflectance SWIR manifests absorption in 2.20 $\mu\text{m}$  and 2.33 $\mu\text{m}$  wavelength regions. Absorption at 2.20 $\mu\text{m}$  (band 6), due to Al-OH anionic agent is consistent with the presence of clay minerals (illite, kaolinite) and sericite, whereas absorption at 2.33 $\mu\text{m}$  (band 8) due to Mg-OH anionic agent and carbonates is consistent with the occurrence of chlorite, epidote and calcite minerals.

In this study different image processing techniques such as band combination, band ratios transformation, and Binary Encoding were used to identify and delineate the altered minerals accompanied by gold mineralization. The Binary Encoding method was found to be the best image processing technique for delineation of the hydrothermally formed minerals.

Analysis of the spectral emission data in the five TIR bands has provided valuable lithological information. It would not be possible to identify silicified rocks in the nine VNIR+SWIR bands due to the lack of recognizable spectral absorption features in quartz at this wavelength region. We have therefore mapped Quartz-bearing surface deposits as well as hydrothermally silicified rocks in the TIR region by using a band ratio  $(b_{11} \times b_{11}) / (b_{10} \times b_{12})$  image. The results obtained from ASTER data are compatible with conclusions inferred from petrographic and XRD studies of the surface samples. The ASTER data appear to be useful in mapping hydrothermal alteration and in ore deposit exploration.

**Key words:** Hired Gold, Sistan suture zone, Image processing, Thermal Infra Red, ASTER Images

## ۱- مقدمه

NOAA و Quick Bird و Ikonis با دقت ۶۰ سانتی‌متر تا یک متر و ماهواره NOAA با دقت یک کیلومتر را فراهم کرده است. امروزه به موازات توسعه فناوری و نیازهای تعریف شده، ماهواره‌ها از حالت کاربردهای عمومی به سمت تخصصی شدن گام برداشته‌اند. یکی از نمونه‌های بارز؛ سنجنده ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) است که بر پایه نیازهای زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی طراحی شده است. ASTER یک تصویرگر چندطیفی (۱۴ بانده) پیشرفته است که ناحیه وسیعی از طیف الکترومغناطیسی را در برمی‌گیرد. این سنجنده دارای ۳ باند مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) است که در محدوده طول موج ۰/۱۸۶ - ۰/۲۵ میکرومتر قرار می‌گیرند و قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر دارند، ۶ باند مادون قرمز کوتاه (SWIR) با محدوده طول موج ۲/۴۳ - ۱/۶ میکرومتر، قدرت تفکیک

امروزه علم سنجنش از دور به سبب قابلیت‌های منحصر به فرد خود، جایگاه مهمی در مطالعات مرتبط با علوم زمین پیدا کرده و در زمینه‌های مختلف اکتشاف معادن، شناسایی جنس سنگ‌ها، شناسایی گسل‌ها، تهیه نقشه، ایجاد مدل ارتفاعی رقومی زمین و بسیاری موارد دیگر کاربرد دارد. مهم‌ترین مزیت این فن، دسترسی به اطلاعات محیطی در حداقل زمان ممکن و با دقت مناسب است. با توجه به این که تصاویر سنجنش از دور در نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی تصویربرداری شده‌اند، اطلاعات سودمندی از ماهیت پدیده‌های مختلف سطح زمین ارائه می‌دهند. از مزیت‌های دیگر سنجنش از دور، تکرار مناسب زمان تصویربرداری است که در مطالعه پدیده‌های ژئودینامیکی حائز اهمیت بالایی است. از طرفی نیاز به دقت‌های مکانی متنوع متناسب با اهداف مورد مطالعه، موجب ظهور و توسعه طیف وسیعی از سنجنده‌ها از

۹/۰۷ میکرومتر معادل باند ۱۲ این سنجنده جذب نشان می‌دهند؛ که از این ویژگی می‌توان جهت تفکیک بخش‌های سیلیسی استفاده نمود (Di Tommaso & Rubinstein, 2006).

در این پژوهش از تصویر ASTER به شماره ۱۵۰۵۰۱ که در تاریخ ۲۰۰۱/۵/۱۵ برداشت شده، برای شناسایی و تفکیک کانی‌های دگرسانی هیدروترمالی همراه با کانی‌زایی طلا در ناحیه معدنی هیرد مورد استفاده شده است. این تصاویر از نظر پردازش در تراز IB قرار دارند که معادل داده‌های رادینس در سنجنده به‌شمار می‌آیند. به منظور از بین بردن تأثیرات جوی و توپوگرافی و تبدیل داده‌های رادینس به داده‌های انعکاسی، باید تصحیحات رادیومتری روی این داده‌ها صورت گیرد.

برای پردازش و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای از نرم‌افزار Envi ver. 4.2 استفاده شده است.

## ۲- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

ناحیه معدنی هیرد بین عرض‌های جغرافیایی  $31^{\circ} 54'$  تا  $31^{\circ} 59'$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $59^{\circ} 08'$  تا  $59^{\circ} 15'$  خاوری در فاصله ۱۰۵ کیلومتری جنوب بیرجند واقع شده است. این ناحیه از نظر تقسیم‌بندی ایالت‌های ساختاری پوسته ایران‌زمین در حاشیه شمال خاوری پهنه لوت و نیز منتهی‌الیه باختری ایالت ساختاری سیستان قرار گرفته است. ایالت ساختاری سیستان یا همان زمین‌درز سیستان (Sistan suture zone)، در خاور ایران و با راستای کلی شمال - جنوب، در واقع پهنه‌ای برخوردی است که حاصل بسته‌شدن باریکه اقیانوسی خاور ایران بین پهنه لوت و صفحه افغان در مزوزویک پسین - ترشیری پیشین می‌باشد (Tirrul et al., 1983). بر اساس نقشه زمین‌شناسی - معدنی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ هیرد (عسکری و صفری، ۱۳۸۲)، واحد شیلی - ماسه‌سنگی ژوراسیک، قدیمی‌ترین رخنمون سنگی منطقه است که با یک دگرشیبی به توالی رسوبی کرتاسه بالایی شامل واحدهای شیلی، کنگلومرای، ماسه‌سنگی، آهکی - مارنی، توف‌های آهکی و آهک ماسه‌ای تبدیل می‌شود. این توالی رسوبی، توسط یک کنگلومرای قاعده‌ای پالئوسن و یک کنگلومرای قاعده‌ای ائوسن به سکانس ماگمایی ترشیری (شامل سنگ‌های ولکانیکی و پلوتونیک) متصل می‌شود. توده‌های نفوذی با ترکیب گرانودیوریت، کوارتزموئزودیوریت و گابروئوریت با سن بعد از ائوسن، در قسمتی از واحدهای ولکانیکی منطقه که عمدتاً دارای ترکیب آندزیت و توف هستند؛ نفوذ کرده و در مواردی

مکانی ۳۰ متر دارند و ۵ باند مادون قرمز حرارتی (TIR) با محدوده طول موج ۸/۱۲۵ - ۱۱/۶۵ میکرومتر، قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر دارند (Fujisada et al., 2001). (جدول ۱)

سنجنده ASTER توسط ماهواره‌ای به نام TERRA حمل می‌شود و در دسامبر ۱۹۹۹ توسط NASA و وزارت صنعت و تجارت اقتصادی ژاپن (MWTI) در مدار زمین قرار گرفت. فاصله آن از زمین ۷۰۵ کیلومتر و گردش آن به صورت قطبی - قطبی است و در ساعت  $10:30'$  به وقت محلی و تقریباً هر ۱۰۰ ثانیه از عرض استوا عبور می‌کند. هر تصویر منطقه‌ای به وسعت  $60 \times 60$  کیلومتر را پوشش می‌دهد.

از سال ۲۰۰۰ داده‌های چندطیفی ASTER برای مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است (Ninomiya, 2002, 2004; Rowan et al., 2003; Rowan & Mars, 2003). مطالعه داده‌های سنجنده ASTER و مقایسه آن با داده‌های سنجنده  $ETM^+$  نشان می‌دهد که با استفاده از آن می‌توان مناطق دگرسان را با دقت بیشتری شناسایی نمود. ویژگی‌هایی که این سنجنده را به ابزار مناسبی برای اکتشاف ذخایر معدنی تبدیل کرده، در زیر خلاصه شده است:

- تصاویر این سنجنده از تفکیک طیفی خوبی در محدوده مادون قرمز برخوردارند. در این محدوده طیفی می‌توان بسیاری از کانی‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد.

- برخوردار از قدرت تفکیک رادیومتری بسیار خوب (۱۰ و ۱۲ بیت)، تصاویری با کیفیت و نسبت سیگنال به نوفه (نویز) سیار بالا را موجب شده است.

- این سنجنده با داشتن ۵ باند حرارتی (در محدوده طول موج ۸/۱۲۵-۱۱/۶۵ میکرومتر) با دقت رادیومتری ۱۲ بیت امکان تشخیص و تفکیک سیلیکات‌ها و انواع واحدهای سنگی را فراهم می‌سازد،

- سنجنده ASTER با قابلیت برداشت تصاویر Stereo امکان تهیه مدل ارتفاعی رقومی را فراهم می‌کند.

مطالعات اسپکترومتری نشان داده است که کانی‌های دارای عامل آنیونی Al-OH در طول موج ۲/۲ میکرومتر (معادل باند ۶ ASTER) و کانی‌های دارای عامل آنیونی Mg-OH و کربنات‌ها در طول موج ۲/۳ میکرومتر (معادل باند ۸) جذب مشخصی نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از باندهای ۶ و ۸ می‌توان کانی‌های آلومینیوم‌دار مانند کانی‌های ایلیت، کائولینیت، آلونیت و یا مسکویت - سرسیت را از کانی‌هایی مانند کلریت، اپیدوت و یا کربنات تشخیص داد (Rowan et al., 2006). کوارتز و به‌طور کلی کانی‌های سیلیسی در محدوده طول موج ۸/۲۹ میکرومتر معادل باند ۱۰ سنجنده ASTER و

توپوگرافی حذف می‌شود و با استفاده از میانگین هندسی مکانی (میانگین تمام پیکسل‌ها برای هر یک از باندها) تأثیرات مربوط به تابش خورشید، عبورپذیری جوی و نیز خطای دستگاهی حذف می‌شود. برای انجام تصحیحات اتمسفری و تبدیل داده‌های رادیانس حرارتی به قابلیت انتشار (Emissivity) از روش Emissivity Normalization استفاده شد.

### ۳-۲- تحلیل داده‌های مادون قرمز کوتاه (SWIR)

به منظور مشاهده مناطق دگرسان، ابتدا از ترکیب باندی RGB:468 استفاده شد. در این ترکیب باندی، کانی‌های مربوط به زون پروپلیتیک (کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و کانی‌های رسی و سریست به رنگ صورتی مشاهده می‌شوند (تصویر ۲-الف).

تبدیلات نسبت باندی نیز روش مفیدی برای تشخیص کانی‌های دگرسان است، به طوری که کانی‌های حاوی پیوند Al-OH در نسبت‌های 4/5 و 4/6 و کانی‌های با پیوند Fe-OH در نسبت باندی 4/7، دارای مقادیر بالایی بوده از این رو در تصویر رنگی RGB:4/5, 4/6, 4/7 کانی‌های دگرسان به رنگ سفید نمایان می‌شوند. به منظور حذف اثرات پوشش گیاهی، ماسک پوشش گیاهی روی منطقه اعمال شده است (شکل ۲-ب).

در این پژوهش به منظور شناسایی بهتر مناطق دگرسانی از روش Binary Encoding نیز استفاده شد. در این روش داده‌های مورد تحلیل و داده‌های مرجع، بر اساس نزدیکی آنها به میانگین طیفی، به کدهای صفر و یک تبدیل می‌شوند. داده‌های مورد تحلیل، با استفاده از عملگر Exclusive OR با داده‌های مرجع مقایسه شده و بر اساس شباهت آنها در یکی از گروه‌های مرجع طبقه‌بندی می‌شوند (Richards & Xiuping, 1999). در این روش، به تعداد هر یک از عضوهای انتهایی (کانی‌های مرجع) به کار برده شده، تصویر خروجی به دست می‌آید.

در این مطالعه نمودارهای طیفی ۱۲ کانی شامل آلونیت، ایلیت، کائولینیت، مسکویت، مونت‌موریلونیت، پیروفیلیت، کلسیت، کلریت، اپیدوت، گوتیت، همتایت و جاروسیت به‌عنوان داده مرجع استفاده گردید. جهت ایجاد داده‌های مرجع از مجموعه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استفاده شد. برای مطابقت باندهای طیفی موجود در مجموعه USGS با تصاویر ASTER، طیف‌های آزمایشگاهی باید به تعداد باندهای تصویر (۱۴ باند)، بار دیگر نمونه‌برداری شوند.

در تصاویر ۳ و ۵، نتایج حاصل از روش Binary Encoding در روی زمینه‌ای از تصویر باند ۳ (توپوگرافی) مشاهده می‌شوند. لازم به ذکر است که با اعمال

موجبات ایجاد دگرسانی و کانه‌زایی طلا، مس، سرب و روی را فراهم آورده‌اند (شکل ۱).

حاصل مطالعات و پی‌جویی‌های اولیه توسط سازمان زمین‌شناسی کشور در ناحیه مذکور، معرفی ۴ محدوده امیدبخش معدنی در نقشه زمین‌شناسی - معدنی ۱:۲۰۰۰۰ هیرد بود. بر این اساس محدوده امیدبخش معدنی (۱)، در مرکز ناحیه مطالعاتی و به فاصله ۲/۵ کیلومتری جنوب باختر روستای هیرد قرار گرفته و با مساحتی بالغ بر ۳ کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین محدوده امیدبخش معدنی به‌شمار می‌رود. این محدوده از لحاظ سنگ‌شناسی شامل سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی، نفوذی و رسوبی می‌باشد. محدوده امیدبخش معدنی (۲)، در حدفاصل محدوده (۱) و روستای هیرد قرار گرفته و غالب سنگ‌های تشکیل دهنده آن آتشفشانی و نفوذی می‌باشند. محدوده امیدبخش معدنی (۳)، در باختر محدوده مطالعاتی و فاصله ۴/۵ کیلومتری باختر روستای هیرد واقع شده است. عمده سنگ‌های این محدوده شامل آذرآوری‌ها، گدازه‌ها و توده نفوذی اسیدی می‌باشند. بالاخره محدوده امیدبخش معدنی (۴)، در جنوب محدوده واقع شده که عمده مساحت آن توسط واریزه و آبرفت پوشیده شده است (شکل ۱).

برای بررسی مناطق دگرسان از روش‌های مختلف پتروگرافی و پراش پرتو اشعه ایکس (XRD) استفاده شده است. مهم‌ترین دگرسانی‌های تشخیص داده شده شامل دگرسانی آرژیلیک، پروپلیتیک، اسکارنی، سیلیسی، سریستی، تورمالینی و کربناتی می‌باشند. مقایسه نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای با مشاهدات صحرایی و نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو اشعه ایکس (XRD) و مطالعه مقاطع نازک، انطباق خوبی با یکدیگر نشان می‌دهند.

### ۳- تحلیل داده‌ها و بحث

#### ۳-۱- پیش پردازش داده‌ها

به منظور انجام تصحیحات هندسی، از داده‌های IRS مربوط به ناحیه که پیش‌تر توسط نقشه توپوگرافی رقمی ۱:۲۵۰۰۰ هیرد تصحیح شده بود، استفاده گردید و تصویر ASTER با روش تصویر به تصویر نسبت به تصویر IRS تصحیح شد.

برای انجام تصحیحات رادیومتری و تبدیل داده‌های رادیانس VNIR-SWIR به داده‌های انعکاسی، از روش Log Residual استفاده شد. در این روش از اطلاعات آماری خود صحنه برای کالیبراسیون استفاده می‌شود و داده‌های رادیانس نسبت به میانگین هندسی طیفی و سپس میانگین هندسی مکانی نرمال می‌شوند. با استفاده از لگاریتم میانگین هندسی طیفی (میانگین تمام باندها برای یک پیکسل)، تأثیرات

ASTER استفاده می‌شود (Di Tommaso & Rubinstein, 2006). طیف کوارتز نشان‌دهنده جذب در باندهای ۱۰ و ۱۲ است و چند پیک کوچک در باند ۱۱ نشان می‌دهد. Ninomiya در سال ۲۰۰۲، چند اندیس کانی‌شناسی ASTER را برای مشخص کردن کانی‌ها و ترکیب شیمیایی سیلیس، کربنات و سیلیکات‌ها پیشنهاد داده است. اندیس Qi (Ninomiya, 2002) به صورت زیر تعریف شده است:

$$Q_i = (b_{11} * b_{11}) / (b_{10} * b_{12})$$

انتظار می‌رود که این اندیس برای کوارتز بالا و برای فلدسپات پتاسیم پایین باشد (Ninomiya et al., 2005).

به منظور تشخیص کانی‌های سیلیسی، اندیس Qi برای داده‌های حرارتی محاسبه شد و بعد از اعمال مقدار حد (حدود ۱/۰۸۳) پیکسل‌هایی که در آنها مقدار این اندیس بالاتر از مقدار حد بود، به عنوان مناطق سیلیسی شناخته شدند. در تصویر ۸. الف - نتیجه بدست آمده، روی زمینه‌ای از تصویر باند ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که با توجه به رخنمون‌های کوچک دگرسانی سیلیسی و همچنین قدرت تفکیک زمینی ۹۰ متر باندهای حرارتی سنجنده ASTER، مناطق تفکیک شده سیلیسی شامل رگه‌های سیلیسی و سنگ‌های سیلیسی شده می‌باشد (شکل ۸-ب).

شکل ۹- الف طیف یک نمونه سیلیسی که توسط طیف‌سنج Micro-FTIR از بخش‌های سیلیسی مربوط به ذخیره پورفیری ناحیه Infiernillo واقع در آرژانتین اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد (Di Tommaso & Rubinstein, 2006). همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، کوارتز و ترکیبات سیلیسی، در محدوده طول موج ۸/۲۹ میکرومتر معادل باند ۱۰ سنجنده ASTER و ۹/۰۷ میکرومتر معادل باند ۱۲ این سنجنده، جذب نشان می‌دهند؛ که از این ویژگی می‌توان برای تفکیک بخش‌های سیلیسی استفاده نمود (Di Tommaso & Rubinstein, 2006). در شکل ۹- ب طیف حاصل از طیف‌سنج Micro-FTIR نسبت به سنجنده ASTER نمونه‌برداری مجدد شده است و در شکل ۹- پ منحنی بازتاب طیفی بخش‌های سیلیسی مربوط به ناحیه معدنی هیرد که از تصویر Emissivity به دست آمده است، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شباهت زیادی بین این نمودار با نمودار مربوط به شکل ۹- ب وجود دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

ارزیابی و پردازش داده‌های ASTER، انطباق خوبی را با داده‌های زمینی

مقادیر حد برای هر یک از تصاویر، پیکسل‌های دارای ارزش‌های پایین‌تر از این مقادیر حذف شده و تنها پیکسل‌های با مقادیر بالا که احتمال وقوع کانی مورد نظر در آنها بیشتر است، حفظ شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از روش‌های ترکیب باندی و تبدیلات نسبت باندی، انطباق نسبتاً خوبی با این روش نشان می‌دهند به طوری که زون‌های پروپلیتیک، آرژلیک و فیلیک (تصویر ۲)، به ترتیب با کانی‌های اپیدوت، کلریت، کلسیت؛ ایلیت، کائولینیت و سریسیت مطابقت دارند (شکل ۵ و ۳- الف).

به منظور مقایسه نتایج حاصل از روش‌های ترکیب باندی، تصاویر نسبتی و Binary Encoding با داده‌های زمینی، نمودار طیفی نقاط انتخاب شده (نقاط A, B, C) روی تصاویر ۳ و ۵، با طیف‌های آزمایشگاهی (مجموعه USGS) مربوطه مقایسه شده‌اند. جهت مطابقت باندهای طیفی موجود در مجموعه USGU با تصاویر ASTER، طیف‌های آزمایشگاهی باید به تعداد باندهای تصویر (۱۴ باند)، نمونه‌برداری مجدد شوند.

در شکل ۷ پروفیل‌های طیفی مربوط به نقاط مشخص شده در تصاویر ۳ و ۵ نشان داده شده است. این نقاط از قسمت‌هایی که دگرسانی آنها طی مشاهدات صحرایی مشخص شده، انتخاب شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۷- ث مشاهده می‌شود، کانی‌های کلریت، اپیدوت و کلسیت جذب بالایی در محدوده ۲/۳۳ میکرومتر دارند. علت وقوع جذب در این محدوده، وجود عامل آنیونی Mg-OH و CO<sub>3</sub> است. در شکل ۷- ج، در محدوده طول موج ۲/۲۰ میکرومتر جذب بالایی صورت گرفته که با حضور کانی‌های رسی و سریسیت مطابقت دارد. علت وقوع جذب در این محدوده، وجود عامل آنیونی Al-OH است. علاوه بر این، منحنی طیفی این کانی‌ها با منحنی طیفی آزمایشگاهی آنها مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شباهت زیادی بین منحنی طیفی نقاط انتخاب شده در تصویر با منحنی‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

#### ۳-۳- تحلیل داده‌های مادون قرمز حرارتی (TIR)

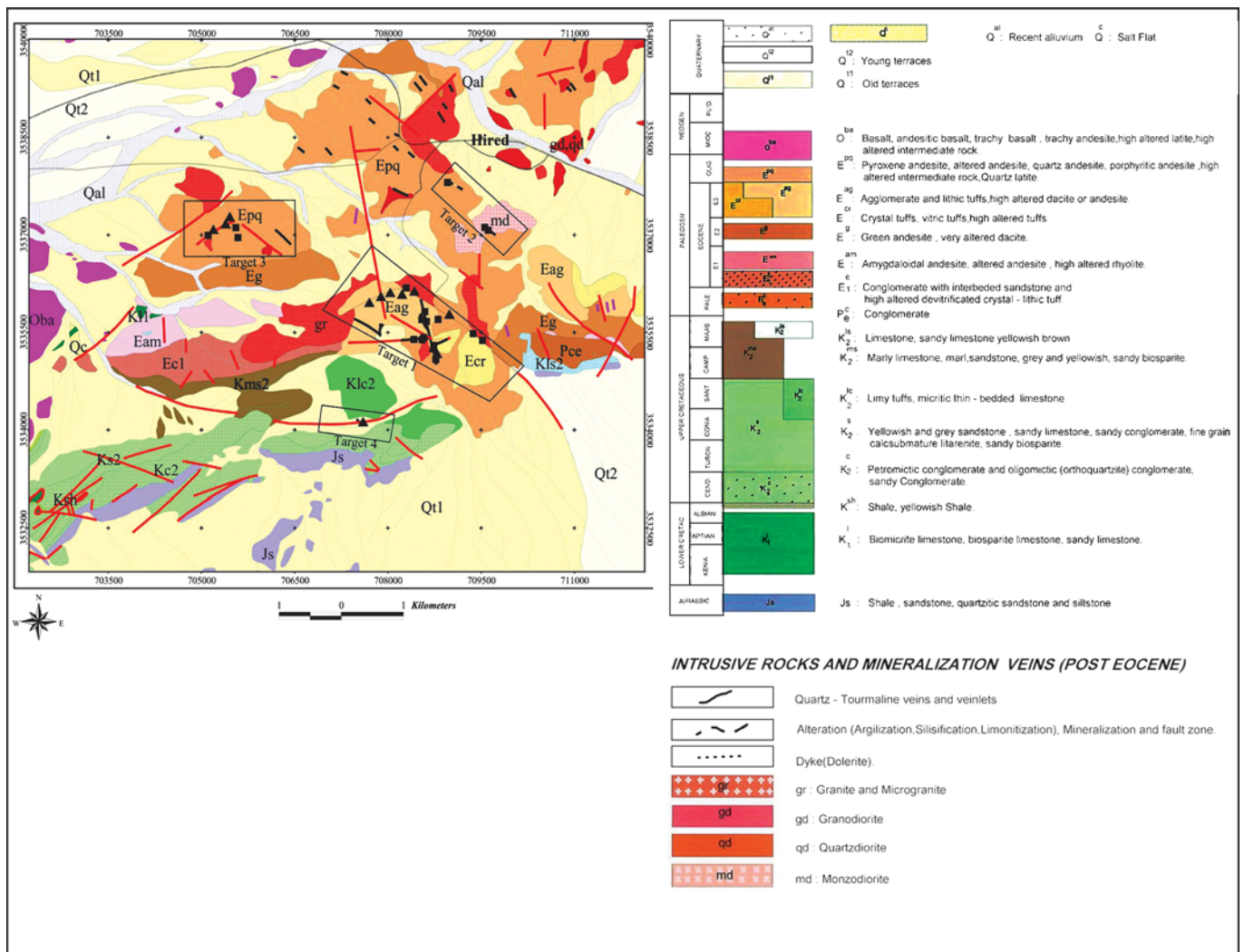
برای انجام تصحیحات اتمسفری و تبدیل داده‌های رادیانس حرارتی به قابلیت انتشار (Emissivity) از روش Emissivity Normalization استفاده شد. کانی‌های سیلیسی، سیلیکات‌ها و کربنات‌ها در ارتباط با پیوندهای C-O و Si-O اشکال طیفی مشخصی را در ناحیه مادون قرمز حرارتی نشان می‌دهند؛ از این رو برای تشخیص این کانی‌ها که به فراوانی در سنگ‌های سطح زمین حضور دارند، از باندهای TIR سنجنده

تصاویر ASTER ابزار نیرومندی جهت اکتشاف ذخایر در مراحل مقدماتی محسوب می‌شوند، چرا که این تصاویر با دارا بودن داده‌هایی با دقت طیفی بالا می‌توانند هزینه و زمان مورد نیاز برای ارزیابی زمینی را به طور مؤثری کاهش دهند.

### سپاسگزاری

بدینوسیله از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور بخصوص گروه دورسنجی که نهایت همکاری را در تهیه این مقاله و در اختیار گذاشتن داده‌های ماهواره‌ای داشته‌اند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

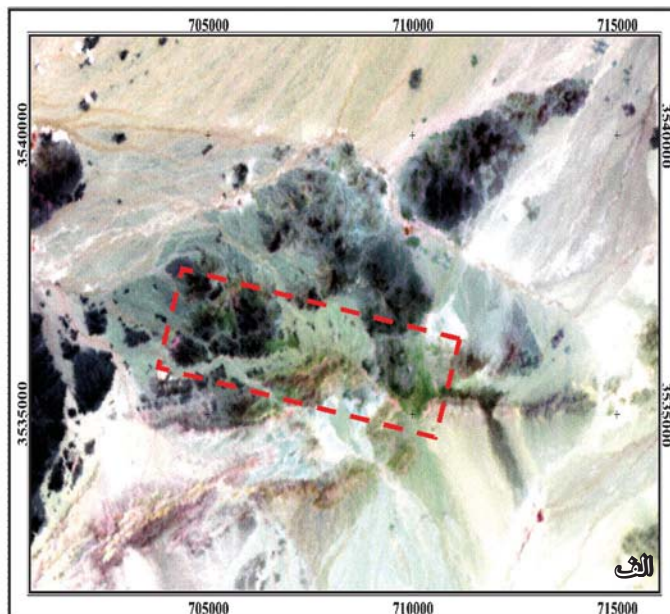
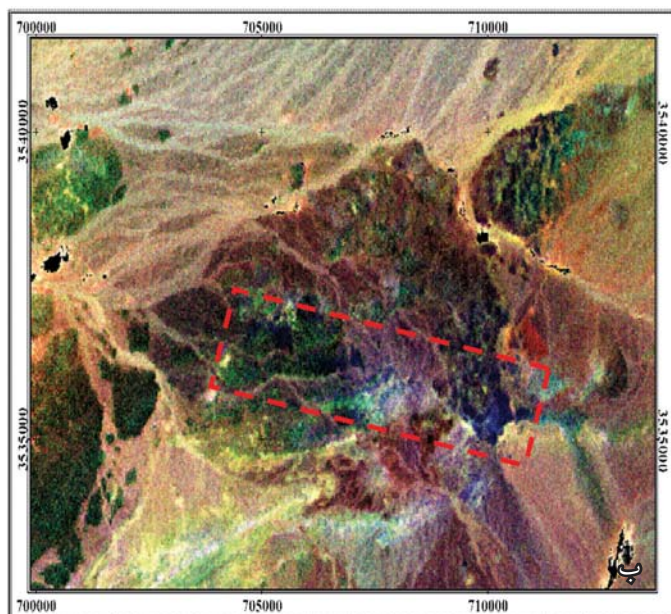
در ناحیه معدنی هیرد نشان می‌دهد. از تحلیل طیفی انعکاسی در محدوده SWIR، برای شناسایی کانی‌های دگرسان منطقه استفاده شده است. در زون آرژلیک این ناحیه کانی‌های ایلیت و مقداری کائولینیت، در زون فیلک کانی سرسیت و در زون پروپلینیک کانی‌های اپیدوت و مقداری کلریت و کلسیت تشخیص داده شده است. از تحلیل داده‌های حرارتی این سنجنده نیز برای تفکیک بخش‌های سیلیسی استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از پردازش تصاویر ASTER با مشاهدات صحرائی و نتایج حاصل از تحلیل پراش پرتو اشعه ایکس (XRD) و مطالعه مقاطع نازک نمونه‌های برداشت شده از قسمت‌های دگرسان انطباق خوبی را با یکدیگر نشان می‌دهند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که



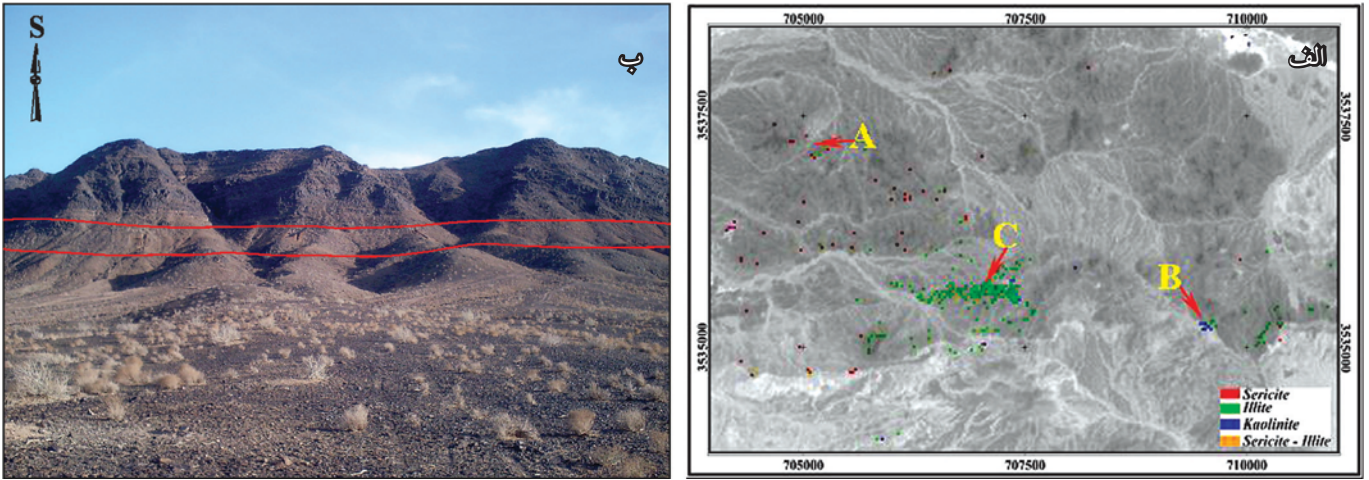
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی - معدنی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ محدوده معدنی هیرد (عسکری و صفری، ۱۳۸۲، با رسم مجدد)، مثلث‌ها و مربع‌های مشکی به ترتیب مکان تعدادی از گمانه‌ها و ترانسه‌های حفر شده را نشان می‌دهند.

جدول ۱- ویژگی‌های طیفی سنجنده ASTER

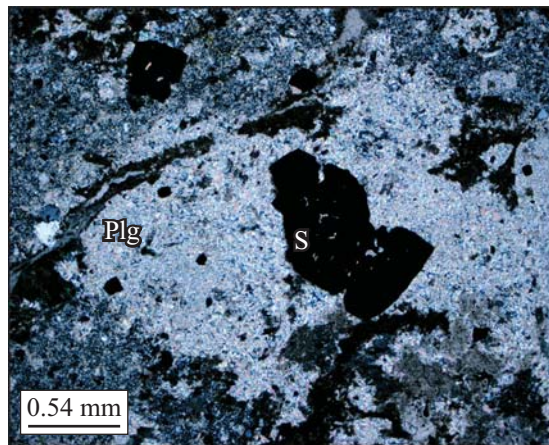
Subsystem	Band no.	Spectral range ( $\mu\text{m}$ )	Spatial resolution (m)
VNIR	1	0.52–0.60	15
	2	0.63–0.69	
	3N	0.76–0.86	
	3B	0.76–0.86	
SWIR	4	1.60–1.70	30
	5	2.145–2.185	
	6	2.185–2.225	
	7	2.235–2.285	
	8	2.295–2.365	
	9	2.360–2.430	
	TIR	10	
11		8.475–8.825	
12		8.925–9.275	
13		10.25–10.95	
14		10.95–11.65	



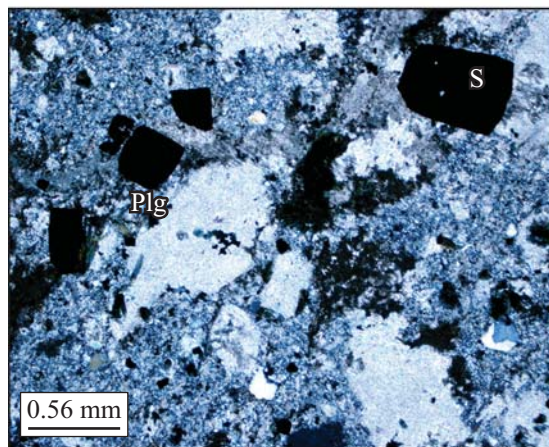
شکل ۲- الف) ترکیب باندهای RGB:468 برای مشاهده مناطق دارای دگرسانی رسی و سریسیت (صورتی) و پروپلیتیک (سبز). ب) تصویر RGB از نسبت‌های باندهای (4/5, 4/6, 4/7) که در آن مناطق دگرسان به رنگ سفید مشاهده می‌گردد.



شکل ۳- الف) تصویر پراکنندگی کانی‌های رسی و سریسیت که با استفاده از روش Binary Encoding به دست آمده است. کانی‌های رسی و سریسیت با رنگ‌های مختلف در زمینه‌ای از تصویر باند ۳ نشان داده شده‌اند. ب) پهنه برشی - گسلی سیه کمر که دارای بیشترین دگرسانی رسی و سریسیت است.



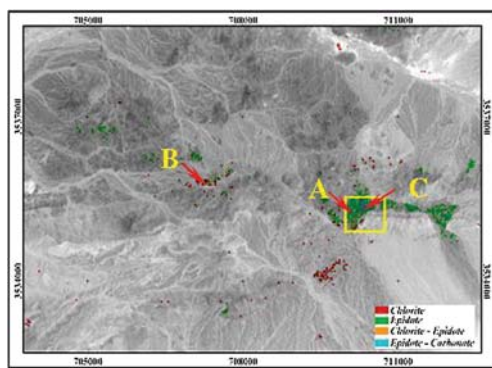
الف



ب

شکل ۴- الف) نمایی از یک درشت بلور (فئوکریست) پلاژیوکلاز آرژیلی شده همراه با مقداری سریسیت (XPL, 40X). ب) منظره‌ای از بافت پورفیری اولیه در آندزیت‌های آرژیلی شده، بلورهای پلاژیوکلاز تماماً به مجموعه‌ای از کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (XPL, 40X).



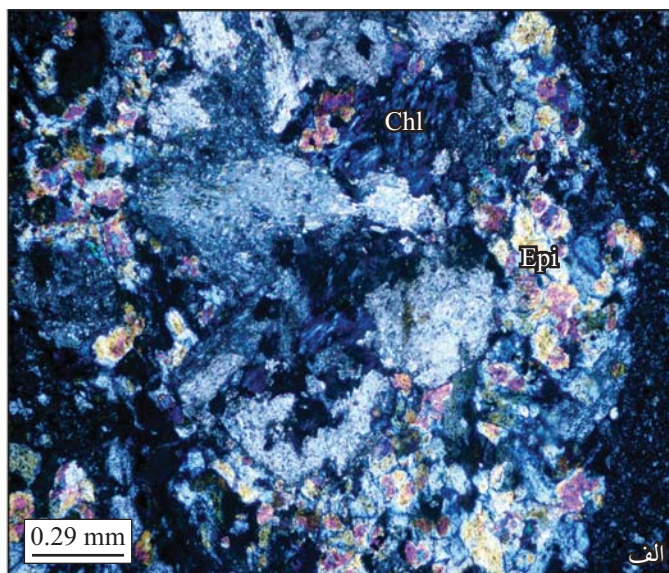
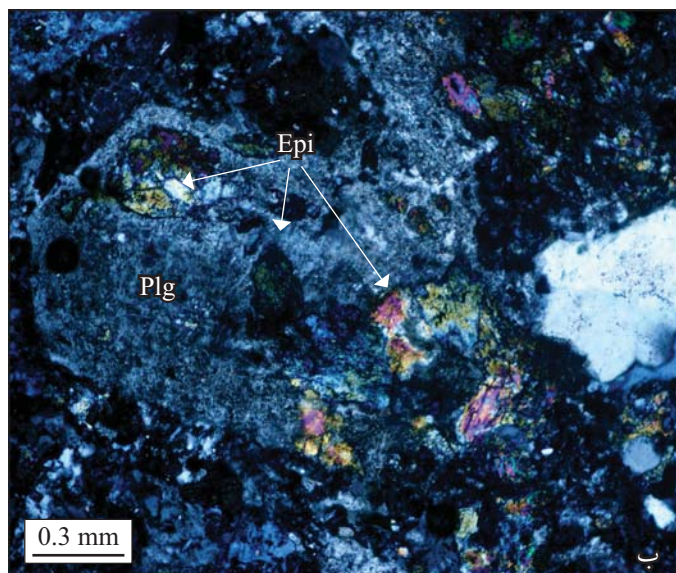


الف

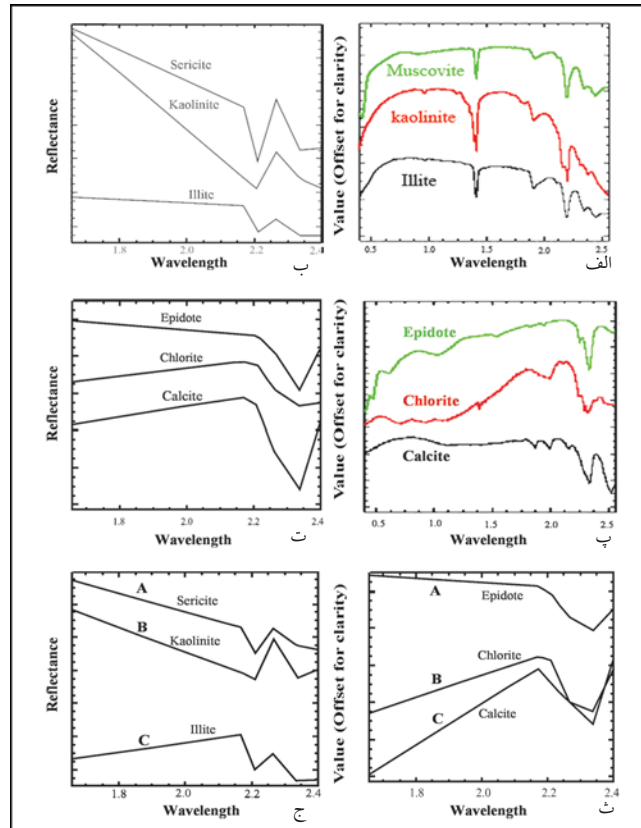


پ

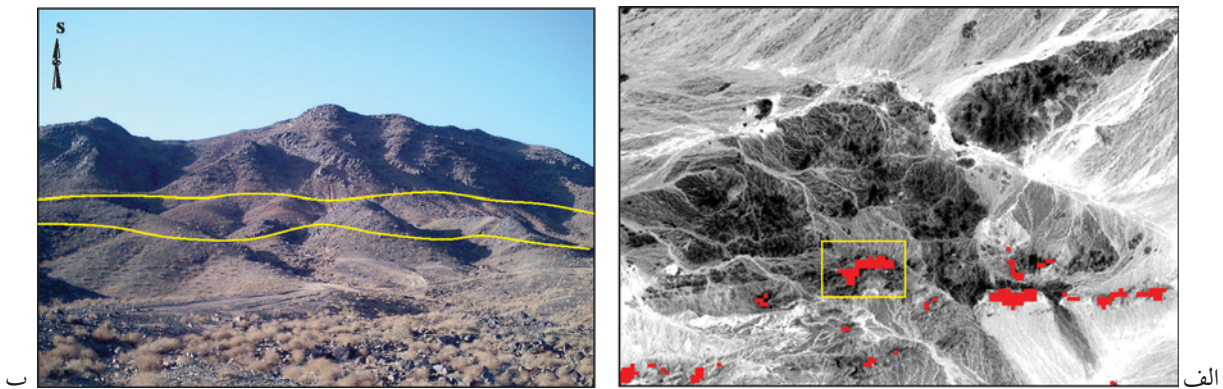
شکل ۵- الف) تصویر پراکندگی کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت که با استفاده از روش Binary Encoding به دست آمده است. کانی‌ها با رنگ‌های مختلف در زمینه‌ای از تصویر باند ۳ نشان داده شده‌اند. کادر زرد موقعیت شکل ب را نشان می‌دهد. ب) واحدهای آتشفشانی پروپیلیتی (سمت چپ) در مجاورت سنگ‌های کربناته (سمت راست) مشاهده می‌گردند.



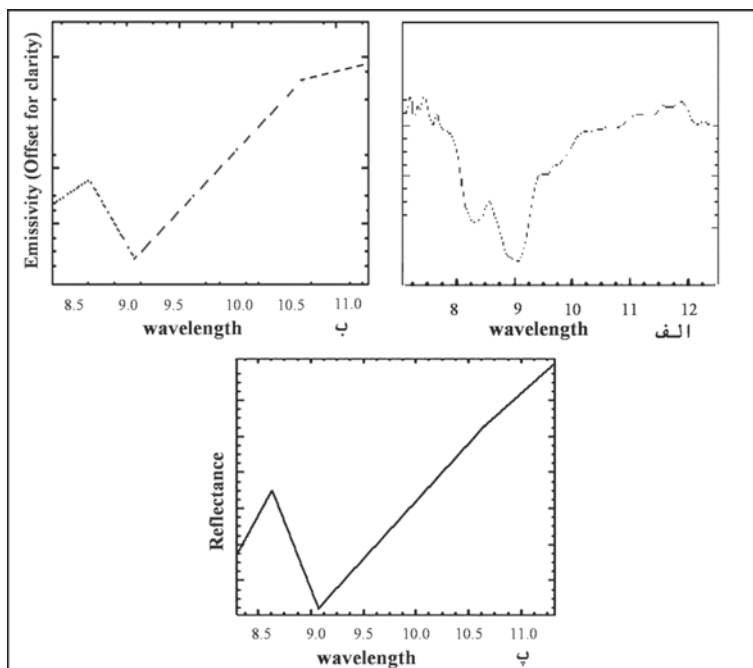
شکل ۶- الف) دگرسانی پلاژیو کلاز به مجموعه‌ای از کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت، (XPL, 100X)، ب) نمایی از اپیدوت‌های درشت بلور و خودشکل که جایگزین کانی پلاژیو کلاز شده‌اند (XPL, 100X)



شکل ۷-الف) طیف بازتاب آزمایشگاهی کانی‌های سریسیت، کائولینیت و ایلیت (مجموعه USGS)، ب) منحنی بازتاب طیفی کانی‌های سریسیت، کائولینیت و ایلیت که نسبت به سنجنده ASTER نمونه‌برداری شده‌اند و در محدوده طول موج ۲/۲ میکرومتر (معادل باند ۶ ASTER)، بیشترین جذب را نشان می‌دهند، پ) طیف بازتاب آزمایشگاهی کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت (مجموعه USGS)، ت) منحنی بازتاب طیفی کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت که نسبت به سنجنده ASTER نمونه‌برداری شده‌اند و در محدوده طول موج ۲/۳ میکرومتر (معادل باند ۸ ASTER)، بیشترین جذب را نشان می‌دهند، ث) منحنی بازتاب طیفی کانی‌های سریسیت، کائولینیت و ایلیت در ناحیه معدنی هیرد، ج) منحنی بازتاب طیفی کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت در ناحیه معدنی هیرد.



شکل ۸-الف) پراکنندگی سیلیس که با استفاده از اندیس  $Q_1$  به دست آمده است. بخش‌های سیلیسی با رنگ سرخ بر روی زمینه‌ای از تصویر باند ۱ مشاهده می‌شوند. کادر زرد موقعیت شکل ب را نشان می‌دهد. ب) نمایی از بخش‌های سیلیسی شده پهنه برشی کانه‌دار در دامنه کوه سیه کمر.



شکل ۹- الف) طیف نمونه سیلیسی که توسط طیف‌سنج Micro-FTIR اندازه‌گیری شده است (Di Tommaso & Rubinstein, 2006)  
 ب) نمودار حاصل از بخش‌های سیلیسی که به باندهای ترمال سنجنده ASTER، نمونه‌برداری مجدد شده است،  
 پ) منحنی طیفی مربوط به بخش‌های سیلیسی در ناحیه معدنی هیرد.

## کتابنگاری

عسکری، ع. و صفری، م.، ۱۳۸۱- گزارش نقشه زمین‌شناسی معدنی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ ناحیه امید بخش معدنی طلای هیرد (شمال غرب نهبندان)، طرح اکتشافات مواد معدنی در جنوب خراسان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

## References

- Askari, A. & Safari, M., 2003 –Report of geological-mining map (1:20000) Hired minig area (NW Nehbandan), Geological Survey of Iran.
- 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: 1-16.
- Fujisada, H., Iwasaki, A. & Hara, S., 2001- ASTER stereo system performance. *Proceeding of SPIE, the International Society for Optical Engineering* 4540:39-49.
- Ninomiya, Y., 2002- Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. *Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering* 4710:191-202.
- Ninomiya, Y., 2004- Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering* 5234:180-190.
- Ninomiya, Y., Fu, B. & Cudahy, T.J., 2005- Detecting Lithology with radiance at the sensor data of ASTER multispectral TIR. *Remote Sensing of Environment* 99:127-139.



- Richards, J.A. & Xiuping Jia, 1999- Remote sensing digital image analysis, Springer, 363 p.
- Rowan, L.C. & Mars, J.C., 2003- lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emissivity and Reflection Radiometer ASTER data. Remote Sensing of Environment 84:350-366.
- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J. & Mars, J.C., 2003- Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada using the Advanced Spaceborn Thermal Emissivity and Reflection Radiometer ASTER . A new satellite-imagind system. Economic Geology 98:1019-1027.
- Rowan, L.C., Schmidt, R.G., & Mars, J.C., 2006- Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data, Journal of Remote Sensing of Environment, 104: 74-87.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J.& Camp, V.E., 1983- The Sistan suture zone of eastern Iran, Geol. Soc. Am. Bull., 94: 134-150.