



معرفی روشی جدید در تفسیر و انتخاب مؤلفه‌های اصلی برای نقشه‌برداری از ETM^+ دگرسانیهای هیدروترمال در تصاویر لندست

محمد کشکوئی جهرمی* و افشین قشلاقی

گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت: 1392/11/16، پذیرش: 1394/03/16

چکیده

تحلیل مؤلفه‌های اصلی¹، یک روش آماری چند متغیره در تحلیل داده‌های چندبعدی بوده و تفسیر نتایج حاصل از آن با پیچیدگیهای خاص خود همراه است. در این پژوهش، روشی جدید در تحلیل و انتخاب مؤلفه‌های اصلی تصاویر لندست ETM^+ ، به‌منظور نقشه‌برداری دگرسانی هیدروترمال ارائه شده است. در این روش با تجزیه و تحلیل ریاضی و آماری بردارهای ویژه، سطح معناداری بردارهای ویژه بین باندهای مختلف هر مؤلفه اصلی تعیین شد. مؤلفه‌ای که حاوی حداکثر معناداری طیفی (مقادیر هدف) برای باندهای 1، 3، 5 و 7 و همچنین 5 و 3 است، به‌ترتیب، به‌عنوان مؤلفه اصلی کارآمد در بارزسازی اکسیدهای آهن، کانیهای رسی و کانیهای کربناته انتخاب شد. در مرحله بعد، بر اساس اطلاعات طیفی کانیهای یاد شده بالا، برتری طیفی مؤلفه‌های اصلی تعیین و سهم هر مؤلفه در بارزسازی این کانیها محاسبه شد. در مرحله آخر با استفاده از نتایج حاصله از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تصاویر اکسید آهن، کانی رسی و کانیهای کربناته تهیه شد. هر مؤلفه حاوی بخشی از اطلاعات طیفی کانیهای مختلف است و محاسبه سهم هر مؤلفه امکان تعیین پتانسیل طیفی هر PC را فراهم می‌کند. مؤلفه‌ای که وزن طیفی بالاتری دارد، اطلاعات طیفی بیشتری را در خود جای داده است. در تصویر مورد بررسی، مؤلفه پنجم دارای بیشترین وزن طیفی بوده و حاوی اطلاعات طیفی کانی رسی، اکسیدهای آهن و کانیهای کربناته است. دگرسانی پروپلیتیک و تشکیل کلسیت باعث بارزسازی هم‌زمان این دگرسانی و رگه‌های کربناته شده است. دگرسانی فلیک و تشکیل کانیهای رسی با زمینه روشن، باعث بارزسازی هم‌زمان این کانیها با واحدهای کربناته شده است. مناطق منطبق با سنگ‌شناسی آذرین و دگرسانی هیدروترمال به‌عنوان مناطق امیدبخش مس پورفیری معرفی شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل مؤلفه اصلی، تصاویر لندست، دگرسانی هیدروترمال، نقشه‌برداری، بافت، کرمان

مقدمه

مؤلفه استاندارد شده مورد تأکید قرار گرفته است (Eklundh and Singh, 1993; Ciampalini et al., 2013). در تحلیل مؤلفه اصلی، مؤلفه‌ها بر اساس اختلاف واریانس طبقه‌بندی شده است و مجموع واریانس تمام مؤلفه‌ها برابر 100% فرض می‌شود. معمولاً مؤلفه اصلی اول 50 تا 90 درصد واریانس (در صورتی که مؤلفه‌ها بیشتر از 3 باشد) (Vincent, 1997) و مؤلفه آخر شامل تمام واریانس‌های باقی‌مانده از کل بوده و حاوی اطلاعات خاص‌تری از تصویر است (Yetkin, 2003). در روشهای آماری واریانس داده‌ها در قالب مقادیر ویژه² بیان

تحلیل مؤلفه اصلی یک روش مفید آماری جهت کاهش حجم و تشخیص الگوی پراکندگی داده‌های چند متغیره است. در سال 1985 برای اولین بار مفهوم مؤلفه اصلی استاندارد شده و استاندارد نشده در سنجش از دور ارائه شد (Singh and Harrison, 1985). اساس روش استاندارد شده، ماتریس همبستگی داده‌ها طیفی بوده است و باعث افزایش نسبت علامت به نوفه می‌شود، در حالی که در روش استاندارد نشده، از ماتریس کوواریانس استفاده می‌شود و برتری آن نسبت به

*مسئول مکاتبات: ukgeology@yahoo.com

1. Principal component analysis
2. Eigenvalues

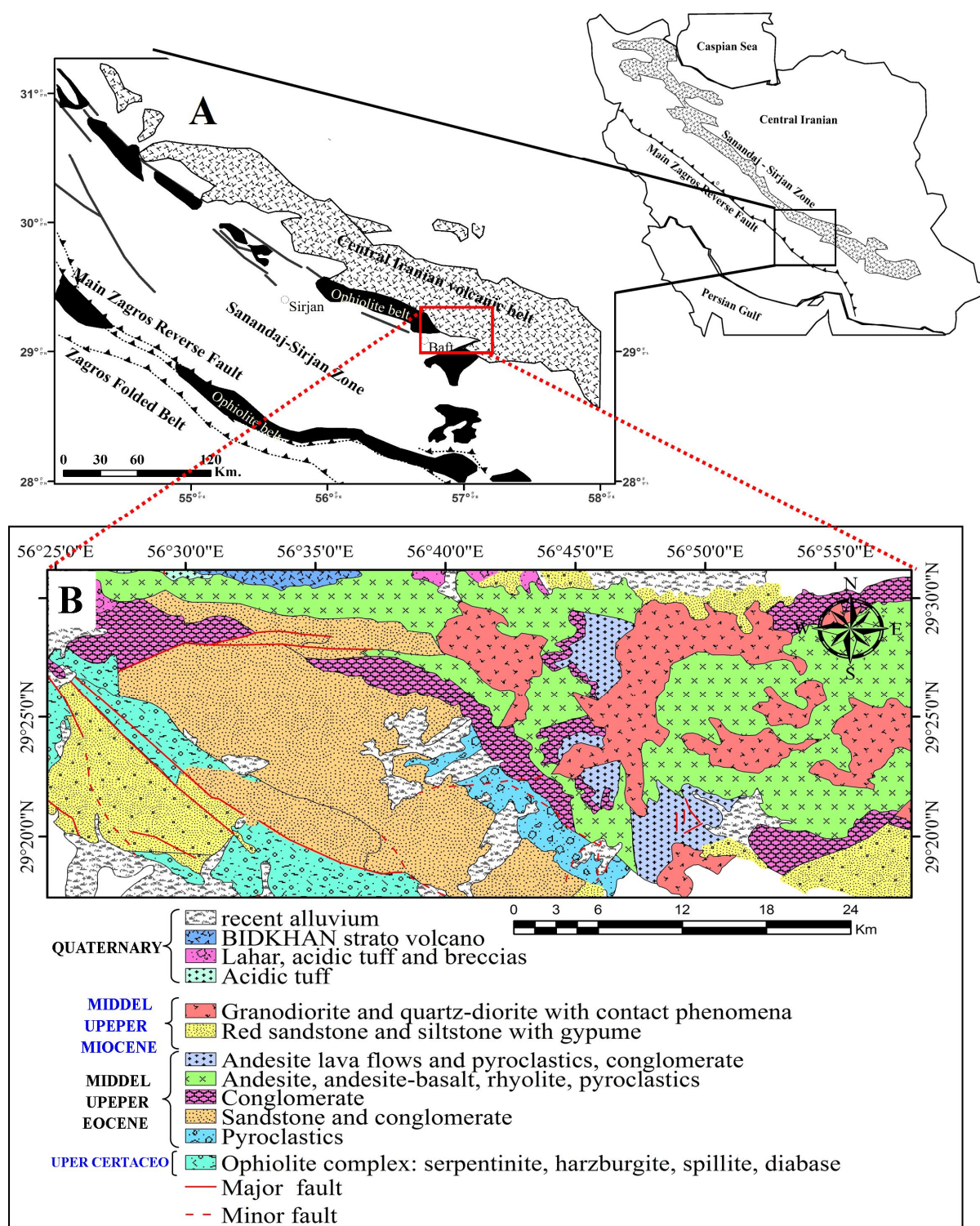
می‌شود و بردار حاصل از این مقادیر در محور مختصات مؤلفه اصلی، به صورت بردار ویژه¹ تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، به ازای هر باند یک بردار ویژه تعریف می‌شود؛ که دارای جهت گیری خاص خود در فضای چند بعدی است (مثلاً 7 باند سنجنده ETM^+ دارای 7 بردار ویژه و 7 جهت‌گیری است) (Gupta et al., 2013). مقادیر ویژه مؤلفه اصلی یکی از شاخصهای اطلاعات نهفته تصویر بوده و به منظور بارزسازی کانیهای موجود در سطح زمین استفاده شده است (Crosta and Moore, 1989; Tangestani and Moore, 2000).

هر چه اختلاف مقادیر ویژه در دو باند بیشتر باشد، همبستگی طیفی آن دو باند کمتر بوده و اختلاف طیفی آنها نیز بیشتر است (Kwarteng and Chavez, 1998; Ranjbar et al., 2004). گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2013) با بررسی تصاویر ماهواره‌ای قبل و بعد از تحلیل مؤلفه اصلی و همچنین با تحلیل بردارهای ویژه تصویر به این نتیجه رسیدند که، بزرگی بردار ویژه هر باند به سطح معناداری طیفی آن باند بر روی محور PC بستگی دارد. به عبارت دیگر، مقادیر بالای بردار ویژه برای یک باند، بیانگر سطح معناداری بالای آن باند در آن مؤلفه است (Gupta et al., 2013). مقادیر ویژه و بردارهای ویژه بامعنا در تفسیر مؤلفه‌های اصلی اهمیت زیادی دارند (Richard and Dean, 2002). بنابراین می‌توان گفت، بردارها و مقادیر ویژه، حاوی پتانسیل بالایی از اطلاعات طیفی تصویر هستند.

با وجود این که تحلیل مؤلفه اصلی، یک روش مفید برای دسته‌بندی و خلاصه کردن حجم زیادی از داده‌هاست؛ ولی تفسیر نتایج حاصل از این روش با پیچیدگیهایی نیز همراه است (Drury, 2001). در این پژوهش روشی ارائه شده است که با استفاده از داده‌های آماری به دست آمده از تحلیل مؤلفه اصلی تصاویر لندست ETM^+ ، امکان تفسیر مؤلفه‌های اصلی و همچنین تصمیم‌گیری در مورد استفاده از آنها به منظور نقشه‌برداری مناطق دگرسانی هیدروترمال فراهم شده است. در سالهای اخیر، علم سنجش از دور به منظور شناسایی مناطق دگرسانی هیدروترمال و همچنین پتانسیل‌یابی منابع طبیعی و مس پورفیری در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شده است (Abrams et al., 1983; Kaufman, 1988; Loughlin, 1991; Ruiz-Armenta and Prol-Ledesma, 1998; Tangestani and Moore, 2002; Dehnavi et al., 2010; Pour and Hashim, 2011; Van der Meer

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در استان کرمان (نزدیک روستای بزنجان-شمال شرق بافت) واقع شده است و بخش انتهایی کمربند آتشفشانی ایران مرکزی (کمربند دهج-ساردویه) و کمربند افیولیتی گوغر-بافت را شامل می‌شود (شکل 1-A). مجموعه آتشفشانی ائوسن و سنگهای نفوذی میوسن با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالت، آگلومرا و توف در منطقه مورد بررسی رخنمون دارند (شکل 1-B). گرانودیوریت، دیوریت پورفیری و کوآرتزیدیوریت از جمله سنگهای آتشفشانی موجود در منطقه هستند؛ که در برخی موارد دچار دگرسانی هیدروترمال شده است (Srdic et al., 1972). رگه‌های متعدد آهک سیلیسی شده در مناطق غربی رخنمون دارند و به نظر می‌رسد که این رگه‌های کربناتی حاصل فرآیند چرخش محلولهای گرمایی و رسوب کربنات و سیلیس در شکستگیها باشند (Masumi and Ranjbar, 2011). غالب دگرسانی موجود در محدوده مورد بررسی، فلیک و پروپلیتیک بوده و دگرسانی آرژیلیک از گسترش محدودتری برخوردار است (Jafari, 2009; Masumi and Ranjbar, 2011). نشانه‌های مس چهرن، حراران، لاله‌زار، پی‌نگین (مس پورفیری) و نشانه‌های معدنی آب‌بحری، گوغر (مس رگه‌ای) و کانسار سرب و روی قنات مروان، از جمله مناطق کانه‌زایی مهم در منطقه مورد مطالعه هستند (Abassdadeh, 2011). مجموعه افیولیتی گوغر-بافت به سن کرتاسه پسین به موازات کمربند دهج-ساردویه توسعه یافته است (Moghadam et al., 2013). دگرسانی شدید سائوسریتی، اورالیتی و سرپنتینیته نیز در بخشی از این آمیزه رنگی دیده می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، دگرسانی هیدروترمال باعث کانسارسازی مس در محدوده مورد بررسی شده است و با توجه به این که کانه‌زایی مس رگه‌ای معمولاً اثر دگرسانی چندانی در سطح زمین نشان نمی‌دهد، در این پژوهش نقش دگرسانی هیدروترمال در کانه‌زایی مس پورفیری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.



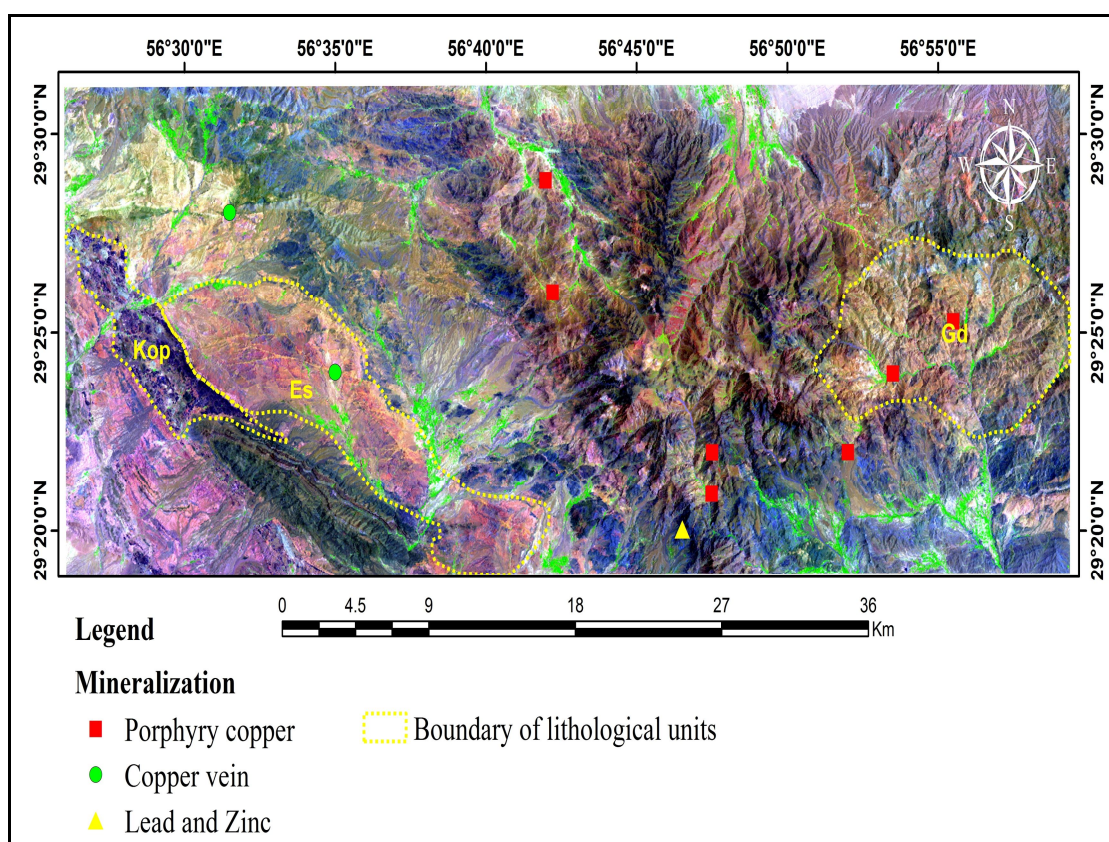
شکل 1. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی، A: جایگاه منطقه مورد بررسی (بزنجان-بافت) در کمربند آتشفشانی ایران مرکزی و مجموعه افیولیتی گوهر-بافت (Shahabpour, 2005)، B: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (بزنجان) (Geological Survey of Iran, 1973)

Fig. 1. Geographic map of the study area (Shahabpour, 2005), A: The location of the study area (Bezanjan-Baft) in volcanic belt of the central Iran and Gogher-Baft ophiolite complex, B: Geological map of the study area (Bezanjan) (Geological Survey of Iran, 1973)

روش مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ستون 160 و ردیفهای 39 و 40 مسیر تصویربرداری ماهواره لندست قرار گرفته است. داده‌های برداشت‌شده توسط سنجنده لندست ETM+ در سال 2002، از پایگاه داده‌های این سنجنده دریافت شد (USGS). برای دریافت اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای، فرآیند پیش‌پردازش و تصحیح هندسی بر روی تصاویر خام صورت گرفت. تحلیل داده‌های ماهواره‌ای در نرم‌افزار ENVI 4.7 انجام شد. با توجه به کاربردهای گسترده سیستم اطلاعات جغرافیایی در

بررسیهای زمین‌شناسی و به‌خصوص سنجش از دور، از نرم‌افزار ARC GIS 9.3 استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، از محدوده مورد بررسی، بازدید صحرایی به‌عمل آمده است. ترکیب رنگی کاذب باند 7 در سرخ، باند 4 در سبز و باند 1 در آبی، نشان‌دهنده توزیع واحدهای سنگ‌شناسی در محدوده مورد بررسی است (شکل 2).



شکل 2. ترکیب رنگی کاذب باندهای 7 و 4 و 1، سنجنده ETM+ و توزیع مناطق کانه‌زایی، (باند 7 در قرمز، باند 4 در سبز و باند 1 در آبی) (Gd): گرانودیوریت و آندزیت، Kop: مجموعه افیولیتی گوغر-بافت، Es: سنگ‌های رسوبی)

Fig. 2. Color composites of Bands 7, 4 and 1 in Landsat ETM sensed image and mineralization zones (Gd: Granodiorite and Andesite, Kop: Ghogher-Baft ophiolite complex, Es: Sedimentary rocks)

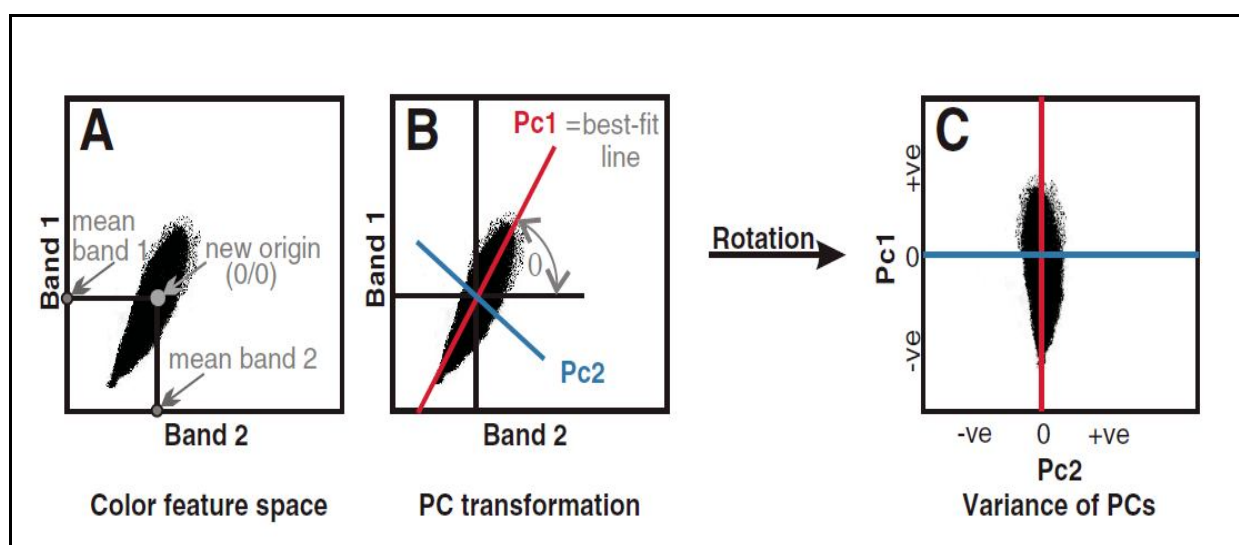
تحلیل مؤلفه اصلی

تصاویر ماهواره‌ای دارای قالب ندره‌ای (رستری) هستند و به‌منظور کاهش ابعاد این داده‌های چند طیفی از تحلیل مؤلفه اصلی استفاده می‌شود. تحلیل مؤلفه‌های اصلی بارز کننده همبستگی‌هایی است که در بین داده‌های چند متغیره وجود

داد (Davis, 1973). در روند محاسبه مؤلفه‌های اصلی ابتدا میزان میانگین دو مجموعه داده (به‌طور مثال باند 1 و 2 سنجنده ETM+) تعیین می‌شود. این میزان به‌عنوان مرکز محور مختصات جدید معرفی شده است و داده‌ها به محور مختصات جدید انتقال داده می‌شوند (شکل 3-A). سپس

اصلی اول و دوم عمود بوده و در فضای چند بعدی بر اساس واریانس، آرایش پیدا می‌کنند (Drury, 2001) (شکل 3- C). یک داده چند طیفی دارای بردارهای فضایی با عدد محوری خاص خود است و این عدد ترکیبی از اعداد طیفی است؛ که به هر پیکسل داده می‌شود، هر پیکسل از تصویر بسته به روشنایی خود دارای بردار خاص خود است (Gupta et al., 2013).

مقادیر باندها بر اساس بیشترین واریانس حول محور مختصات جدید دچار چرخش می‌شوند، به طوری که در راستای بیشترین واریانس قرار گیرند (شکل 3- B). بهترین خطی که از میان این داده‌ها عبور می‌کند و همچنین دارای بیشترین واریانس است، به‌عنوان مؤلفه اصلی اول (PC1) معرفی می‌شود. مؤلفه اصلی دوم (PC2) نیز بر مؤلفه اصلی اول عمود بوده و دارای کمترین واریانس است. سایر مؤلفه‌ها بر مؤلفه



شکل 3. تحلیل مؤلفه اصلی، نمایش دو متغیر داده‌های دو باند لندست ETM+، همبستگی بالای دو باند (باند 1 و باند 2) به ایجاد بیضی کشیده در فضای دو بعدی منجر می‌شود. A: بر اساس مقادیر میانگین دو باند، مرکز محور مختصات جابه‌جا شده است. B: محور مختصات بر اساس بیشترین واریانس دچار چرخش شده است. C: مؤلفه اصلی اول دارای بیشترین واریانس است و مؤلفه اصلی دوم بر مؤلفه اصلی اول عمود بوده و حاوی کمترین واریانس داده‌هاست (Ott et al., 2006).

Fig. 3. Principal component analysis, A: bivariate data showing two bands of Landsat ETM, High correlation two bands (band 1 and 2) to create an elliptical is stretched in two-dimensional space, B: Based on the mean values of two bands, the center of axis has moved, C: The axes are then rotated so one is aligned with the maximum variance in the data, (Ott et al., 2006).

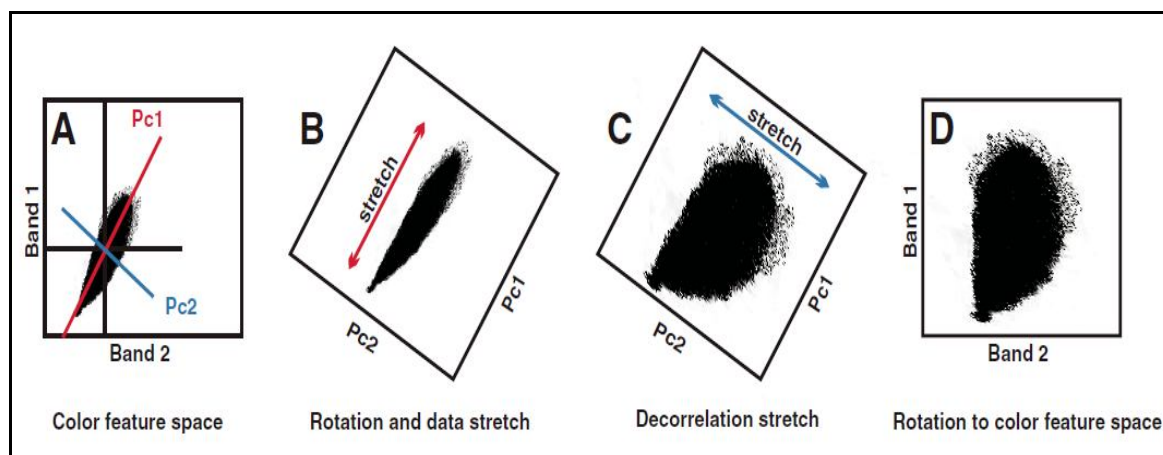
تحلیل مؤلفه اصلی معکوس¹

مؤلفه معکوس در مقایسه با مؤلفه‌های اصلی، تصویر قابل تفسیرتری را به وجود آورده است؛ چرا که در این روش به دلیل غیرهمبسته شدن² داده‌های تصویر ناهنجاریهای موجود در تهرنگ بارز می‌شود (Ott et al., 2006). داده‌های اولیه مربوط به منطقه مورد بررسی در طی فرآیند تحلیل مؤلفه اصلی دچار تغییر مکان و چرخش حول بیشترین واریانس شده است. در طی تحلیل مؤلفه معکوس، مؤلفه اصلی دچار چرخش، کشیدگی در امتداد محور اصلی بیضی مؤلفه اصلی و بازگشت به محور اصلی مختصات شده‌اند (شکل 4- A, B).

مقادیر ویژه بیانگر واریانس داده‌هاست (Smith, 2002) و بردار حاصل از آن، بردار ویژه نامیده می‌شود. در محور مختصات، طول هر بردار بر اساس مقادیر ویژه و جهت‌گیری آن بر اساس بردار ویژه مشخص می‌شود (Gupta et al., 2013). به عبارت دیگر، بردارهای ویژه بیانگر وزن هر یک از مقادیر ویژه در فضای چند بعدی هستند. در این پژوهش، بر اساس محاسبات ریاضی و آماری بر روی بردار ویژه مؤلفه‌های اصلی، روشی جدید در انتخاب بهترین مؤلفه برای تفکیک دگرسانیه‌های هیدروترمال و استعدادیابی مس پورفیری ارائه شده است.

همبستگی بیشتر است.

C و D) (Drury, 2001; Ott et al., 2006). تصویر حاصل نسبت به تصویر مؤلفه‌های اصلی حاوی رنگهای قوی‌تر و با



شکل 4. تحلیل مؤلفه اصلی معکوس، A: نمایش دو متغیره مؤلفه اصلی در دو باند لندست ETM+، B: داده‌های اولیه (مؤلفه اصلی) حول محور فضایی دچار چرخش شده است و در امتداد مؤلفه اصلی اول کشیده می‌شود، C: Decorrelation: داده‌ها در راستای مؤلفه دوم کشیده شده است و D: داده‌ها به مرکز محور مختصات برگشت داده شده است (Ott et al., 2006).

Fig. 4. Reverse principal component analysis, A: Bivariate plots of two bands of Landsat ETM+, B: The first principal component has been stretched after rotation of the axes to principal component space, C: In the next step the second principal component has been stretched, D: Decorrelated data are rotated back to the original feature space (Ott et al., 2006).

بحث و بررسی

نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی در جدول 1 آورده شده است. با توجه به داده‌های مربوط به شش مؤلفه اصلی (PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC7) و شش باند سنجنده ETM⁺ (باند 1، باند 2، باند 3، باند 4، باند 5 و باند 7)، ماتریسی مطابق با جدول 2 محاسبه شد. اعداد موجود در این ماتریس بر اساس قدر مطلق تفاضل بردارهای ویژه مؤلفه‌های اصلی در سطرها و ستون متناظر (باندهای سنجنده ETM⁺)، محاسبه شده است. بزرگی بردار ویژه هر باند به سطح معناداری طیفی آن باند بر روی محور PC بستگی دارد. به عبارت دیگر، مقادیر معنادار و بالا نشان‌دهنده سطح معناداری طیفی بالای آن باند برای مؤلفه اصلی تصویر است (Gupta et al., 2013). تمامی اعداد موجود در جدول 2، به صورت مثبت فرض شده است؛ زیرا هدف این ماتریس، نمایش معناداری طیفی مؤلفه‌های اصلی (یعنی ویژگی طیفی مؤلفه اصلی) در باندهای مختلف است. هر باند طیفی به تنهایی بخشی از اطلاعات طیفی کانیاها را در بر می‌گیرد (Yetkin,

2003) و از آنجایی که مؤلفه‌های اصلی حاصل عملیات تبدیل بر روی باندها هستند، بنابراین هر مؤلفه اصلی به تنهایی شامل بخشی از ویژگی طیفی کانیاهاست. هرچه اختلاف مقادیر ویژه مؤلفه اصلی در دو باند بیشتر باشد، همبستگی آنها کمتر است (Ranjbar et al., 2004). در این پژوهش، بیشترین اختلاف بردار ویژه (یعنی کمترین همبستگی) بین دو باند مؤلفه اصلی، به عنوان اعداد هدف معرفی شده است. کانیهایی رسی و اکسیدهای آهن بهترین شاخص برای شناسایی دگرسانی هیدروترمال و کانسارهای مس پورفیری هستند (Robb, 2005). بهترین مؤلفه برای بررسی اکسید آهن، مؤلفه‌ای است که دارای اعداد هدف در باندهای 1 و 3 و به طور مشابه در باندهای 5 و 7 برای کانیهایی رسی باشد. لازم به ذکر است با استفاده از این روش، مقدار هدف برای باندهای 1 و 3 فقط در ماتریس مربوط به مؤلفه اصلی چهارم و همچنین این مقادیر برای باندهای 5 و 7 فقط در ماتریس مؤلفه اصلی پنجم محاسبه شده است (جدولهای 3 و 4).

جدول 1. نتایج حاصل از مؤلفه‌های اصلی (Eigenvectors) تصاویر لندست ETM+

Table 1. Eigenvectors extracted by PCA from Landsat ETM+ images

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7	Max	Min
PC1	-0.16753	-0.27503	-0.44346	-0.35715	-0.58119	-0.48405	-0.16753	-0.58119
PC2	-0.45483	-0.40992	-0.55997	0.276215	0.463426	0.14311	0.463426	-0.55997
PC3	0.048906	0.054369	0.042157	0.860365	-0.22734	-0.44829	0.860365	-0.44829
PC4	0.46451	0.141096	-0.54491	0.184492	-0.35824	0.552292	0.552292	-0.54491
PC5	-0.4584	-0.33942	0.398224	0.147614	-0.50725	0.552292	0.552292	-0.50725
PC7	0.580326	-0.78629	0.180273	0.009801	0.100658	-0.04733	0.580326	-0.78629

جدول 2. ماتریس طرح برای محاسبه معناداری طیفی تصاویر ETM+ و تعیین پتانسیل طیفی هر یک از مؤلفه‌های در بارزسازی اطلاعات طیفی کانیه‌ها

Table 2. A matrix showing spectral significance in Landsat ETM+ images and special potential of each component in enhancement of mineral spectral data

PC _x	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
Band 1	B1-B1					
Band 2	B1-B2	B2-B2				
Band 3	B1-B3	B2-B3	B3-B3			
Band 4	B1-B4	B2-B4	B3-B4	B4-B4		
Band 5	B1-B5	B2-B5	B3-B5	B4-B5	B5-B5	
Band 7	B1-B7	B2-B7	B3-B7	B4-B7	B5-B7	B7-B7

PC_x: مؤلفه اصلی Xام، | Bn-Bm |: معناداری طیفی مؤلفه Xام برای باندهای m و n

The main components of the Xth, | Bn-Bm | spectral significance of PCx for bands of m and n.

جدول 3. ماتریس معناداری طیفی مؤلفه اصلی چهارم، این مؤلفه در باندهای 1 و 3 دارای بیشترین اختلاف طیفی برای اکسید آهن است

Table 3. Significance matrix for PC4, This PC have the highest spectrum disorder for iron oxide in bands 1 and band 3.

PC 4	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
Band 2	0					
Band 3	0.323414	0				
Band 4	*1.009417	0.686003	0			
Band 5	0.280018	0.043396	0.729399	0		
Band 7	0.822749	0.499335	0.186668	0.542731	0	
Band 7	0.087782	0.411196	1.097199	0.3678	0.910531	0

*: مقادیر هدف برای اکسید آهن

*Target values for iron oxide

جدول 4. ماتریس معناداری طیفی مؤلفه اصلی پنجم، این مؤلفه در باندهای 5 و 7 دارای بیشترین اختلاف طیفی برای کانیه‌های رسی است.

Table 4. Significance matrix for PC5, This PC have the highest spectrum disorder for clay minerals in bands 5 and band 7.

PC 5	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
Band 2	0					
Band 3	0.118974	0				
Band 4	0.856619	0.737645	0			
Band 5	0.606009	0.487035	0.25061	0		
Band 7	0.048859	0.167833	0.905478	0.654868	0	
Band 7	1.010687	0.891713	0.154068	0.404678	**1.059546	0

***: مقادیر هدف برای کانیه‌های رسی

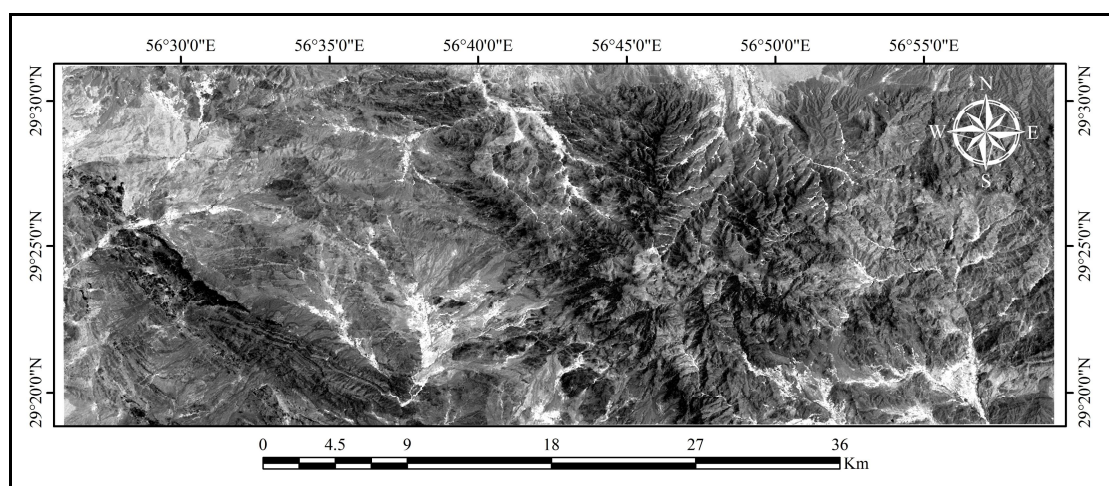
***Target values for clay minerals

نقشه‌برداری هم‌زمان مناطق دگرسانی و سنگ‌شناسی آذرین در منطقه مورد بررسی از ترکیب رنگی PC4-PC5 و میانگین مؤلفه معکوس (IPC4 و IPC5)، به ترتیب در باندهای سرخ، آبی و سبز استفاده شده است (شکل 6). در این شکل سنگهای آذرین عمدتاً به رنگ سبز تیره، مجموعه افیولیتی به رنگ روشن و دگرسانی هیدروترمال (مناطق شرقی) و رگه‌های کربناته (مناطق غربی) به رنگ صورتی قابل شناسایی است. در ادامه روشی ارائه می‌شود که به کمک آن می‌توان مناطق دگرسانی و رگه‌های کربناته را با دقت بیشتر جدا کرد.

مجموع مقادیر موجود در هر ماتریس مؤلفه اصلی (یعنی مجموع ویژگی طیفی مؤلفه‌های اصلی در باندهای ETM^+)، وزن طیفی مؤلفه اصلی معرفی شده است. هرچه وزن طیفی مؤلفه بیشتر باشد، اطلاعات طیفی بیشتری از کانیه‌های مختلف را در خود جای می‌دهد. وزن طیفی مؤلفه‌های اصلی برای تصویر مورد بررسی به شرح زیر است:

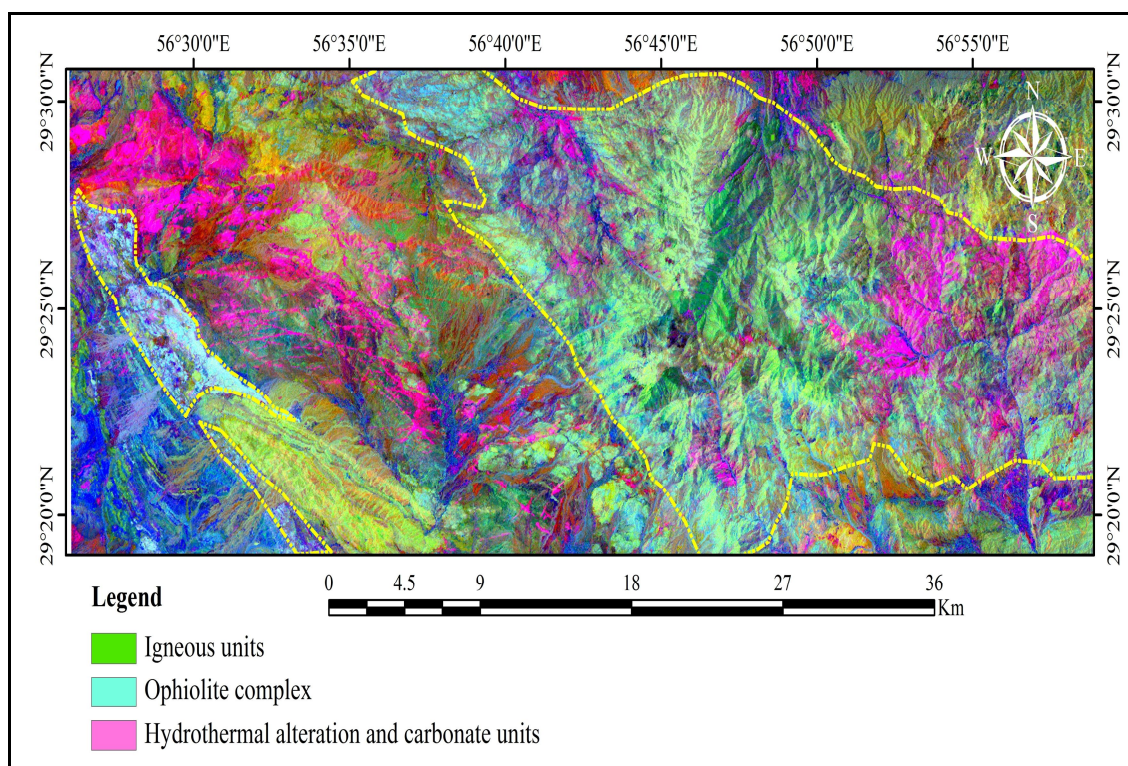
PC5> PC4>PC2>PC3>PC7>PC1

با توجه به نتایج تحلیل مؤلفه معکوس، مؤلفه معکوس سوم و چهارم شامل اطلاعات با ارزشی برای پوشش گیاهی است. پیکسل‌های روشن در تصویر میانگین مؤلفه معکوس چهارم و منفی مؤلفه معکوس سوم، معرف پوشش گیاهی موجود در منطقه مورد بررسی است (تصویر Veg) (شکل 5). به‌منظور



شکل 5. میانگین مؤلفه معکوس چهارم و منفی مؤلفه معکوس سوم (تصویر Veg). پیکسل‌های روشن بیانگر پوشش گیاهی موجود در منطقه (بزنجان - بافت) است.

Fig. 5. Average of inversed PC4 and negatively inversed PC3 (light pixels is vegetation capping in Bezanjan-Baft area)



شکل 6. سنگ‌شناسی آذرین، دگرسانیه‌های هیدروترمال و رگه‌های کربناته در منطقه مورد بررسی (یزنجان - بافت). سنگهای آذرین به رنگ سبز تیره از مجموعه افیولیتی به رنگ روشن، قابل تفکیک است. رگه‌های کربناته (مناطق غربی) و دگرسانی هیدروترمال (مناطق شرقی) با رنگ صورتی مشخص شده است.

Fig. 6. Igneous rocks, hydrothermal alterations and carbonate veins typically found in the study area (Bezanjan-Baft). Igneous rocks and ophiolite complex are respectively enhancement in dark green colors and bright. Carbonate veins (western region) and hydrothermal alteration (eastern region) is marked with pink color

تعیین سهم هر مؤلفه در بارزسازی اطلاعات طیفی کانیهای رسی و اکسیدهای آهن

تحلیل مؤلفه اصلی یک روش استاندارد برای آنالیز داده‌های چند طیفی است؛ ولی تفسیر تصویرهای ایجادشده از این روش با پیچیدگی همراه است. روش ارائه‌شده در زیر، این محدودیت را بر طرف کرده است و باعث بهبود در تفسیر مؤلفه‌های اصلی تصویر می‌شود. تعیین سهم هر مؤلفه اصلی در بارزسازی اطلاعات طیفی کانیها، نقش مهمی در معرفی مؤلفه‌های اصلی مناسب جهت نقشه‌برداری مناطق دگرسانی ایفا می‌کند. هر مؤلفه به تنهایی حاوی بخشی از ویژگی طیفی کانیهاست. سهم هر مؤلفه در بارزسازی اطلاعات طیفی هر کانی برابر است با مقدار ویژگی طیفی در دو باند (برای مثال کانیهای رسی، باند 5 و 7 و اکسیدهای آهن، باند 3 و 1) برای یک مؤلفه خاص، تقسیم بر وزن طیفی مؤلفه اصلی مورد نظر. از آنجایی که مؤلفه اصلی چهارم و پنجم به ترتیب در باندهای 3

و 1 و باندهای 5 و 7 دارای مقادیر هدف هستند، این مؤلفه‌ها به ترتیب به عنوان شاخص اصلی اکسید آهن و کانی رسی معرفی شده است. با توجه به این که در طی عملیات تحلیل مؤلفه اصلی، به ازای n باند، n مؤلفه اصلی تولید می‌شود (Drury, 2001). می‌توان بیان کرد که، سهم مؤلفه اصلی پنجم در بارزسازی اطلاعات طیفی کانیهای رسی (باندهای 5 و 7)، 37% بوده و به طور مشابه، مؤلفه اصلی چهارم 37% از اطلاعات طیفی اکسید آهن (باندهای 1 و 3) را در خود جای داده است. مؤلفه اصلی پنجم نیز 30% اطلاعات طیفی اکسیدهای آهن و مؤلفه اصلی چهارم 33% اطلاعات طیفی کانیهای رسی را در خود جای داده‌اند. به عبارت دیگر مؤلفه اصلی چهارم و پنجم حاوی بیشترین اطلاعات طیفی اکسیدهای آهن و کانیهای رسی هستند.

تصمیم‌گیری در انتخاب مؤلفه اصلی و نقشه‌برداری مناطق دگرسانی

در صورتی که تحلیل مؤلفه اصلی با انتخاب باند مناسب همراه باشد، نتایج مناسبتری برای نمایش عوارض در بر خواهد داشت (Ciampalini et al., 2013). تصاویر اکسید آهن و کانی رسی معیارهای مناسبی برای نقشه‌برداری مناطق

کانه‌زایی مس پورفیری است (Tangestani and Moore, 2002; Ranjbar et al., 2003; Ranjbar et al., 2004; Pour and Hashim, 2012). بر اساس نتایج به‌دست آمده از تعیین سهم مؤلفه اصلی، برتری طیفی مؤلفه‌های اصلی برای بارزسازی اطلاعات طیفی کانیهای رسی و اکسید آهن محاسبه شده است (جدول 5).

جدول 5. برتری مؤلفه‌های اصلی در بارزسازی اطلاعات طیفی

Table 5. Selectivity of the PCs for enhancement of the spectral data

Selectivity of the PCs	
Clay minerals	PC5>PC4>PC2>PC3>PC7>PC1
Fe Oxides	PC4>PC5>PC7>PC1>PC2>PC3

تعیین سهم هر مؤلفه در بارزسازی اطلاعات طیفی کانیهای کربناته

کانیهای کربناته (به‌طور خاص سنگ آهک خالص) در محدوده طیفی مرئی تا فروسرخ نزدیک (NIR) و فروسرخ میانی (SWIR) (طول موج 2/35 μm) به‌ترتیب دارای بیشترین بازتابش و جذب است و میزان جذب در محدوده فروسرخ میانی به درصد خلوص کانی کربناته بستگی دارد (Sanjeevi, 2008). با توجه به محدوده باندهای سنجنده ETM+ و با در نظر گرفتن ناخالصی کانیهای کربناته، باندهای 5 و 3 مناسبترین باند در تصویربرداری این کانیهای معرفی می‌شود. مقادیر ویژه باند 5 و 3 در مؤلفه‌های اصلی مورد ارزیابی قرار گرفت و سهم هر مؤلفه در بارزسازی اطلاعات طیفی کانیهای کربناته محاسبه شد. برتری شش مؤلفه اصلی در بارزسازی اطلاعات طیفی کانیهای کربناته به قرار زیر است:

$$PC5>PC2>PC1>PC3>PC4>PC7$$

با توجه به برتری طیفی مؤلفه‌های اصلی برای کانیهای رسی (جدول 5) و همچنین داده‌های آماری مربوط به مؤلفه اصلی پنجم (جدول 3)، می‌توان نتیجه گرفت که مؤلفه اصلی پنجم، علاوه بر اطلاعات طیفی کانی رسی و اکسید آهن، حاوی اطلاعات طیفی کانیهای کربناته بوده و به‌کارگیری این مؤلفه باعث بارزسازی هم‌زمان کانیهای رسی و کربناته می‌شود. ترکیب رنگی PC1- در قرمز، PC2- در سبز و PC3- در آبی، به‌منظور بارزسازی رگه‌های کربناته ایجاد شده است. با وجود

با توجه به موارد گفته شده، تصاویر اکسید آهن و کانی رسی بر اساس رابطه‌های زیر تهیه شد:

تصویر اکسید آهن: میانگین مؤلفه اصلی پنجم و منفی مؤلفه اصلی چهارم (PC4-) (شکل 7-A).

$$\text{رابطه 1: } \frac{(PC5) + (-PC4)}{2}$$

تصویر کانی رسی: میانگین منفی مؤلفه اصلی چهارم و منفی مؤلفه اصلی پنجم (PC5-) (شکل 7-B).

$$\text{رابطه 2: } \frac{(-PC5) + (-PC4)}{2}$$

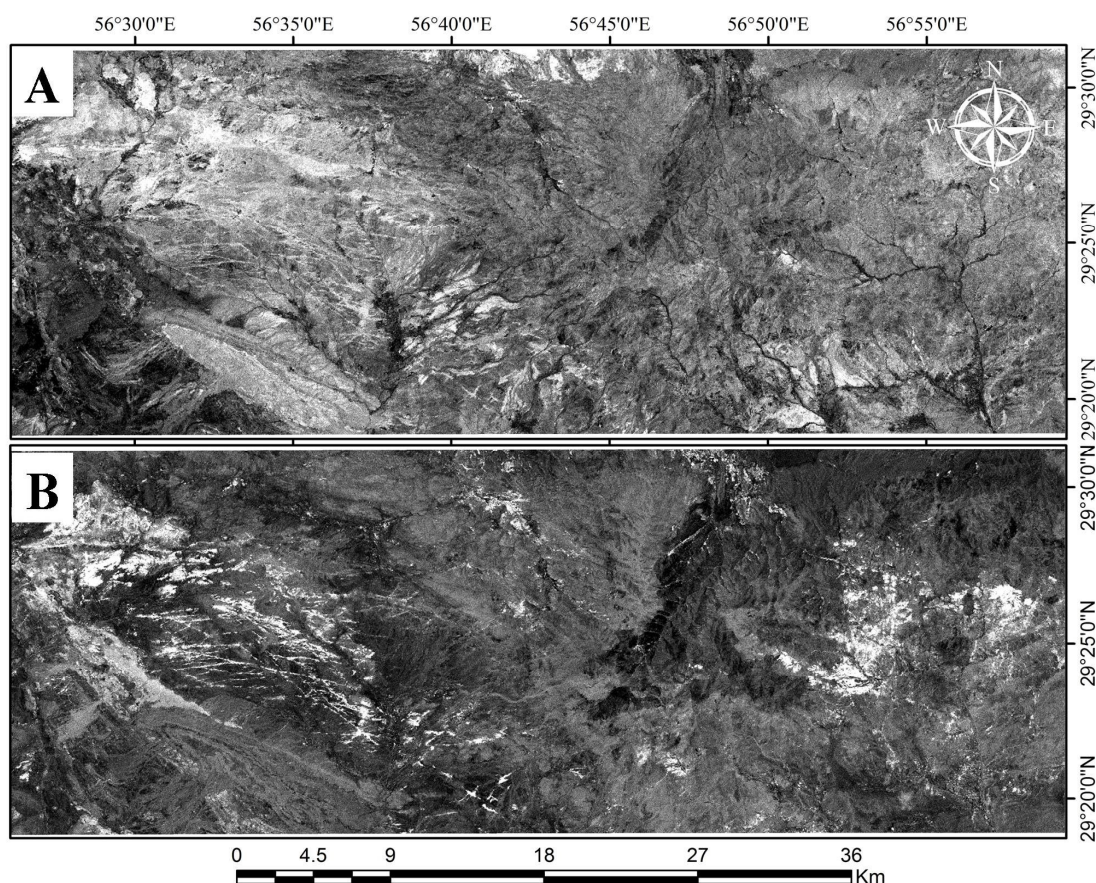
با توجه به میزان بارگذاری مؤلفه‌های اصلی (جدول 1) و به‌منظور ایجاد تصویرهایی با پیکسل‌های روشن، ضریب منفی در مؤلفه‌های اصلی اعمال شده است. شکل (7-A) توزیع واحدهای مرتبط با اکسید آهن را به تصویر در آورده است. این واحدها در غرب منطقه مورد بررسی، عمدتاً از نوع کنگلومرا و ماسه‌سنگ قرمز رنگ است و در مناطق شرقی به‌صورت دگرسانی اکسید آهن بارز شده است. شکل (7-B) توزیع واحدهای مرتبط با کانیهای رسی و کانیهای کربناته را به تصویر در آورده است. در این شکل دگرسانی هیدروترمال و حضور کانیهای رسی (در شرق منطقه) و همچنین رگه‌های کربناته (در مناطق غربی) با رنگ روشن مشخص شده است. به‌منظور تفکیک واحدهای نام‌برده، روش زیر به کار گرفته شده است.

5، 6، 7 و 8 حاوی اطلاعات طیفی مشخصی از داده‌های تصویر است. طبقه‌بندی تصاویر پردازش یافته، امکان تفسیر و مدیریت داده‌های تصویر را در قالب رستر فراهم کرده و به کارگیری هم‌زمان فناوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نتایج مطلوبی را در مدیریت اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای در پی داشته است (Reddy, 2008). با استفاده از قابلیت نرم‌افزار ARC GIS، طبقه‌بندی تصاویر نام‌برده در 10 طبقه انجام شده است. بیشترین ارزش تصویری در بالاترین طبقه قرار داده شده است.

گسترش محدود رگه‌های کربناته (مناطق غربی)، این واحدها به رنگ روشن بارز شده است (شکل 8). دقت تصویربرداری طیفی به قدرت تفکیک طیفی باندهای هر سنجنده وابسته بوده و با وجود محدودیت قدرت تفکیک طیفی سنجنده ETM+ در بارزسازی کانیهای مختلف، این روش تا حدودی در تفکیک کانیهای کربناته از سایر کانیها موفق تر بوده است.

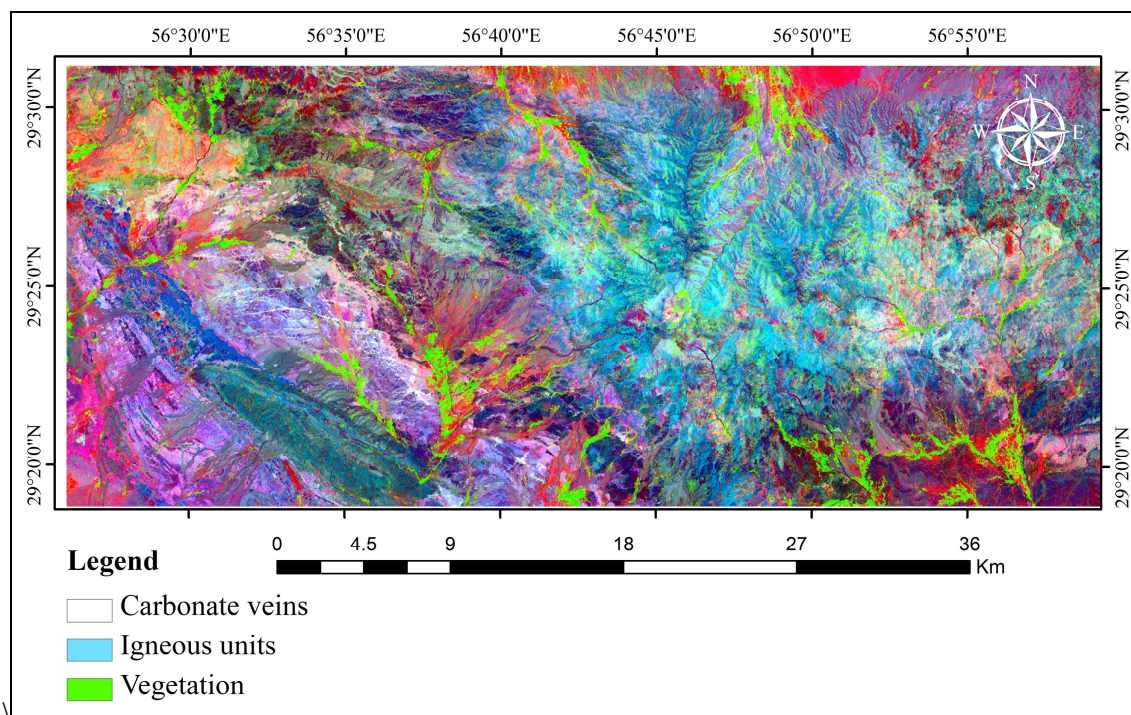
طبقه‌بندی تصاویر پردازش یافته

تصاویر ماهواره‌های حاوی لایه‌های اطلاعاتی متفاوتی هستند. هدف طبقه‌بندی، تعیین جایگاه هر پیکسل در هر طبقه خاص و جدا کردن هر طبقه بر اساس ارزش تصویری است. شکلهای



شکل 7، بر اساس نتایج حاصل شده از برتری طیفی شش مؤلفه اصلی (جدول 5) و همچنین به کارگیری رابطه‌های 1 و 2، تصویر اکسید آهن و تصویر کانی رسی تهیه شده است. A: واحدهای حاوی اکسید آهن (ماسه‌سنگها و کنگلومرای قرمز) موجود در غرب و شمال تصویر و دگرسانی اکسید آهن در مناطق شرقی تصویر به رنگ روشن بارز شده است، B: رگه‌های کربناته (سمت چپ تصویر) و حضور کانیهای رسی (سمت راست تصویر) به رنگ روشن بارز شده است.

Fig. 7. Based on the results obtained from Selectivity of the six main components (Table 5) as well as using Equation 1 and 2, illustration iron oxide and clay mineral picture was taken A: Fe-oxide bearing units in the upper (Red sandstone and conglomerate) and left of the acquired image and ferrous alteration in the right side, are enhanced by light color, B: Carbonate veins (left) and clay minerals (right) enhanced by light color.



شکل 8. با توجه به داده‌های آماری و همچنین برتری مؤلفه‌های اصلی در بارزسازی کانیهای کربناته، ترکیب رنگی منفی مؤلفه اول در باند قرمز، مؤلفه دوم در باند سبز و منفی مؤلفه سوم در باند آبی، بیانگر رگه‌های کربناته (مناطق غربی) است و با رنگ روشن بارز شده است.

Fig. 8. According to statistical data, as well selectivity of the six main components in the enhancement of carbonate minerals, Color composites of negative PC1 in red, PC2 in green band and negative PC3 in blue band showing carbonate vein (western areas).

مناطق امیدبخش اکتشاف مس پورفیری منطق بر هم‌جواری واحدهای آذرین و دگرسانی هیدروترمال است (شکل 10 - B).

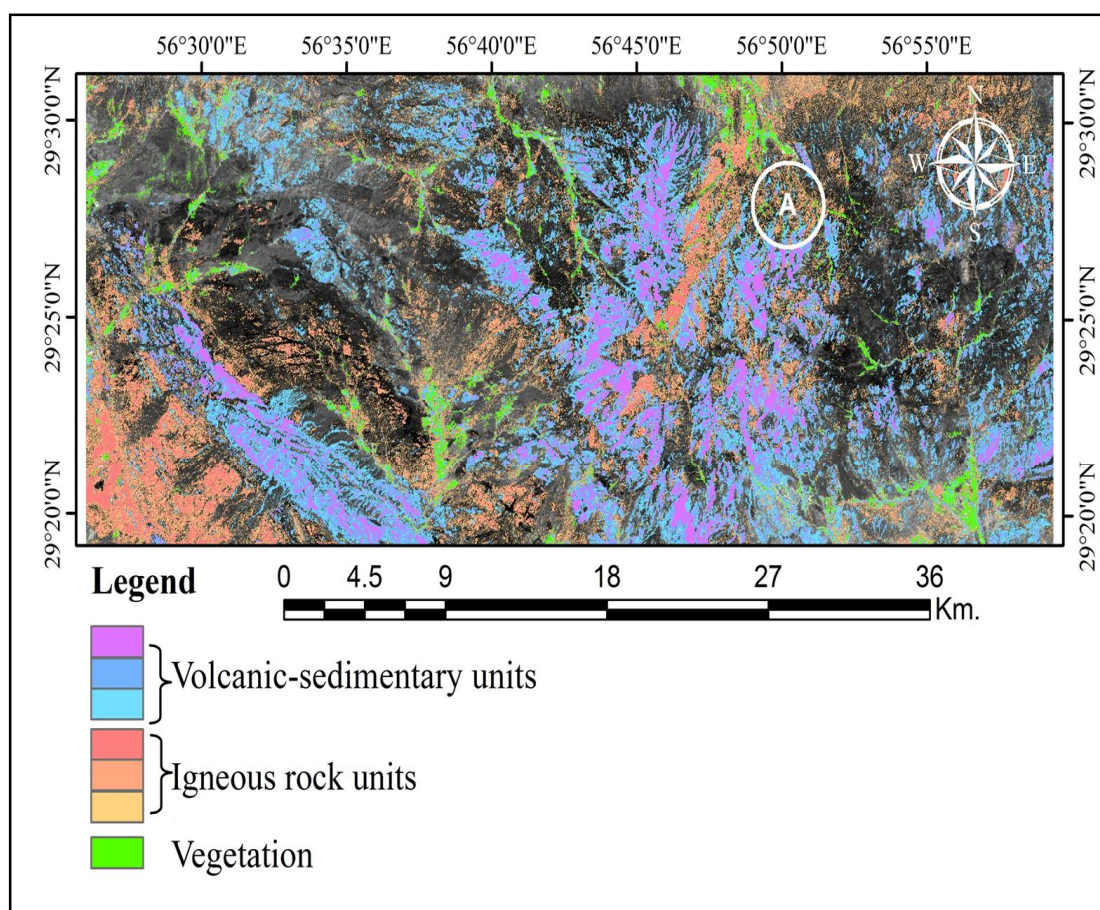
صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل‌شده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و انطباق آن با شواهد زمین‌شناسی، بازدیدهایی از واحدهای سنگی و رخنمونهای دگرسانی موجود در منطقه انجام شد. در بازدیدهای صورت گرفته از مناطق شمالی و منطبق با محدوده A در شکل 9، سنگهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن در همسایگی ولکانیک‌های میوسن تشخیص داده شده است (شکل 11 - A و B). در شرق منطقه مورد بررسی، ولکانیک‌های نیمه‌عمیق به‌شدت تحت‌تأثیر دگرسانی فیلیک قرارگرفته است (شکل 11 - C و D) و دگرسانی پروپلیتیک با گسترش محدودتر در این توده‌ها دیده می‌شود (شکل 11 - E). نفوذ دایکهای دیابازی در ماسه‌سنگهای موجود در مناطق غربی، باعث توسعه محدود دگرسانی پروپلیتیک، اکسید آهن و رسی در حوالی ایستگاه 3 شده است (شکل 11 - F).

طبقه دهم (شکل 5) بیانگر پوشش گیاهی بوده و به‌طور مشابه آخرین طبقه (شکل A-7) بیانگر دگرسانی اکسید آهن (در شرق منطقه مورد بررسی) و کنگلومرا و ماسه‌سنگهای قرمز رنگ (در غرب منطقه مورد بررسی) است. طبقه دهم (شکل B-7) بیانگر کانیهای رسی و دگرسانی فیلیک (مناطق شرقی و ایستگاه 1) و رگه‌های کربناته (مناطق غربی) است. طبقه 1 و 2 و 3 (شکل 6) و به‌طور مشابه طبقه 1 و 2 و 3 (شکل 8)، به ترتیب بیانگر واحدهای سنگی آذرین و واحدهای آتشفشانی-رسوبی است (شکل 9). در طبقه دهم (شکل 8) دگرسانی پروپلیتیک و رگه‌های کربناته به‌صورت هم‌زمان بارز شده است؛ زیرا کلسیت به‌صورت ثانویه و در اثر دگرسانی پروپلیتیک در مناطق شرقی (ایستگاه 2) تشکیل شده است. دگرسانی سوسوریتی و سرپانتینیتی و همچنین تولید ثانویه کانیهای رسی در مجموعه افیولیتی، باعث قرارگیری این واحد زمین‌شناسی در طبقه کانیهای رسی و پیکسل‌های آبی‌رنگ در (شکل A-10) شده است. با توجه به نتایج پردازش تصاویر،

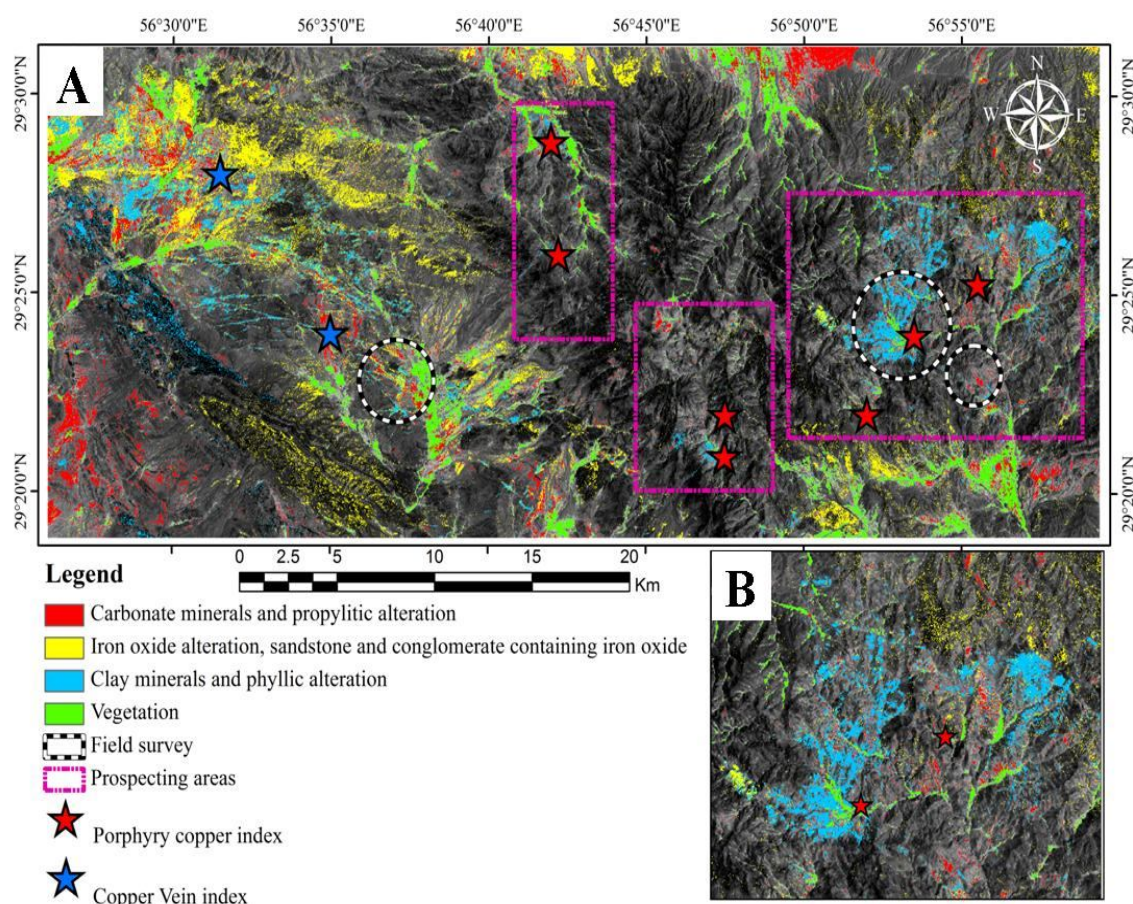
ترتیب به سائوسیریت، کلسیت و کلریت، اپیدوت تبدیل شده و بیانگر دگرسانی پروپلیتیک است (شکل D-12). سنگ اولیه (احتمالاً آندزیت پورفیری) تحت تأثیر دگرسانی هیدروترمال قرار گرفته است؛ زیرا، پلاژیوکلاز به کلریت و سریسیت تبدیل شده است و پیریت در مجاورت این کانیها تشکیل شده است (شکل E-12). کانی اوپک در شکل E-12، پیریت بوده و این کانی در مجاور کلریت و سریسیت قرار گرفته است (شکل F-12). در دایک‌های دیابازی (حوالی ایستگاه 3)، دگرسانی هیدروترمال باعث تشکیل کانی کلریت و سریسیت شده است (شکل G-12).

تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال، رگه‌های کربناته سیلیسی شده و در امتداد شکستگیهای تشکیل شده است (شکل 11-12). نتایج بررسیهای پتروگرافی در شکل 12 آورده شده است. شکل (A-12)، نشان‌دهنده مرز گرانودیوریت و کوارتز دیوریت در حوالی ایستگاه A در شکل 9 است. افزایش غلظت آهن، منگنز و سیلیس در رگه‌های کربناته می‌تواند شاهدهی بر نقش محلولهای هیدروترمال در ایجاد این رگه‌ها در حوالی ایستگاه 3 باشد (شکل B-12). حضور کوارتز و سریسیت بیانگر دگرسانی فیلیک شدید در حوالی ایستگاه 1 است (شکل C-12). در نمونه‌های جمع‌آوری شده از حوالی ایستگاه 2، کانیهای پلاژیوکلاز و فرومنیزین (آمفیبول و اولیوین)، به



شکل 9. این تصویر بر اساس تصویر طبقه‌بندی شده (شکل‌های 6 و 8) در ده طبقه تهیه شده است. بیشترین ارزش تصویری در بالاترین طبقه قرار داده شده است. طبقه‌های 1 و 2 و 3 (شکل 6) بیانگر توزیع توده‌های آذرین و طبقه 1 و 2 و 3 (شکل 8) بیانگر توزیع واحدهای آتشفشانی - رسوبی است. پوشش گیاهی از طبقه 10 ام (شکل 5) استخراج شده است (A: محل نمونه‌برداری بر روی زمین).

Fig. 9. This picture acquired from classified images (Fig. 6 and 8) that have been prepared in ten classes, the highest value is as the highest class. Classes 1, 2 and 3 (figure 6) is igneous outcrops in figure 6 and volcano sedimentary units in figure 8. Vegetation capping is acquired from class of 10 in figure 5. A symbolizes the field sampling points.



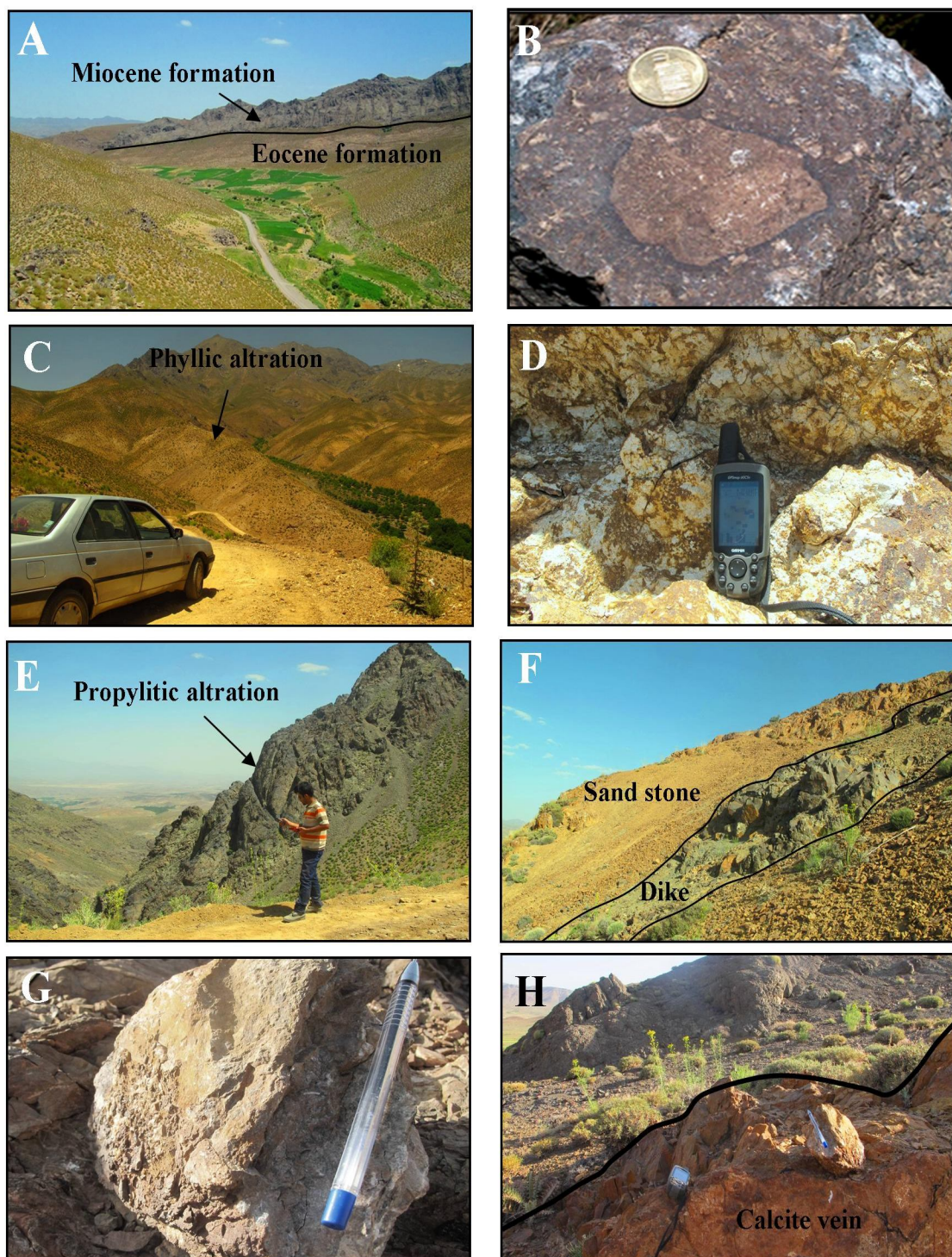
شکل 10. A: توزیع دگرسانی هیدروترمال و مناطق امیدبخش مس پورفیری در منطقه مورد بررسی (بزنجان - بافت). این تصویر بر اساس تصویر طبقه‌بندی شده (شکل 7-A و B و شکل 8) در ده طبقه تهیه شده است. بیشترین ارزش تصویری در بالاترین طبقه قرار داده شده است. طبقه دهم (شکل 7-A) بیانگر اکسید آهن است و این واحدها در مناطق غربی و شمالی به صورت ماسه‌سنگ و کنگلومرای قرمز رخمون دارند و در مناطق شرقی به صورت دگرسانی اکسید آهن بارز شده است. طبقه دهم (شکل 7-B) بیانگر حضور کانیهای رسی و دگرسانی فیلیک است. طبقه دهم (شکل 8) بیانگر دگرسانی پروپلیتیک (مناطق شرقی) و کانیهای کربناته (مناطق غربی) است. B: مناطق امید بخش مس پورفیری و هم‌جواری دگرسانی پروپلیتیک، اکسید آهن و فیلیک

Fig. 10. A: Hydrothermal alteration patterns and prospecting zones for porphyry Copper exploration in study area (Beznanjan-Baft), The image is acquired from classified images (figures 7-A, 7-B and 8) that prepared in ten classes. the highest value is as the highest class, Class 10 indicates Fe oxides (The units in western and northern regions are sandstone and red conglomerate outcrop and in the eastern regions are these are iron oxide alteration), clay minerals (phyllic alteration) and propylitic alteration in figures 7-A, 7-B and 8, respectively, Class 10 in Figure 8, represents propylitic alteration (eastern region) and carbonate minerals (western region), B: Prospecting areas for exploration of porphyry copper and coexistence of propylitic alteration, iron oxides and phyllic alteration.

نتیجه‌گیری

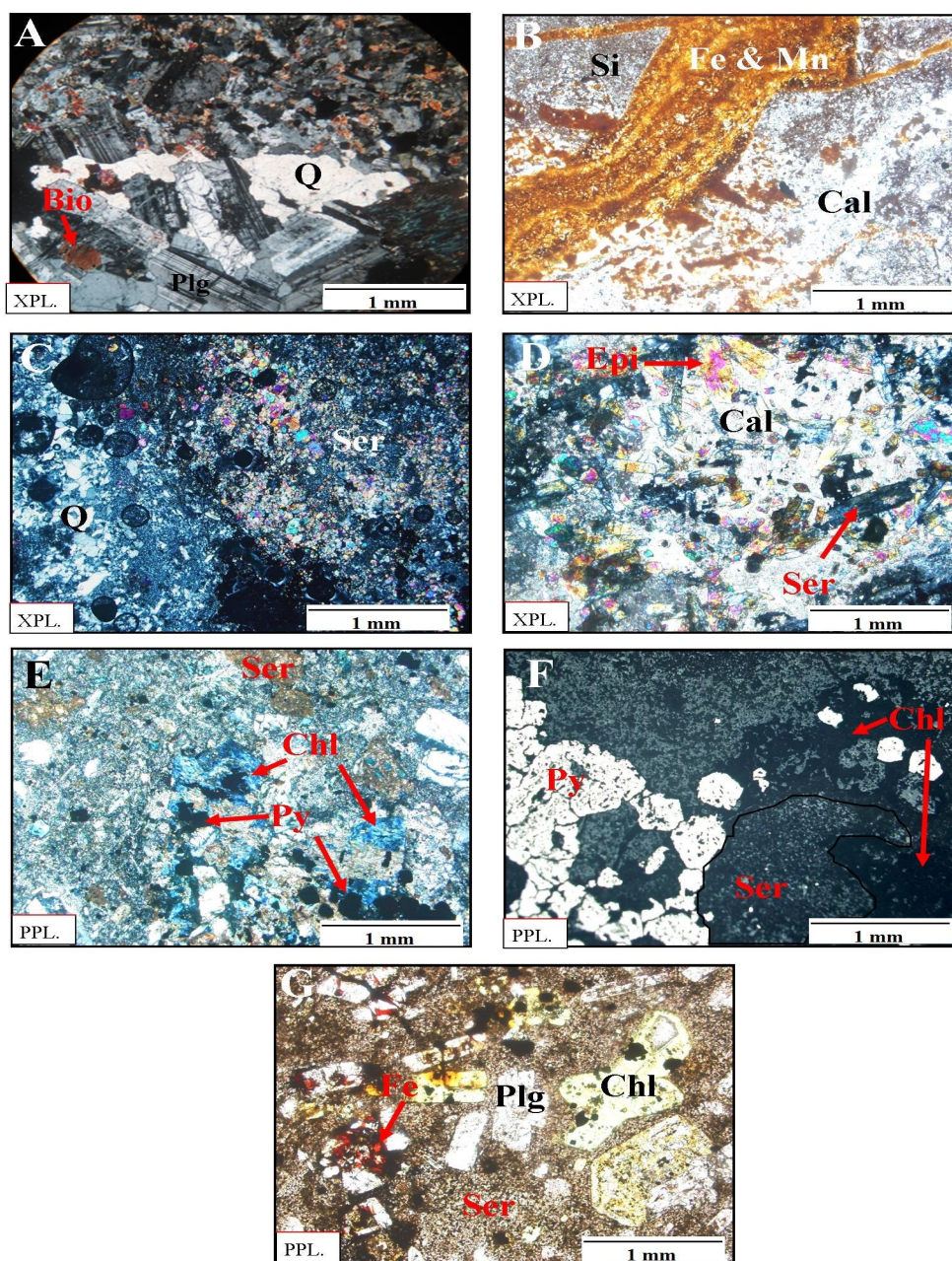
در این پژوهش، با تحلیل ریاضی و آماری بردارهای ویژه تصویر روشی جدید در تعیین پتانسیل طیفی هر PC ارائه شد و با استفاده از این فرآیند امکان تفسیر و تصمیم‌گیری در مورد اطلاعات طیفی هر مؤلفه فراهم می‌شود. نتایج محاسبات انجام شده، نشان داد که اختلاف بردارهای ویژه می‌توانند به عنوان عاملی برای پیش‌بینی همبستگی طیفی بین باندهای

مختلف تصاویر ماهواره‌ای به کار روند؛ به طوری که اگر تفاضل قدر مطلق بردارهای ویژه بین دو باند یک مؤلفه اصلی (یعنی ویژگی طیفی مؤلفه اصلی)، بیشتر یا مساوی یک باشد (یعنی اعداد هدف)، آن دو باند دارای بیشترین اختلاف طیفی و کمترین همبستگی هستند. محاسبه وزن طیفی مؤلفه اصلی نشان می‌دهد که هرچه PC، وزن طیفی بیشتری داشته باشد، اطلاعات طیفی خاص‌تری را در خود جای داده است.



شکل 11. A: هم‌جواری واحدهای آتشفشانی رسوبی ائوسن و توده‌های نفوذی میوسن در شمال منطقه مورد بررسی (بزنجان- بافت)، B: هاله واکنشی در اطراف آنکلاوها در محل برخورد توده نفوذی و واحدهای آتشفشانی رسوبی، C و D: توزیع گسترده دگرسانی فیلیک در مناطق شرقی و در حوالی ایستگاه (1)، E: دگرسانی پروپلیتیک در توده‌های ولکانیکی در حوالی ایستگاه (2)، F: نفوذ دایک‌های دیابازی در ماسه‌سنگ‌های موجود در مناطق غربی و در حوالی ایستگاه (3)، G و H: رگه‌های کربناته سیلیسی شده

Fig. 11. A: coexistence of volcano- sedimentary units and plutonic rock of Eocene age in the north of the study area (Bezanjan-Baft), B: Reaction halo around enclaves in the contact of volcano- sedimentary units and plutonic rock, C: and D: Highly altered phyllic zone in the east of the study area, (E) Propylitic alteration within volcanic rocks, F: Intrusion of dibasic dikes into the sandstone rocks in the west of the study area, G and H: Silicified carbonate veins



شکل 12. A: مرز بین گرانودیوریت و آنکلاو کوارتز دیوریتی در شمال محدوده مورد بررسی، B: رگه کربناته حاوی اکسید آهن، منگنز و سیلیس در مجاور دایک‌های دیابازی، C: دگرسانی شدید فیلیک و حضور کوارتز و سریسیت، D: دگرسانی پروپلیتیک شدید در آندزیت پورفیری، E: تشکیل کلریت و سریسیت در اثر دگرسانی هیدروترمال، F: حضور پیریت در مجاورت کلریت و سریسیت، G: دگرسانی کلریتی و رسی در دایک دیابازی با بافت پورفیری، (کوارتز Q، بیوتیت Bio، سریسیت Ser، کلسیت Cal، اپیدوت Epi، پلاژوکلاز Plg، اوپک Op، کلریت Chl، هماتیت Fe، سیلیس Si، آهن و منگنز Fe & Mn) (بزرگ‌نمایی عکسهای A، B، C، E، F و G 2X و عکس D 4X است)

Fig. 12. A: Contact between granodiorite and quartz-diorite enclaves in the north of the study area, B: Carbonate veins containing iron oxides, manganese and silica in contact of dibasic dikes, C: Highly altered phyllic zone and presence of quartz and sericite, D: Highly altered propylitic zone within porphyritic andesite, E: Chlorotic and argillic alteration within dibasic porphyritic andesite, F: Pyrite is accompanied by chlorite and sericite, G: Chlorite and sericite formed by hydrothermal alteration, (Bio: biotite; Ser: sericite; Cal: calcite; Epi: epidote; Plg: plagioclase; Op: opaque minerals, Chl: chlorite; Fe: hematite; Si: silica, Fe & Mn: iron and manganese) (Magnification scale for images no A, B, C, E, F and G is 2X and image no D, is 4X)

است. بارزسازی هم‌زمان دگرسانی فیلیک و رگه‌های کربناته در تصویر ETM+ ناشی از دگرسانی هیدروترمال و تشکیل کانیه‌های رسی با تن رنگی مشابه با کانیه‌های کربناته است. با توجه به نتایج پردازش تصاویر ماهواره‌ای و پژوهش‌های زمین‌شناسی، مناطق شرقی و مرکزی که در آنها دگرسانی هیدروترمال با واحدهای آذرین هم‌پوشانی دارد، به‌عنوان مناطق امیدبخش کانه‌زایی مس پورفیری معرفی می‌شود. فرآیند ارائه شده در این پژوهش به‌عنوان روشی کاربردی در پردازش تصاویر ETM+ معرفی می‌شود؛ چرا که در این روش، علاوه بر تعیین پتانسیل طیفی هر مؤلفه، امکان انتخاب مؤلفه اصلی و نقشه‌برداری مناطق دگرسانی هیدروترمال فراهم شده است.

قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری سرکار خانم زهرا غلامی (دانشجوی دکتری زمین‌شناسی دانشگاه شیراز) و همچنین از راهنمایی‌های آقای دکتر حجت‌الله رنجبر (عضو هیأت‌علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان) و آقای دکتر مجید هاشمی تنگستانی (عضو هیأت‌علمی دانشگاه شیراز) صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. حمایت‌های مالی این پژوهش بر عهده شرکت زمین آب بهینه پویان پارس کاو (زآب پاک) بوده است.

با محاسبه سهم هر PC در بارزسازی کانیه‌های رسی، اکسید آهن و کانیه‌های کربناته و همچنین محاسبه برتری طیفی مؤلفه‌های اصلی، پتانسیل طیفی هر PC مشخص شد. با محاسبه پتانسیل طیفی امکان تولید تصاویری با اطلاعات طیفی اکسید آهن، کانیه‌های کربناته و کانیه‌های رسی فراهم شده است. ممکن است یک مؤلفه هم‌زمان اطلاعات طیفی چند کانی را در خود جای داده باشد که نبود آگاهی از این موضوع، باعث ایجاد خطا در تفسیر تصاویر مؤلفه‌های اصلی می‌شود. بر اساس نتایج تعیین سهم مؤلفه‌های اصلی، PC پنجم علاوه بر اطلاعات طیفی کانی رسی و اکسید آهن، حاوی اطلاعات طیفی کانیه‌های کربناته بوده و به‌کارگیری این مؤلفه باعث بارزسازی هم‌زمان این کانیه‌ها شده است. طبقه‌بندی تصاویر پردازش‌شده باعث استخراج اطلاعات طیفی از تصاویر مؤلفه‌های اصلی شده است. نتایج پردازش تصاویر نشان می‌دهد؛ که غالب دگرسانی موجود در محدوده مورد بررسی، فیلیک و پروپلیتیک بوده و دگرسانی آرژیلیک و اکسید آهن، از گسترش محدودتری برخوردار است. بر اساس نتایج پتروگرافی، حضور کوارتز و سریسیت و همچنین کلسیت، اپیدوت، کلریت، به ترتیب بیانگر رخداد دگرسانی فیلیک و پروپلیتیک در محدوده مورد بررسی است. دگرسانی پروپلیتیک و تشکیل کلسیت به‌صورت ثانویه، مهمترین عامل بارزسازی هم‌زمان دگرسانی پروپلیتیک و کانیه‌های کربناته

References

- Abassdadeh, M., 2011. Hydrothermal alteration mapping by ASTER images in Rarbor area, Kerman. *Journal of Earth Sciences*, 20(78): 123-128.
- Abrams, M.J., Brown, D., Lepley, L. and Sadowski, R., 1983. Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona. *Economic Geology*, 78(4): 591-604.
- Ciampalini, A., Garfagnoli, F., Antonielli, B., Moretti, S. and Righini, G., 2013. Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11): 4529-4546.
- Crosta, A.P. and Moore, J.M., 1989. Geological mapping using landsat thematic mapper imagery in Almeria province, south-east Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 10(3): 505-514.
- Davis, J.C., 1973. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley and Sons, New York, 257 pp.
- Dehnavi, A.G., Sarikhani, R. and Nagaraju, D., 2010. Image processing and analysis of mapping alteration zones in environmental research, East of Kurdistan, Iran. *World Applied Sciences Journal*, 11(3): 278-283.
- Drury, S.A., 2001. *Image interpretation in geology*. Routledge, London, 304 pp.
- Eklundh, L. and Singh, A., 1993. A comparative analysis of standardised and unstandardised principal components analysis in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 14(7): 1359-1370.
- Geological Survey of Iran, 1973. *Exploration for ore deposit in Kerman Region*. Geological Survey of Iran Report Yu/53, Tehran, 220 pp.
- Gupta, R.P., Tiwari, R.K., Saini, V. and Srivastava, N., 2013. A simplified approach for

- interpreting principal component images. *Advances in Remote Sensing*, 2 (2): 111-119.
- USGS (U.S. Geological Survey). <http://earthexplorer.usgs.gov>
- Jafari, H., 2009. Evaluate the economic potential of copper in Hararan (Kerman province) using by lithogeochemical methods. *Journal of Land and Resources*, 1(2): 25-31.
- Kaufman, H., 1988. Mineral exploration along the Aqaba-Levanat structure by use of TM data, concepts, processing and results. *International Journal of Remote Sensing*, 9 (10): 1630-1658.
- Kwarteng, A.Y. and Chavez J.P.S., 1998. Change detection study of Kuwait City and environs using multi-temporal Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(9): 1651-1662.
- Loughlin, W.P., 1991. Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(9): 1163-1169.
- Masumi, F. and Ranjbar, H., 2011. Hydrothermal alteration mapping using image sensors ASTER and ETM+ in the northern half of the Geological Map 1:100,000 Baft. *Journal of Earth Sciences*, 20(79): 121-128.
- Moghadam, H.S., Stern, R.J., Chiaradia, M. and Rahgoshay, M., 2013. Geochemistry and tectonic evolution of the Late Cretaceous Gogher-Baft ophiolite, Central Iran. *Lithos*, 168 (1), 33-47.
- Ott, N., Kollersberger, T. and Tassara, A., 2006. GIS analyses and favorability mapping of optimized satellite data in northern Chile to improve exploration for copper mineral deposits. *Geosphere*, 2(4): 236-252.
- 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.
- Pour, A.B. and Hashim, M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44(1), 1-9.
- Ranjbar, H., Honarmand, M. and Moezifar, Z., 2004. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(2): 237-243.
- Ranjbar, H., Shahriari, H. and Honarmand, M., 2003. Comparison of ASTER and ETM+ data for exploration of porphyry copper mineralization: A case study of Sar Cheshmeh areas, Kerman, Iran. *International Conference Map Asia*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Reddy, M.A., 2008. *Textbook of Remote Sensing and Geographical Information Systems*. Atlantic Publishers and Distributors, Haydarabad, 476 pp.
- Richard, A.J. and Dean, W.W., 2002. *Applied multivariate statistical analysis*. Prentice Hall, New York, 453 pp.
- Robb, L., 2005. *Introduction to ore-forming processes*. John Wiley and Sons, Cornwall. 386 pp.
- 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(10): 1981-2000.
- Sanjeevi, S., 2008. Targeting limestone and bauxite deposits in southern India by spectral unmixing of hyperspectral image data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII (B8), 1189-1194.
- Shahabpour, J., 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(4): 405-417.
- Singh, A. and Harrison, A., 1985. Standardized principal components. *International Journal of Remote Sensing*, 6(6): 883-896.
- Smith, L.I., 2002. *A tutorial on principal components analysis*. Cornell University, USA, 14 pp.
- Srdic, A., Dimitrijevic, M.N., Cvetic, S. and Dimitrijevic, M.D., 1972. Geological map of Baft, scale 1:100,000. Geological survey of Iran.
- Tangestani, M.H. and Moore, F., 2000. Iron oxide and hydroxyl enhancement using the Crosta Method: a case study from the Zagros Belt, Fars Province, Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(2): 140-146.
- Tangestani, M.H. and Moore, F., 2002. Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 23(22): 4815-4825.
- Van der Meer, F.D., Van der Werff, H., van Ruitenbeek, F., Hecker, C.A., Bakker, B.H., Noomen, F.M., van der Meijde, M., Carranza,

E.J.M., de Smeth, J.B. and Woldai, T., 2012. Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1): 112-128.

Vincent, R.K., 1997. *Fundamentals of geological and environmental remote sensing*. Prentice Hall, New York, 132 pp.

Yetkin, E., 2003. *Alteration Mapping By Remote Sensing: Application to Hasandağ–Melendiz Volcanic Complex*. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 364 pp.



A new approach for hydrothermal alteration mapping by selecting and interpreting principal components in Landsat ETM+ images

Mohammad Kashkoei Jahroomi* and Afshin Qishlaqi

Department of Hydrology and Environmental Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Submitted: Feb. 5, 2014

Accepted: June 6, 2015

Keywords: Principal component analysis, Landsat ETM⁺, Hydrothermal alteration, Mapping, Baft, Kerman

Introduction

In remote sensing studies, especially those in which multi-spectral image data are used, (i.e., Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper), various statistical methods are often applied for image enhancement and feature extraction (Reddy, 2008). Principal component analysis is a multivariate statistical technique which is frequently used in multidimensional data analysis. This method attempts to extract and place the spectral information into a smaller set of new components that are more interpretable. However, the results obtained from this method are not so straightforward and require somewhat sophisticated techniques to interpret (Drury, 2001). In this paper we present a new approach for mapping of hydrothermal alteration by analyzing and selecting the principal components extracted through processing of Landsat ETM+ images.

The study area is located in a mountainous region of southern Kerman. Geologically, it lies in the volcanic belt of central Iran adjacent to the Gogher-Baft ophiolite zone. The region is highly altered with sericitic, propylitic and argillic alteration well developed, and argillic alteration is limited (Jafari, 2009; Masumi and Ranjbar, 2011). Multispectral data of Landsat ETM+ was acquired (path 181, row 34) in this study. In these images the color composites of Band 7, Band 4 and Band 1 in RGB indicate the lithology outcropping in the study area. The principal component analysis (PCA) of image data is often implemented computationally using three steps: (1) Calculation of the variance, covariance matrix or correlation matrix of the satellite sensor data. (2)

Computation of the eigenvalues and eigenvectors of the variance-covariance matrix or correlation matrix, and (3) Linear transformation of the image data using the coefficients of the eigenvector matrix.

Results

By applying PCA to the spectral data, according to the eigenvectors obtained, 6 principal components were extracted from the data set. In the PCA matrix, the eigen vector differences between the means of the level of significance between two bands (or spectral significance of the PC). The higher value is regarded as the Target Value of the bands which show a lower correlation. The components having maximum spectral significance of PCs, in bands 1 and 3, 5 and 7 and 5 and 3, were selected for enhancement of iron oxides, clay minerals and carbonate minerals, respectively. In each PC matrix, the sum of the significances is regarded as the spectral weight of that PC.

The spectral weight of the extracted PCs, was found to be as follows:

PC5 > PC4 > PC2 > PC3 > PC7 > PC1

The inverse PC4 and -PC3 provide valuable information on vegetation mapping. In order to map the alteration zones and igneous rocks outcropped in the study area, the color composites of the PC5, -PC4 and average of each PC are included in RGB, respectively. The spectral proportion of each PC pertaining to each mineral was calculated as spectral significance in the two bands (e.g. Bands 5 and 7 for clay minerals and Bands 3 and 1 for Fe oxide minerals) divided by spectral weight of that PC. Based on the obtained

*Corresponding authors Email: ukgeology@yahoo.com

results, the selectivity of the extracted components for enhancement of clay minerals and Fe oxide minerals was calculated and images of these minerals were produced using the following expressions:

Fe oxide minerals:

Clay minerals:

For carbonate minerals, the proportion of each PC is calculated in terms of the eigenvectors of bands 5 and 3. The selectivity of the PCs used in enhancing of spectral data of carbonate minerals is as follows: PC5>PC2>PC1>PC3>PC4>PC7

In the remotely sensed image, PC5 with high spectral weight was selected as the informative PC for clay minerals, iron oxides and carbonate minerals. This is because propylitic alteration and the formation of carbonate minerals can be easily enhanced in the processed images. Eventually, overlapping of the processed images provides patterns of hydrothermal alteration which indicate the areas to be prospected. In order to validate the obtained results of the image processing with geological evidence, petrographic studies of rock samples collected from major outcrops in the study area were made. It was found that quartz, calcite, epidote, sericite and chlorite are the main constituents of sericitic and propylitic alteration assemblages in the study area. The minerals are virtually enhanced in Landsat ETM+ using the proposed methods and confirm the results obtained from multispectral data analysis.

Conclusion

This study provides a new and improved approach to obtain the most meaningful spectral data for

oxides, carbonates and clay minerals in multispectral images. As these minerals are typically found in hydrothermal alteration, the method presented in this article can be used for enhancement of such mineral spectral data, which can be very helpful in prospecting and exploration for hidden mineral deposits.

Acknowledgments

The first author wishes to sincerely thank Z.Gholami (PhD student, Shiraz University) for her assistance during this study. Also, we would like to thank Dr. Ranjbar (Shahid Bahonar University of Kerman) and Dr. H. Tangestani (Shiraz University) for their constructive comments. Financial support for this study was provided by the ZABPAK Company.

References

- Drury, S.A., 2001. Image interpretation in geology. Routledge, London, 304 pp.
- Jafari, H., 2009. Evaluate the economic potential of copper in Hararan (Kerman province) using by lithogeochemical methods. Journal of Land and Resources, 1(2): 25-31.
- Masumi, F. and Ranjbar, H., 2011. Hydrothermal alteration mapping using image sensors ASTER and ETM+ in the northern half of the Geological Map 1:100,000 Baft. Journal of Earth Sciences, 20(79): 121-128.
- Reddy, M.A., 2008. Textbook of Remote Sensing and Geographical Information Systems. Atlantic Publishers and Distributors, Hyderabad, 476 pp.