

مقایسه بین داده‌های ژئوفیزیک هوایی و تصاویر حسگر استر در نقشه‌برداری از مناطق دگرسانی گرمایی به منظور اکتشاف کانی‌سازی مس در منطقه بافت کرمان

فیض اله معصومی^۱ و حجت‌اله رنجبار^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: ۸۶/۶/۲۰، پذیرش نهایی: ۸۸/۱۲/۱۸)

چکیده

منطقه مورد بررسی، دربرگیرنده محدوده شمالی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بافت در استان کرمان است. داده‌های ژئوفیزیک هوایی و تصاویر حسگر استر (ASTER) این منطقه در ارتباط با نقشه‌برداری از مناطق دگرسان شده، آنالیز و مقایسه شده‌اند. داده‌های حسگر استر در محدوده فروسرخ طول موج کوتاه با استفاده از روش‌های مؤلفه اصلی و نسبت باندی مورد آنالیز قرار گرفته و مناطق دگرسان بارزسازی شده‌اند. داده‌های ژئوفیزیک هوایی نیز با استفاده از روش‌های مؤلفه‌های اصلی و نقشه‌های نسبتی آنالیز شده‌اند. بررسی داده‌های تابش‌سنجی (پتاسیم) نشان داد آن‌گونه که انتظار می‌رفت همه مقادیر زیاد پتاسیم مشاهده شده با مناطق دگرسان شده ارتباط ندارد و مقدار زیاد پتاسیم در سنگ‌های فلدسپاردار در برخی مناطق، موجب نمایش مقدار زیاد پتاسیم در نقشه‌های ژئوفیزیک شده است. ارزیابی کلی داده‌های استر و ژئوفیزیک هوایی در این منطقه نشان می‌دهد که داده‌های استر، مناطق دگرسان شده را با دقت بیشتری نسبت به داده‌های ژئوفیزیک مشخص می‌کنند. اما باید به این نکته نیز توجه کرد که داده‌های ژئوفیزیکی برخلاف داده‌های دورسنجی می‌توانند بی‌هنجاری‌های سطحی و تا حدودی عمقی را مشخص سازند.

واژه‌های کلیدی: ژئوفیزیک هوایی، استر، آنالیز مؤلفه‌های اصلی، دگرسانی گرمایی

Comparison between Airborne Geophysical and ASTER Data for Hydrothermal Alteration Mapping for Exploration of Copper Mineralization

Masoumi, F.¹ and Ranjbar, H.²

¹ M. Sc. in mineral exploration, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

² Associate Professor, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

(Received: 11 Sep 2007, Accepted: 9 March 2010)

Abstract

The study area covers the northern part of the Baft geological map (scale of 1:100 000). Several porphyry and vein-type mineralization are reported from this area. A topic that is discussed in the mineral exploration community is the use of remote sensing and airborne geophysics for porphyry type mineralization. Which one is more reliable and efficient in hydrothermal alteration mapping? Airborne geophysical data and Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images of this area were analyzed and compared for hydrothermal alteration mapping. ASTER data was analyzed by using shortwave infrared (SWIR) bands by applying principal component analysis (PCA) and band ratioing, in order to enhance the altered areas. Band ratios such as 4/9, 7/9 and 7/6 were used for hydrothermal alteration enhancement. After applying PCA,

principal component 3 could enhance the hydrothermal alteration. Airborne geophysical data was analyzed by applying principal component analysis and ratioing techniques. The higher K radiometric values, as was expected, are not entirely associated with hydrothermal alteration. There are anomalous values that are associated with the lithologies that are rich in K-bearing feldspars. The overall evaluation of satellite and geophysical data shows that ASTER data is more accurate in terms of hydrothermal alteration mapping than geophysical data in this area. Nevertheless, this point should be taken into consideration that the geophysical data can detect both surface and sub-surface anomalies. The combined use of both data sets is recommended for hydrothermal alteration mapping.

Key words: Airborne geophysics, ASTER, Principal Components Analysis, Hydrothermal Alteration

۱ مقدمه

پژوهشگران دیده شده است (پان، ۱۹۹۳؛ رنجبر و همکاران، ۲۰۰۱a، رنجبر و همکاران، ۲۰۰۱b؛ هنرمند و همکاران، ۲۰۰۲ و دووال، ۱۹۷۷). از روش نسبت‌های نقشه و آنالیز مؤلفه اصلی برای بارسازی مناطق دگرسان شده در این تحقیق استفاده شد.

نهشته‌های پورفیری در ناحیه کرمان با مقدار مغناطیس کم، پتاسیم زیاد و مقاومت کم همراه هستند (پیچر و همکاران، ۱۹۹۴؛ ریغورد و پاترسون، ۱۹۹۴). با توجه به اینکه داده‌های تابش سنجی عموماً مربوط به تابش‌های سطح زمین هستند و داده‌های مغناطیس سنجی با دستگاهی اندازه‌گیری شده‌اند که میدان کل را اندازه‌گیری می‌کند، برای همسان‌سازی داده‌ها در ابتدا کاهش نسبت به قطب و سپس مشتق قائم اول که اثرات مغناطیسی سطحی را بارسازی می‌کنند، روی داده‌های مغناطیسی اعمال شد. در همهٔ پردازش‌ها از این لایه به‌جای داده‌های خام مغناطیس سنجی استفاده شد.

تصاویر سنجش از دور دو کاربرد عمده در اکتشاف مواد معدنی دارند (ساینز، ۱۹۹۹).

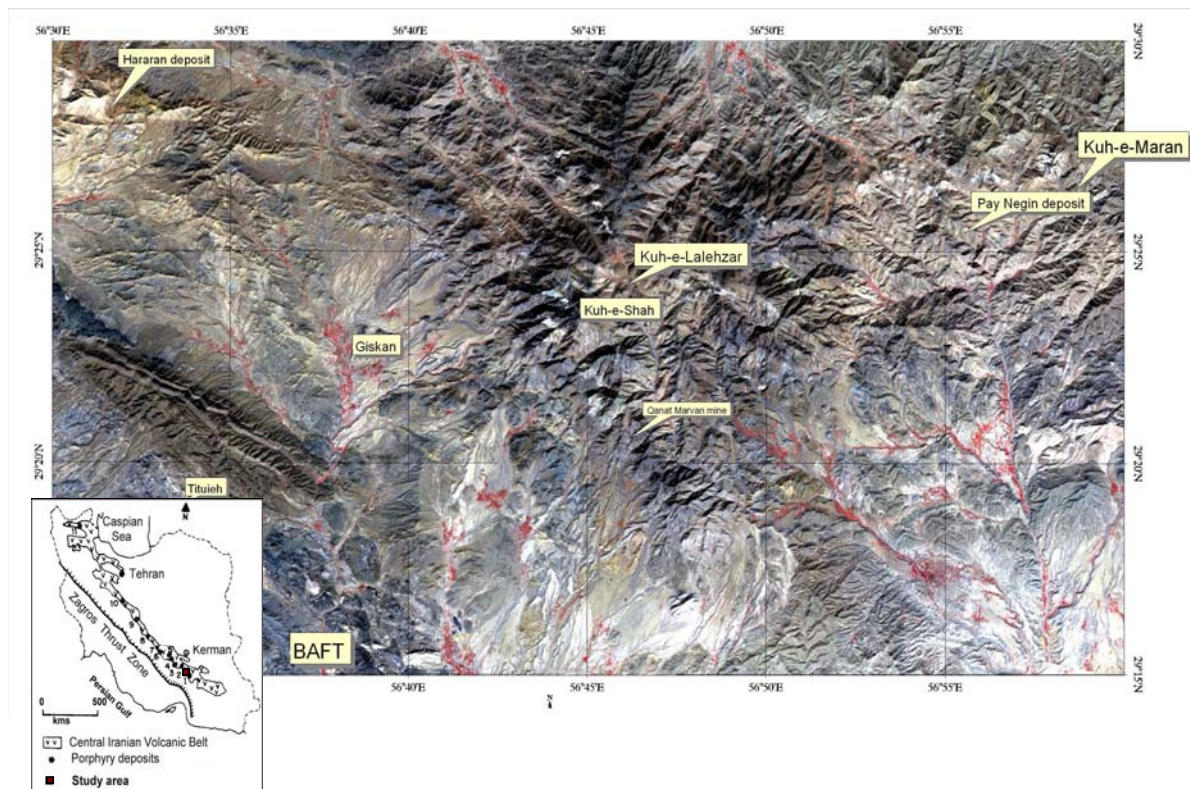
- ۱- تهیه نقشه زمین‌شناسی و شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌هایی که نهشته‌های معدنی را در بر دارند.
- ۲- شناسایی سنگ‌های دگرسان شده براساس ویژگی‌های طیفی آنها.

محلول‌های گرمایی که ممکن است از عنصرهای پتاسیم (K) سدیم (Na)، کلسیم (Ca)، آهن (Fe) و منیزیم (Mg) غنی باشند، در اثر واکنش با سنگ‌های مسیر باعث ایجاد تغییراتی در ترکیب سنگ‌ها می‌شوند و کانی‌های جدیدی تولید می‌کنند. از 40K که در اثر تغییرات در کانی‌شناسی سنگ‌ها ایجاد می‌شود، می‌توان با استفاده از روش تابش‌سنجی، درحکم شاخصی برای تعیین مناطق دگرسان شده استفاده کرد. در اثر دگرسانی سنگ‌ها کانی‌هایی مانند سریسیت، بیوتیت، فلدسپارهای پتاسیم‌دار، برخی از کانی‌های رسی، کلسیت، اپیدوت و کلریت تشکیل می‌شوند (لوول و گیلبرت، ۱۹۷۰). این کانی‌ها را می‌توان با استفاده از آنالیز تصاویر ماهواره‌ای مشخص کرد. از آنجا که برخی از این کانی‌ها غنی از 40K هستند، می‌توان به روش تابش‌سنجی نیز مناطق دگرسان شده را مشخص کرد.

محققان گوناگون از روش تابش‌سنجی در تعیین مناطق دگرسان شده استفاده کرده‌اند (دیکسون و اسکات، ۱۹۹۷؛ ژاکس و همکاران، ۱۹۹۷؛ آيرو، ۲۰۰۲؛ شیوز و همکاران، ۲۰۰۰ و کوادروس و همکاران، ۲۰۰۳). این محققان روش نقشه‌های نسبتی را برای تعیین مناطق دگرسان شده مورد استفاده قرار داده‌اند. آنالیزهای آماری داده‌های ژئوفیزیکی در تحقیقات اکتشافی بسیاری از

هیوسان و همکاران، ۲۰۰۵؛ هویارد و کرولی، ۲۰۰۵؛ مارس و رووان، ۲۰۰۶ و رووان و همکاران، ۲۰۰۶). منطقه مورد بررسی نیمه شمالی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی بافت در استان کرمان را دربر می‌گیرد. شکل ۱ موقعیت این منطقه را در پهنه ایران زمین نشان می‌دهد. هدف از این تحقیق مقایسه روش‌های متفاوت آنالیز (آنالیز مؤلفه اصلی و نقشه‌های نسبتی) روی داده‌های ژئوفیزیکی و تصاویر ماهواره‌ای در تعیین مناطق دگرسان‌شده است. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های ژئوفیزیک هوایی مغناطیس‌سنجی برحسب nT و تابش‌سنجی (مقادیر اورانیم و توریم برحسب eppm و پتاسیم برحسب درصد) برداشت شده از سوی سازمان انرژی اتمی ایران و تصاویر ماهواره‌ای حسگر استر (اخذ شده در ۲۰۰۱) است.

حسگر استر که روی ماهواره ترا نصب شده است از سال ۱۹۹۹ تصاویر چند طیفی را به زمین مخابره می‌کند. این حسگر در ۱۴ باند طیفی تصویر برداری می‌کند که این امر با سه حسگر صورت می‌گیرد. سه باند طیفی اول که با نام مرئی و فروسرخ نزدیک شناخته می‌شوند در طول موج‌های بین $0.52 - 0.86 \mu\text{m}$ شش باند طیفی دوم که به تصاویر فروسرخ طول موج کوتاه معروف‌اند، در طول موج‌های $1.6 - 2.430 \mu\text{m}$ و پنج باند سوم که به تصاویر فروسرخ حرارتی نامیده می‌شوند، در طول موج‌های $8.125 - 11.65 \mu\text{m}$ اخذ می‌شوند (آبرامز، ۲۰۰۲). تحقیقات گذشته روی داده‌های حسگر استر نشان داده است که تصاویر فروسرخ طول موج کوتاه برای تعیین برخی مناطق دگرسان شده مناسب‌اند (یوشیکی، ۲۰۰۲؛ رووان و همکاران، ۲۰۰۳؛ گالوائو و همکاران، ۲۰۰۵؛

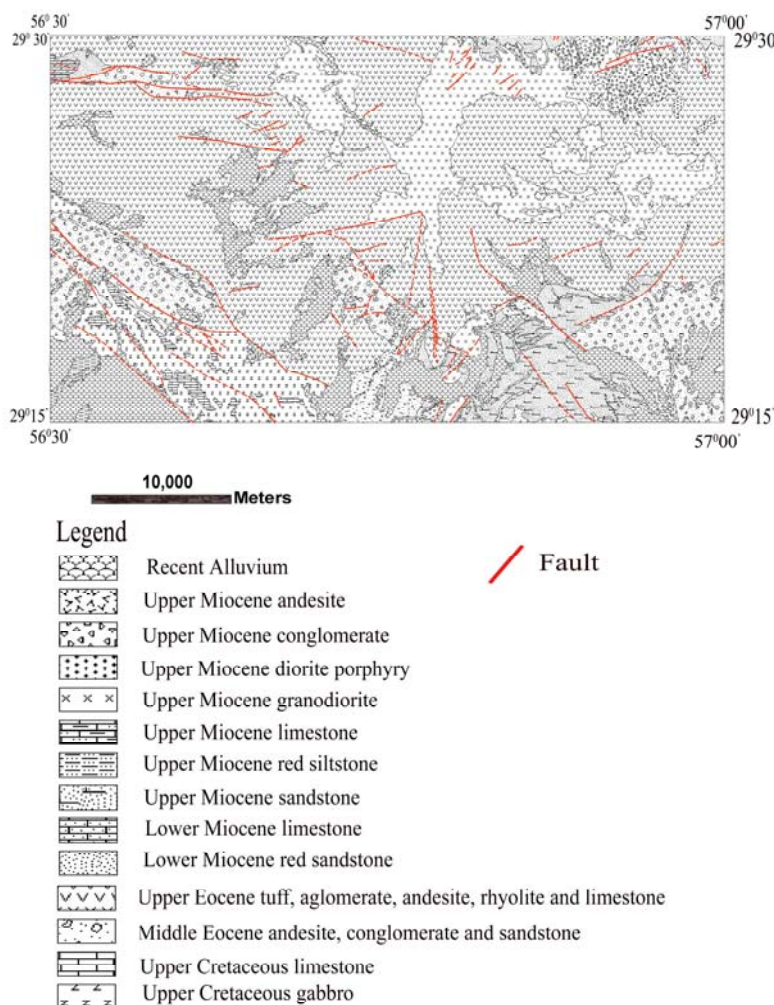


شکل ۱. موقعیت منطقه تحقیقاتی روی کمان ماگمایی ارومیه - دختر (شهاب پور، ۱۹۹۴) و تصویر کاذب رنگی (۱، ۲، ۳) حسگر استر. پوشش گیاهی در این تصویر با رنگ سرخ نشان داده شده است.

۲ زمین‌شناسی منطقه

و آندزیت پیروکسن‌دار با سن ائوسن و سیلتستون، کنگلومرا و گراول با سن میوسن تشکیل شده است. جدیدترین واحدها از رسوبات کواترنر تشکیل یافته‌اند. توده‌های نفوذی موجود در منطقه که در بعضی مناطق باعث دگرسانی و ایجادکانی سازی شده‌اند عمدتاً در میوسن میانی و با ترکیبات گرانودیوریت، دیوریت پورفیری و کوارتز-دیوریت تشکیل شده‌اند (ساردیک و همکاران، ۱۹۷۲). نقشه زمین‌شناسی منطقه در شکل ۲ نشان داده شده است.

منطقه مورد تحقیق در نیمه شمالی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی شهرستان بافت روی کمان ماگمایی دهج-ساردوئیه در استان کرمان قرار دارد. ریخت‌شناسی منطقه عموماً دارای پستی و بلندی‌های فراوان و توپوگرافی کوهستانی و خشن است. بلندترین ارتفاع منطقه ۴۳۷۶ و پایین‌ترین نقطه ۱۸۲۰ متر است. سنگ‌های دیاباز، آهک، گابرو و ماسه‌سنگ با سن کرتاسه بالایی قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه را تشکیل می‌دهند. ماسه‌سنگ، کنگلومرا، آذرآواری‌ها، ایگنمبریت، بازالت آندزیتی



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه. اسامی واحدهای سنگی به ترتیب سنی از قدیم به جدید در راهنمای نقشه آورده شده است (با تغییر از (ساردیک و همکاران، ۱۹۷۲).

شکل ۴ نقشه نسبتی eK/eTh نشان می‌دهد. با توجه به این تصویر، قسمت عمده دگرسانی‌های منطقه که در شرق، شمال و غرب تصویرند، نمایان شده است.

کوادرس و همکاران در سال ۲۰۰۳ از روش زیر برای تعیین مناطق غنی شده پتاسیم مرتبط با فعالیت‌های گرمایی استفاده کرده‌اند.

$$Ki = (K - eTh) \times eTh \quad (1)$$

$$Kd = (K - Ki) / Ki \quad (2)$$

نقشه حاصل از این رابطه نمایانگر توزیع مقادیر پتاسیم و مناطق غنی شده مرتبط با فرایندهای گرمایی است. در شکل ۵ نقشه Kd برای منطقه مورد تحقیق آورده شده است. این نقشه تقریباً مشابه نقشه نسبتی eK/eTh است.

۲-۳ آنالیز مؤلفه‌های اصلی

آنالیز مؤلفه اصلی یکی از روش‌های آماری چندمتغیره است که با استفاده از بردارهای ویژه و مقادیر ویژه ماتریس داده‌های مورد بررسی، جهت‌هایی که در آنها حداکثر تغییرات رخ می‌دهد را شناسایی می‌کند و سپس با استفاده از مجموعه متغیرهای جدید که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه است، تعداد ابعاد (متغیرها) کاهش می‌یابد و نقش هر یک از متغیرها در تغییرپذیری مشخص می‌شود (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). با توجه به اینکه در این تحقیق چهار نوع داده ژئوفیزیکی به کار گرفته شده، به منظور بارزسازی تغییرات با استفاده از روش آنالیز مؤلفه اصلی، تعداد چهار مؤلفه به دست آمد. نتایج حاصل از این پردازش در جدول ۱ نشان داده شده است.

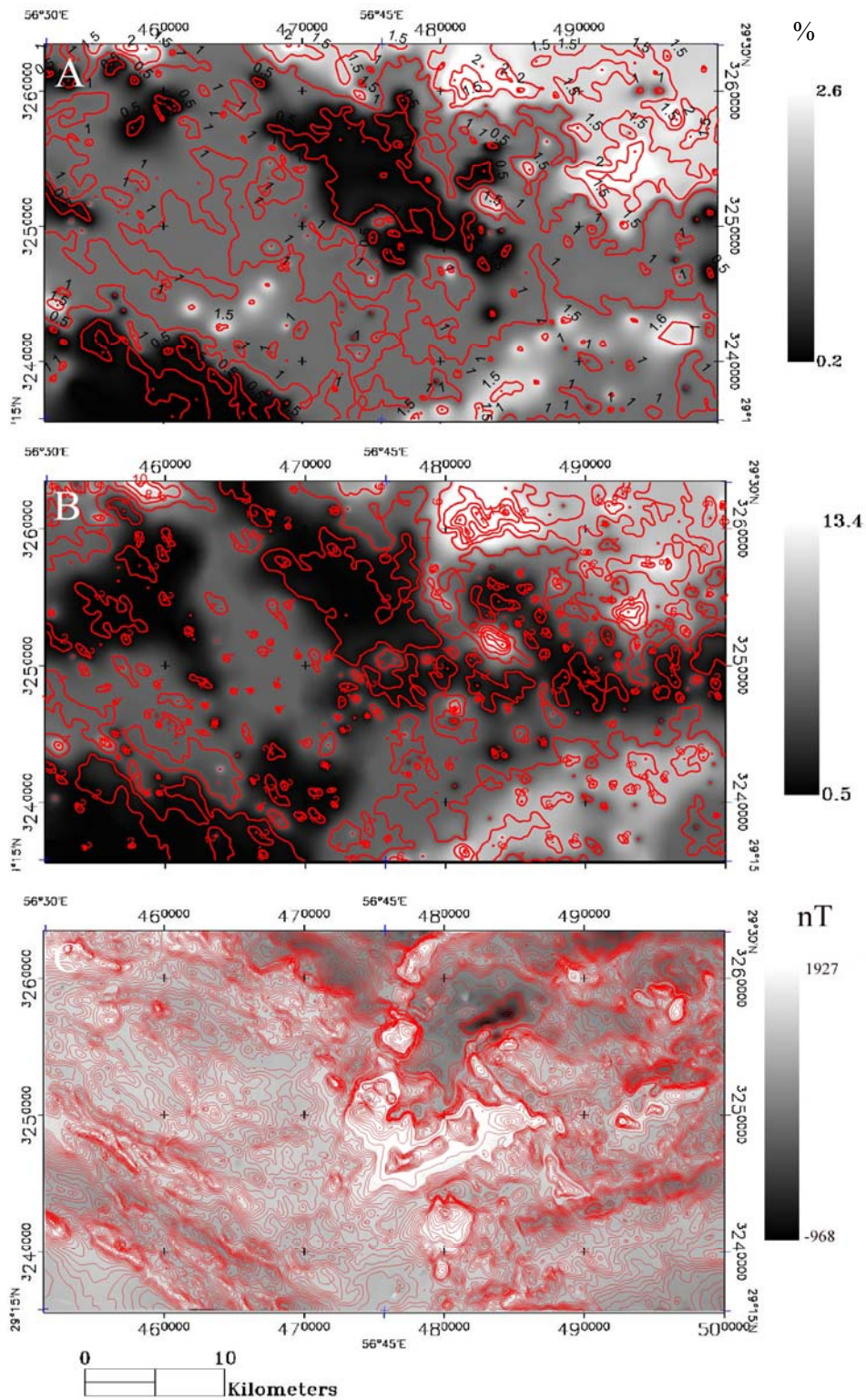
گسل‌های منطقه در جهت‌های مختلف پراکنده شده‌اند و روند خاصی را نشان نمی‌دهند. کانسارهای منطقه عمدتاً پورفیری (مس هاراران، لاله زار و پی‌نگین) و رگه‌ای (سرب و روی قنات مروان، مس گوغر و آب بهری) می‌باشند که در امتداد کانسارهای مختلف موجود بر روی کمان ماگمایی ارومیه-دختر وجود آمده‌اند (دیمتریویچ، ۱۹۷۳).

۳ آنالیز داده‌های ژئوفیزیک

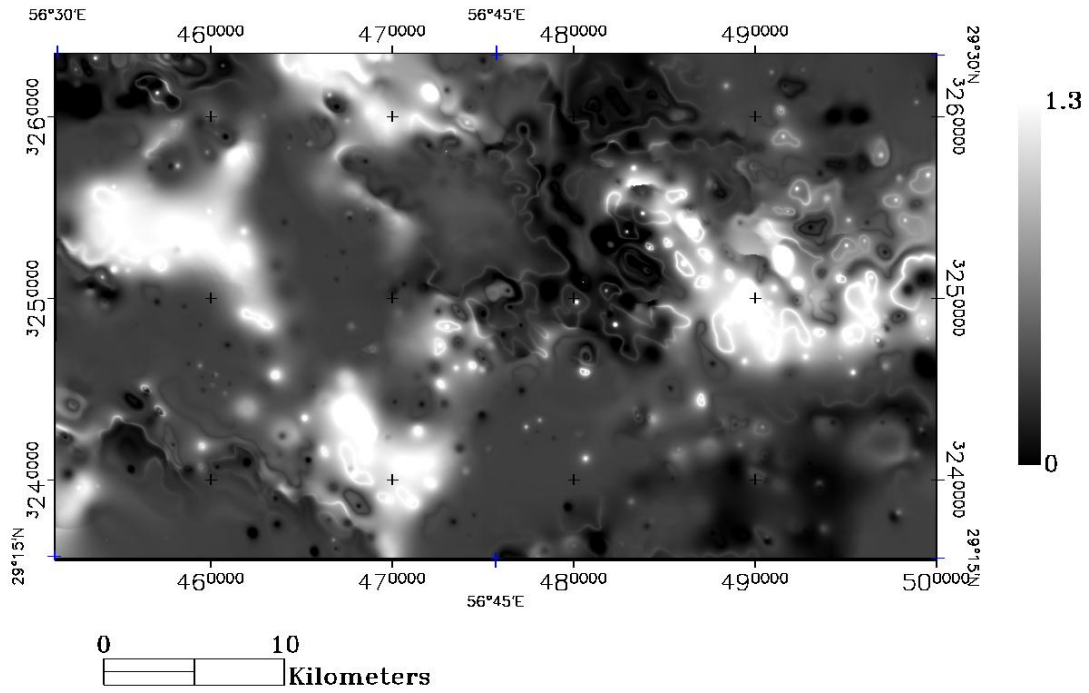
برای بررسی داده‌های ژئوفیزیک هواپرد و ارتباط آنها با مناطق دگرسان شده، نقشه‌های کانتوری پس از تبدیل به فایل رقومی تصویری در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ArcMap به صورت برداری درآمده و سپس به فرمت رستر در آورده شده‌اند. نقشه‌های مربوط به این داده‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از بررسی این نقشه‌ها مشخص شد که برای بارزسازی مناطق دگرسان شده در منطقه موردنظر، نمایش اولیه این داده‌ها کافی نیست و لازم است از روش‌های پردازش داده برای هدف ذکر شده استفاده شود. در زیر به این روش‌ها پرداخته شده است.

۱-۳ نقشه‌های نسبتی

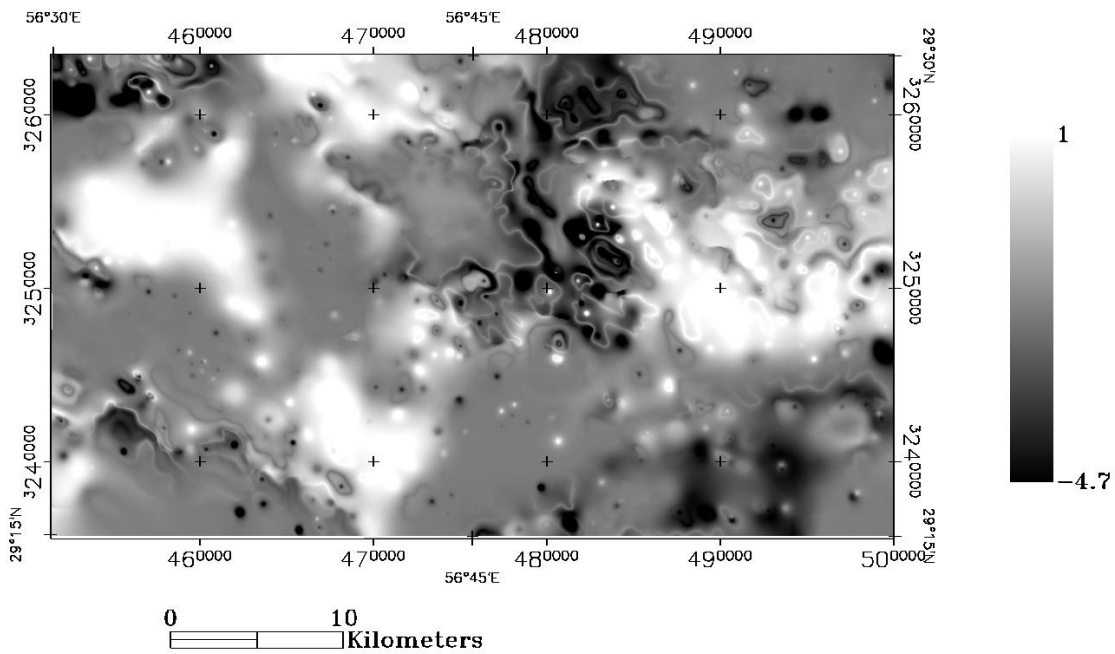
در برخی موارد، دگرسانی‌های گرمایی همراه با غنی شدن پتاسیم و تهی شدن توریم است (کوادرس و همکاران، ۲۰۰۳). بنابراین می‌توان از نسبت eK/eTh برای نمایش بهتر مناطق دگرسانی استفاده کرد. نویسندگان متعددی از این نسبت در تعیین مناطق دگرسان شده و حذف اثر سنگ استفاده کرده‌اند (ژاکس و همکاران، ۱۹۹۷؛ آبرو، ۲۰۰۲؛ شیوز و همکاران، ۲۰۰۰ و کوادرس و همکاران، ۲۰۰۳).



شکل ۳. نقشه های رستری داده های ژئوفیزیکی. پتاسیم (A)، توریم (B) و شدت میدان مغناطیسی (کاهش یافته به قطب) (C). خطوط کانتوری نقشه ها نیز نشان داده شده است.



شکل ۴. نقشه حاصل از نسبت eK/eTh . پیکسل‌های روشن نمایانگر مقادیر زیاد این نسبت است.



شکل ۵. نقشه Kd . پیکسل‌های روشن نمایانگر مقادیر زیاد Kd است.

جدول ۱. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی داده‌های ژئوفیزیک.

متغیر مؤلفه	پتاسیم	توریم	اورانیم	مغناطیس‌سنجی	درصد واریانس
PC1	-۰/۵۸	-۰/۵۹	-۰/۴۰	۰/۳۸	۵۵/۵۶
PC2	-۰/۰۹	-۰/۱۹	-۰/۴۲	-۰/۸۸	۱۹/۹۵
PC3	۰/۴۱	۰/۳۲	-۰/۸۰	۰/۲۷	۱۸/۷۰
PC4	-۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۰۸	-۰/۰۴	۵/۷۳

میدان مغناطیسی زیادی نمایان می‌سازند. زون دگرسانی پتاسیک در سطح زمین در محدوده مورد بررسی مشاهده نشد. در ضمن مناطقی که دارای سنگ‌های بازیک و فوق‌بازی (افیولیت‌ها در جنوب غرب منطقه) هستند، شدت میدان مغناطیس زیادی نشان می‌دهند. اکثر کانسارهای پورفیری موجود در کمان ماگمایی کرمان دارای زون اکسیده‌اند که این خود نشانگر تبدیل مگنتیت و پیریت به کانی‌های ثانویه‌ای مانند گوتیت و هماتیت است که خاصیت مغناطیسی کمی نسبت به مگنتیت دارند. در مورد کانسارهایی که دارای بیوتیت و مگنتیت در زون پتاسیک‌اند، در صورتی که زون اکسیده ضخیمی نداشته باشند، بایستی در تفسیر نتایج مولفه‌های اصلی تجدید نظر کرد. در چنین مواردی شدت میدان مغناطیسی زیاد با مقادیر زیاد داده‌های تابش‌سنجی ضریب همبستگی بزرگی خواهد داشت.

در مولفه اصلی دوم اورانیم و شدت میدان مغناطیسی دارای همبستگی به نسبت زیادی هستند. از آنجا که مقادیر اورانیم در این منطقه بسیار کم است و نقشه به دست آمده نیز ارتباطی با مناطق دگرسان شده ندارد، این مولفه پدیده خاصی را نشان نمی‌دهد. در مولفه اصلی سوم پتاسیم و توریم دارای همبستگی مثبت‌اند اما با اورانیم همبستگی منفی دارند. با توجه به این نکته که در این مولفه عنصرهای پتاسیم و توریم هر دو افزایش نشان می‌دهند، اثر سنگ‌شناسی در این مولفه حذف نمی‌شود و مناطق دگرسان شده و غیر دگرسان با هم نشان داده می‌شوند. در

در مولفه اصلی اول که حاوی بیشترین واریانس داده‌ها است، داده‌های تابش‌سنجی (پتاسیم، توریم و اورانیم) دارای همبستگی زیاد اما با شدت میدان مغناطیسی همبستگی معکوس دارند. با توجه به علامت منفی داده‌های تابش‌سنجی، مناطقی که دارای تابش‌سنجی بالاتری هستند با تون تیره و مناطقی که دارای شدت میدان مغناطیسی زیادند با تون روشن نشان داده شده‌اند. نقشه این مولفه با استفاده از رابطه ۳ تهیه شده است (شکل ۶).

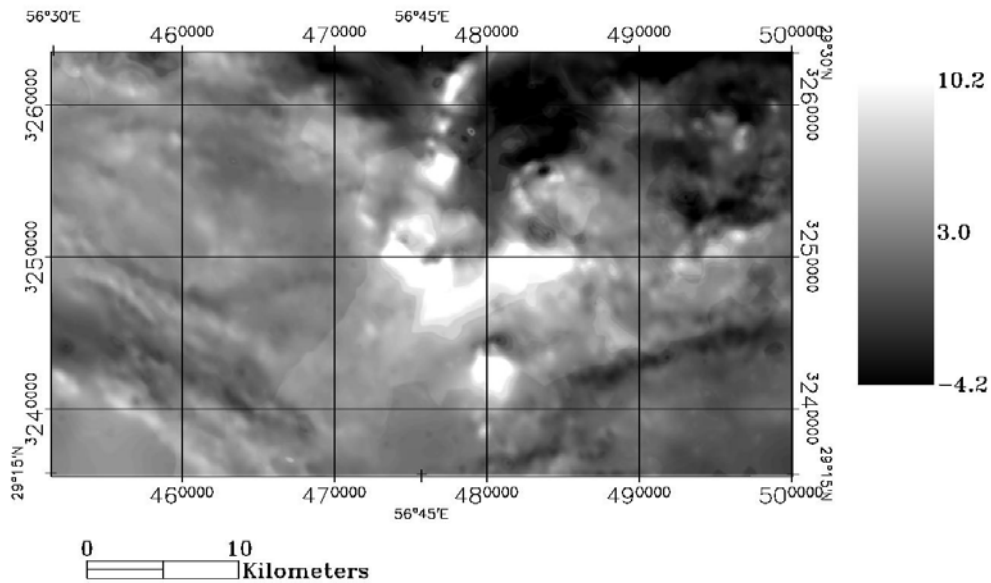
$$PC1 = -0.58(K \text{ map}) - 0.59(Th \text{ map}) - 0.40(U \text{ map}) + 0.38(Mag \text{ map}) \quad (۳)$$

البته با توجه به این نکته که در مناطق دگرسان شده (پتاسیک، فلیک و آرژیلیک) که اکسایش سطحی اثر کرده است، تهی‌شدگی مغناطیسی پدیده‌ای طبیعی است. در زون اکسایش مگنتیت به کانی‌های گروه اکسید آهن مانند گوتیت، هماتیت و ژاروسیت تبدیل می‌شود. همچنین دگرسانی پروپلیتیک معمولاً دارای کانی‌هایی است که دارای آهن فراوانی‌اند، لذا انتظار می‌رود که داده‌های شدت میدان مغناطیسی روی مناطق دگرسان شده (فلیک و آرژیلیک) مقدار کم و در حاشیه‌ها که دگرسانی پروپلیتیک اثر کرده است مقدار زیاد نشان دهد. در این منطقه محدوده‌های دگرسان شده (فلیک و آرژیلیک) دارای شدت میدان مغناطیس کم و در اکثر محدوده‌هایی که دارای دگرسانی پروپلیتیک‌اند، شدت

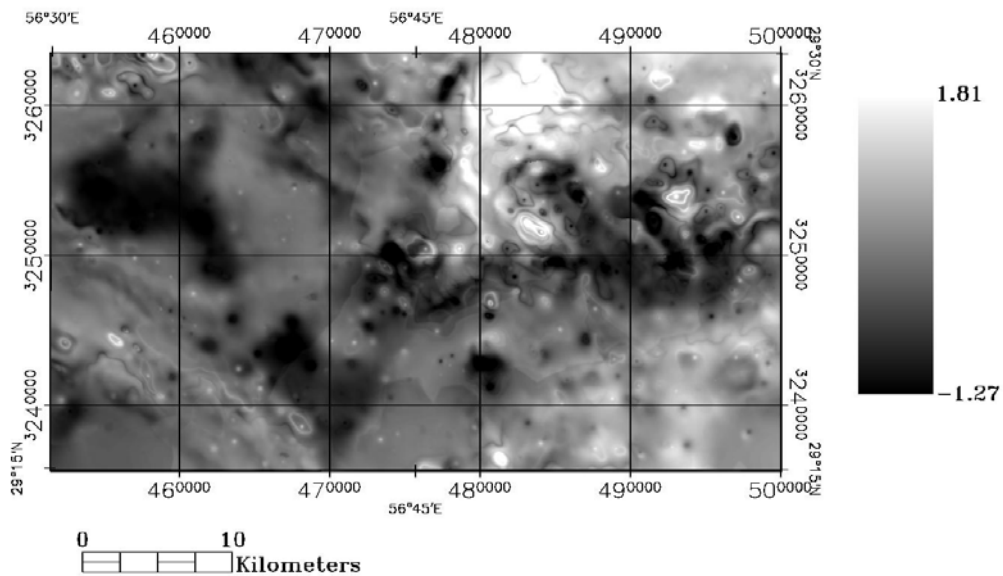
توجه به این نکته که نسبت پتاسیم به توریم می‌تواند شاخصی به منظور شناسایی مناطق دگرسان شده باشد، این مولفه مناطق دارای دگرسانی را با تون تیره نشان می‌دهد. این نقشه با استفاده از رابطه ۴ تهیه شد (شکل ۷).

مولفه چهارم پتاسیم و توریم دارای بارگزاری زیاد اما مخالف هم هستند.

$$PC4 = -0.69(K \text{ map}) + 0.08(U \text{ map}) - 0.04(Mag \text{ map}) + 0.71(Th \text{ map}) \quad (4)$$



شکل ۶. نقشه مولفه اصلی اول که با استفاده از بارگزاری‌های جدول ۱ تهیه شده است. مناطقی که دارای همبستگی زیاد توریم، پتاسیم و اورانیم هستند با تون تیره نشان داده شده‌اند.



شکل ۷. نقشه مولفه اصلی چهارم که با استفاده از بارگزاری‌های جدول ۱ تهیه شده است. مناطقی که دارای پتاسیم زیاد و توریم کم هستند با تون تیره نشان داده شده‌اند.

تصاویر مورد استفاده در اینجا، مربوط به دو منظره مجزای اخذ شده در تیر ۱۳۸۰ هستند. تصاویر مورد استفاده، از نظر هندسی (مخصوصاً در طول جغرافیایی) دارای دقت کافی نبودند که با استفاده از نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ و با در نظر گرفتن عارضه‌های مشترک بین تصویر و نقشه توپوگرافی که عمدتاً آبراهه‌ها بودند، زمین مرجع شدند. تصاویر مورد استفاده تا سطح IB تصحیح تابش سنجی شده بودند. در مرحله پیش پردازش داده‌ها از کسر اثر تیرگی (Dark subtract) که در اینجا مقادیر کمینه هر باند تصویر در محاسبات در نظر گرفته شد، استفاده شد. این روش اثر پراکنش جوئی را حذف می‌کند. علاوه بر این، از روش میانگین بازتابش داخلی نسبی (Internal Average Relative Reflectance) نیز استفاده شد. در این روش میانگین طیف تصویر محاسبه و در حکم مرجع در نظر گرفته می‌شود. سپس میانگین طیف به دست آمده بر طیف پیکسل‌های باندها تقسیم می‌شود (کروس و همکاران، ۱۹۸۵).

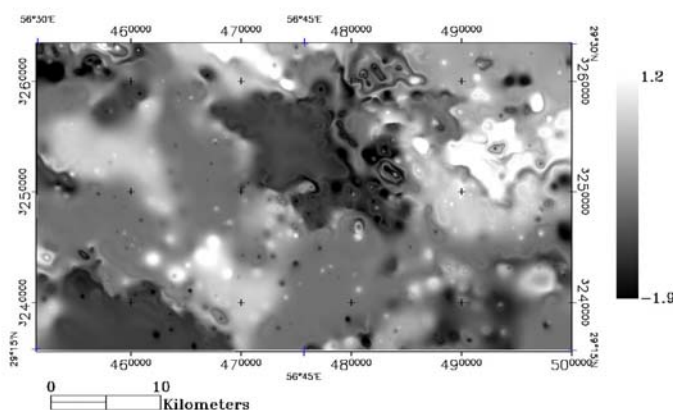
با توجه به این نکته که دو عنصر پتاسیم و توریم نقش مهم‌تری در تعیین مناطق دگرسان شده دارند، آنالیز مولفه اصلی نیز روی این دو نقشه صورت گرفت. مولفه اصلی دوم مناطق دگرسان شده را به شکل بارزی مشخص می‌سازد. این نقشه تطابق بیشتری نسبت به نقشه مولفه اصلی چهارم با دگرسانی‌های مشاهده شده بر سطح زمین دارد (شکل ۸). باید به این نکته توجه داشت که اگر بارگزاری پتاسیم زیاد و بارگزاری توریم کم باشد (جدول ۲)، به این ترتیب اثر پتاسیم که ممکن است با دگرسانی در ارتباط باشد، بیشتر می‌شود.

۴ پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در سال‌های اخیر از تصاویر ماهواره‌ای در تعیین مناطق دگرسان‌شد مخصوصاً مناطق دگرسانی مرتبط با کانسارهای نوع پورفیری که عمدتاً دارای مناطق وسیع دگرسانی در سطح زمین‌اند، استفاده شده است. حسگر استر با توجه به دارا بودن باندهای طیفی متعدد، امکان نقشه‌برداری از مناطق دگرسان‌شده را فراهم می‌آورد.

جدول ۲. نتایج به دست آمده از آنالیز مولفه‌های اصلی روی توریم و پتاسیم.

	پتاسیم	توریم	درصد واریانس
PC1	۰/۱۶	۰/۹۸	۹۸/۳
PC2	۰/۹۸	-۰/۱۶	۱/۷



شکل ۸. نقشه مولفه اصلی دوم با استفاده از آنالیز مولفه‌های اصلی روی نقشه‌های توریم و پتاسیم.

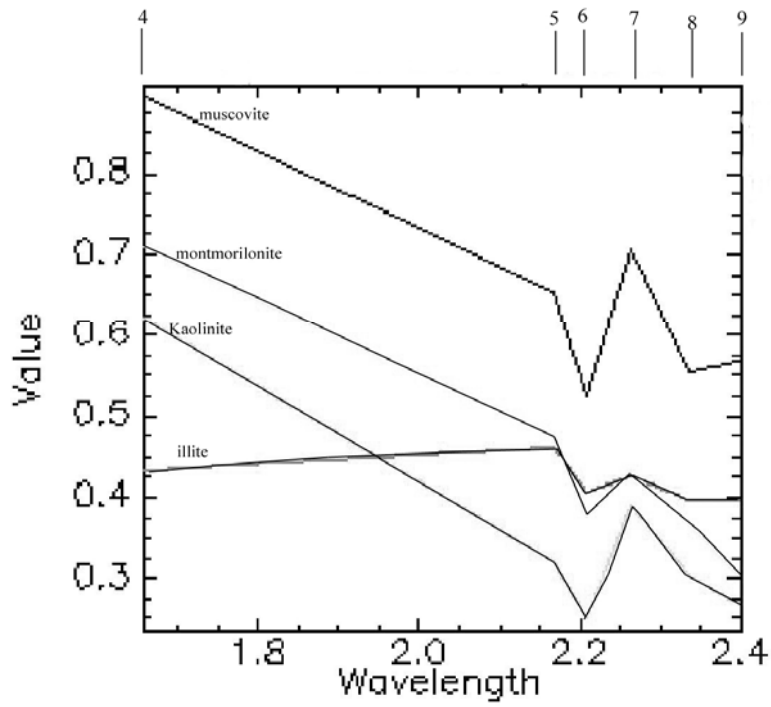
آمد. به دلیل تداخل پوشش گیاهی در این نسبت از شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (ساینز، ۱۹۹۷) برای حذف این تداخل استفاده شد. شکل ۱۰ تصویر این نسبت باندی را نشان می‌دهد.

با بررسی‌های صورت گرفته در عملیات صحرایی و نتایج آزمایش روی نمونه‌ها - که در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهند شد - مشخص شد که زون A روی توده‌های نفوذی و سنگ‌های دگرسان شده منطقه قرار گرفته اما زون B علاوه بر دارا بودن دگرسانی ضعیف، دربرگیرنده رگه‌های کربناته است. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای باندهای ذکر شده، در جدول ۳ آورده شده است. با مراجعه به جدول ۳، مؤلفه اول دارای بارگزاری مثبت همه باندها و معرف سپیدایی است. در مؤلفه دوم، با توجه به بارگزاری مثبت باند ۴ و بارگزاری منفی باند ۹ انتظار می‌رود که برخی از مناطق دگرسان شده بارزسازی شوند. اما این تصویر همه مناطق دگرسان شده را بارزسازی نمی‌کند. در مؤلفه سوم باند ۴ یعنی محدوده بازتاب کانی‌هایی رُسی، مسکوویت و کربنات‌ها، دارای بارگزاری زیاد و منفی است (۰/۸۰-) اما باند ۶ واقع در محدوده جذب کانی‌های رُسی و مسکوویت، دارای بارگزاری زیاد اما مثبت است (۰/۴۹). در نتیجه انتظار می‌رود که مناطق با دگرسانی‌های گرمایی که حاوی کانی‌های هیدروکسیل می‌باشند، با تون تیره نمایان شوند (شکل ۱۱). به این علت که گیاهان در برخی از گستره طیف الکترومغناطیس - به خاطر وجود آب در بافتشان - با کانی‌های رُسی شباهت‌های طیفی دارند، اثر پوشش گیاهی نیز در امتداد دره‌ها با رنگ تیره به چشم می‌خورد. مؤلفه‌های اصلی ۴، ۵ و ۶ با توجه به واریانس بسیار کمشان دارای نوفه‌اند و عارضه خاصی را آشکار نمی‌سازند.

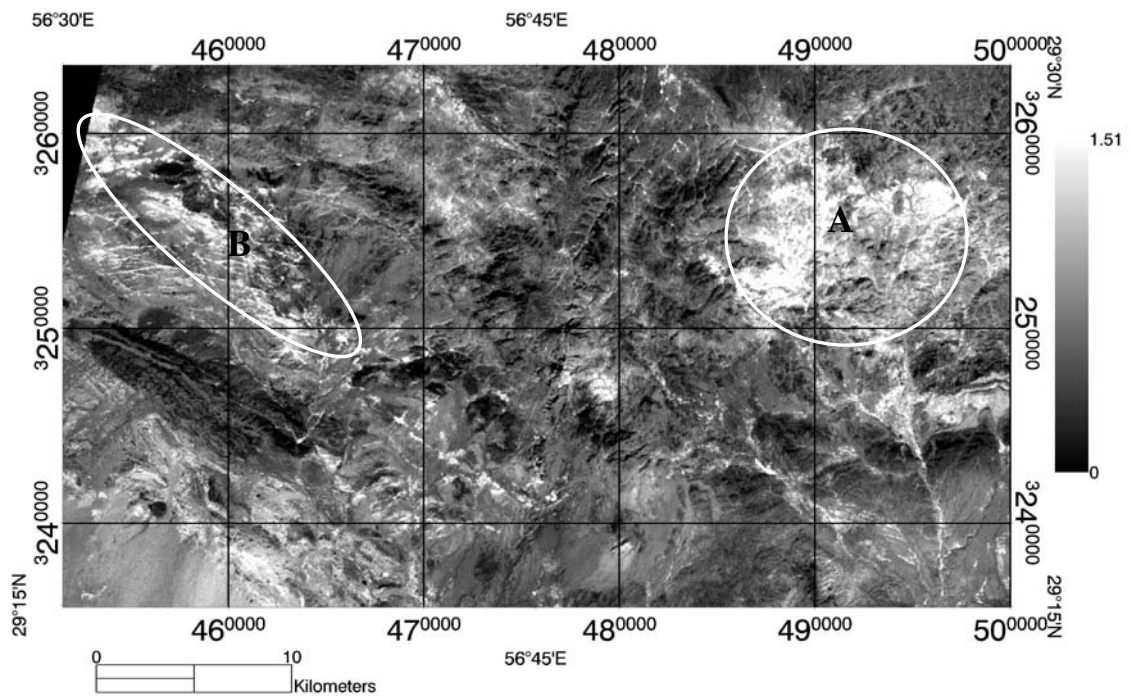
بر اساس تحقیقات متعددی که تاکنون صورت گرفته است (منابع عرضه شده در مقدمه)، کانی‌ها دارای بازتاب و جذب در طول موج‌های متفاوت‌اند که این اساس پردازش تصویر به منظور شناخت آنها است. در شکل ۹ منحنی پاسخ طیفی برخی از کانی‌های موجود در دگرسانی‌های گرمایی نشان داده شده است.

با بررسی منحنی طیفی کانی‌ها برای بارزسازی این مواد می‌توان از نسبت‌های باندی استفاده کرد. در روش نسبت باندی، یک پیکسل از باند اول بر پیکسل متناظر آن در باند دوم تقسیم می‌شود. برای تعیین مناطق دگرسان شده معمولاً باند تصویری که مناطق دگرسان شده دارای بازتاب است در صورت و باند تصویری که دارای جذب است در مخرج قرار داده می‌شوند. ضعف روش نسبت باندی در حذف اثر تداخل‌های طیفی، یکی از مشکلاتی است که این روش با آن روبه‌رو است. برای مثال پوشش گیاهی سبز دارای بازتاب زیادی در محدوده باند ۴ استرس‌ها و کربنات‌ها نیز در همین باند دارای بازتاب‌اند. در صورتی که از این باند در صورت کسر استفاده شود، مناطق دارای پوشش گیاهی سبز نیز بارزسازی می‌شوند. اما در مناطق دارای پوشش گیاهی ضعیف، تاحدودی می‌توان از این روش در تعیین مناطق دگرسان شده استفاده کرد، هرچند که روش مؤلفه‌های اصلی جواب بهتری می‌دهد.

با بررسی شکل ۹ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که برای بارزسازی مناطق دگرسان شده با توجه به حضور کانی‌های رُسی و مسکوویت می‌توان از نسبت‌های باندی ۴/۹ و ۷/۹ و ۷/۶ تصاویر (SWIR, Short Wave Infra Red) استفاده کرد. به همین منظور نسبت‌های ذکر شده به کار رفت. پس از بررسی تصاویر و مقایسه مناطق بارز شده با نمونه‌های برداشت شده و نتایج پراش پرتو ایکس و مقاطع نازک نمونه‌ها، بهترین نتیجه از نسبت ۴/۹ به دست



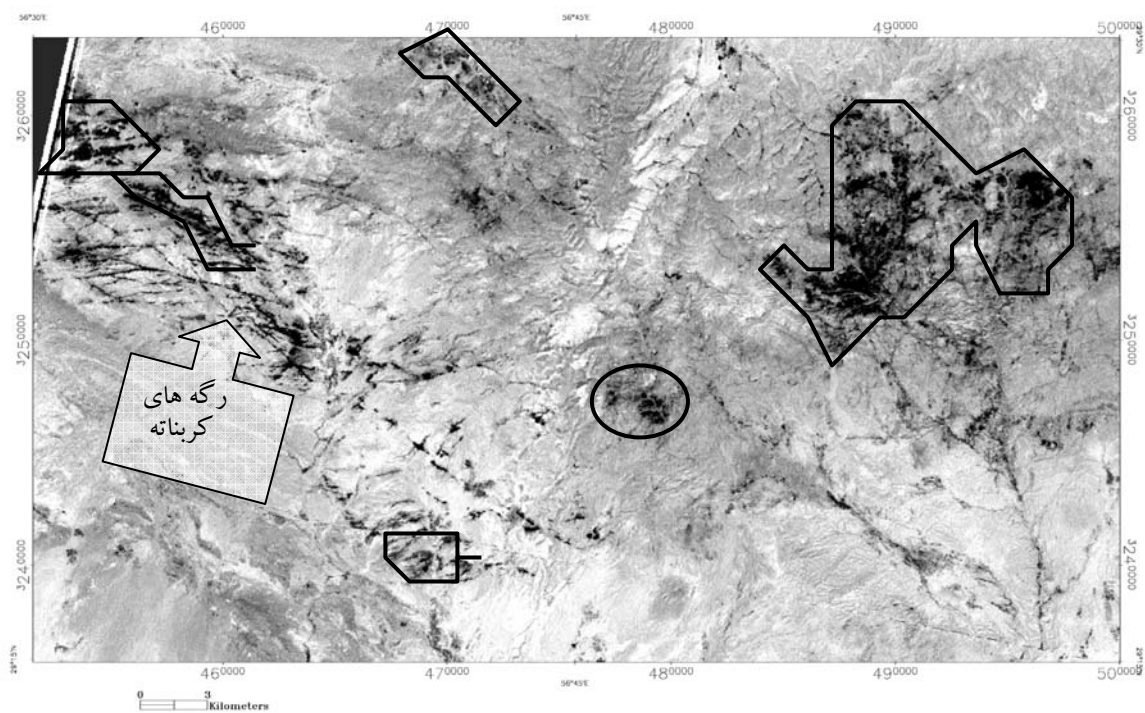
شکل ۹. منحنی طیفی کانی‌های موجود در دگرسانی‌های گرمایی. باندهای انعکاسی حسگر استر در بالای شکل نشان داده شده است (اقتباس از لیوو و همکاران، ۱۹۹۳).



شکل ۱۰. دگرسانی‌های موجود در منطقه بافت که با رنگ روشن نمایان شده‌اند. قسمت‌های روشن در غرب تصویر (B) علاوه بر دگرسانی، حاوی رگه‌های کربناته نیز هستند.

جدول ۳. نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی روی باندهای محدوده فرسرخ طول موج کوتاه.

باند / مؤلفه	۴	۵	۶	۷	۸	۹	واریانس (%)
PC1	0.431027	0.362127	0.399814	0.402589	0.433700	0.415999	93.91
PC2	0.357497	0.379815	0.492274	-0.471035	-0.447727	-0.251534	3.01
PC3	-0.803243	0.207902	0.494559	-0.137250	0.119922	0.183766	1.27
PC4	-0.125174	0.095916	0.212546	0.633846	-0.044183	-0.725426	0.94
PC5	-0.144836	0.463881	-0.305295	0.365118	-0.641344	0.354963	0.46
PC6	-0.067573	0.676014	-0.463514	-0.249277	0.428707	-0.278682	0.38

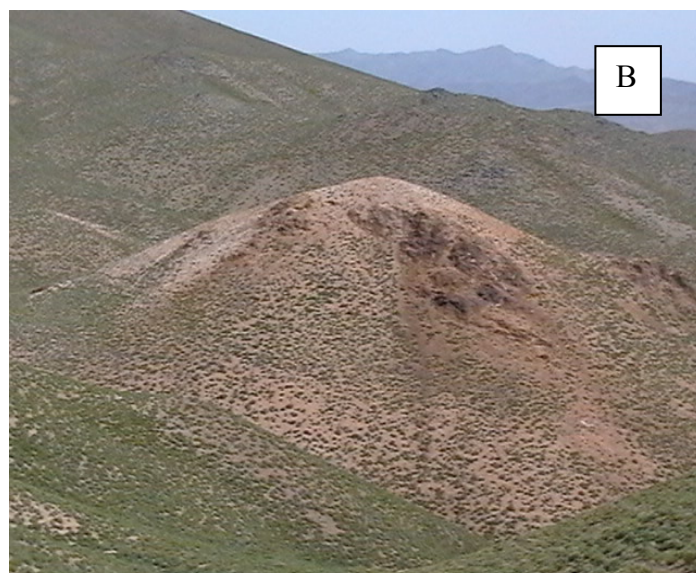


شکل ۱۱. تصویر مؤلفه اصلی سوم حاصل از آنالیز مؤلفه‌های اصلی روی باندهای محدوده SWIR. در این تصویر مناطق دارای دگرسانی با رنگ تیره نشان داده شده‌اند.

شده در سطح زمین دارای رخنمون‌های متعدد سنگی‌اند که این خود امکان استفاده از داده‌های سنجش از دور را فراهم کرده است. نمونه‌هایی از رخنمون‌های سنگی در منطقه در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۵ بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از روش‌های پیش‌گفته در شناسایی مناطق دگرسان شده، بازدید صحرایی و برداشت نمونه‌های صحرایی از منطقه مورد بررسی صورت گرفت. مناطق دگرسان



شکل ۱۲. رخنمون‌های مناطق دگرسان شده در منطقه مورد بررسی: A منطقه فیلیک و B منطقه آرژیلیک را نشان می‌دهد. علاوه بر کانی‌های هیدروکسیل‌دار، که به سنگ اصلی رنگ روشن‌تری داده است، اکسید آهن با رنگ قهوه‌ای روی برخی مناطق مشاهده می‌شود.

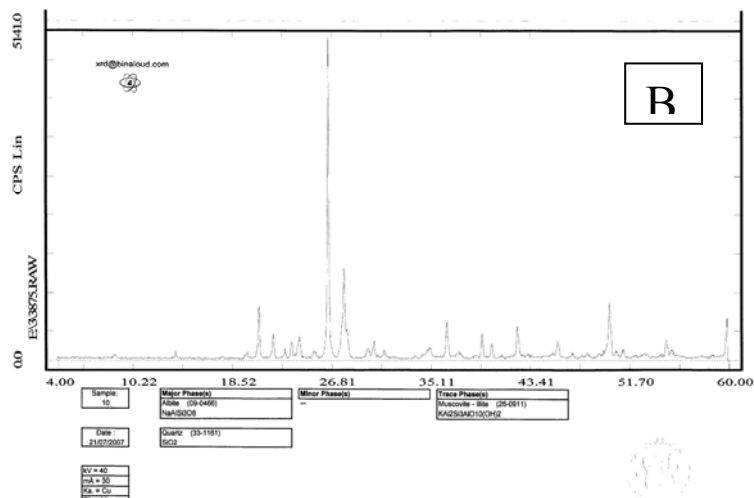
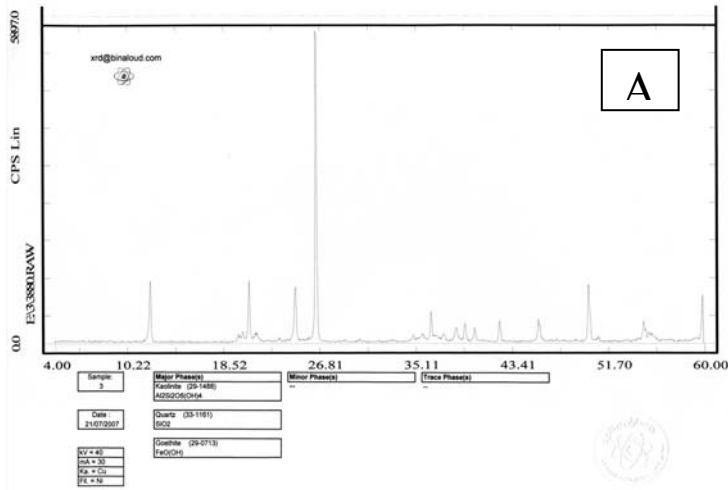
صورت گرفته است. بررسی‌های میکروسکوپی و پراش پرتو ایکس، وجود دگرسانی فیلیک (سرسیت-کوارتز) و آرژیلیک را در بخش‌هایی که در تصاویر ماهواره‌ای درحکم مناطق دگرسان مشخص شده بودند، تأیید کرد. شکل ۱۳ نمونه‌ای از نتایج به‌دست آمده از آنالیز پراش پرتو ایکس را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از داده‌های ژئوفیزیک با دگرسانی‌های مشاهده شده در منطقه مشخص ساخت که بخش‌های عمده مناطق دگرسان شده، بارزسازی شده‌اند. وجود کانی‌های رسی،

مکان‌های نمونه‌برداری به شکلی انتخاب شده‌اند که محدوده‌های گوناگون دگرسانی را دربر گیرند. در مواردی که بی‌هنجاری‌ها در داده‌های ژئوفیزیکی مشاهده شدند، نمونه‌برداری از آن مناطق که در صحرا اثر دگرسانی نداشتند، نیز صورت گرفت. نمونه‌های برداشت شده از بخش‌های متفاوت منطقه به دو روش میکروسکوپی و پراش پرتو ایکس بررسی شدند. بررسی میکروسکوپی در بخش مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان و آنالیز XRD در شرکت کانسارن بینالود

که بتواند همه سطوح دگرسانی (بررسی شده در بازدیدهای صحرائی منطقه، نقشه‌ها و گزارش‌های زمین‌شناسی) را به نقشه درآورد، استفاده شده است. آنچه که حاصل آنالیزهای متفاوت داده‌های ژئوفیزیک هوابرد بود، قسمت‌هایی از مناطق دگرسان شده همراه با برخی مناطق بودند که ارتباطی با فعالیت‌های گرمایی نداشتند و صرفاً به دلیل حضور سنگ‌های آتشفشانی حاوی پتاسیم زیاد و بدون کانی‌سازی، بارز شدند. در مناطقی که دگرسان شدگی همراه با کانی‌های رُسی فقیر از پتاسیم باشد (مانند دگرسانی آرژیلیک)، داده‌های تابش‌سنجی جواب مناسبی نخواهند داشت.

مانند کائولینیت که پتاسیم بسیار اندکی در ساختار مولکولی خود دارند، به‌ندرت با روش‌های تابش‌سنجی قابل کاوش‌اند. اما روش‌های سنجش ازدور در صورتی که این کانی‌ها در سطح وجود داشته باشند، قادرند که این مناطق را بارزسازی کنند. پس از بررسی صحرائی مشخص شد که تصاویر ماهواره‌ای روی مناطق دگرسان شده انطباق بهتری نسبت به روش‌های ژئوفیزیکی دارند.

۶ مقایسه نتایج به‌دست آمده از داده‌های ژئوفیزیک و دورسنجی در این تحقیق از روش‌های متفاوت آنالیز داده برای ترکیب داده‌های ژئوفیزیک و به‌دست آوردن نقشه‌هایی



شکل ۱۳. نتایج آنالیز XRD برای ۲ نمونه از دگرسانی‌های منطقه. A- حاوی کانی‌های کائولینیت، کوارتز، و گوتیت و B- حاوی کانی‌های آلپیت، موسکویت، کوارتز و ایلیت.

با استفاده از هر چهار داده ژئوفیزیکی و نقشه نسبتی K/Th با مناطق دگرسان شده دارد.

۴- داده‌های ماهواره‌ای صرفاً قشر بالایی سطح زمین را بررسی می‌کنند، درحالی‌که داده‌های ژئوفیزیک هوایی اثرات سطحی (داده‌های تابش‌سنجی) و تا حدودی عمقی (داده‌های مغناطیس‌سنجی) را بررسی می‌کنند. در صورتی‌که از ترکیب هر دو نوع داده استفاده شود، نتایج قابل‌قبول‌تری، مخصوصاً در مورد مناطقی که از رسوبات ضخیم پوشیده شده باشند، به دست خواهد آمد.

تشکر و قدردانی

پیشنهادات داوران محترم، در ارتقای کیفیت این مقاله بسیار موثر بوده است که در اینجا از داوران محترم قدردانی و تشکر می‌شود. از سازمان انرژی اتمی ایران به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های ژئوفیزیک هوایی تشکر و قدردانی می‌گردد. معاون محترم اکتشاف سازمان صنایع و معادن استان کرمان امکانات لازم برای عملی شدن تحقیقات صحرائی و نمونه‌برداری را در اختیار نگارندگان مقاله قرار داده است که بدین وسیله از ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- حسینی‌پاک، ع. ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۸۰، تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران.
- Abrams, M., 2002, ASTER user handbook. Jet Propulsion Lab.
- Airo, M. L., 2002, Aeromagnetic and Aeroradiometric response to hydrothermal alteration. *Surveys in Geophysics*, 23(6), 273-302.
- Baft, 1:100000 SERIES SHEET 7348, Geological survey of Iran.
- Dickson, B. L. and Scott, K. M., 1997, Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2), 187-200.
- Dimitrijevic, M. D., 1973, Geology of Kerman region, Report YU/52, Iran, Geological Survey of Iran.

از آنجا که منطقه مورد بررسی دارای آب و هوایی نسبتاً خشک، رخنمون سنگی بسیار، همراه با پوشش گیاهی اندک است، از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان به راحتی در تعیین مناطق دگرسان شده استفاده کرد. در این تحقیق از روش‌های متفاوت پردازش تصویر در بازسازی مناطق دگرسان شده استفاده شد. مقایسه نتایج به دست آمده از بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی مشخص ساختند که تصاویر ماهواره‌ای با دقت قابل‌قبولی مناطق دگرسانی را ثبت کرده‌اند. در مواردی که تداخل طیفی وجود داشت، این تداخل با استفاده از روش آنالیز مؤلفه اصلی، تفکیک شد. بنابر توضیحات بالا، ثبت مناطق دگرسان شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نسبت به داده‌های ژئوفیزیک در مناطق خشک، نتایج قابل‌اعتمادتری دارد.

۷ نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف مقایسه تصاویر ماهواره‌ای حسگر استر و داده‌های ژئوفیزیک هواپرد در تعیین مناطق دگرسان شده صورت گرفته است. نتایج به دست آمده در زیر بیان می‌شود.

۱- با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و بررسی‌های صحرائی مشخص شد که برای نقشه‌برداری از مناطق دگرسان شده، پردازش تصاویر ماهواره‌ای حسگر استر، نسبت به داده‌های ژئوفیزیک هوایی نتایج بهتری در بر داشته است. روش مؤلفه‌های اصلی با استفاده از باندهای SWIR برای بازسازی مناطق دگرسان شده مناسب‌تر است.

۲- داده‌های مغناطیس‌سنجی در این منطقه با مناطق دگرسان شده انطباق خوبی نشان ندادند.

۳- نتیجه به دست آمده از روش آنالیز مؤلفه اصلی روی داده‌های توریم و پتاسیم روشن ساخت که مؤلفه اصلی دوم انطباق نسبتاً خوبی نسبت به نقشه kd، مؤلفه‌های اصلی

- techniques to the delineation of hydrothermal systems in base and precious metal deposit. North-west Mining Association conference, November.
- Quadros, T. F. M., de., Koppe, J. C., Strieder, J. C. and Costa, J. F. C. L., 2003, Gamma-ray data processing and integration for Lode-Au exploration. *Natural Resources Research*, **12**(1), 57-65.
- Ranjbar, H., Hassanzadeh, H., Torabi, M., Ilaghi, O., 2001a, Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehzar area, Kerman province, Iran, using principal component analysis. *Journal of applied geophysics*, **48**, 33-41.
- Ranjbar, H., Shahhoseiny, M., and Tata, M. 2001b, Geophysical, geochemical, and geological data analyses of Darrehzar area, using canonical correlation method. *Journal Earth and Space physics*, **27**(1), 9-19
- Reford, S., Paterson, N. R., 1994, Airborne Geophysical Survey in Weathered terrain. Proceedings of a short course presented by the prospectors and developers association of Canada. Lynda Bloom(Ed.). *Prospecting in tropical and arid terrains*, March 5-6, 1994. prospectors and developers association of Canada. 3-61 to 3-109.
- Rowan, J. C., Schmidt, R. G. and Mars, J. C., 2006, Distribution of hydrothermally altered rocks in Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, **104**(1), 74-87.
- Rowan, L. C., Hook, S. J., Abrams, M. J. and Mars, J. C., 2003, Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced space borne thermal emission and reflection radiometer (Aster), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, **98**(5), 1018-1027
- Sabins, F. F., 1997, *Remote Sensing, Principles and Interpretation*. third ed, Freeman, New York, 494 pp.
- Sabins, F. F., 1999, Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* **14**, 157-183.
- Sardic, A., Dimitrijevic, M. N., Cvetic, S. and Dimitrijevic, M., D., 1972, Geological map of Sensing for Exploration Geology. ERIM, 309-324.
- Shahabpour, J., 1994, Post-mineralization breccia dike from the Sar Cheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran. *Exploration and Mining Geology* **3**, 39-43.
- Shives, R. B. K., Charbonneau, B. W. and Ford, K., 2000, The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry, recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, **65**(6), 2001-2011.
- Duval, J., 1977, High sensitivity γ -ray spectrometry: state of the art and trial application of factor analysis. *Geophysics*, **53**, 349-559.
- Galvao, L. S., Almeida-Filho, R. and Vitorello, I., 2005, Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using short-wave infrared bands: evaluations in a tropical savanna environment. *International Journal of Applied earth observation and geoinformation*, **7**(2), 107-114.
- Hewson, R. D., Cudahy, T. J., Mizuhiko, S., Ueda, K. and Mauger, A. J., 2005, Seamless geological map generation using ASTER in Brocken Hill-Carnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment*, **99**(1-2), 159-172.
- Honarmand, M., Ranjbar, H. and Moezifar, Z., 2002, Integration and analysis of Airborne geophysical and remote sensing data of Sar Cheshmeh area, using directed principal component analysis. *Exploration and Mining Geology*, **11**(1-4), 43-48.
- Hubbard, B., E. and Crowley, J. K., 2005, Mineral Mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using Co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions. *Remote Sensing of Environment*, **99**(1-2), 173-186.
- Jakes, A. L., Wellman, P., Whitakar, A. and Wyborn, D., 1997, High-resolution geophysics in modern geological mapping. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17920, 159-173.
- Kruse, F. A., Raines, G. I. and Watson, K., 1985, Analytical techniques for extracting geologic information from multichannel airborne spectroradiometer and airborne imaging spectrometer data. In *Proceedings of the 4th Thematic Conference on Remote*.
- Livo, K. E.; Clarck, R. N. and Knepper, D. H., 1993, Spectral plot program for accessing the USGS digital spectral library database with MS-DOS personal computers. USGS open-file 93-593. Denver, Colorado.
- Lowell, J. D. and Guilbert, J. M., 1970, Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, **65**, 373-408.
- Mars, J. C. and Rowan, J. C., 2006, Regional Mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Space borne Thermal and Reflection Radiometer(ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*, **2**(3), 161-186.
- Pan, G., 1993, Canonical favourability model for data integration and mineral potential mapping. *Computer and Geosciences*, **19**, 1077-1100.
- Pitcher, D. H., Steele, J. P. and Waston, R. k., 1994, The application of airborne geophysical

Yoshiki, N., 2002, Rock type mapping with indices defined for multispectral thermal infrared ASTER data: Case studies, In: Ehlers M. (Ed.), Proceedings of Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology II, Sep 23-26 2002, Agia Pelagia, Greece, SPIE. V. 4886, 2002, 123-132. The International Society for optical engineering (SPIE).