

# مدل سازی اکتشافی کانسارهای فلزی با استفاده از پردازش داده‌های ASTER و OLI برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در منطقه دولت آباد اسفندقه، استان کرمان

سیده سکینه موسوی<sup>۱</sup>، مهدی هنرمند<sup>۲</sup>، هادی شهرباری<sup>۳</sup> و مهدیه حسینجانی زاده<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۸

## چکیده

اکتشاف مواد معدنی در منطقه اسفندقه واقع در جنوب خاور استان کرمان به دلیل تنوع کانسارهای فلزی نظیر کانسارهای مس سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، اسکارن آهن و منگنز آتشفشانی، پیچیدگی خاصی دارد. این تحقیق با هدف ارائه مدل اکتشافی این نوع کانی‌زایی‌ها و تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از داده‌های دورسنجی انجام شد. از تصاویر سنجنده‌های ASTER و OLI و روش‌های پردازش تصویر متنوعی شامل ترکیب رنگی نسبت‌های باندی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی و شاخص‌های SI و QI برای شناسایی هاله‌های دگرسانی‌های گرمایی استفاده شد. اعتبارسنجی نتایج از طریق مطالعات صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفت. دگرسانی‌های آرژلیک، فلیک، پروپیلیتیک و کانی‌های اکسید و هیدروکسیدهای آهن از طریق ترکیب رنگی نسبت‌های باندی نظیر (B6)/(B4+B7) در رنگ قرمز، (B5)/(B4+B6) در رنگ سبز و (B8)/(B7+B9) در رنگ آبی سنجنده ASTER بارزسازی شدند. نقشه برداری دگرسانی گرمایی نیز با تحلیل مؤلفه اصلی باندهای انتخابی ۲، ۴، ۶ و ۷ سنجنده OLI و باندهای ۴ تا ۹ سنجنده ASTER و نیز مجموعه‌ای مرکب از باندهای ۲ و ۴ سنجنده OLI به همراه باندهای ۴ تا ۹ سنجنده ASTER موفقیت آمیز بود. باندهای فرسوخ حرارتی ASTER برای محاسبه شاخص‌های SI و QI جهت بارزسازی هاله‌های سیلیسی استفاده شدند. نقشه پتانسیل معدنی منطقه اسفندقه شامل هفت ناحیه مستعد همچون معادن مس سرگز کوه، منگنز حسین آباد و سنگ آهن اسفندقه با تلفیق نقشه‌های دگرسانی به روش منطق فازی به دست آمد. نتایج نشان داد با انتخاب مناسب سنجنده‌ها و روش‌های پردازش تصویر می‌توان در مراحل شناسایی و پی‌جویی اقدام به مدل‌سازی اکتشافی و نهایتاً تهیه نقشه پتانسیل معدنی کرد.

**کلیدواژه‌ها:** اسفندقه، OLI، ASTER، دگرسانی، مس سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد، اسکارن، منگنز آتشفشانی، تحلیل مؤلفه اصلی.

E-mail: mehonarmand167@yahoo.com

\*نویسنده مسئول: مهدی هنرمند

## ۱- پیش‌نوشتار

به منظور نقشه‌برداری از لیتولوژی کمپلکس افیولیت صوغان بهره گرفتند. علاوه بر این، (Mohebi et al. (2015) از اطلاعات دورسنجی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی برای بررسی ساختاری کانی‌زایی مس پورفیری در کوه هنزا (استان کرمان) استفاده کردند.

تاکنون نقاط متعددی در منطقه اسفندقه (به ویژه بخش جنوب باختر ورقه اسفندقه) با استفاده از روش‌های مختلف اکتشافی به عنوان ذخایر کانی‌های فلزی، شناسایی شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. مطالعات میدانی شامل برداشت‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمی آبراه‌های اساس اغلب این اکتشافات در مراحل شناسایی و پی‌جویی بوده است. مطالعه حاضر تلاش دارد با هدف کسب نتایج مطلوب‌تر در اکتشاف ذخایر معدنی فلزی، راهکارهای اکتشافی مناسبی را از طریق تحلیل داده‌های ماهواره‌ای در مرحله شناسایی و پی‌جویی در بخش شمالی برکه یکصد هزارم اسفندقه ارائه دهد. برای نیل به این هدف از تصاویر سنجنده‌های ASTER و OLI (Operational Land Imager) برای مدل‌سازی کانی‌سازی آهن، مس و منگنز و آگاهی از ارتباط کانی‌سازی با مناطق دگرسان شده و توده‌های نفوذی منطقه استفاده شده است. بنابراین علاوه بر شناخت نقاط قوت هر سنجنده در نقشه‌برداری از دگرسانی‌های مرتبط با لیتولوژی مواد معدنی همراه با هر کدام از آنها، بهترین روش یا مجموعه روش‌های پردازش در هر مورد معرفی و در پایان با تلفیق نتایج حاصل از این روش‌ها نقشه کلی پتانسیل معدنی منطقه تهیه خواهد شد.

منطقه اسفندقه واقع در بخش شمال باختر شهرستان جیرفت در استان کرمان به دلیل قرارگیری در پهنه سندانج- سیرجان و ارومیه- دختر از موقعیت زمین‌شناسی و زمین‌ساختی خاصی برای رخدادهای کانی‌زایی منگنز، کرومیت، مس (سولفید توده‌ای)، آهن (اسکارن) و سایر فلزات (مانند طلا) برخوردار است. بخشی از منطقه به واسطه وجود سنگ‌های بازالتی، کربناتی، چرت‌ها و سنگ‌های فوق بازی سربانتینیزه شده میزبان کانسارهای سولفید توده‌ای (معدن سرگز کوه)، کرومیت (مجموعه معادن کرومیت اسفندقه) و منگنز است. در بخش دیگر توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی، سنگ‌های آتشفشانی ریبولیتی، دایک‌های کراتوفیری، گنبد‌های ریوداسیتی و توده‌های نفوذی تراکی آندزیت دیده می‌شود که احتمال پیدایش سایر کانسارهای آتشفشانی و گرمایی از جمله منگنز (معدن منگنز حسین آباد)، آهن اسکارن (سنگ آهن اسفندقه)، مس و طلا را تقویت می‌کند (شهرکی قدیمی، ۱۳۸۳؛ بدرزاده و همکاران، ۱۳۸۸).

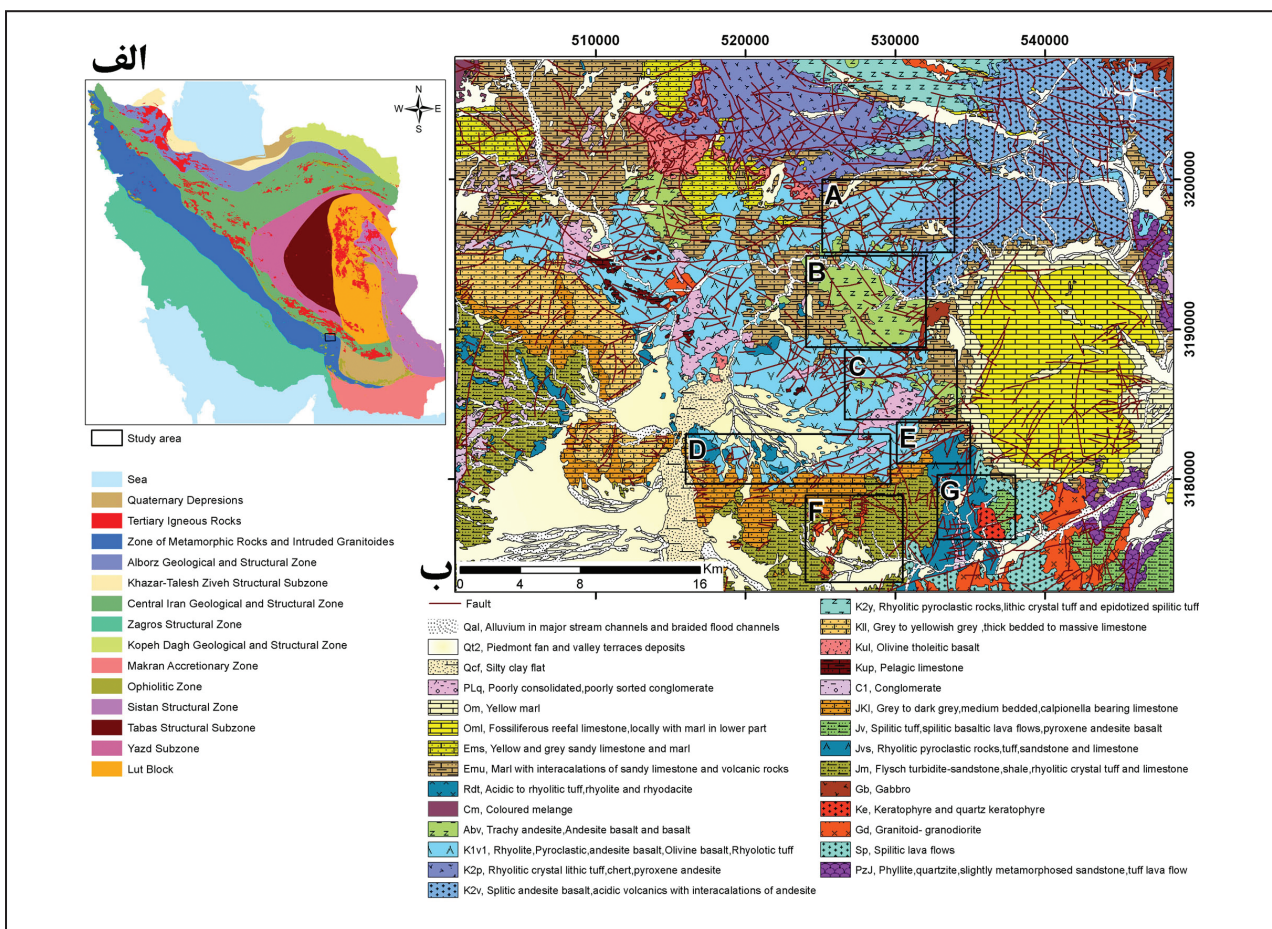
(Volesky et al. (2003) از داده‌های ASTER و Landsat 7 ETM+ به منظور مطالعات زمین‌شناسی کانسارهای مس سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد درون پهنه برشی نئوپروتروزوییک جنوب باختر عربستان استفاده کرده‌اند. (Zho et al. (2008) از روش تحلیل مؤلفه‌های انتخابی، باندهای ۱، ۴، ۵ و ۷ داده‌های سنجنده ETM+ برای نقشه‌برداری دگرسانی فلیک کانسارهای مس پورفیری و اکسیدهای آهن مربوط به کانسارهای اسکارن آهن بهره گرفتند. (Frank et al. (2012) از داده‌های ابرطیفی HyMap، به منظور شناسایی خصوصیات سیستم‌های گرمایی مرتبط با کانی‌سازی کانسارهای سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد باختر استرالیا استفاده کردند. (Sadeghi et al. (2013) از داده‌های ASTER و ETM+ با هدف شناسایی و تشخیص ظهور کانسارهای آهن‌دار در منطقه اسفوردی سود بردند. (Pournamdari et al. (2014) از تصاویر سنجنده‌های ASTER و TM در جنوب ایران

## ۲- جایگاه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در بخش شمالی برکه یکصد هزارم اسفندقه (۵۷ درجه تا ۵۷ درجه و ۳۰ دقیقه طول جغرافیایی و ۲۸ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۲۹ درجه عرض جغرافیایی) قرار دارد (شکل ۱). از دیدگاه ساختاری منطقه اسفندقه در باختر گسل

انوسن واحدهای سنگی شامل ماسه سنگ‌های آهکی و مارن به سن انوسن میانی و زیرین وجود دارد. از دیدگاه سنگ‌شناسی رسوبات الیگومیوسن در این منطقه از دو بخش تشکیل شده‌اند: (۱) بخش‌های زیرین شامل کنگلومرا و ماسه‌سنگ؛ (۲) بخش بالایی عمدتاً شامل آهک‌های ریفتی. این واحد از نظر سنی معادل با سازند قم است. جدیدترین واحدها منطقه اسفندقه رسوبات نئوژن و کواترنر هستند (شکل ۱). از مهم‌ترین کانسارهایی که در این منطقه قرار دارند می‌توان به معدن مس سرگزکوه، معدن آهن اسفندقه و معادن منگنز از جمله معدن منگنز حسین‌آباد اشاره کرد که در موقعیت‌های پر شماری از جنوب خاور نقشه، در چرت‌های منگنزدار واقع در همبری ولکانیک‌های ژوراسیک با سنگ‌های آذرین اسیدی ژوراسیک و همچنین در محل گسل‌های واقع در همبری سنگ‌های آهکی اربیتولین‌دار کرتاسه زیرین و ولکانیک‌های کرتاسه زیرین دیده می‌شوند (شهرکی قدیمی، ۱۳۸۳؛ بدرزاده و همکاران، ۱۳۸۸).

زندان (میناب)، در منتهی الیه پهنه سندانج- سیرجان جنوبی واقع شده و همچنین بخش شمالی آن در پهنه ساختاری ارومیه- دختر (دهج- ساردوییه) قرار گرفته است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌چینه‌ای منطقه را مجموعه سنگ‌های دگرگونی با سن پالئوزویک تا ژوراسیک پایینی تشکیل داده‌اند (شهرکی قدیمی، ۱۳۸۳). ژوراسیک در منطقه بیشتر از رسوبات و سنگ‌های آذرین بیرونی دریایی تشکیل می‌شود که عمدتاً شامل سنگ‌های پوسته اقیانوسی (افیولیت‌ها، بازالت‌های اسپیلیتی، گدازه‌های بازالتی و سنگ‌های آذرین آواری) است. سنگ‌های آذرین درونی شامل گرانودیوریت و گرانیت در بخش جنوب باختری نقشه اسفندقه قرار دارند. نفوذ سنگ‌های خروجی ریولیتی و ریوداستیتی درون مجموعه ولکانیک‌های ژوراسیک باعث دگرسانی شده است. در منطقه اسفندقه، واحد سنگ‌چینه‌ای کرتاسه با سنگ‌های آهک اربیتولین‌دار شروع می‌شود. قدیمی‌ترین واحد سنگی مربوط به انوسن میانی را کنگلومرای قاعده‌ای انوسن میانی تشکیل می‌دهد. در بالای تشکیلات



شکل ۱- الف) موقعیت محدوده مطالعاتی بر روی نقشه پهنه‌های رسوبی- ساختاری ایران (آقناباتی، ۱۳۸۵)؛ ب) موقعیت پتانسیل‌های مس رگه‌ای (محدوده‌های A، B و C)، معدن منگنز حسین‌آباد (D) و پتانسیل معدنی منگنز (محدوده F)، معدن سنگ آهن اسفندقه (E) و کانسار مس سرگزکوه (G) بر روی نقشه زمین‌شناسی اسفندقه (با تغییرات از شهرکی قدیمی، ۱۳۸۳).

### ۳- مواد و روش کار

سریسیت، کلریت، اپیدوت و کلسیت انعکاس بالایی در باند ۴ سنجنده ASTER نشان می‌دهند (شکل ۳).

در زون فیلیک، کانی‌های ایلیت و مسکوویت به واسطه وجود Al-OH یک سیمای جذب طیفی در باند ۶ (طول موج ۲/۲۰ میکرومتر) و سیمای جذب با شدت کمتری در باند ۸ (نزدیکی طول موج ۲/۳۸ میکرومتر) سنجنده ASTER نشان می‌دهند (شکل ۳). علاوه بر این، معمولاً آثار بارزی از ژاروسیت، گوتیت و هماتیت در زون فیلیک و کمتر زون آرژیلیک دیده می‌شود که می‌توان اثرات این کانی‌ها را با یک سیمای جذب طیفی شاخص در نزدیکی طول موج ۰/۴۴ میکرومتر

برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی و مدل‌سازی اکتشافی کانی‌زایی‌های منطقه اسفندقه از تصاویر سنجنده‌های ASTER و OLI استفاده شد. شکل ۲، روند کلی انجام این تحقیق شامل مراحل ورود و آماده‌سازی داده‌ها، پردازش تصاویر، اعتبارسنجی نتایج، ساخت مدل اکتشافی و تهیه نقشه پتانسیل معدنی را نشان می‌دهد.

#### ۳-۱. ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص دگرسانی گرمابی

زون‌های دگرسانی گرمابی را مجموعه‌ای از کانی‌ها تشکیل می‌دهند؛ که حداقل یکی از آنها دارای ویژگی‌های جذب طیفی منحصر به فردی است (Mars and Rowan, 2006; Honarmand et al., 2013). کانی‌های رسی،

کانی‌های شاخص مناطق دگرسانی سیلیسی (به‌طور ویژه کوارتز) در محدوده فرورسرخ حرارتی دارای حداقل گسیلندگی (باندهای ۱۰ و ۱۲ سنجنده ASTER) و حداکثر گسیلندگی (در باندهای ۱۳ و ۱۴ سنجنده ASTER) هستند. سنجنده ASTER با تعداد باندهای بیشتر در محدوده فرورسرخ حرارتی (۵ باند) نسبت به سنجنده OLI جهت شناسایی دگرسانی سیلیسی (کوارتز) مزیت دارد.

### ۳-۲. داده‌های سنجنده از راه دور

در این تحقیق از داده‌های سنجنده ASTER نصب شده بر روی ماهواره TERRA و سنجنده OLI نصب شده بر روی ماهواره لندست ۸ استفاده شد. پیش‌پردازش و پردازش تصاویر در نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام گرفت. سنجنده ASTER در ۱۴ باند طیفی درون محدوده‌های VNIR، فرورسرخ کوتاه‌موج (SWIR) و فرورسرخ حرارتی (TIR) تصویربرداری می‌کند. تصاویر ASTER منطقه مطالعاتی فاقد ابر با سطح پیش‌پردازش B1 از مرکز تحلیل داده‌های زمین و سنجنده از دور ژاپن (ERSDAC)، مربوط به تاریخ ۲۰۰۱/۰۸/۰۳ اخذ شدند؛ که دارای سیستم مختصات UTM زون ۴۰ شمالی و با سطح مبنای WGS-84 بودند. سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) دارای ۹ باند در محدوده VNIR و SWIR است. در این تحقیق از تصاویر فاقد ابر سنجنده OLI استفاده شد که در تاریخ ۲۰۱۴/۰۸/۳۱ برداشت شده‌اند.

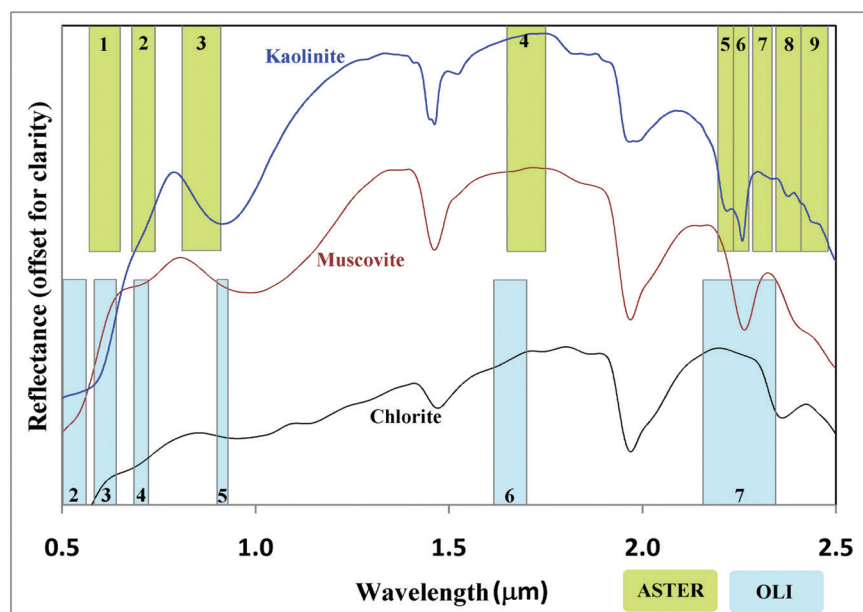
(باند ۲ سنجنده OLI) رؤیت کرد (شکل ۳). فرایندهای الکترونی به دلیل حضور عناصر واسطه از قبیل  $Fe^{2+}$ ،  $Fe^{3+}$ ،  $Mn$ ،  $Cr$  در ساختار بلوری این کانی‌ها مسبب ظهور ویژگی‌های طیفی در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک (۰/۴ تا ۱/۱ میکرومتر) هستند. استفاده از داده‌های سنجنده OLI با یک باند بیشتر در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک (VNIR) نسبت به سنجنده ASTER دارای اولویت جهت بارسازی این کانی‌هاست (شکل ۳).

در دگرسانی آرژیلیک، کانی مونت‌موریلونیت یک سیمای جذب AL-OH در طول موج ۲/۲۰ میکرومتر نشان می‌دهد (Hunt, 1977; Hunt and Ashley, 1979). کائولینیت به واسطه حضور Al-OH یک جذب دوتایی نمایش می‌دهد؛ که اولین سیمای جذب در ۲/۲۰ میکرومتر (باند ۶ سنجنده ASTER) و دومین سیمای جذب یا شانه در ۲/۱۷ میکرومتر (باند ۵ سنجنده ASTER) قرار دارد (شکل ۳).

مطابق شکل ۳، در دگرسانی پروپیلیتیک، سیمای جذب Fe، Mg-OH و  $CO_3$  ناشی از ارتعاشات مولکولی مجموعه کانی‌های کربناتی (کلسیت و دولومیت)، اپیدوت و کلریت (در محدوده طول موج ۲/۳۳ تا ۲/۳۵ میکرومتر باند ۸ سنجنده ASTER) قرار دارند (Mars and Rowan, 2006; Rowan et al., 2006).



شکل ۲- روند نمای تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از مدل‌سازی اکتشافی کانسارها در منطقه اسفندقه بر اساس داده‌های ماهواره‌ای.



شکل ۳- منحنی انعکاس طیفی کانی‌های شاخص دگرسانی گرمایی به دست آمده از طیف‌نگاری نمونه‌های معدن مس سرگزکوه (باندهای سنجنده‌های ASTER و OLI بر روی شکل نشان داده شده‌اند).



### ۳-۳. پیش‌پردازش تصاویر

برای تصحیح اتمسفری باندهای VNIR و SWIR سنجنده‌های ASTER و OLI از الگوریتم فلش (FLAASH) و به منظور تصحیح باندهای TIR سنجنده ASTER از الگوریتم تصحیح اتمسفری حرارتی در نرم افزار ENVI استفاده شد. عملیات تصحیح هندسی تصاویر ASTER و زمین مرجع کردن آنها با استفاده از داده‌های دقیق‌تر OLI و تصحیح کراس‌تاک (Crosstalk) نیز بر روی تصاویر ASTER انجام شد.

### ۳-۴. پردازش تصاویر ماهواره‌ای

– **تصاویر ترکیب رنگی و نسبت‌های باندی:** با توجه به واکنش متفاوت طول موج‌های مختلف انرژی الکترومغناطیس در برخورد با واحدهای سنگی می‌توان از تصاویر رنگی کاذب در تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی و الگوهای ساختاری و خطواره‌های منطقه بهره برد. در ساخت تصاویر ترکیب رنگی کاذب، بهتر است از باندهایی استفاده شود که همبستگی کمتری نسبت به هم دارند. تصاویر نسبت‌های باندی که از تقسیم ارزش DN یک باند بر ارزش DN از باند دیگر به دست می‌آیند برای برجسته‌سازی ویژگی‌های خاص و یا موادی که نمی‌توان آن‌ها را در باندهای خام شناسایی کرد، بسیار مفید خواهند بود (Pour and Hashim, 2011). از نسبت‌های باندی برای شناسایی پوشش گیاهی، اکسیدهای آهن و مناطق غنی از کانی‌های حاوی آنیون OH (یون هیدوکسیل) استفاده می‌شود. بنابراین روش یاد شده را می‌توان برای نقشه‌برداری مناطق دگرسانی گرمایی مرتبط با کانی‌زایی احتمالی به کار گرفت.

به افزایش درصد کوارتز و یا اکسیدهای سیلیسی (چرت، اوپال و کلسدون) در سنگ، اصطلاحاً سیلیسی شدن می‌گویند. برای شناسایی مناطق دگرسانی سیلیسی (یا اهداف غنی از کوارتز) می‌توان از شاخص‌های کوارتز (QI) و مافیک (SI) یا شاخص فقیر از سیلیس (Carrino et al., 2015) بر روی باندهای TIR سنجنده ASTER بهره برد. شاخص‌های QI و SI به ترتیب از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آیند.

$$SI = \text{band}12 \times (\text{band}14)^3 / (\text{band}13)^4 \quad (1)$$

$$QI = \text{band}11 / (\text{band}10 + \text{band}12) \times \text{band}13 / \text{band}12 \quad (2)$$

در هر دو رابطه ۱ و ۲ از کنتراست‌های طیفی کانی‌های شاخص زون سیلیسی (کوارتز) استفاده می‌شود که حداکثر گسیلش یا جذب را در محدوده‌ی باند ۱۰ و ۱۲ و حداقل گسیلش (بازتاب بالا) را در محدوده باندهای ۱۱، ۱۳ و ۱۴ سنجنده ASTER نشان می‌دهند.

– **تحلیل مؤلفه اصلی:** تحلیل مؤلفه اصلی برای کاهش اثر تداخلی مواد، به ویژه پوشش گیاهی و نیز به‌طور گسترده برای نقشه‌برداری دگرسانی‌ها در ایالات فلز زایی به کار برده شده است (Kaufmann, 1988; Honarmand et al., 2013). در این روش، بردارهای ویژه یک ماتریس وارینانس-کووارینانس یا یک ماتریس همبستگی مورد محاسبه قرار می‌گیرد (Davis and Sampson, 2002). روش تحلیل مؤلفه اصلی به دو صورت تحلیل مؤلفه استاندارد (استفاده از تمام باندها) و تحلیل مؤلفه انتخابی کاربرد دارد که در حالت دوم از باندهای مناسب (در اینجا باندهای حاوی ویژگی‌های جذب و انعکاسی کانی‌های مورد نظر) با کمترین همبستگی استفاده می‌شود (جدول ۱). در روش تحلیل مؤلفه انتخابی با کاهش باندهای ورودی ضمن پرهیز از اثر تداخلی طیف‌های خاص (همانند گیاهان)، بخت بارزسازی کانی‌های مورد نظر افزایش می‌یابد (Loughlin, 1991; Ruiz-Armenta and Prol-Ledesma, 1998). مطابق جدول ۱، در این تحقیق از تحلیل مؤلفه انتخابی با تکیه بر ویژگی‌های طیفی هر نوع دگرسانی و قابلیت‌های هر یک از سنجنده‌های ASTER و OLI استفاده شده است.

– **روش منطق فازی:** مدل‌سازی با استفاده از منطق فازی بر اساس نظریه مجموعه‌های فازی استوار شده است (Zadeh, 1965). در دنیای واقعی مرز بین مناطق مطلوب و غیرمطلوب برای کانسارسازی، غیردقیق و یا فازی است. بنابراین در روش فازی به هر پیکسل از هر نقشه، بر اساس اهمیت نسبی و رده‌های موجود در آن یک وزن یا مقدار عضویت فازی بین ۰ تا ۱ داده می‌شود. نقشه‌های شواهد خاص مربوط به کانی‌زایی می‌تواند با توجه به درجه اهمیت عضویت و میزان مطلوبیت برای کانی‌زایی در یک مجموعه فازی بر اساس نظر و تجربه کارشناسی ارزیابی شوند. بعد از مشخص

کردن وزن برای تمام الگوهای نقشه‌های شاهد، معمولاً ترکیب نقشه‌ها با استفاده از پنج عملگر فازی AND، OR، حاصل ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و گاما (An et al., 1991) انجام می‌شود. از این نظریه جهت مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مناطق مختلف استفاده شده است (Carrino et al., 2015).

### ۳-۵. اعتبارسنجی نتایج

برای تأیید و ارزیابی نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف پردازش تصویر، ۴۰ نمونه سنگ جهت انجام طیف‌سنجی با استفاده از یک دستگاه طیف‌سنج مدل FieldSpec3 در محیط آزمایشگاه و تهیه و مطالعه مقاطع نازک برداشت شدند. طیف‌های آزمایشگاهی ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار SAMS تصحیح شدند و به‌صورت بصری و همچنین به کمک نرم‌افزار PIMA View V.3.1 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. لازم به ذکر است مختصات نقاط نمونه‌برداری به وسیله یک دستگاه GPS قرائت و از محل برداشت نمونه‌ها عکس تهیه شد.

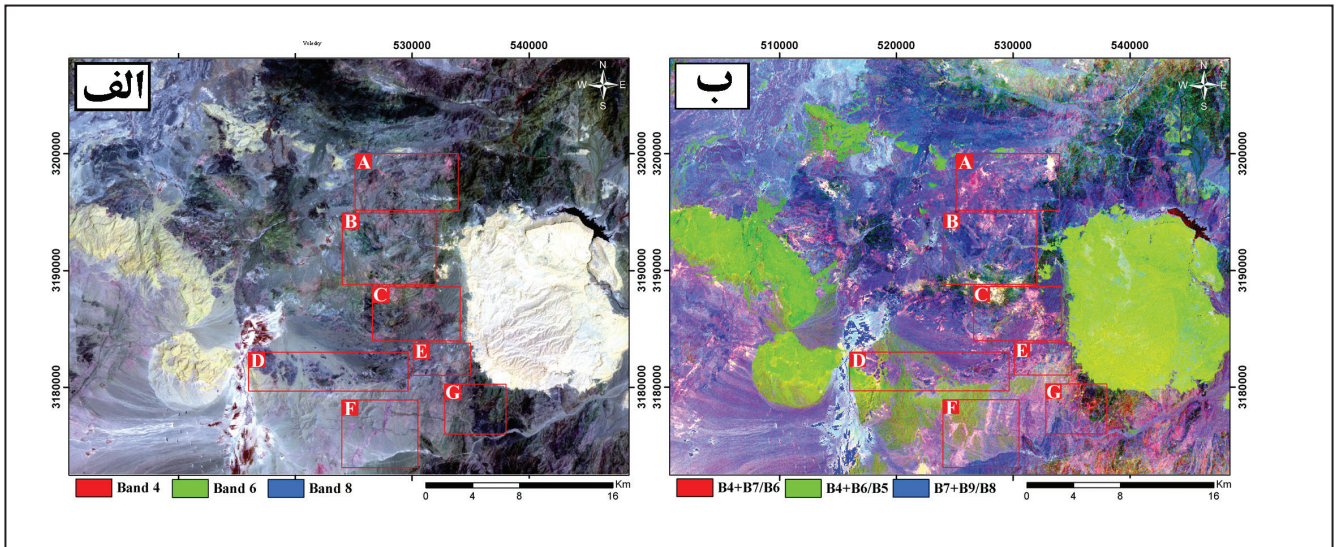
### ۴- بحث

در اکتشافات ناحیه‌ای ایجاد مدل‌های اکتشافی بر پایه شناسایی مناطق دگرسان شده، گسل‌خورده و همچنین مناطق با سنگ میزبان مناسب می‌تواند به جانمایی پتانسیل‌های معدنی منطقه کمک کند. با توجه به پیدایش کانی‌زایی‌های گوناگون همانند ماسیوسولفید، اسکارن و رگه‌های گرمایی و تبعاً تنوع نشانه‌های معدنی، انجام مطالعات سنجش از راه دور در منطقه اسفندقه مستلزم به کارگیری داده‌ها و روش‌های متنوعی است. در این تحقیق سعی شده است با بهره‌گیری از دو نوع داده ماهواره‌ای ASTER و OLI با ویژگی‌های منحصر به خود و از طریق کاربرد روش‌های پردازش تصویر متنوع، بازتاب سطحی پدیده‌های زمین‌شناسی مختلف به خوبی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد تا در نهایت ضمن تهیه نقشه پتانسیل معدنی، یک مدل اکتشافی برای مناطق با ویژگی‌های زمین‌شناسی و اقلیمی مشابه ارائه شود. برای درک بهتر پدیده‌های زمین‌شناسی منطقه و با توجه به نتایج مطالعات، محدوده‌های هفت گانه A تا G در منطقه اسفندقه معرفی می‌شوند؛ که علاوه بر وجود سوابق معدنکاری، بیشترین نشانه‌های معدنی را در خلال بازدیدهای صحرایی و مطالعات دورسنجی از خود به نمایش گذاشتند.

ساخت ترکیب‌های رنگی چه به‌صورت ادغام ساده باندهای یک سنجنده و چه به‌صورت مرکب حاصل از ادغام تصاویر نسبت باندی، مؤلفه‌های اصلی و غیره، راهکاری هر چند ساده اما مؤثر در شناخت اولیه منطقه و حتی بارزسازی برخی نشانه‌های مهم کانی‌زایی احتمالی محسوب می‌شود. شکل ۴- الف ترکیب رنگی باندهای ۴ (قرمز)، ۶ (سبز) و ۸ (آبی) سنجنده ASTER را نشان می‌دهد. در این شکل مناطق دگرسانی گرمایی مرتبط با کانی‌زایی با رنگ ارغوانی مشخص شده‌اند که بخش عمده‌ای از آن درون محدوده‌های هفت گانه رؤیت می‌شود. نکته قابل ملاحظه، آشکار شدن سنگ آهک‌های منطقه با رنگ سفید است. شکل ۴- ب نتیجه مشابهی با بهره‌گیری از نسبت‌های باندی مرکب (B6)/(B4+B7) در رنگ قرمز، (B5)/(B4+B6) در رنگ سبز و (B8)/(B9+B7) در رنگ آبی نشان می‌دهد. در این تصویر، دگرسانی‌ها به رنگ گلبهی و سنگ‌های آهکی با رنگ سبز دیده می‌شوند. بازدیدهای صحرایی نشان داد سایر توده‌های آذرین واقع در منطقه که با رنگ روشن با دگرسانی احتمالی در این تصویر دیده می‌شود، فاقد کانی‌زایی شاخصی هستند.

بر پایه اطلاعات مندرج در جدول ۱، تحلیل مؤلفه اصلی بر روی باندهای انتخابی سنجنده ASTER انجام شد. جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی بر روی باندهای انتخابی در محدوده‌های SWIR و TIR سنجنده ASTER را نشان می‌دهند. در هر جدول، یک مؤلفه اصلی بر اساس بیشینه اختلاف باندهای جذب و بازتاب کانی‌های مورد نظر مشخص شده است. برای مثال در جدول ۲، بیشترین اختلاف مقادیر ویژه باندهای بازتاب ۴ (۰/۴۹) و ۷ (۰/۵۸) با باند جذب ۶ (۰/۸۲-) در مؤلفه اصلی سوم (PC3) رخ می‌دهد. بنابراین تصویر PC3 می‌تواند مناطق دارای دگرسانی نوع فلیک را بارزسازی کند.





شکل ۴- الف) ترکیب رنگی باندهای ۴، ۶ و ۸ سنجنده ASTER (دگرسانی‌ها به رنگ ارغوانی)؛ ب) ترکیب رنگی نسبت‌های باندی مرکب سنجنده ASTER (دگرسانی‌ها با رنگ گلبهی). محدوده‌های A، B، C: موقعیت پتانسیل‌های مس رگه‌ای، محدوده D: معدن منگنز حسین‌آباد، محدوده F: پتانسیل معدنی منگنز، محدوده E: معدن سنگ آهن اسفندقه، محدوده G: کانسار مس سرگز کوه.

جدول ۱- انواع تحلیل مؤلفه انتخابی با تکیه بر قابلیت‌های هر یک از سنجنده‌های ASTER و OLI (برگرفته از: Mars and Rowan, 2006; Rowan et al., 2006; Carrino et al., 2015).

سنجنده	باندهای انتخابی	هدف بارسازی	کانی‌های شاخص
ASTER	۷ و ۵، ۴	دگرسانی آرزلیک	کانولینیت، آلونیت و مونت‌موریلونیت
	۷ و ۶، ۴	دگرسانی فلیک	ایلیت / مسکوویت (سرسیت)
	۹ و ۸، ۵	دگرسانی پروپلیتیک	کلریت، اپیدوت و کربنات‌ها
	۱۴ و ۱۳، ۱۲، ۱۰	دگرسانی سیلیسی	کوارتز
OLI	۷ و ۶، ۴، ۲	دگرسانی گرمایی (آرزلیک + فلیک)	اکسید و هیدروکسیدهای آهن، کانی‌های رسی، ایلیت و مسکوویت

جدول ۲- تحلیل مؤلفه انتخابی باندهای محدوده SWIR سنجنده ASTER.

باندهای ورودی	PC1	PC2	PC3	نوع دگرسانی
۴	۰/۷۱	-۰/۶۸	۰/۵۰	آرزلیک
	۰/۵۱	۰/۲۹	-۰/۸۱	
	۰/۴۹	۰/۶۷	۰/۵۵	
	۹۷/۹۴ (%)	۱/۲۲	۰/۸۴	
۶	۰/۷۰	-۰/۶۵	۰/۴۹	فلیک
	۰/۵۳	۰/۱۹	-۰/۸۲	
	۰/۴۸	۰/۷۳	۰/۵۸	
	۹۷/۷۵ (%)	۱/۲۸	۰/۹۷	
۵	۰/۵۹	۰/۵۱	-۰/۶۲	پروپلیتیک
	۰/۴۹	-۰/۸۴	-۰/۲۲	
	۰/۶۶	۰/۵۷	۰/۷۵	
	۹۸/۴۹ (%)	۰/۹۴	۰/۵۷	

جدول ۳- تحلیل مؤلفه انتخابی باندهای محدوده TIR سنجنده ASTER.

نوع دگرسانی	PC1	PC2	PC3	PC4
۱۰	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۶۸	-۰/۱۲
	۰/۵۳	۰/۴۳	-۰/۶۶	۰/۳۰
	۰/۴۴	-۰/۴۳	-۰/۲۷	-۰/۷۴
	۰/۴۰	-۰/۶۹	۰/۱۴	۰/۵۸
	۹۹/۹۲ (%)	۰/۵۸	۰/۱۷	۰/۰۰۵
۱۲	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۶۸	-۰/۱۲
	۰/۵۳	۰/۴۳	-۰/۶۶	۰/۳۰
	۰/۴۴	-۰/۴۳	-۰/۲۷	-۰/۷۴
	۰/۴۰	-۰/۶۹	۰/۱۴	۰/۵۸
	۹۹/۹۲ (%)	۰/۵۸	۰/۱۷	۰/۰۰۵
۱۳	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۶۸	-۰/۱۲
	۰/۵۳	۰/۴۳	-۰/۶۶	۰/۳۰
	۰/۴۴	-۰/۴۳	-۰/۲۷	-۰/۷۴
	۰/۴۰	-۰/۶۹	۰/۱۴	۰/۵۸
	۹۹/۹۲ (%)	۰/۵۸	۰/۱۷	۰/۰۰۵
۱۴	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۶۸	-۰/۱۲
	۰/۵۳	۰/۴۳	-۰/۶۶	۰/۳۰
	۰/۴۴	-۰/۴۳	-۰/۲۷	-۰/۷۴
	۰/۴۰	-۰/۶۹	۰/۱۴	۰/۵۸
	۹۹/۹۲ (%)	۰/۵۸	۰/۱۷	۰/۰۰۵

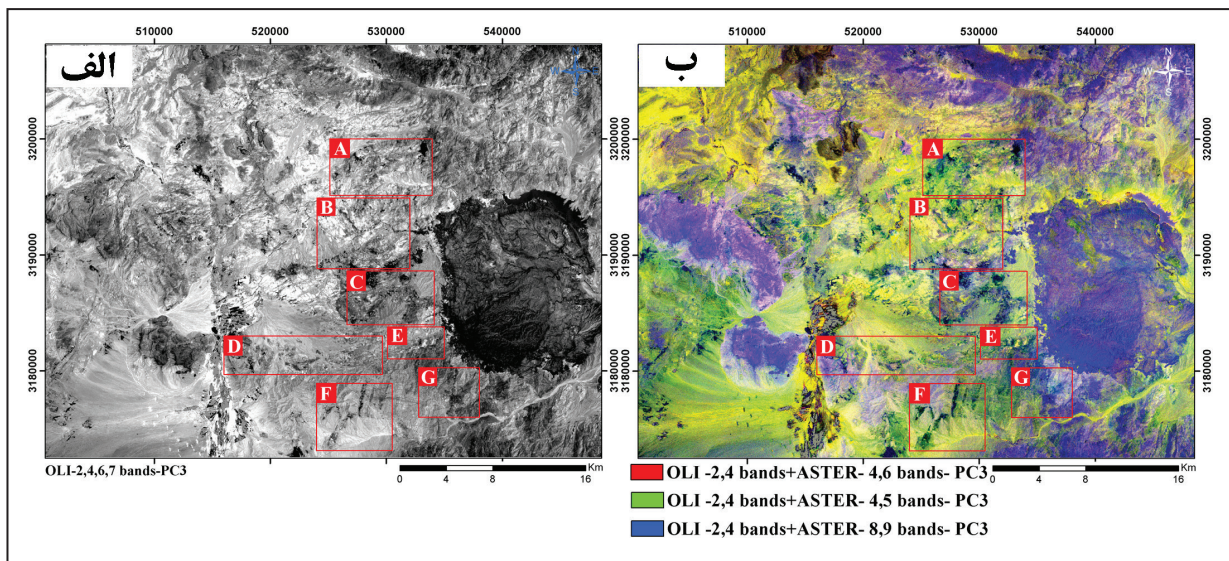
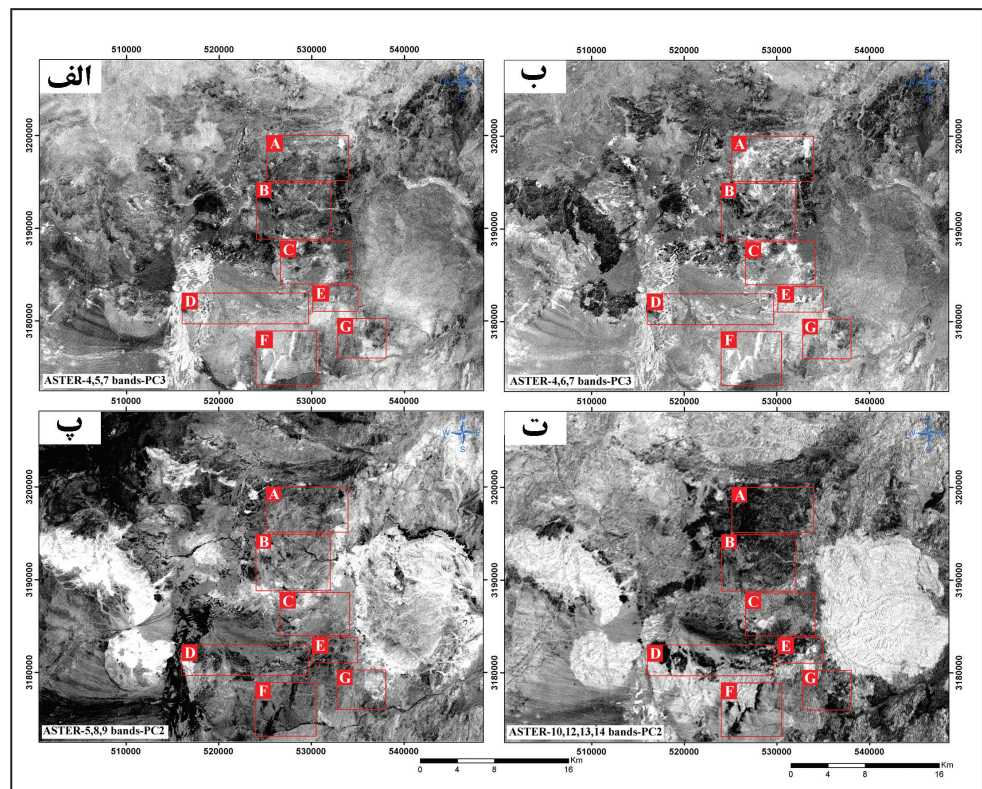


دیده می‌شود. با توجه به اینکه در سنجنده OLI باندهای ۲ (جذب) و ۴ (بازتاب) برای تشخیص کانی‌های گروه اکسید و هیدروکسیدهای آهن و از طرفی باندهای ۶ (بازتاب) و ۷ (جذب) برای تشخیص مناطق دگرسانی گرمایی مناسب هستند، از این چهار باند برای تحلیل مؤلفه اصلی استفاده شد.

جدول ۴ نتیجه تحلیل مؤلفه اصلی بر روی باندهای انتخابی سنجنده OLI را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن بیشینه اختلاف مقادیر ویژه باندهای جذب و بازتاب، مؤلفه اصلی سوم (PC3) برای نمایش دگرسانی‌های شاخص منطقه انتخاب شد. مطابق شکل ۶- الف مناطق دگرسانی بدون امکان تفکیک انواع دگرسانی آرژیلیک، فلیک و اکسید آهن با پیکسل‌های تیره مشخص شده‌اند. در این تصویر مناطق آهکی نیز با رنگ تیره دیده می‌شوند؛ که در صورت نداشتن داده‌های کمکی و شناخت منطقه، تشخیص مناطق دگرسانی را با مشکل مواجه می‌کنند.

شکل ۵ تصاویر مؤلفه‌های اصلی انتخابی سنجنده ASTER را بر اساس داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد. در شکل‌های ۵- الف و ب به ترتیب مناطق حاوی دگرسانی‌های آرژیلیک و فلیک با پیکسل‌های روشن مشخص شده‌اند. شدت و گسترش دگرسانی فلیک به‌طور خاص در محدوده‌های هفت‌گانه بارزتر است. در شکل ۵- پ، دگرسانی پروپیلیتیک با پیکسل‌های روشن به همراه سنگ‌های آهکی مشخص شده است. در تصویر ۵- ت به خوبی محدوده‌های سیلیسی شده در ارتباط با فرایندهای گرمایی و یا مناطق دارای سنگ‌های آذرین اسیدی و حد واسط با پیکسل‌های تیره مشخص هستند. این تصویر انطباق بسیار جالبی با مناطق هفت‌گانه دارد. آغشتگی دگرسانی‌های فلیک و به‌طور کمتر آرژیلیک توسط کانی‌های گروه اکسید و هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، همتایت و زاروسیت) در منطقه مطالعاتی

شکل ۵- تصاویر تحلیل مؤلفه اصلی باندهای انتخابی سنجنده ASTER: الف) دگرسانی آرژیلیک با پیکسل‌های روشن؛ ب) دگرسانی فلیک با پیکسل‌های روشن؛ پ) دگرسانی پروپیلیتیک و سنگ‌های آهکی با پیکسل‌های روشن؛ ت) سیلیسی‌شدگی با پیکسل‌های تیره. نام مؤلفه اصلی و باندهای انتخابی بر اساس جدول‌های ۲ و ۳ در زیر هر شکل درج شده است.



شکل ۶- الف) تصویر تحلیل مؤلفه اصلی باندهای انتخابی سنجنده OLI (دگرسانی‌های آرژیلیک/فلیک به رنگ تیره)؛ ب) تصویر رنگی تحلیل مؤلفه اصلی باندهای منتخب از باندهای دو سنجنده ASTER و OLI (دگرسانی‌های آرژیلیک/فلیک به رنگ تیره).

جدول ۴- تحلیل مؤلفه انتخابی باندهای سنجنده OLI برای بارزسازی مناطق دگرسانی.

باند های ورودی	PC1	PC2	PC3	PC4
۱۰	۰/۲۰	-۰/۵۹	۰/۳۱	۰/۷۵
۱۲	۰/۴۲	-۰/۶۷	-۰/۳۳	-۰/۶۰
۱۳	۰/۷۱	۰/۳۴	-۰/۵۶	۰/۲۴
۱۴	۰/۵۳	۰/۲۹	۰/۷۸	-۰/۱۳
مقدار ویژه (%)	۹۹/۹۲	۰/۰۵۸	۰/۰۱۷	۰/۰۰۵

همزمان و دقیق کانی‌های اکسید/هیدروکسید آهن و دگرسانی گرمایی آرژیلیک/فیلیک/ پروپیلیتیک پرداخت. در این جدول نتایج تحلیل مؤلفه اصلی در حالات مختلف و نیز هدف از انتخاب هر مجموعه از باندهای دو سنجنده OLI و ASTER آورده شده است. بارگذاری بالاتر کانی‌های آهن‌دار در دگرسانی فیلیک به دلیل همراهی بیشتر این گروه از کانی‌ها با این دگرسانی است؛ در صورتی که در دگرسانی پروپیلیتیک این همراهی دیده نمی‌شود.

سنجنده ASTER به دلیل نداشتن باند در محدوده طول موج‌های حدود ۰/۴ تا ۰/۵ میکرومتر در مقایسه با سنجنده OLI دارای قابلیت لازم جهت آشکارسازی کانی‌های گروه اکسید و هیدروکسیدهای آهن نیست. هر چند این سنجنده با داشتن قدرت تفکیک طیفی بالاتر در منطقه SWIR نسبت به سنجنده OLI، توانایی تفکیک دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک را دارد. این امکان وجود دارد تا با ایجاد مجموعه جدیدی از باندها نظیر آن چه که در جدول ۵ آورده شده است؛ به نقشه‌برداری

جدول ۵- تحلیل مؤلفه اصلی باندهای انتخابی سنجنده‌های OLI و ASTER.

نوع دگرسانی	PC4	PC3	PC2	PC1	باند های ورودی
آرژیلیک	۰/۷۸	۰/۳۲	۰/۵۰	۰/۲۰	باند ۲ OLI
	-۰/۵۰	-۰/۱۸	۰/۷۲	۰/۴۴	باند ۴ OLI
	۰/۲۷	-۰/۵۳	-۰/۳۷	۰/۷۱	باند ۴ ASTER
	-۰/۲۶	۰/۷۷	-۰/۳۰	۰/۵۱	باند ۵ ASTER
	۰/۷۵	۱/۸۵	۱۴/۵۰	۸۲/۹۰	مقدار ویژه (%)
فیلیک	۰/۷۸	۰/۳۲	۰/۵۰	۰/۲۰	باند ۲ OLI
	-۰/۴۹	-۰/۲۳	۰/۷۲	۰/۴۳	باند ۴ OLI
	۰/۲۹	-۰/۵۲	-۰/۳۹	۰/۷۰	باند ۴ ASTER
	-۰/۲۷	۰/۷۵	-۰/۲۶	۰/۵۳	باند ۶ ASTER
	۰/۸۰	۱/۹۸	۱۴/۷۵	۸۲/۴۷	مقدار ویژه (%)
پروپیلیتیک	-۰/۸۵	-۰/۱۳	-۰/۴۵	۰/۲۵	باند ۲ OLI
	۰/۵۱	-۰/۰۱	-۰/۶۷	۰/۵۳	باند ۴ OLI
	۰/۰۴	-۰/۷۵	۰/۴۳	۰/۴۹	باند ۸ ASTER
	-۰/۱۲	۰/۶۴	۰/۴۰	۰/۶۴	باند ۹ ASTER
	۰/۷۳	۱/۸۵	۱۴/۴۲	۸۳/۰۰	مقدار ویژه (%)

با مشخص شدن انواع دگرسانی‌های شاخص منطقه اسفندقه از طریق پردازش داده‌های سنجنده‌های OLI و ASTER، مطابق شکل ۲ از روش فازی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده شد. برای این منظور دگرسانی‌های مختلف برای هر نوع کانی‌سازی که از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده بودند به صورت داده وکتوری در محیط نرم‌افزار ENVI 5.3 ذخیره شدند. هر داده وکتوری معرف یک دگرسانی خاص است که به نرم‌افزار ArcGIS 10.3 وارد شد. با توجه به اینکه برخی دگرسانی‌ها بین چند نوع کانی‌زایی مشترک هستند، لایه‌های دگرسانی هم نوع با یکدیگر ادغام شدند و تشکیل لایه رستری واحدی برای آن نوع دگرسانی دادند. پس از انجام طبقه‌بندی مجدد، با توجه به اهمیت هر دگرسانی در کانسازسازی، وزن مناسبی به هر لایه اختصاص داده شد. وزن‌دهی لایه‌های دگرسانی با توجه به نوع کانسارها و نشانه‌های معدنی شناخته شده در منطقه مطالعاتی و با در نظر گرفتن اطلاعات زمینی بر مبنای دانش و تجربه کارشناسی به انجام رسید. عملیات وزن‌دهی به صورت مضربی از وزن هر رده در وزن نقشه شاهد که در اینجا نقشه دگرسانی است، برای هر یک از مناطق دگرسانی صورت پذیرفت. به این ترتیب برای دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی به ترتیب اوزان ۱، ۰/۷، ۰/۶ و ۰/۵ در نظر

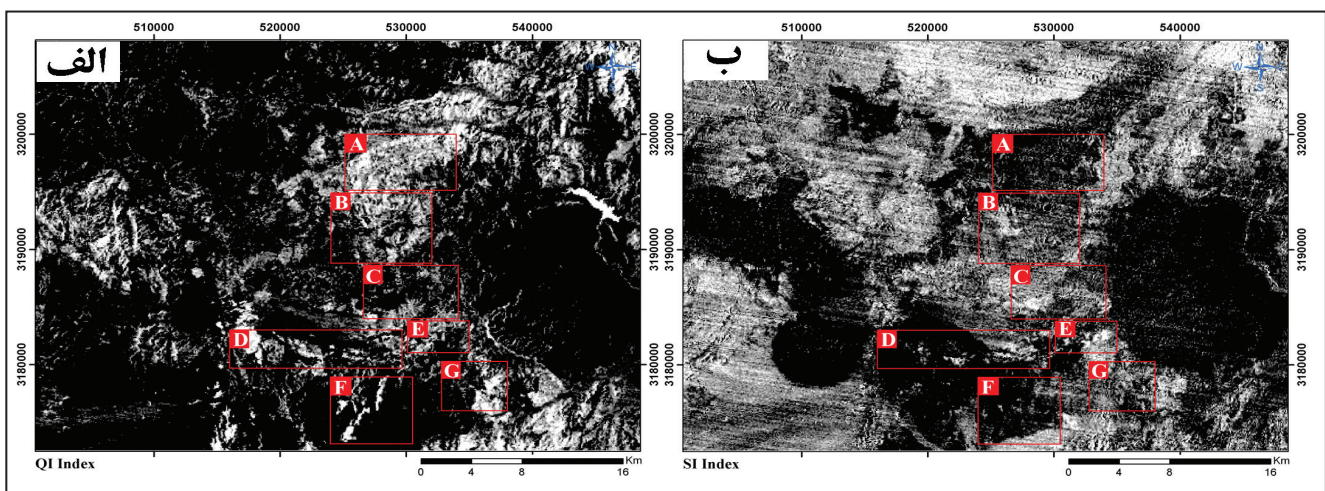
بر اساس نتایج جدول ۵، ترکیب رنگی حاصل از بارزسازی سه نوع دگرسانی آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک در شکل ۶- ب ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، بر اساس بازدیدهای میدانی، آغستگی مناطق دگرسان شده آرژیلیک و خصوصاً فیلیک به کانی‌های اکسید و هیدروکسیدهای آهن محرز است. در شکل ۶- ب، دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و کانی‌های گروه اکسید/هیدروکسید آهن با رنگ تیره و دگرسانی پروپیلیتیک به همراه سنگ‌های آهکی با رنگ آبی دیده می‌شوند.

هر چند دگرسانی سیلیسی می‌تواند از نشانه‌های کانی‌زایی احتمالی باشد؛ شواهد صحرائی در منطقه نشان می‌دهد که کانی‌زایی منگنز همراه با سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی غنی از سیلیس است. بنابراین می‌توان مناطق با افزایش محتوای سیلیس را به عنوان مناطق مستعد برای کانی‌زایی معرفی کرد. شکل ۷ شاخص‌های کوارتز (QI) و شاخص مافیک (SI) را بر روی باندهای TIR سنجنده ASTER نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷- الف شاخص کوارتز انطباق بسیار خوبی بر مناطق هفت گانه دارد و در همان حال مطابق شکل ۷- ب شاخص مافیک تهی‌شدگی نسبی محتوای سیلیس را در این مناطق نشان می‌دهد.

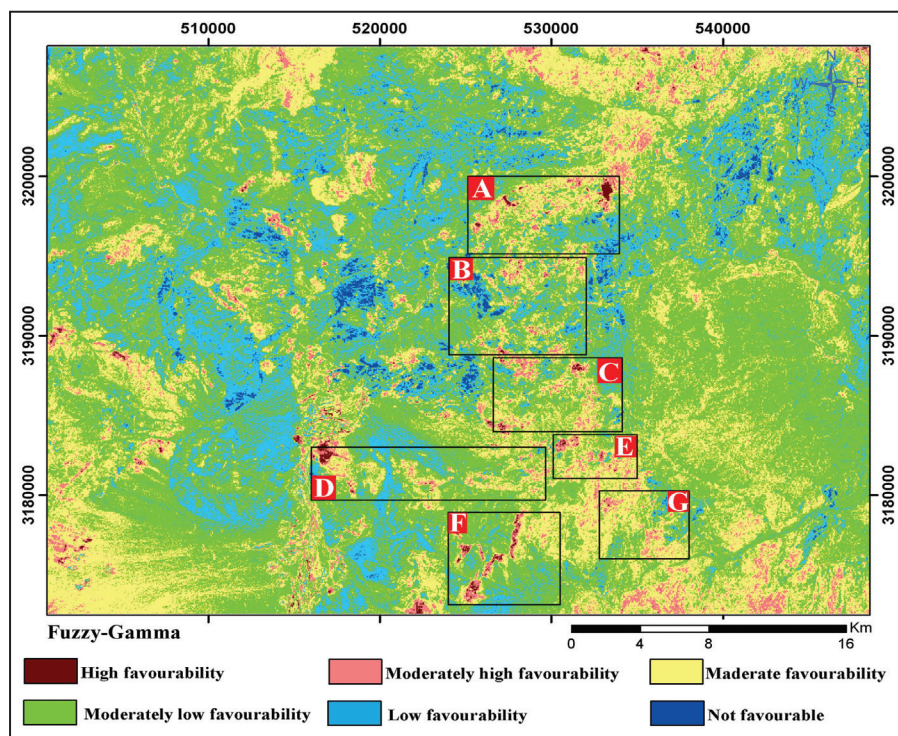


کانی‌زایی مس به صورت رگه‌ای درون زون فیلیک و در رگه‌های سیلیسی دیده می‌شود. شکل ۹-ت نیز مقطع نازک یک نمونه در حالت XPL را نشان می‌دهد که در آن دگرسانی کوارتز سرسیست (فیلیک) همراه با کانی‌های اپاک وجود دارند. محدوده‌های D و F با کانی‌زایی منگنز در منطقه اسفندقه معرفی می‌شوند. شکل ۱۰- الف نمای کلی منطقه D را نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های ۱۰- ب و پ، رخنمون منگنز درون جبهه کار استخراجی در مجاورت یک توده سنگ ریولیتی دگرسان شده قرار گرفته است. غنی‌شدگی محتوای سیلیس در مجاورت ماده معدنی یکی از نشانه‌های اکتشافی بوده که با استفاده از لایه‌های شاخص کوارتز (QI) و شاخص مافیک (SI) در الگوریتم فازی، پتانسیل‌های معدنی منگنز در منطقه اسفندقه را مشخص کرده است. در شکل ۱۰-ت یک مقطع نازک نمونه گرفته شده از مجاورت کانی‌زایی منگنز نشان داده شده است که در آن دگرسانی کوارتز-سرسیست به وضوح دیده می‌شود. کانی‌زایی در محدوده E از نوع اسکارن است.

گرفته شد. لایه‌های مختلف دگرسانی حاصل که به صورت فازی طبقه‌بندی مجدد و وزن‌دار شده‌اند با استفاده از عملگر گامای فازی در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 با هم تلفیق شدند. مطابق پیشنهاد (Bonham-Carter 1994)، مقدار گاما برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شد. شکل ۸ نقشه پتانسیل معدنی حاصل از اجرای روش فازی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، تمرکز پتانسیل‌های معدنی منطقه اسفندقه شامل مناطق هفت‌گانه A تا G است که بعضاً بر برخی محدوده‌های دارای مجوز معدنی در منطقه منطبق هستند. این مناطق بر اساس روش فازی بیشترین درجه مطلوبیت را جهت کانی‌زایی دارند. بررسی صحرایی حاکی از پراکندگی انواع دگرسانی در منطقه است. در این بین مناطق هفت‌گانه بیشترین شواهد سطحی را از خود نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۹- الف دیده می‌شود؛ دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک از مهم‌ترین دگرسانی‌های محدوده‌های A+B و C محسوب می‌شوند؛ که دارای رگه‌های سیلیسی حاوی کانی‌زایی مس و عناصر همراه آن هستند. در شکل‌های ۹- ب و پ به ترتیب

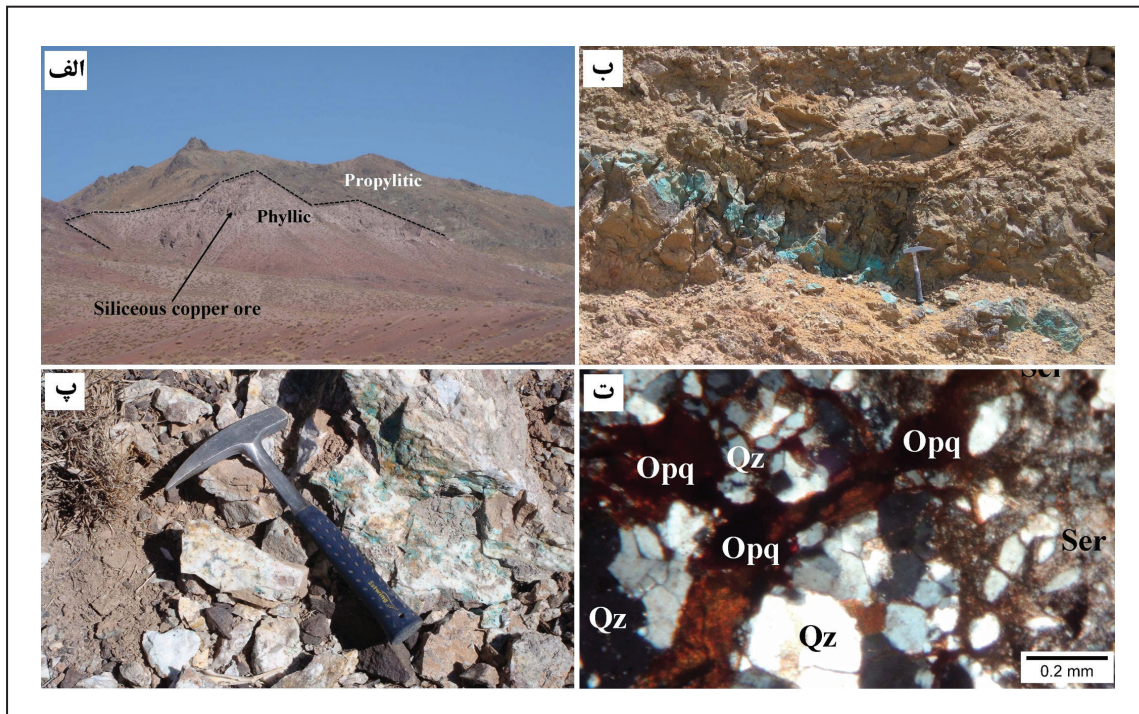


شکل ۷- الف) شاخص‌های کوارتز (QI) یا غنی‌شدگی سیلیس؛ ب) شاخص مافیک (SI) یا فقر از سیلیس بر روی باندهای TIR سنجنده ASTER.

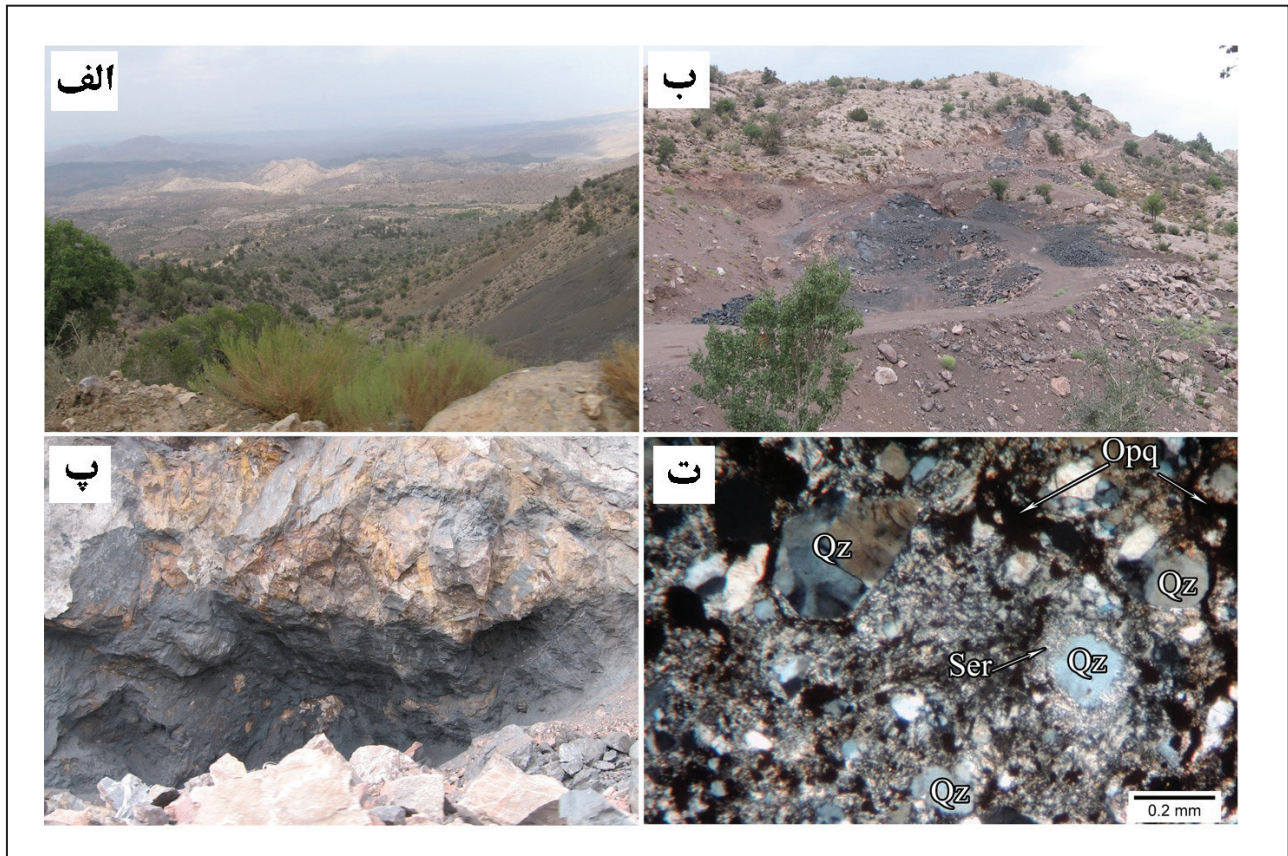


شکل ۸- نقشه پتانسیل معدنی منطقه اسفندقه حاصل اجرای روش فازی. موقعیت پتانسیل‌های مس رگه‌ای (محدوده‌های A, B و C)، معدن منگنز حسین‌آباد (D) و پتانسیل معدنی منگنز (محدوده F)، معدن سنگ آهن اسفندقه (E) و کانسار مس سرگز کوه (G).





شکل ۹- الف) منظره‌ای از دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک در منطقه C؛ ب) رگه مس دار (کانی مالاکیت)؛ پ) کانی‌زایی مس در رگه‌های سیلیسی؛ ت) مقطع نازک دگرسانی کوارتزسریسیت (فیلیک) در حالت XPL. ماده معدنی سیلیسی مس دار (Siliceous copper ore)، سریسیت (Ser)، اپاک (Opq) و کوارتز (Qz).



شکل ۱۰- الف) منظره کلی یک توده ریولیتی در منطقه D؛ ب) جبهه کار استخراجی منگنز در محدوده معدنی D؛ پ) کانی‌زایی منگنز در مجاورت ریولیت دگرسان شده؛ ت) مقطع نازک دگرسانی کوارتزسریسیت (فیلیک) در حالت XPL. سریسیت (Ser) و کوارتز (Qz) و کانی‌های اپاک (Opq).



شکل‌های ۱۱- الف، ب و پ به ترتیب کانی‌زایی اسکارن آهن را درون محدوده‌های سنگ آهن اسفندقه و دگرسانی‌های پروپیلیتیک (با رخنمون‌های اکسید آهن) و آرژیلیک نشان می‌دهند. در شکل ۱۱- ت یک مقطع نازک دگرسانی آرژیلیک در محدوده E دیده می‌شود.

در محدوده G که منطبق بر محدوده معدن مس سرگز کوه است؛ دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک به ترتیب بیشترین وسعت را در منطقه نشان می‌دهند (شکل ۱۲- الف). در شکل ۱۲- ب مقطع نازک یک نمونه برگرفته از منطقه دگرسانی پروپیلیتیک دیده می‌شود که کانی‌های کلریت و اپیدوت را به عنوان کانی‌های شاخص این زون معرفی می‌کند. شکل ۱۲- پ رخنمون دگرسانی فیلیک را در یکی از جبهه‌کارهای معدن سرگز کوه نشان می‌دهد که در مقطع نازک نمونه آن (شکل ۱۲- ت)، دگرسان شدن پلاژیوکلاز و تبدیل آن به سریست قابل مشاهده است. همراهی کانی‌های گروه اکسید و هیدروکسید آهن با دگرسانی‌های آرژیلیک و سیلیسی به‌طور محسوس در منطقه مطالعاتی دیده می‌شود (شکل‌های ۱۲- ث و ج) که اثرات آن بر منحنی انعکاس طیفی به دست آمده از این مناطق نیز قابل مشاهده است (شکل ۳). به همین علت در بیشتر تصاویر پردازش شده، مناطق معرفی شده به عنوان محدوده حاوی اکسید و هیدروکسیدهای آهن بر مناطق دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک منطبق شده‌اند.

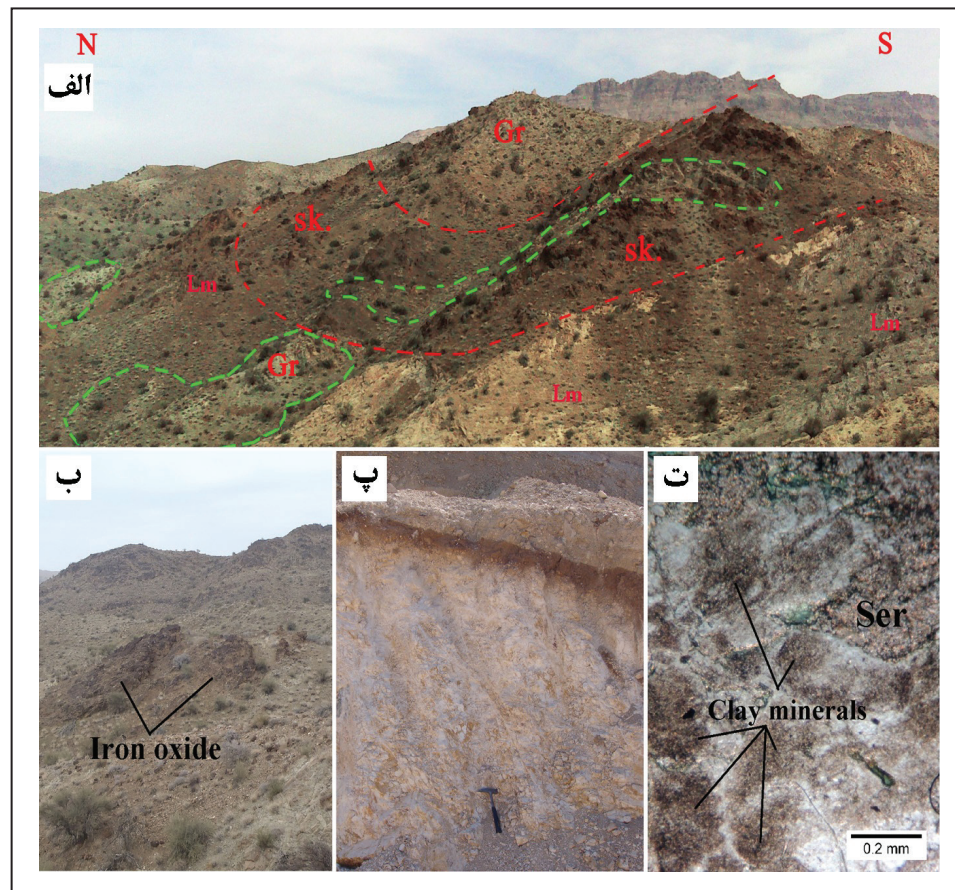
۵- نتیجه‌گیری

تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در مناطقی همچون منطقه اسفندقه استان کرمان مستلزم شناخت ویژگی‌های طیفی کانی‌های مرتبط با هر نوع کانی‌زایی، زمین‌شناسی منطقه، آگاهی از ویژگی‌های سنجنده‌های مورد نظر و اتخاذ روش‌های پردازش تصویر کارآمد است. با توجه به بررسی زمین‌شناسی منطقه اسفندقه، وجود دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک به همراه کانی‌های اکسید آهن و سیلیس (یا غنی‌شدگی سیلیسی) محرز است که می‌تواند با فرایندهای

کانی‌زایی ارتباط داشته باشند. سنجنده OLI در نقشه‌برداری کانی‌های گروه اکسید و هیدروکسیدهای آهن به همراه مجموع دگرسانی‌های گرمایی نوع فیلیک و آرژیلیک توانایی دارد. در حالی که سنجنده ASTER دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی را بارزسازی می‌کند. تهیه ترکیب‌های رنگی کاذب از داده‌های هر دو سنجنده در محدوده‌های VNIR و SWIR می‌تواند به ارزیابی کلی و تشخیص تنوع و پراکندگی ویژگی‌های کانیایی منطقه کمک کند. در این راستا، تحلیل مؤلفه‌های اصلی باندهای انتخابی ۲، ۴، ۶، ۸ و ۹ سنجنده OLI و ۴ تا ۹ سنجنده ASTER می‌تواند به تفکیک دگرسانی‌های گرمایی منطقه پیچیده‌ای همچون اسفندقه کمک کند. با توجه به عدم توانایی تفکیک دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک در سنجنده OLI و نیز عدم توانایی مؤثر شناسایی مناطق حاوی کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن توسط سنجنده ASTER می‌توان از باندهای ۲ و ۴ سنجنده OLI به همراه باندهای ۴، ۵، ۶، ۸ و ۹ سنجنده ASTER در یک الگوریتم مشترک تحلیل مؤلفی اصلی برای بارزسازی این دگرسانی‌ها سود برد. استفاده از شاخص کوارتز (QI) و شاخص مافیک (SI) با استفاده از باندهای فرسوخ حرارتی سنجنده ASTER می‌تواند در تشخیص دگرسانی سیلیسی یا غنی‌شدگی‌های موضعی از سیلیس در مجاورت کانی‌زایی منگنز مؤثر باشد. در نهایت نقشه پتانسیل معدنی منطقه اسفندقه شامل هفت منطقه اصلی با تلفیق نتایج حاصل از روش‌های مختلف پردازش تصویر توسط منطق فازی تهیه شد. بر اساس مطالعات صحرایی و مناطق معدنی شناخته شده قبلی، نواحی با درجه مطلوبیت بالا انطباق قابل توجهی با این مناطق دارند.

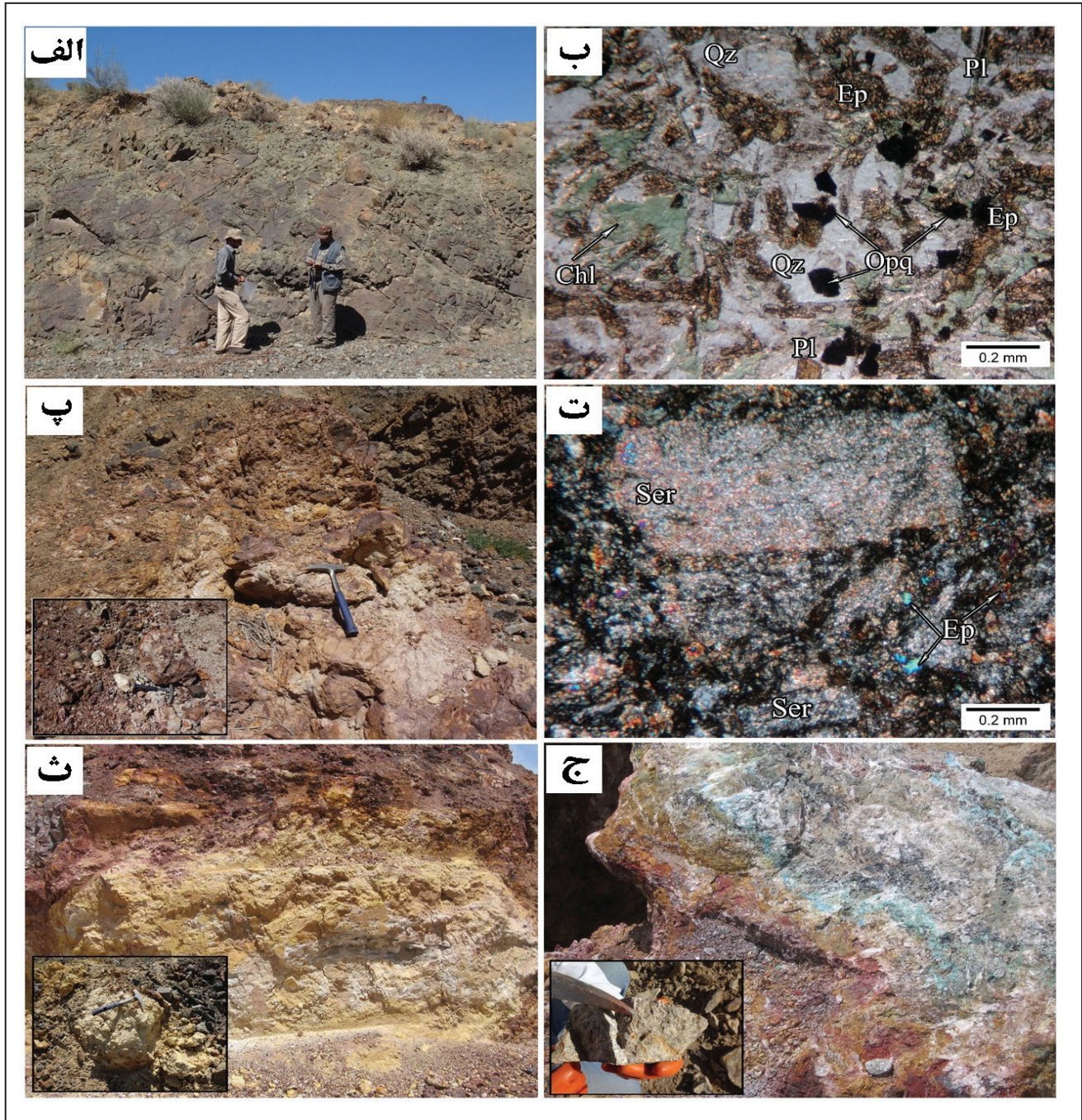
### سپاسگزاری

در این پژوهش طیف‌نگاری نمونه‌ها با استفاده از امکانات دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته و عملیات صحرایی با کمک شرکت مهندسین مشاور سورگان پارسه صورت پذیرفت.



شکل ۱۱- الف) نمایی از سنگ آهن اسکارن اسفندقه و تشکیل کانی‌زایی آهن در مجاورت توده گرانیتی و سنگ آهک؛ ب) دگرسانی پروپیلیتیک و رخنمون‌های اکسید آهن؛ پ) رخنمون دگرسانی آرژیلیک در جبهه‌کار معدن سنگ آهن اسفندقه؛ ت) مقطع نازک دگرسانی آرژیلیک در حالت PPL. گرانیت (Gr)، اسکارن (Sk)، سنگ آهک (Lm)، سریست (Ser)، اکسید آهن (Iron oxide) و کانی‌های رسی (Clay minerals).





شکل ۱۲- الف) رخنمون دگرسانی پروپیلیتیک در محدوده معدنی مس سرگز کوه؛ ب) مقطع نازک دگرسانی پروپیلیتیک در حالت PPL؛ پ) رخنمون دگرسانی فیلیک در محدوده معدنی مس سرگز کوه؛ ت) مقطع نازک دگرسانی فیلیک در حالت XPL؛ ث) رخنمون کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن همراه با دگرسانی آرژیلیک در محدوده معدنی مس سرگز کوه؛ ج) کانی‌زایی مس در رگه سیلیسی حاوی کانی‌های اکسید و هیدروکسید آهن. سریسیت (Ser)، کلریت (Chl)، اپیدوت (Ep)، پلاژیوکلاز (Pl)، کوارتز (Qz) و کانی‌های اپاک (Opq).



**کتابنگاری**

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۵- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.  
 بدرزاده، ز.، سبزه‌ئی، م.، راستاد، ا.، امامی، م. ه. و خیمنو، د.، ۱۳۸۸- مراحل مختلف کانه‌زایی سولفیدی در کانسار سولفید توده‌ای آتشفشان زاد سرگر، شمال باختر جیرفت، سندج- سیرجان جنوبی،  
 فصلنامه علوم زمین، ۱۹ (۷۶)، صص. ۸۵ تا ۹۴. doi:10.22071/GSJ.2018.55653  
 شهرکی قدیمی، ع.، ۱۳۸۳- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفندقه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

**References**

- An, P., Moon, W. M. and Rencz, A., 1991- Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27, 1- 11. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/geoinformatics1990/2/2/2\\_2\\_177/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/geoinformatics1990/2/2/2_2_177/_article/-char/ja/)
- Bonham-Carter, G. F., 1994- *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier, 398 p. doi: 10.1016/0098-3004(95)90019-5.
- Carrino, T. A., Crósta, A. P., Toledo, C. L. B., Silva, A. M. and Silva, J. L., 2015- Geology and hydrothermal alteration of the Chapi Chiara prospect and nearby targets, southern Peru, using ASTER data and reflectance spectroscopy. *Economic Geology*, 110, 73- 90. doi:10.2113/econgeo.110.1.73.
- Davis, J. C. and Sampson, R. J., 2002- *Statistic and Data Analysis in Geology*, 638 p. New York: John Wiley and Sons. [http://www.soest.hawaii.edu/GG/FACULTY/ITO/GG413/Davis\\_Directional\\_Data.pdf](http://www.soest.hawaii.edu/GG/FACULTY/ITO/GG413/Davis_Directional_Data.pdf).
- Frank, J. A., Ruitenbeek, V., Thomas, J. C., Freek, D. M. and Martin, H., 2012- Characterization of the hydrothermal systems associated with Archean VMS-mineralization at Panorama, Western Australia, using hyperspectral, geochemical and geo-thermometric data. *Ore Geology Reviews*, 42, 33- 46. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.07.001.
- Honarmand, M., Ranjbar, H. and Shahabpour, J., 2013- Combined use of ASTER and ALI data for hydrothermal alteration mapping in the northwestern part of the Kerman magmatic arc, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 2023- 2046. doi: 10.1080/01431161.2012.731540.
- Hunt, G. R. and Ashley, R. P., 1979- Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74, 1613- 1629. doi: 10.2113/gsecongeo.74.7.1613.
- Hunt, G. R., 1977- Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42, 501- 513. doi: 10.1190/1.1440721.
- Kaufmann, H., 1988- Mineral Exploration along the Aquaba-Levant Structure by Use of TM Data, Concepts, Processing and Results. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1639- 1658. doi: 10.1080/01431168808954966.
- Loughlin, W., 1991- Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 1163- 1169. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1991journal/sep/1991\\_sep\\_1163-1169.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1991journal/sep/1991_sep_1163-1169.pdf).
- Mars, J. C. and Rowan, L. 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, 161- 186. doi: 10.1130/GES00044.1.
- Mohebi, A., Mirnejad, H., Lentz, D., Behzadi, M., Dolati, A., Kani, A. and Taghizadeh, H., 2015- Controls on porphyry Cu mineralization around Hanza Mountain, south-east of Iran: An analysis of structural evolution from remote sensing, geophysical, geochemical and geological data. *Ore Geology Reviews*, 69, 187- 198. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.02.016.
- Pour, A. B. and Hashim, M., 2011- Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42 (6), 1309- 1323. doi: 10.1016/j.jseaes.2011.07.017.
- Pournamdari M., Hashim, M. and Beiranvand Pour, A., 2014- Spectral transformation of ASTER and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghanophiolite complex, south Iran. *Advances in Space Research*, 54, 694- 709. doi: 10.1016/j.asr.2014.04.022.
- Rowan, L. C., Schmidt, R. G. and Mars, J. C., 2006- Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 104, 74- 87. doi: 10.1016/j.rse.2006.05.014.
- Ruiz-Armenta, J. R. and Prol-Ledesma, R. M., 1998- Techniques for Enhancing the Spectral Response of Hydrothermal Alteration Minerals in Thematic Mapper Images of Central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1981- 2000. doi: 10.1080/014311698215108.
- Sadeghi, B., Khalajmasoum, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., Foster, P. and Ziazarifi, A., 2013- Using ETM<sup>+</sup> and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1:100,000 mapping sheet of Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 85, 103- 114. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2013.05.003.
- Volesky, J. C., Stern, R. J. and Johnson, P. R., 2003- Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies. *Precambrian Research*, 123: 235- 247. doi: 10.1016/S0301-9268(03)00070-6.
- Zadeh, L. A., 1965- Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338- 353. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

# Mineral exploration modeling of metallic deposits using ASTER and OLI data for producing mineral potential map in Esfandagheh region, Kerman province

S. S. Mousavi<sup>1</sup>, M. Honarmand<sup>2\*</sup>, H. Shahriari<sup>3</sup> and M. Hosseinjani Zadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M. Sc., Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Received: 2018 March 16

Accepted: 2018 August 19

## Abstract

Mineral exploration in Esfandagheh area, located in south east of Kerman province is complicated due to variety of metallic deposits including volcanogenic massive sulfide copper, skarn iron, and volcanic manganese. This research was carried out with the aim of defining a model for mineral exploration and providing mineral potential map using remote sensing data. ASTER and OLI images along with various image processing techniques including color composite of band ratios, principal component analysis (PCA), and QI and SI indices were applied to recognize the hydrothermal alteration halos. Result validation was done through field and laboratory studies. Argillic, phyllic, propylitic, and iron oxides/hydroxides alterations were enhanced using color composite ratios of ASTER bands like  $(B4+B7)/B6$  in red,  $(B4+B6)/B5$  in green, and  $(B7+B9)/B8$  in blue. Hydrothermal alteration mapping was also accomplished using selected PCA of OLI 2, 4, 6, and 7 bands, ASTER 4 to 9 bands and a combination of OLI 2 and 4 bands along with ASTER 4 to 9 bands. ASTER thermal infrared bands applied to determine QI and SI indices for enhancing silicic halos. Mineral potential map was produced through integrating alteration maps by fuzzy logic method in which seven areas were identified such as Sargaz Kuh copper mine, Hossein Abad manganese mine, and Esfandagheh iron mine. Results showed the possibility of establishing mineral exploration model and producing mineral potential map in reconnaissance and prospecting stages using appropriate sensors and image processing techniques.

**Keywords:** Esfandagheh, ASTER, OLI, Alteration, Volcanogenic massive sulfide, Skarn, Volcanic manganese, Principal component analysis. For Persian Version see pages 45 to 56

\*Corresponding author: M. Honarmand; E-mail: mehonarmand167@yahoo.com