



بررسی‌های دورسنجی و مغناطیس‌هوابرد در ذخایر مس پورفیری برای شناسایی مناطق با تمرکز بالای کانه‌زایی طلا، مطالعه موردی بخش میانی کمربند دهج ساردوئیه کرمان، ایران

مهديه حسينجاني زاده* و مهدي هنرمند

گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۷

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی‌های دورسنجی و مغناطیس‌هوابرد در ذخایر مس پورفیری برای شناسایی واحدهای دگرسانی و مناطق با تمرکز بالای کانه‌زایی طلاست. بدین منظور هشت اندیس با تمرکز متفاوت طلا انتخاب و مرز مطالعاتی و کانی‌های مهم دگرسانی در آنها توسط پردازش داده‌های استر مشخص شدند. داده‌های مغناطیسی نیز با فیلترهای مختلف پردازش و بر اساس مرزهای تعیین شده برای هر اندیس برش داده شدند. در مرحله بعد مناطق بارز شده و تغییرات میدان مغناطیس در اطراف هر اندیس، بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند. طبق نتایج پردازش تصاویر استر زون فیلک در منطقه گسترش زیادی دارد و با توجه به اینکه بیشتر ذخایر فقیر از طلا با دگرسانی گسترده فیلک همراه هستند، این امر پایین بودن مقدار طلا در این ذخایر را تأیید می‌کند. نتایج داده مغناطیسی نیز نشان داد که تغییر در شدت میدان مغناطیسی با تغییرات طلا در اندیس‌های مورد بررسی همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: داده مغناطیس‌هوایی، ذخایر مس پورفیری، سنجش از دور، طلا، کمربند دهج ساردوئیه کرمان

مقدمه

تناژ ذخایر مس پورفیری همبستگی منفی و بین مقدار طلا و مگنتیت همبستگی مثبت بالایی وجود دارد؛ به طوری که در کانسارهای با مقادیر بالای مگنتیت، تمرکز طلا بیشتر است (Kesler, 1973; Tittley, 1978; Sillitoe, 1979; Cox and Singer, 1988; Lowell, 1989; Kesler et al., 2002; Shafiei and Shahabpour, 2008). بالا در مرکز سیستم‌های مس پورفیری می‌تواند کلید اکتشافی مهمی در اکتشاف ذخایر پورفیری غنی از طلا باشد. داده‌های مغناطیسی به دلیل نمایش تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از واحدهای زمین‌شناسی در ردیابی و بررسی فرآیندهای

ذخایر مس پورفیری از جمله بزرگ‌ترین منابع طلا در پوسته بالایی محسوب می‌شوند و دارای حدود ۱۰۰ تن طلا هستند (Kesler et al., 2002). طلا در ذخایر مس پورفیری اغلب به عنوان محصول فرعی وجود دارد و مقدار متوسط آن نسبتاً کم است و بین ۰/۱۲-۰/۳۸ گرم بر تن می‌رسد؛ اما تناژ بسیار بالایی ذخایر مس، منبع قابل ملاحظه‌ای از طلا را که ارزش اقتصادی زیادی دارد، فراهم می‌کند (Kerrich et al., 2000). در زمینه کانه‌زایی طلا در ذخایر مس پورفیری بررسی‌های زیادی در دنیا انجام و مشخص شده است که بین مقدار طلا، عمق جایگزینی و

و توصیف کانسارهای مس پورفیری و طلا در سراسر جهان استفاده شده‌اند (Henderson, et al., 1966; Ranjbar et al., 2001; Ranjbar et al., 2004; Honarmand et al., 2004; Tommaso and Rubinstein, 2007; Ranjbar et al., 2011; Boadi, et al., 2013; Ganiyu et al., 2013). در کشور ما با وجود دارا بودن ذخایر مس پورفیری بزرگی مانند سرچشمه و میدوک، تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد توزیع طلا در این ذخایر و کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و مغناطیسی در اکتشاف آنها انجام نشده است. از محدود بررسی‌هایی که انجام شده است، می‌توان به پژوهش انجام شده توسط شفیع و شهاب‌پور (Shafiei and Shahabpour, 2008) اشاره کرد که با انجام آنالیزهای مختلف شیمیایی به بررسی توزیع طلا در ذخایر مس پورفیری کرمان پرداختند. روش‌های مرسوم اکتشاف کانی‌ها بسیار پرهزینه بوده و نیازمند زمان و نیروهای انسانی بالایی است. با استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌توان به مقدار زیادی در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد و آنها را کاهش داد. این پژوهش جزو اولین پژوهش‌هایی است که به بررسی تمرکز پراکندگی طلا با استفاده از سنجش دور در ذخایر مس پورفیری می‌پردازد و نتایج این پژوهش می‌تواند در نواحی دیگر نیز به کار برده شود. هدف اصلی از این پژوهش، شناسایی واحدهای دگرسانی و بررسی ویژگی‌های مناطق با تمرکز بالاتر کانه‌زایی طلا توسط پردازش داده‌های استر و داده مغناطیسی هوآبرد است. بدین منظور تعدادی از اندیس‌های مس موجود در کمربند آتشفشانی-رسوبی دهج-ساردوئیه کرمان شامل آبدر، سرکوه، میدوک، سرچشمه، دره‌زار، سارا، سریدون و ایجو که بر اساس آنالیزهای شیمیایی مقدار طلا در آنها مشخص شده است (Shafiei and Shahabpour, 2008) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

روش مطالعه

در این پژوهش، برای بررسی امکان شناسایی مناطق با تمرکز بالای طلا، زون‌های دگرسانی و تغییرات میدان مغناطیسی در اطراف هشت اندیس معدنی شامل آبدر، سرکوه، میدوک،

زمین شناسی نقشه منحصر به فرد ایفا می‌کنند و بررسی‌های مغناطیسی می‌تواند در شناسایی نواحی با تمرکز مگنتیت بالا و تشخیص ذخایر با مقادیر طلای بیشتر، مفید واقع شوند.

از مهم‌ترین ویژگی‌های کانسارهای مس پورفیری، گسترش زون‌های دگرسانی است که از این ویژگی علاوه بر اینکه می‌توان برای مجزا کردن و شناسایی سیستم‌های پورفیری از انواع دیگر کانه‌زایی استفاده کرد، وسیله اکتشافی مهمی نیز در شناسایی این ذخایر محسوب می‌شود. بررسی الگوی دگرسانی و کانه‌زایی کانسارهای مس پورفیری در فعالیت‌های اکتشافی و بررسی بیشتر این کانسارها اهمیت زیادی دارد. شدت و گسترش دگرسانی بیانگر گسترش کانی‌سازی در منطقه است و رابطه‌ای مستقیم بین وسعت دگرسانی‌ها و کانی‌سازی برقرار است. به‌طور کلی، الگوی دگرسانی و کانه‌زایی کانسارهای مس پورفیری مشابه است؛ ولی عواملی مختلف مانند عمق جایگزینی، ترکیب سنگ‌های دیواره، جایگاه زمین‌ساختی، گسلش، ترکیب سیالات کانه‌زا و اندازه آن بر روی شکل، اندازه، کانی‌شناسی و تقارن الگوی دگرسانی و کانه‌زایی کانسارهای مس پورفیری تأثیر دارند (Lowell and Guilbert, 1970; Guilbert and Lowell, 1974). در ذخایر مختلف شدت و گسترش دگرسانی‌ها و همچنین نوع کانه‌زایی و عیار آنها با یکدیگر متفاوت است. به‌عنوان نمونه، در بیشتر ذخایر مس پورفیری فقیر از طلا در جنوب غرب و غرب آمریکا و آسیای مرکزی، دگرسانی فلیک گسترش زیادی دارد (Kesler et al., 2002).

سنجش از دور دارای توانایی بالایی در شناسایی واحدهای مختلف دگرسانی است و با استفاده از سنجنده‌های با توان تفکیک طیفی بالا امکان شناسایی و تفکیک واحدهای دگرسانی از یکدیگر وجود دارد. اهمیت سنجش از دور در اکتشاف کانی‌ها به‌وسیله بررسی‌های زیادی مشخص شده است (Galvao et al., 2005; Zhang et al., 2007; Amer et al., 2012; Hosseinjani Zadeh et al., 2014a; Hosseinjani Zadeh et al., 2014b; Tayebi and Tangestani, 2015). داده‌های مغناطیس هوآبرد برای اکتشاف

با هلی کوپتر در سال ۱۹۹۲ توسط شرکت اِروِدت^۱ استفاده شده است. چنان‌که در جدول مشخص است، ذخایر سرکوه و آبدر که تمرکز طلا در آنها بالاتر است، مقدار مگنتیت موجود در آنها نیز بیشتر است. در واقع همبستگی بالایی بین طلا و مگنتیت وجود دارد که امکان بررسی مناطق با توانایی بالاتر توسط داده مغناطیسی را فراهم می‌کند. داده‌های مغناطیسی با فرآیند تبدیلی و فیلترهای مختلف مانند تبدیل برگردان به قطب، فیلتر مشتق اول و دوم مورد پردازش قرار گرفتند. در مرحله بعد بر اساس مرزهای تعیین شده برای هر اندیس داده مغناطیسی برش داده و تغییرات میدان مغناطیسی در اطراف هر اندیس بررسی و با یکدیگر مقایسه شدند.

منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی از نظر تقسیمات ساختاری ایران در کمربند آتشفشانی رسوبی ایران مرکزی و در زون ارومیه-دختر واقع شده است و بر اساس تقسیمات ناحیه کرمان کمربند دهج-ساردوئیه را شامل می‌شود (شکل ۱- A و B). کمربند دهج-ساردوئیه در جنوب شرق کمربند آتشفشانی-رسوبی ارومیه دختر واقع شده و بیشترین حجم ماگماتیسیم آن را به خود اختصاص داده است. این کمربند با طول ۴۵۰ و عرض ۹۰ کیلومتر از شمال غرب و غرب استان کرمان، مناطق انار و دهج شروع شده و تا جنوب شرق این استان (جبال بارز جیرفت) امتداد یافته است و از شمال به فرورفتگی دشت رفسنجان و ایران مرکزی محدود می‌شود (Dimitrijevic, 1973). در این ناحیه معدن سرچشمه که بزرگ‌ترین ذخیره مس پورفیری شناخته شده ایران است و همچنین معادن میدوک و دره زار و ذخایر مس پورفیری سریدون، سارا، کوه پنج و تعدادی ذخیره دیگر قرار گرفته‌اند (شکل ۱- C و D). در این پژوهش، هشت اندیس مهم موجود در کمربند دهج-ساردوئیه شامل آبدر، سرکوه، میدوک، سرچشمه، دره زار، سارا، سریدون و ایجو که بر اساس آنالیزهای شیمیایی مقدار طلا در آنها مشخص شده است

سرچشمه، دره زار، سارا، سریدون و ایجو بررسی شده‌اند (جدول ۱). ابتدا مناطق و کانی‌های دگرسانی با اجرای ترکیب رنگی مناسب، انتخاب طیف تصویر و الگوریتم پالایش تطبیقی تنظیم شده آمیخته^۱ بر روی تصاویر استر بارزسازی شدند. پالایش تطبیقی تنظیم شده آمیخته روشی سریع برای آشکارسازی کانی‌های خاص بر اساس انطباق با طیف عضو انتهایی تصویر و یا کتابخانه‌ای است که یک روش هیبرید ناآمیختگی زیریکسل بخشی است و ترکیبی از روش‌های معروف پردازش سیگنال و تئوری اختلاط خطی است (Boardman, 1998). نتایج MTMF، به صورت دو دسته تصاویر خاکستری که شامل تصاویر پالایش تطبیقی و تصاویر با ارزش‌های امکان‌ناپذیری هستند، ارائه می‌شود. تصاویر MF، مقدار نسبی انطباق طیف مرجع و فراوانی زیریکسل را فراهم می‌کند. مقدار MF بین صفر تا یک است و پیکسل‌های با ارزش بزرگ‌تر از صفر کسر فراوانی مؤلفه هدف را نشان می‌دهند. پیکسل‌های با امکان‌ناپذیری بالا، احتمال مثبت دروغین دارد. برای نقشه‌برداری درست باید پیکسل‌هایی انتخاب شوند که امتیاز MF آنها بالا و مقدار امکان‌ناپذیری آنها پایین باشد (Hosseinjani Zadeh, 2013).

پس از بارزسازی کانی‌های دگرسانی مرز مطالعاتی هر اندیس توسط نتایج پردازش استر مشخص شد و داده‌های بارز شده به فرمت برداری تبدیل و وارد محیط GIS شدند. برای ارزیابی مناطق بارز شده بررسی‌های میدانی، آنالیز طیف‌نمایی، پراش پرتو X و بررسی مقاطع نازک انجام شده است. برای اینکه مشخص شود که آیا ارتباطی بین مقدار طلا و داده مغناطیسی وجود دارد، اندیس‌های مهم موجود در منطقه مورد مطالعه که تمرکز طلا در آنها مشخص است، مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱). این اندیس‌ها به ترتیب تمرکز طلا شامل سرکوه، آبدر، میدوک، سرچشمه، دره زار، سارا، سریدون و ایجو هستند. برای بررسی شدت میدان مغناطیسی در منطقه مورد بررسی از اطلاعات ناحیه‌ای شرکت ملی مس و داده‌های مغناطیسی هوابرد تهیه شده

1. Mixture Tuned Matched Filtering Approach (MTMF)

2. Aerodat

دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیکی و فیلیکی از شدت بیشتری برخوردار بوده و شدت دگرسانی‌های کلریتی و اپیدوتی کمتر است. در سنگ‌های آتشفشانی، در نزدیک تماس با توده نفوذی، سیلیسی شدن شدت بیشتری داشته و آرژیلیکی و کلریتی شدن کمتر است. با دور شدن از توده نفوذی شدت دگرسانی کم می‌شود. کانی‌سازی سولفیدی بیشتر در داخل سنگ‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی نزدیک توده نفوذی دیده می‌شود و با دور شدن از این مناطق شدت آن کم می‌شود (Dimitrijevic, 1973).

(Shafiei and Shahabpour, 2008) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این اندیس‌ها نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پاریز، شهر بابک و دهج را پوشش می‌دهند. اندیس‌های سرکوه، سرچشمه، دره زار و سریدن در نقشه پاریز، آبدر، میدوک، سارا در شهر بابک و ایجو در دهج واقع شده‌اند. بیشترین و گسترده‌ترین رخنمون‌های منطقه واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن هستند. نفوذ توده‌های گرانیتی و گرانودیوریتی در این واحدها باعث ایجاد دگرسانی وسیع در منطقه شده است. شدت دگرسانی در همه مناطق یکسان نیست. در سنگ‌های نفوذی

جدول ۱. موقعیت، مقدار میانگین طلا و مگنتیت در ذخایر مورد بررسی (برگرفته از شفیی و شهاب‌پور (Shafiei and Shahabpour, 2008) با تغییرات)

Table 1. The location, Au and magnetite contents in the study deposits (modified by authors after Shafiei and Shahabpour, 2008)

Deposit name	Geographic location (UTM) Zone 40R	Fe ₃ O ₄ (%)	Au (g/t)
SarKuh	348860E, 3311429N	1.24	0.083
Abdar	338413E, 3353595N	0.80	0.072
Meiduk	324373E 3367560N	0.79	0.053
Sarcheshmeh	392000E, 3313529N	0.4	0.040
Darrehzar	393800 E, 3306089N	-	0.036
Sara	321613E 3369855N	-	0.034
Iju	303508E, 3380085N	-	0.013
Seridune	394370E, 3315134N	-	0.024

داده‌های استر و پردازش انجام شده

سنجنده استر اطلاعات منابع زمینی را در ۱۴ باندها مجزا تهیه می‌کند که ۳ باندها آن در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک^۱ (۰/۸۶ - ۰/۵۲ μm) با تفکیک مکانی ۱۵ متر، ۶ باندها در محدوده

فرورسرخ موج کوتاه^۲ (۲/۴۳ - ۱/۶ μm) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و ۵ باندها در محدوده فرورسرخ گرمایی^۳ (۱۱/۶۵ - ۸/۱۲۵ μm) قرار دارند. این سنجنده قابلیت ویژه‌ای برای نقشه‌برداری کانی‌ها با هزینه پایین و دقت بالا دارد و با دارا بودن

1. Visible Near Infrared (VNIR)
2. Short Wave Infrared (SWIR)
3. Thermal Infrared (TIR)

Galvao et al., 2005; Calvin et al., 2005; Zhang et al., 2007; Hosseinjani Zadeh and Tangestani, 2011; Ranjbar et al., 2011; Bedini, 2011; Hosseinjani Zadeh et al., 2014c; Honarmand et al., 2012). در این پژوهش برای شناسایی اولیه مناطق دگرسانی ترکیب رنگی ۴۶۸ و برای شناسایی دقیق‌تر و بارسازی کانی‌های شاخص دگرسانی، روش پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته اجرا شده است.

پیکسل‌ها به‌طور معمول مخلوطی از انرژی‌های بازتابی و یا گسیل‌یافته از مواد مختلف هستند که با استفاده از روش‌های تمام پیکسلی نمی‌توان آنها را آشکارسازی کرد. از جمله روش‌های پردازش زیرپیکسلی می‌توان به پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته اشاره کرد که اهمیت آن در پژوهش‌های زیادی مشخص شده است (Boardman et al., 1995; Kruse et al., 2003; Hosseinjani Zadeh, 2008; Bishop et al., 2011; Hosseinjani Zadeh and Tangestani, 2011; Hosseinjani Zadeh, 2013; Hosseinjani Zadeh et al., 2014a, 2014c).

بدین‌منظور در این پژوهش برای نقشه‌برداری و بارسازی زون‌های مختلف از روش MTMF استفاده شده است. قبل از اجرای این الگوریتم محدوده‌های طیفی VNIR و SWIR با توان تفکیک ۳۰ متر یکپارچه‌سازی و پیش‌پردازش‌های مختلف مانند تصحیح کراس‌تاک و کالیبراسیون بازتاب نسبی متوسط داخلی^۴ به‌منظور حذف نویز و به‌دست آوردن بازتاب سطحی روی داده‌ها اعمال شد (ENVI User Guide., 2003). اندیس‌های مورد بررسی در این پژوهش در سه فریم استر قرار دارند که در تاریخ‌های سیزدهم مارچ ۲۰۰۲، اول سپتامبر ۲۰۰۳ و نهم آگوست ۲۰۰۴ تهیه شده‌اند و پردازش‌های انجام‌شده به‌صورت جداگانه روی این فریم‌ها انجام شده است.

روش MTMF با استفاده از طیف‌های تصویر استخراج‌شده روی داده‌های مرئی - فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ موج کوتاه استر اجرا شده است. پنج عضو انتهایی شامل سرسیت (ایلپیت -

باندهای زیادتر در محدوده فرورسرخ موج کوتاه نسبت به سنجنده‌های چندطیفی TM⁺، ETM⁺ (ماهواره لندست) و HRV (ماهواره اسپات) امکان شناسایی و تفکیک کانی‌های مهم دگرسانی را فراهم می‌کند (Qui et al., 2006; Gabr et al., 2010; Mars, 2010; Bedini, 2011; Ranjbar et al., 2011; Hosseinjani Zadeh and Tangestani, 2011; Amer et al., 2012; Hosseinjani Zadeh et al., 2014c; Tayebi et al., 2014).

این سنجنده دارای توانایی بالایی در نقشه‌برداری مجموعه کانی‌های دگرسانی مانند آلونیت - پیروفیلیت، کائولینیت - مونتموریلونیت، ایلپیت - مسکویت (سرسیت)، کلریت - اپیدوت - کلسیت و ژاروسیت است. مسکویت و ایلپیت که شاخص زون دگرسانی فلیک هستند، سیمای جذبی قوی در باند ۶ استر ($2/205 \mu\text{m}$) نشان می‌دهند. کائولینیت، دیکیت و هالوسیت (شاخص دگرسانی آرژلیک) دارای سیمای جذب قوی در باند ۶ و جذب ضعیف‌تر در باند ۵ ($2/165 \mu\text{m}$) هستند. اپیدوت، کلریت و کلسیت (زون پروپلیتیک) سیمای جذبی در باند ۸ ($2/35 \mu\text{m}$) نشان می‌دهند. ژاروسیت نیز که در زون اکسید مشاهده می‌شود در باند ۷ ($2/26 \mu\text{m}$) جذب دارد (Hosseinjani Zadeh and Tangestani, 2011; Hosseinjani Zadeh et al., 2014c). یکی از ساده‌ترین و اولین روش‌ها برای آگاهی از وجود زون‌های دگرسان، استفاده از ترکیب رنگی کاذب باندهای ۴، ۶ و ۸ سنجنده استر است که به‌ترتیب به باندهای قرمز، سبز و آبی منسوب می‌شوند. این ترکیب رنگی برای مشخص کردن مناطق با سیمای جذبی ۲/۲۰۵ و ۲/۳۲ و بازتابی ۱/۶۵ میکرومتر مفید است (Mars, 2010).

در پردازش تصاویر ماهواره‌ای علاوه‌بر روش‌های ساده مانند ترکیب رنگی از روش‌های پردازش طیفی تمام پیکسلی و زیر پیکسلی مانند ناآمیختگی طیفی خطی^۱، پالایش تطبیقی^۲، پالایش تطبیقی تنظیم‌شده آمیخته و نقشه‌بردار زاویه طیفی^۳ برای شناسایی و تفکیک واحدهای دگرسانی استفاده شده است

1. Liner Spectral Unmixing (LSU)

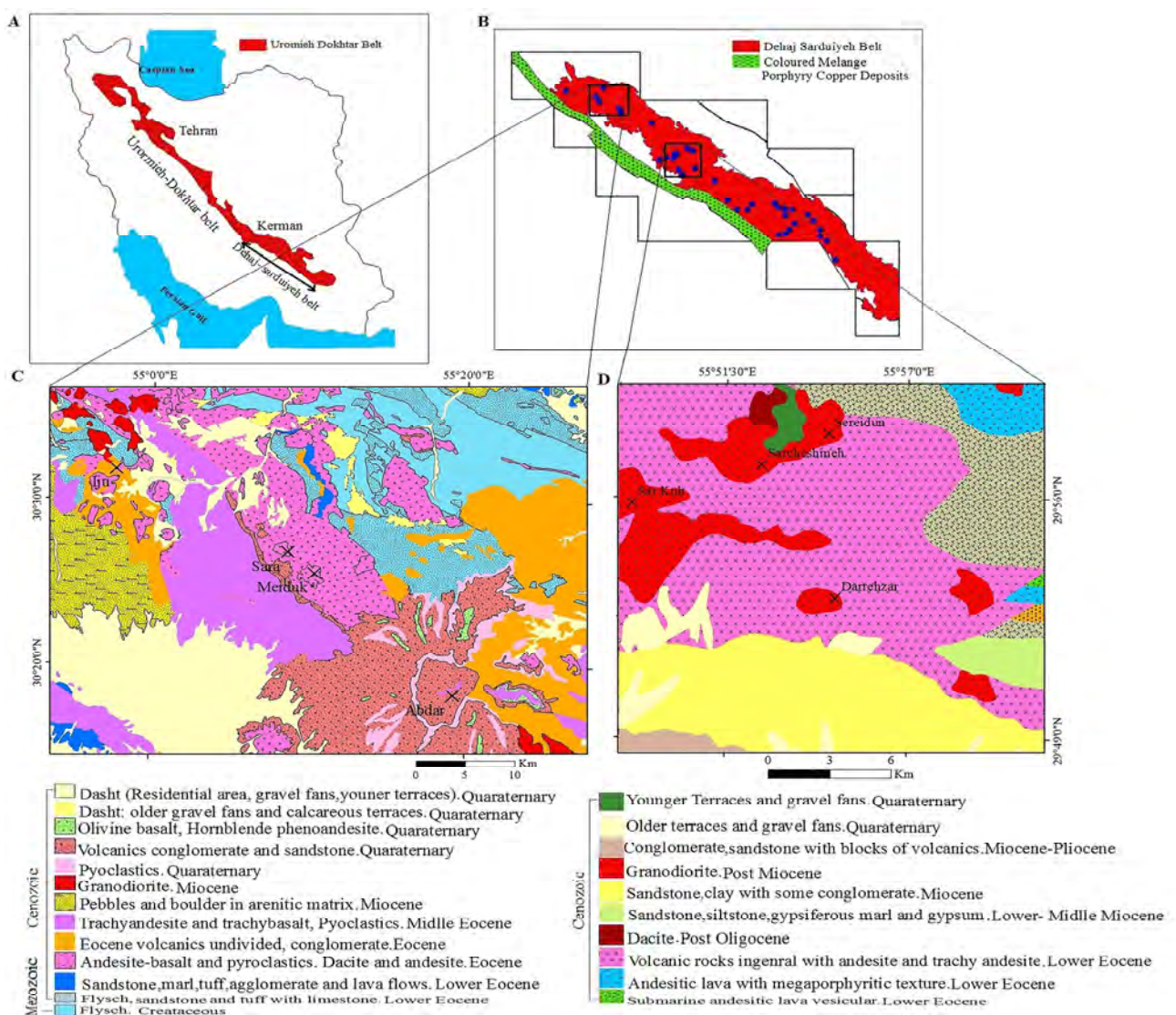
2. Matched Filtering

3. Spectral Angel Mapper

4. Internal Average Relative Reflectance (IARR)

باید دقت کرد که برای اجرای این پردازش طیف و تصویر باید در فضای تبدیل کسر کمترین نوفه (ENVI User Guide, 2003).

مسکویت)، پیروفیلیت-آلونیت، کائولینیت-دیکیت، کلریت-کلسیت-اپیدوت و ژاروسیت از تصویر استخراج شد که به‌عنوان طیف مرجع در پردازش MTMF استفاده شده‌اند. البته



شکل ۱. A: موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد بررسی در ایران و کمربند ماگمایی ارومیه دختر، B: نقشه زمین‌شناختی ناحیه کرمان و موقعیت ذخایر مس پورفیری در کمربند دهج-ساردوئیه (برگرفته از ندیموویک (Nedimovic, 1973) با تغییرات)، C: بخش‌هایی از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پاریز و موقعیت ذخایر مس پورفیری (برگرفته از دمیتریجویک و همکاران (Dimitrijevic et al., 1973) با تغییرات) و D: بخش‌های از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ یکپارچه شده شهر بابک، رباط، انار و دهج و موقعیت ذخایر مس پورفیری (برگرفته از دمیتریجویک و همکاران (Dimitrijevic et al., 1971a, 1971b, 1972, 1973; Djokovic et al., 1973) با تغییرات)

Fig. 1. A: Geographical location of the study area in Iran and the Uromiyeh-Dokhtar magmatic belt, B: Geological map of Kerman region and the locations of porphyry copper deposits in Dehaj-Sarduiyeh belt (modified after Nedimovic, 1973), C: parts of geological map of Pariz and locations of copper deposits (modified after Dimitrijevic et al., 1973), and D: Some parts of merged geological map of the ShahreBabak, Robat, Anar, and Dehaj, and locations of copper deposits (modified after Dimitrijevic et al., 1971a, 1971b, 1972; 1973; Djokovic et al., 1973)

1. Minimum Noise Fraction (MNF)

برای نقشه برداری درست باید پیکسل‌هایی انتخاب شوند که امتیاز MF آنها بالا و مقدار امکان‌ناپذیری آنها پایین باشد. برای تولید نقشه رده‌بندی و فراوانی کانی‌ها به کمک نمودار دوبعدی، تصویر MF روی محور X و تصویر امکان‌ناشدنی روی محور Y قرار داده شده است و با ترسیم ناحیه موردنظر در روی نمودار پراکندگی پیکسل‌های موردنظر مشخص شده‌اند. بعد از انتخاب نواحی موردنظر و رده‌بندی کسر زیرپیکسلی به هر کدام از رده‌ها رنگ خاصی نسبت داده شد. پس از بارزسازی کانی‌های دگرسانی کسر فراوانی آنها در هر پیکسل مشخص و مناطق بارز شده روی ترکیب رنگی باندهای ۴۶۸ استر پلات شده است. سپس مرز مطالعاتی هشت اندیس مهم معدنی که از نظر تمرکز طلا متفاوت هستند، بر اساس نتایج پردازش طیفی و ترکیب رنگی انتخاب شده است. برای تأیید و ارزیابی مناطق بارز شده، بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری در منطقه مطالعاتی انجام شده است و مناطق بارز شده با مطالعات میکروسکوپی، آنالیز پراش پرتو ایکس و طیف‌سنجی تأیید شده‌اند.

داده‌های مغناطیسی هوایی و پردازش انجام شده

مغناطیس‌سنجی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که تغییرات میدان مغناطیس زمین را برای پیدا کردن محل پدیده‌های زیر سطحی و کانه‌های پنهان اندازه می‌گیرد. این روش از جمله روش‌هایی است که منشأ آن طبیعی بوده و ناشی از تأثیر میدان مغناطیسی زمین بر روی سنگ‌هاست. شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با جهت میدان مغناطیسی زمین در محل توده برای مغناطیس شدن سنگ‌های تشکیل دهنده توده و امتداد توده نسبت به جهت میدان مغناطیسی زمین سبب پیچیدگی تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌شود. با اجرای پردازش‌ها، فرآیندهای تبدیلی و فیلترهای مختلف مانند برگردان به قطب، مشتق اول و دوم بر روی داده‌های خام (شدت کل میدان مغناطیسی) می‌توان به اطلاعات با ارزش تری برای تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی و بی‌هنجاری‌ها دست یافت (Telford et al., 1990; Shayestefar et al., 2014).

شدت میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده دارای انحراف و جابه‌جایی از منبع به وجود آورنده آن است که این جابه‌جایی بر اثر زاویه میل و زاویه انحراف بردار مغناطیسی در آن منطقه ایجاد می‌شود. با استفاده از تبدیل برگردان به قطب، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است به قطب مغناطیسی که میدان القایی قائم است، منتقل می‌شود (Shayestefar et al., 2014). اگر میدان زمین مایل باشد، شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی که به صورت القایی به وجود آمده‌اند نسبت به منابع به وجود آورنده نامتقارن خواهند بود؛ ولی در صورتی که میدان القایی قائم باشد، بی‌هنجاری‌های به وجود آمده در اثر القای مغناطیسی بر روی منبع خودشان قرار می‌گیرند. بنابراین تفسیر داده‌های مغناطیسی به‌طور معمول بر روی تصاویر مختلف برگردان به قطب صورت می‌گیرد (Telford et al., 1990; Shayestefar et al., 2014). محاسبات مشتق میدان مغناطیسی برای بررسی تغییرات شدت میدان مغناطیسی در جهت‌های مختلف و تفسیر داده‌های مغناطیسی مفید هستند. برای اینکه بی‌هنجاری‌های سطحی نسبت به بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر تقویت شوند از فیلتر مشتق اول در جهت قائم استفاده می‌شود که با اعمال این فیلتر بر روی نقشه برگردان به قطب، بی‌هنجاری‌های سطحی نمود بیشتری پیدا می‌کنند. در نقشه‌های مشتق، آنومالی‌های ناحیه‌ای و عمیق به دلیل خطی بودن آن خیلی ضعیف شده است و از بین می‌روند و می‌توان رفتار توده‌های مغناطیسی را در سطح بهتر مورد تحلیل قرار داد (Telford et al., 1990).

در این پژوهش، داده‌های مغناطیسی با هدف شناسایی مناطق با تمرکز بالای طلا مورد پردازش و تجزیه تحلیل قرار گرفته‌اند. بدین منظور نقشه‌های شدت مغناطیسی کل منطقه با داده‌های برداشت شده با فاصله خطوط پرواز ۲۰۰ متر و فاصله خطوط کنترل ۱۰ متر و ارتفاع سنجنده مغناطیس‌سنج ۴۵ متر مورد تفسیر کیفی قرار گرفته‌اند. برای به دست آوردن اطلاعات با ارزش‌تر و جزئیات بیشتر برای تفسیر، فرآیندهای تبدیلی و فیلترهای مختلفی مانند تبدیل روش برگردان به قطب، فیلتر

مشق اول و دوم به کار رفته و نتایج حاصل به صورت نقشه‌هایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. برای اجرای این تبدیل و فیلترها از نرم‌افزار ERDAS ER Mapper 2014 استفاده شده است.

بحث و بررسی

نتایج حاصل از پردازش داده‌های اِستِر

با اجرای ترکیب رنگی کاذب از باندهای ۴، ۶ و ۸ (RGB 468) مناطق دگرسانی آرژلیک و فیلیک موجود به رنگ صورتی و پروپیلیتیک به رنگ سبز بارز شدند. با توجه به اینکه جذب در ۲/۲۰۵ و بازتاب در ۱/۶۵ شاخص زون‌های دگرسانی آرژلیک، فیلیک و جذب در ۲/۳۲ و بازتاب در ۱/۶۵ شاخص زون پروپیلیتیک است، در این ترکیب رنگی مناطق دگرسانی آرژلیک-فیلیک که دارای جذب در ۲/۲ میکرومتر هستند به رنگ قرمز تا صورتی و مناطق دگرسانی پروپیلیتیک با جذب ۲/۳۲ میکرومتر به رنگ سبز روشن تا تیره بارز می‌شوند (Mars, 2010). با این ترکیب رنگی شکل بیضوی تا مدور دگرسانی‌های ذخایر پورفیری در اطراف معادن سرچشمه دره زار، میدوک و ذخایر آبدر، سارا، سریدون و ایجو به خوبی قابل تشخیص است. به طوری که دگرسانی‌های آرژلیک و فیلیک در مرکز قرار داشته و اطراف آن دگرسانی پروپیلیتیک بارز شده‌اند. در شکل ۲ خروجی ترکیب رنگی حاصل نشان داده شده و مناطق بارز شده توسط روش MTMF روی آن رونهاده شده است. مرز انتخابی هر اندیس در داده مغناطیسی بر اساس نتایج بارز شده این دو خروجی به صورت چهار گوش جدا شده است. در پردازش MTMF برای مشخص کردن فراوانی هر کانی کسره‌های زیرپیکسلی به سه رده ۰/۵-۰/۳۵، ۰/۵-۰/۷۵ و ۰/۷۵-۱ تقسیم شده‌اند که این رده‌ها برای هر کانی با رنگ خاصی منسوب شده‌اند و به ترتیب بیانگر فراوانی کم، متوسط و زیاد هستند. این رده‌ها به این معنی است که ۳۵-۵۰ درصد، ۵۰-۷۵ درصد و ۷۵-۱۰۰ درصد پیکسل‌ها از کانی مورد نظر تشکیل شده است. بررسی کانی‌های دگرسانی بارز شده با روش MTMF

نشان داد که سرسیت اصلی‌ترین کانی دگرسانی در ناحیه است. در این روش نیز نواحی بارز شده در بیشتر کانسارهای پورفیری شکل کروی تا بیضوی دارند؛ به طوری که سرسیت غالب‌ترین کانی بوده و کائولینیت، پیروفیلیت-آلونیت به صورت پراکنده در بین آنها یافت می‌شود و در اطراف آنها کلریت-کلسیت-اپیدوت قرار گرفته است (شکل ۲-A، B، C، D، E، F، G و H). مناطق بارز شده توسط طیف ژاروسیت اغلب روی مناطق بارز شده سرسیت قرار گرفته‌اند و با آنها هم‌پوشانی دارند و کسر فراوانی بیشتر پیکسل‌ها کمتر از ۵۰٪ است. مناطق بارز شده ژاروسیتی به ویژه در اطراف کانسارها می‌تواند نشان‌دهنده زون اکسیدی و گوسان‌های موجود در این کانسارها نیز باشد. در ذخایر مس پورفیری زون اکسیدی اغلب بر روی زون فیلیک تشکیل می‌شود که بارز شدن سرسیت و ژاروسیت در یک پیکسل در این اندیس‌ها نیز تأییدکننده آن است. بر طبق نتایج بارز شده زون اکسید با فراوانی بالا در سرچشمه، دره زار و میدوک بارز شده است. در ذخایر دیگر مانند سرکوه، آبدر، سارا و ایجو ژاروسیت با فراوانی متوسط و در سریدون با فراوانی کم بارز شده است. در واقع ژاروسیت بارز شده ارتباطی با تغییرات طلا ندارد؛ ولی در مناطق با توانایی کانه‌زایی بالا از مس مانند سرچشمه، دره زار و میدوک فراوانی بالایی را نشان می‌دهد که بیانگر گسترش بیشتر زون اکسیدی در این مناطق است. برای بررسی درستی مناطق بارز شده، بررسی‌های زمینی در مناطق مورد بررسی انجام و ۱۵۰ نمونه برداشت شد. نمونه‌ها با آنالیزهای مختلف مانند پراش پرتو ایکس، مطالعات طیف‌نمایی و میکروسکوپی بررسی شدند. درستی مناطق بارز شده توسط نتایج حاصل از آنالیزها، ارزیابی‌های بصری و استفاده از نقشه‌های دگرسانی بزرگ مقیاس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ارزیابی بصری نتایج بارز شده با نقشه‌های دگرسانی موجود از منطقه مورد بررسی مقایسه شده‌اند. متأسفانه نقشه دگرسانی از تمام کانسارهای منطقه مورد بررسی وجود ندارد و یا در دسترس نیست. تنها نقشه‌های دگرسانی معدن سرچشمه و ذخیره سریدون قابل دستیابی بوده‌اند. بنابراین در ارزیابی بصری تنها از این دو

نقشه استفاده شده است و سایر نواحی به کمک مشاهدات میدانی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بررسی و مقایسه نقشه‌های دگرسانی سرچشمه و سریدون (شکل ۳-B و D) با نتایج به دست آمده از تصاویر استر سازگاری قابل قبولی را ارائه داده است (شکل ۳-A و C).

نتایج حاصل از پردازش داده‌های مغناطیسی

تبدیل برگردان به قطب با استفاده از زاویه میل و انحراف مغناطیسی انجام می‌شود. اندیس‌های مورد بررسی در این پژوهش در دو فریم مغناطیسی متفاوت قرار گرفته‌اند؛ به طوری که اندیس‌های سرکوه، سرچشمه، دره زار و سریدون در یک فریم و اندیس‌های آبدر، میدوک و سارا و ایجو در فریمی دیگر واقع شده‌اند. مقدار این زوایا در منطقه مورد بررسی برای فریم سرچشمه به ترتیب ۲/۰۱۶ و ۴۶/۲۱ درجه با مقدار میانگین میدان مرجع ژئومغناطیسی بین المللی^۱ برابر ۴۵۵۸۳/۴۵ نانو تسلاست. برای فریم میدوک این زوایا ۲/۳ و ۴۶/۵۴ با مقدار میانگین IGRF برابر ۴۵۵۹۹/۴۳ نانو تسلاست. در این دو فریم اندیس‌های معدنی زیادی وجود دارد که در این پژوهش مرز هشت اندیس مورد بررسی با کمک تصاویر پردازش شده استر مشخص و سپس داده مغناطیس بر اساس مرزهای تعیین شده توسط نرم افزار Arc GIS برش داده شد (شکل ۴).

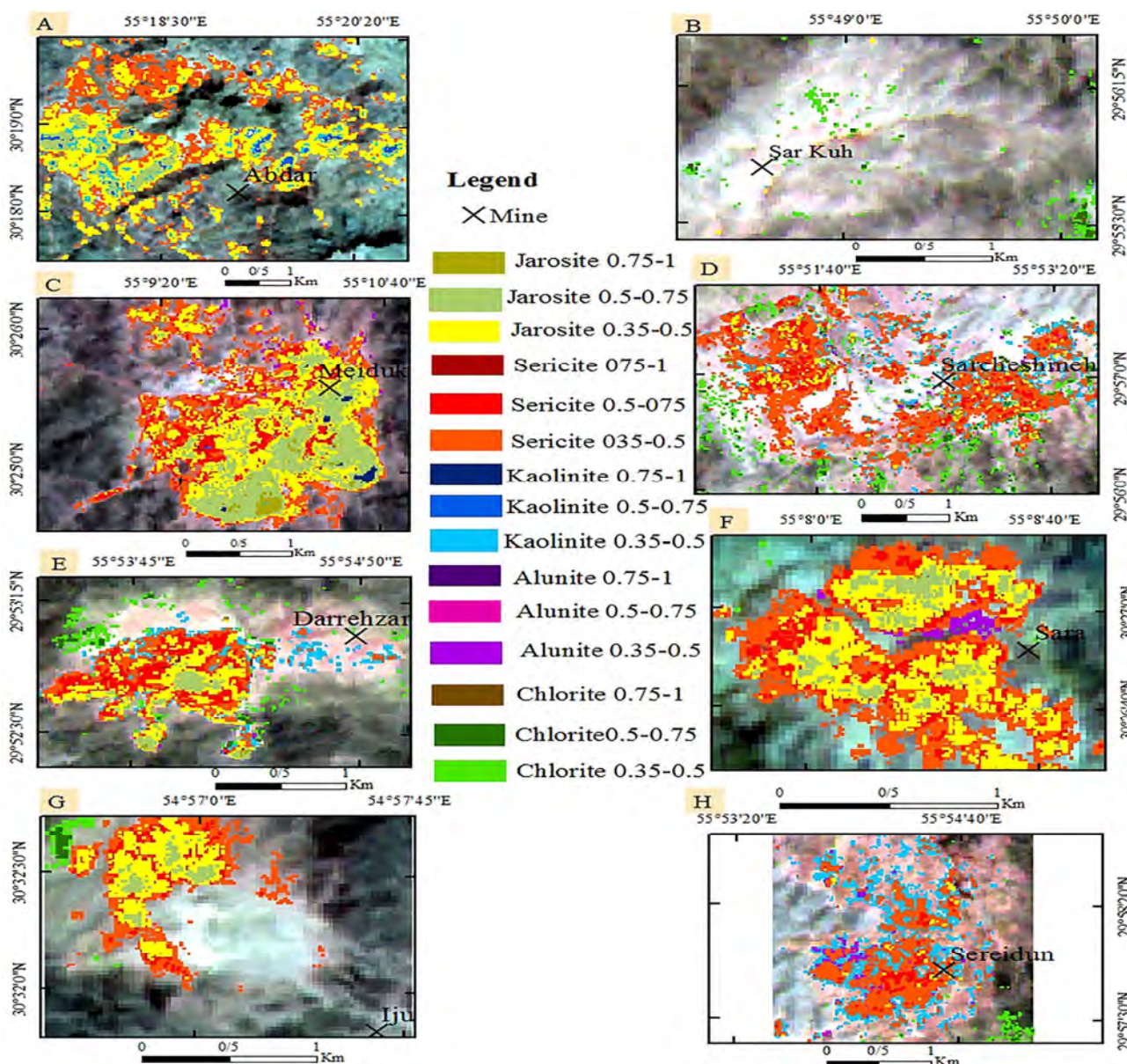
با مقایسه شدت میدان مغناطیسی در اطراف هر اندیس که بر اساس مرزهای تعیین شده توسط پردازش تصاویر استر جدا شده‌اند، مشخص شد که سرکوه و آبدر بیشترین تغییرات و سریدون و ایجو کمترین تغییرات میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد که با مقدار طلا گزارش شده در این اندیس‌ها همخوانی دارد (شکل ۳). بر طبق گزارش‌ها و بررسی‌های انجام شده در این اندیس‌ها بیشترین مقدار طلا در سرکوه و آبدر و کمترین مقدار در سریدون و ایجو گزارش شده است (Shafiei and Shahabpour, 2008). همبستگی بالای طلا با مگنتیت در ذخایر مس پورفیری توسط پژوهش‌های زیادی تأیید شده است

نتایج تبدیل برگردان به قطب بیشترین شدت مغناطیس در آبدر ۲۲۷۳ نانو تسلا و در سرکوه ۱۸۶۳ نانو تسلاست (شکل ۴). بیشترین مقدار مغناطیس در آبدر دیده می‌شود؛ ولی این اندیس برخلاف اندیس سرکوه دارای تغییرات میدان مغناطیسی منفی نیز است. اندیس سرکوه تغییرات میدان مغناطیسی منفی از خود نشان نمی‌دهد و از طرفی وسعت محدوده‌های با تغییرات بالای میدان مغناطیسی در سرکوه بیشتر از آبدر است (شکل ۴-A و B). در مجموع تغییرات میدان مغناطیسی در هشت اندیس مورد بررسی از زیاد به کم عبارتند از: سرکوه، آبدر، میدوک، سرچشمه، دره زار، سارا، سریدون و ایجو که این نتایج با روند تغییرات طلا در این اندیس‌ها منطبق هستند (شکل ۴-A تا H). پس از اعمال تبدیل برگردان به قطب، برای حذف اثرات ناحیه‌ای با طول موج بلند و تداخل بین بی‌هنجاری‌های مجاور از فیلتر مشتق قائم استفاده شده است. این فیلتر در واقع یک فیلتر بالاگذر است و بسامدهای بالا را نسبت به بسامدهای پایین افزایش می‌دهد. بنابراین اثر بی‌هنجاری‌های بزرگ که مربوط به مناطق عمیق و منطقه‌ای هستند، بر روی بی‌هنجاری‌های کوچک از بین می‌رود و بی‌هنجاری‌های سطحی و محلی به خوبی نمایان می‌شوند (Silva et al., 2003; Neawsuparp et al., 2005). قدرت تجزیه مشتق قائم دوم بیش از مشتق اول است؛ ولی کاربرد آن نیازمند داده‌هایی با کیفیت بالاتر است؛ زیرا با افزایش بسامدهای بالا نوبه نیز افزایش می‌یابد (Shayestefar et al., 2014).

نتایج حاصل از فیلتر مشتق اول و دوم برای اندیس‌های موجود در منطقه مورد بررسی در شکل‌های A-۵ تا H و A-۶ تا H نشان داده شده است. طبق این فیلترها بیشترین تغییرات مغناطیسی ثبت شده در این فیلتر به ترتیب مربوط به آبدر، سرکوه، میدوک، دره زار، سارا، ایجو، سرچشمه و سریدون است. بر اساس این نتایج معدن سرچشمه میزان تغییرات کمتری را نشان می‌دهد که با روند مقدار طلا در آن سازگاری ندارد. بیشترین نسبت

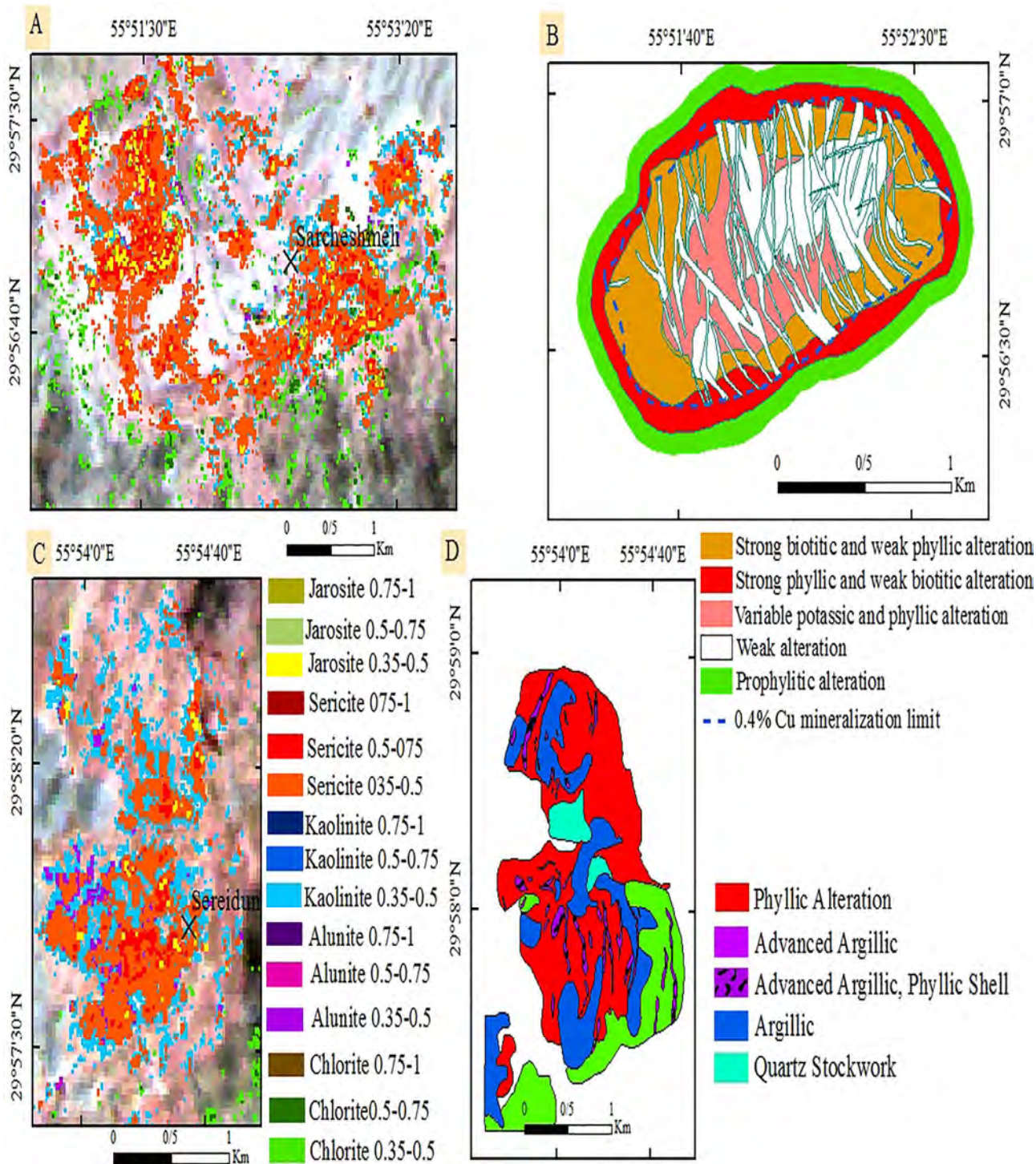
واقع معدن سرچشمه بزرگ‌ترین معدن مس پورفیری ایران است که بی‌هنجاری آن بزرگ است. البته تهی‌شدگی مغناطیسی ممکن است به علت هوازدگی سطحی و تشکیل زون اکسیده در این کانسار نیز باشد.

تغییرات مربوط به ذخیره سرکوه و آبدار است و روند تغییرات مغناطیسی محدوده‌های دیگر به استثنای سرچشمه با تغییرات مقدار طلا‌سازی دارد. این امر ممکن است به این دلیل باشد که در این فیلتر اثر بی‌هنجاری‌های بزرگ از بین می‌رود و در



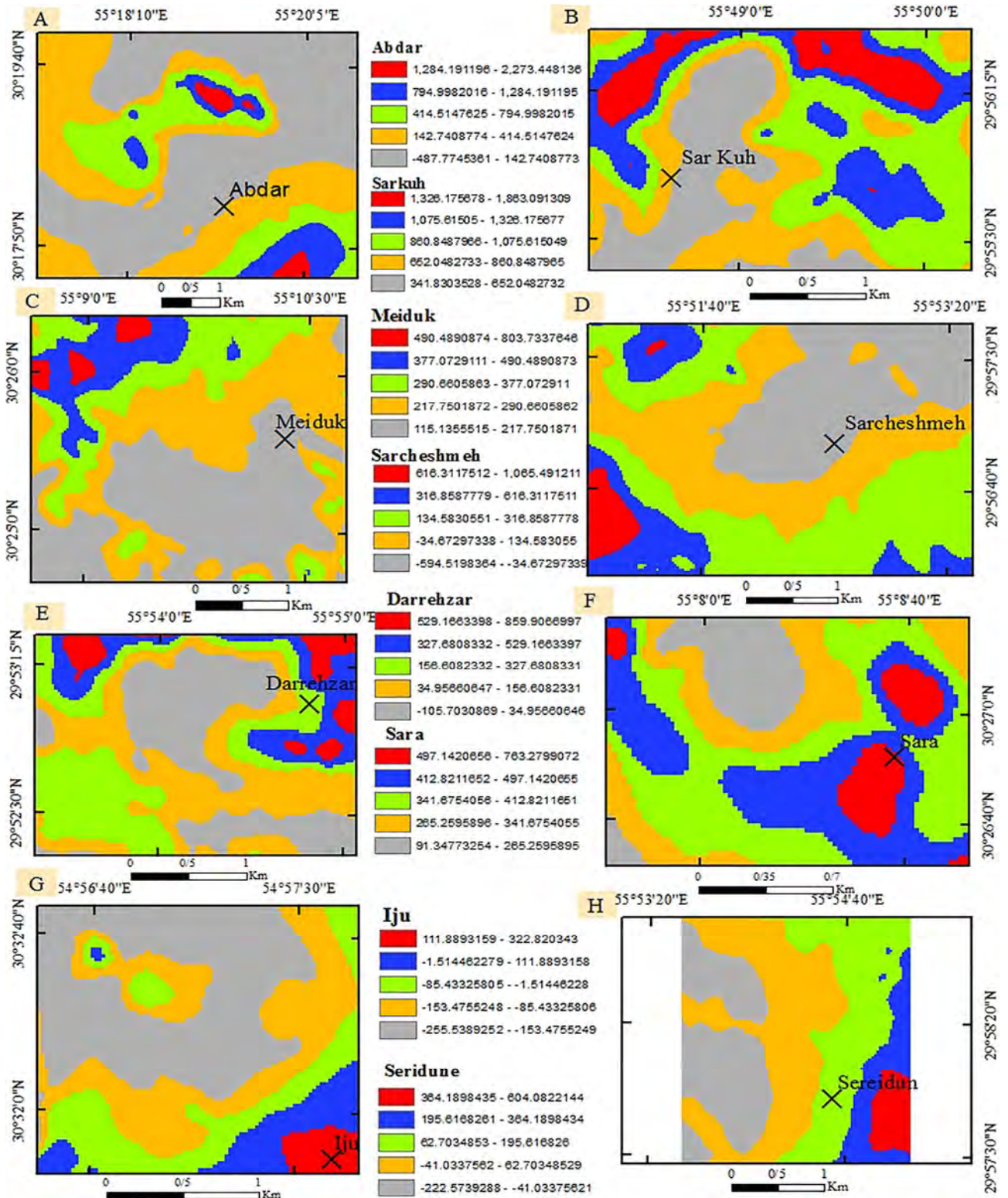
شکل ۲. نقشه رده‌بندی کانی‌های دگرسانی با استفاده از الگوریتم MTMF که بر روی تصویر رنگی کاذب ۴۶۸ استر رونهاده و اندیس‌ها مشخص شده است. A: ذخیره آبدار، B: ذخیره سرکوه، C: معدن میدوک، D: معدن سرچشمه، E: معدن دره‌زار، F: ذخیره سارا، G: ذخیره ایجو و H: ذخیره سریدون

Fig. 2. Classification map of alteration minerals produced by MTMF algorithm, which overlaid on false color composite of bands 468 ASTER. The mineral indexes are specified. A: Abdar deposit, B: Sarkuh deposit, C: Meiduk mine, D: Sarcheshmeh mine, E: Darrehzar mine, F: Sara deposit, G: Iju deposit, and H: Seridune deposit. Abbreviations: Msc: Muscovite, Kln: Kaolinite, Chl: Chlorite, Jrs: Jarosite, Alu: Alunite.



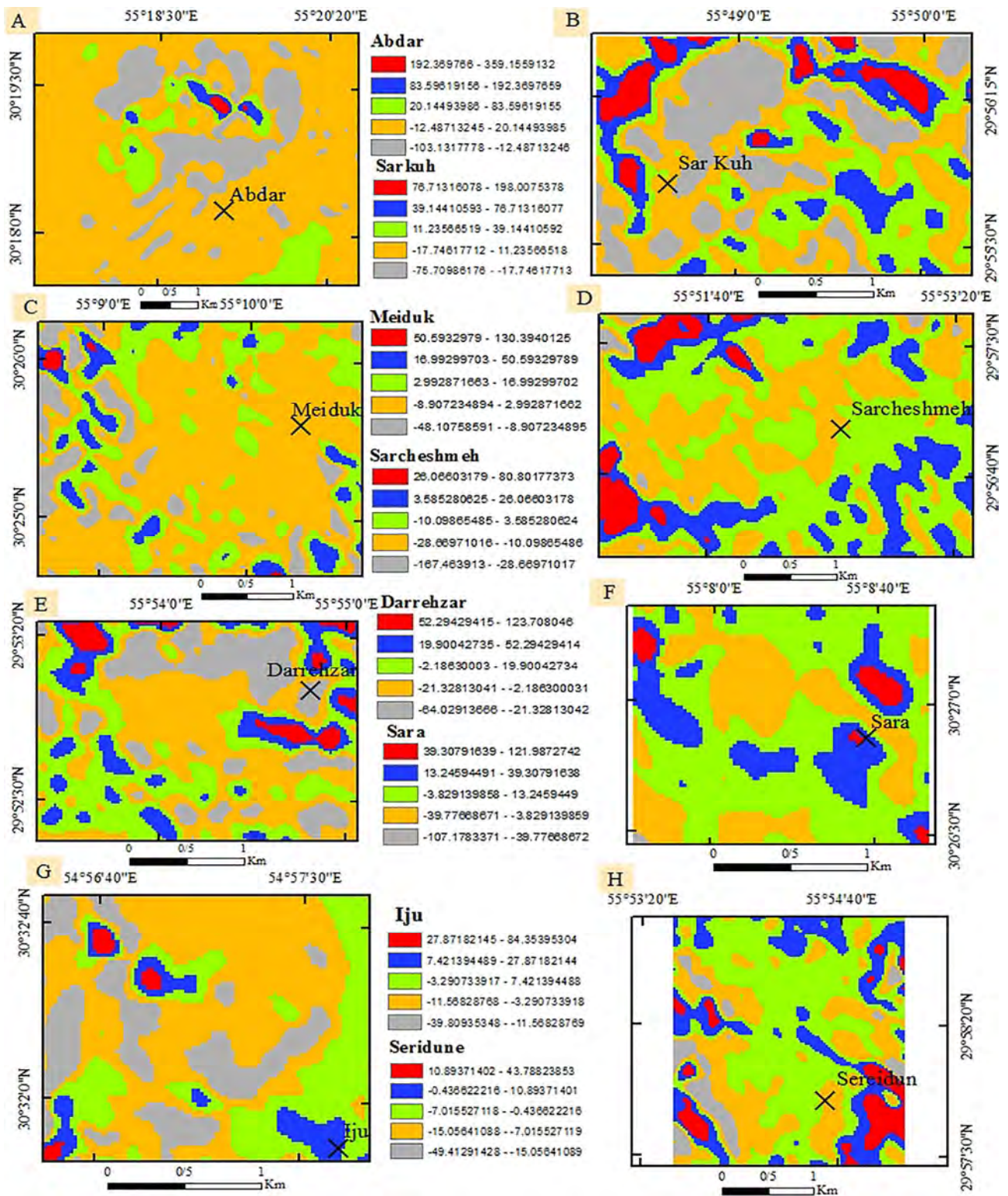
شکل ۳. A: کانی‌های دگرسانی بارز شده با الگوریتم MTMF در معدن سرچشمه، B: نقشه دگرسانی معدن سرچشمه (واترمن و همیلتون (Waterman and Hamilton, 1975) با تغییرات)، C: کانی‌های بارز شده با الگوریتم MTMF در ذخیره سریدون و D: نقشه دگرسانی ذخیره سریدون، (برزگر (Barzegar, 2007) با تغییرات)

Fig 3. A: Discriminated minerals with MTMF algorithm at the Sarcheshmeh, B: Alteration map of the Sarcheshmeh (modified after Waterman and Hamilton, 1975), C: Discriminated minerals with MTMF algorithm at the Sereidun, D: Alteration map of the Sereidun (modified after Barzegar, 2007).



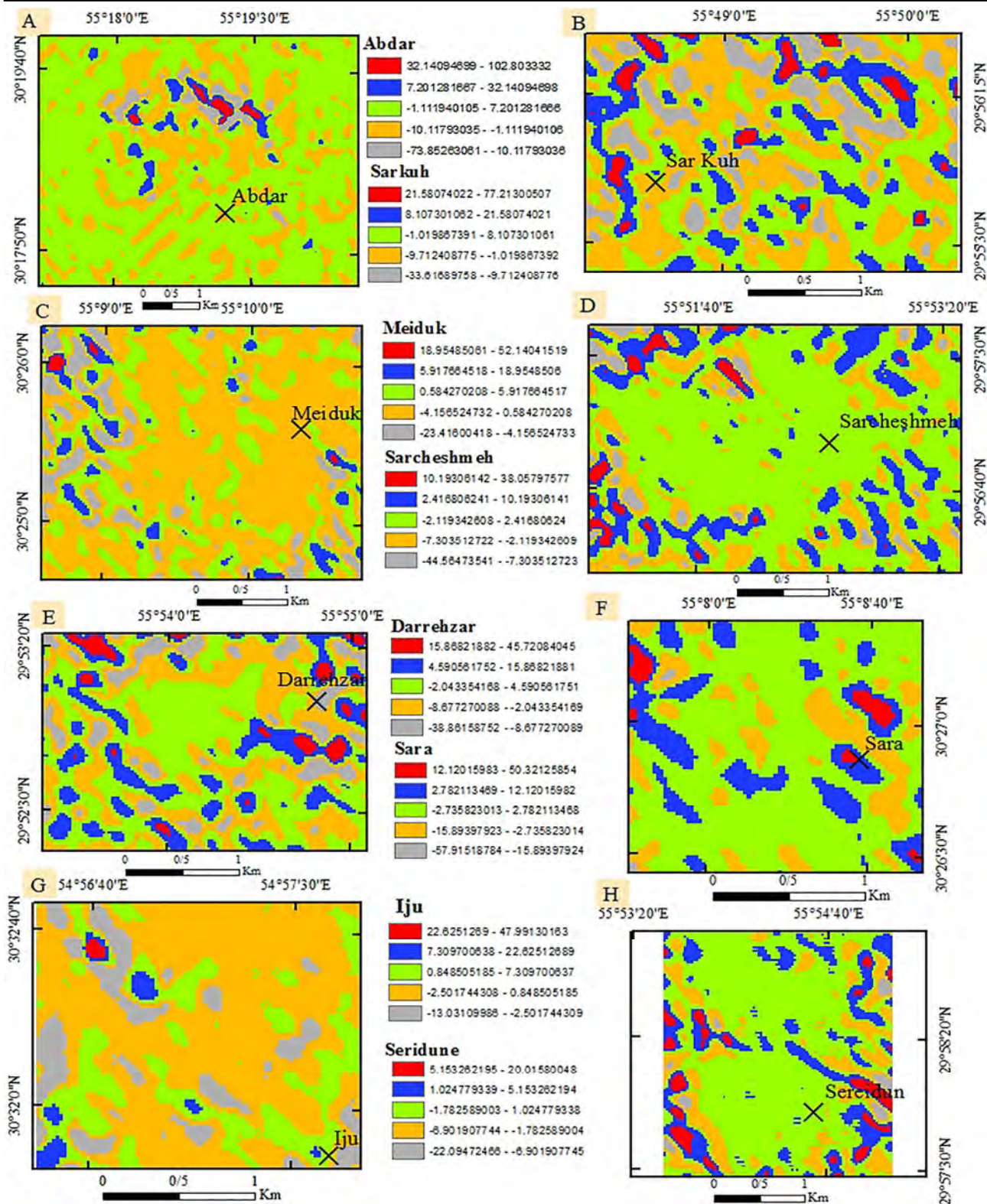
شکل ۴. نقشه‌های تبدیل برگردان به قطب. A: ذخیره آبدر، B: ذخیره سرکوه، C: معدن میدوک، D: معدن سرچشمه، E: معدن دره‌زار، F: ذخیره سارا، G: ذخیره اiju و H: ذخیره سریدون

Fig 4. Reduced-To-Pole magnetic anomaly maps, A: Abdar deposit, B: Sarkuh deposit, C: Meiduk mine, D: Sarcheshmeh mine, E: Darrehzar mine, F: Sara deposit, G: Iju deposit, and H: Seridune deposit



شکل ۵. نقشه فیلتر مشتق اول کانسارهای مطالعاتی. A: ذخیره آبدر، B: ذخیره سرکوه، C: معدن میدوک، D: معدن سرچشمه، E: معدن دره‌زار، F: ذخیره سارا، G: ذخیره ایجو و H: ذخیره سریدون

Fig. 5. First derivative filter map of the study deposits, A: Abdar deposit, B: Sarkuh deposit, C: Meiduk mine, D: Sarcheshmeh mine, E: Darrehzar mine, F: Sara deposit, G: Iju deposit, and H: Seridune deposit.



شکل ۶. نقشه فیلتر مشتق دوم کانسارهای مطالعاتی. A: ذخیره آبدر، B: ذخیره سرکوه، C: معدن میدوک، D: معدن سرچشمه، E: معدن دره‌زار، F: ذخیره سارا، G: ذخیره ایجو و H: ذخیره سریدون

Fig. 6. Second derivative filter map of the study deposits, A: Abdar deposit, B: Sarkuh deposit, C: Meiduk mine, D: Sarcheshmeh mine, E: Darrehzar mine, F: Sara deposit, G: Iju deposit, and H: Seridune deposit

نتیجه‌گیری

تغییرات مغناطیسی را از خود نشان می‌دهند. با توجه به ماهیت داده‌های مغناطیس‌سنجی، بررسی نتایج حاصل از اعمال فیلترها و مقایسه بی‌هنجاری‌های آنها با معادن و اندیس‌های شناخته‌شده، مشخص شد که تبدیل برگردان به قطب بیشترین انطباق را با روند تغییرات طلا در اندیس‌ها دارد. بنابراین با روش مغناطیس‌سنجی ناحیه‌ای و استفاده از فیلتر مناسب احتمال تشخیص مناطق با تغییرات طلا بیشتر در مراحل مقدماتی وجود دارد. این پژوهش نشان داد که تغییر مقدار طلا با تغییرات مغناطیسی سازگاری دارد؛ ولی باید پژوهش‌های بیشتری در مناطق دیگر انجام شود تا قابلیت تشخیص مناطق با مقدار طلا بیشتر با داده مغناطیسی به اثبات برسد.

قدردانی

این پژوهش حاصل انجام یک طرح پژوهشی در پژوهشگاه علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی کرمان با شماره قرارداد ۷/۳۹۵ مورخ ۱۳۹۳/۱/۳۱ است. نویسندگان این مقاله از همکاری پژوهشگاه یادشده و مساعدت‌های مالی آن در طی انجام پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

در این پژوهش کانی‌های سرسیت، کائولینیت، آلونیت، کلریت و ژاروسیت که به ترتیب بیانگر واحدهای دگرسانی فلیک، آژلیک، آژلیک پیشرفته، پروپلیتیک و زون اکسیدی هستند و همچنین ویژگی‌های مناطق با تمرکز بالاتر کانه‌زایی طلا توسط پردازش داده‌های استر و داده مغناطیس‌سنجی هوابرد شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با پردازش تصاویر استر مشخص شد زون فلیک در منطقه گسترش زیادی دارد. با توجه به اینکه بیشتر ذخایر فقیر از طلا با دگرسانی گسترده فلیک همراه هستند (Kesler et al., 2002; Shafiei and Shahabpour, 2008)، این امر پایین بودن مقدار طلا در این ذخایر را تأیید می‌کند. با وجود پایین بودن مقدار طلا در ذخایر مس پورفیری ایران، تمرکز آن در ذخایر مختلف متفاوت است. در مناطقی که تمرکز طلا بالاتر است همبستگی بالایی بین طلا و مگنتیت وجود دارد که می‌توان با بررسی داده مغناطیسی مناطق با توانایی بالاتر را مشخص کرد. بررسی تصاویر مغناطیسی نیز نشان داد که همبستگی بالایی بین مناطقی که تمرکز طلا در آنها بالاتر است با داده مغناطیسی وجود دارد. از بین اندیس‌های مورد بررسی، سرکوه و آبدر که تمرکز طلا در آنها بالاتر است بیشترین

References

- Amer, R., Kusky, T. and Mezayen, A.E., 2012. Remote sensing detection of gold related alteration zones in Um Rus area, Central Eastern Desert of Egypt. *Advances in Space Research*, 49(1): 121–134.
- Barzegar, H., 2007. Geology, petrology and geochemical characteristics of alteration zones within the Seridune prospect, Kerman, Iran. Ph.D. Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 180 pp.
- Bedini, E., 2011. Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data. *Advances in Space Research*, 47(1): 60–73.
- Bishop, C.A., Liu, J.G. and Mason, P.J., 2011. Hyperspectral remote sensing for mineral exploration in Pulang, Yunnan Province, China. *International Journal of Remote Sensing*, 32(9): 2409–2426.
- Boadi, B., Wemegah, D.D. and Preko, K., 2013. Geological and structural interpretation of the Konongo area of the Ashanti gold belt of Ghana from aeromagnetic and radiometric data. *International Research Journal of Geology and Mining*, 3(3): 124–135.
- Boardman, J.W., 1998. Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved subpixel target unmixing and rejection of false positives: mixture tuned matched filterin. 5th JPL Geoscience Workshop, NASA Jet Propulsion Laboratory, California, United States.
- Boardman, J.W., Kruse, F.A. and Green, R.O., 1995. Mapping target signatures via partial

- unmixing of AVIRIS data. 5th JPL airborne earth science workshop, NASA Jet Propulsion Laboratory, California, United States.
- Calvin, W.M., Kratt, C. and Faulds, J.E., 2005. Infrared spectroscopy for drillhole lithology and mineralogy. Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, United States.
- Cox, D.P. and Singer, D.A., 1988. Distribution of gold in porphyry copper deposits. Geological Survey Bulletin, United States, Report 88-46, 26 pp.
- Dimitrijevic, M., 1973. Geology of Kerman region. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, Report 52, 334 pp.
- Dimitrijevic, M.D., Dimitrijevic, M.N. and Djordjevic, M., 1971a. Geological map of Shahre Babak, 1:100000. Geological Survey of Iran. Tehran, Iran.
- Dimitrijevic, M.D., Dimitrijevic, M.N., Djordjevic, M. and Vulovic, D., 1973. Geological map of Pariz, 1:100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Dimitrijevic, M.D., Djordjevic, M. and Petrovic, Z., 1971b. Geological map of Robat, scale: 1:100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Dimitrijevic, M.N., Cvetic, S. and Dimitrijevic, M.D., 1972. Geological map of Anar, scale: 1:100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Djokvoic, I., Cvetic, S. and Dimitrijevic, M.D., 1973. Geological map of Dehaj, scale: 1:100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- ENVI User Guide., 2003. ENVI Software Package Version. 4.5. Reaserach System incorporation, United States, 1084 pp.
- Gabr, S., Ghulam, A. and Kusky, T., 2010. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 38(1-2): 59-69.
- Galvao, L.S., Filho R.A. and Vitorello, C., 2005. Spectral discrimination of hydrothermal altered materials using ASTER Short wave infrared bands: Evaluation in a tropical Savannah Environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(2): 107-114.
- Ganiyu, S.A., Badmus, B.S., Awoyemi, M.O., Akinyemi, O.D. and Olurin, O.T., 2013. Upward Continuation and Reduction to Pole Process on Aeromagnetic Data of Ibadan Area, South-Western Nigeria. *Earth Science Research*, 2(1): 66-73.
- Guilbert, J.M. and Lowell, J.D., 1974. Variations in zoning patterns in porphyry ore deposits. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin* (Canadian Institute of Mining and Metallurgy) Montreal, 76(742): 99-109.
- Henderson, J.R., Stromquist, J.R.A. and Jespersen, A., 1966. Aeromagnetic map of parts of the Mother Lode gold and Sierra foothills copper mining districts, California, and its geologic interpretation. Department of the interior United States Geological Survey, Washington. D.C., map GP-561, 4 PP.
- Honarmand, M., Ranjbar, H. and Moezifar, Z., 2004. 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.
- Honarmand, M., Ranjbar, H. and Shahabpour, J., 2012. Application of Principal Component Analysis and Spectral Angle Mapper in the Mapping of Hydrothermal Alteration in the Jebal-Barez Area, Southeastern Iran. *Resource Geology*, 62(2): 119-139.
- Hosseinjani Zadeh, M., 2008. Comparison of advanced spectral processing of ASTER data in discrimination of alteration zones and lithological units, a case study from Sarduiyeh geological map 1:100000, Kerman, SE Iran. M.Sc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 188 pp.
- Hosseinjani Zadeh, M., 2013. Evaluating relationship between alteration and mineralization using spectral analysis and processing of multispectral and hyperspectral data, a case study from central part of Dehaj-Sarduiyeh belt, Kerman province, SE Iran. Ph.D. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran, 236 pp.
- Hosseinjani Zadeh, M. and Tangestani, M.H., 2011. Mapping alteration minerals using sub-pixel unmixing of ASTER data in the Sarduiyeh area, SE Kerman, Iran. *International Journal of Digital Earth*, 4(6): 487-504.
- Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M.H., Roldan, F.V. and Yusta, I., 2014a. Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1

- Hyperion data. *Advances in Space Research*, 53(3): 440–451.
- Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M.H., Velasco Roldan, F. and Yusta, I., 2014b. Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran. *Ore Geology Reviews*, 62: 191–198.
- Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M.H., Velasco Roldan, F. and Yusta, I., 2014c. Mineral Exploration and Alteration Zone Mapping Using Mixture Tuned Matched Filtering Approach on ASTER Data at the Central Part of Dehaj-Sarduiyeh Copper Belt, SE Iran. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1): 284–289.
- Kerrick, R., Goldfarb, R., Groves, D. and Garwin, S., 2000. The geodynamics of world-class gold deposits: characteristics, space-time distribution, and origins. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors.), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Incorporation. Littleton, Colorado. pp. 501–552.
- Kesler, S.E., 1973. Copper, molybdenum, and gold abundances in porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 68(1): 106–112.
- Kesler, S.E., Chrissyoulis, S.L. and Simon, G., 2002. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews*, 21(1–2): 103–124.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W. and Huntigton, J.F., 2003. Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1388–1400.
- Lowell, J.D., 1989. Gold mineralization in porphyry copper deposits discussed. *Mining Engineering*, 41(4): 227–231.
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–408.
- Mars, J. C., 2010. VINR-SWIR and TIR Remote Sensing of Porphyry Copper Deposits. In: D.A. John (Editor), *Porphyry Copper Deposit Model*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 38–50.
- Newsuparp, K., Charusiri, P. and Meyers, J., 2005. New processing of airborne magnetic and electromagnetic data and interpretation for subsurface structures in the Loei area, Northeastern Thailand. *Science Asia*, 31(3): 283–298.
- Nedimovic, R., 1973. Exploration for ore deposits in Kerman region. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, Report, Yu/53, 247 pp.
- Qiu, F., Abdelsalam, M. and Thakka, P., 2006. Spectral analysis of ASTER data covering part of the Neoproterozoic Allaqi-Heiani suture, Southern Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 44(2):169–180.
- Ranjbar, H., Hassanzadeh, H., Torabi, M. and Ilaghi, O., 2001. Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehzar area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 48(1): 33–41.
- Ranjbar, H., Masoumi, F. and Carranza, E.J.M., 2011. Evaluation of geophysics and spaceborne multispectral data for alteration mapping in the Sar Cheshmeh mining area, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 32(12): 3309–3327.
- Ranjbar, H., Shahriari, H. and Honarmand, M., 2004. Integration of ASTER and Airborne Geophysical Data for Exploration of Copper Mineralization; A case study of Sar Cheshmeh Area. XXth ISPRS Congress, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Istanbul, Turkey.
- Shafiei, B. and Shahabpour, J., 2008. Gold distribution in porphyry copper deposits of Kerman region, Southeastern Iran. *Journal of Science, Islamic Republic of Iran*, 19(3): 247–260.
- Shahriari, H., Honarmand, M. and Ranjbar, H., 2015. Comparison of multi-temporal ASTER images for hydrothermal alteration mapping using a fractal-aided SAM method. *International Journal of Remote Sensing*, 36(5): 1271–1289.
- Shayestefar, M., Mohammadi, M., Rezaei, A. and Ranjbar, H., 2014. Choromit exploration using analysis of 1:50000 aeromagnetic data, Abdasht, Esfandaghe, Kerman. *Journal of Engineering Geology and Environment*, 24(94): 51–58. (in Persian with English abstract)

- Sillitoe, R.H., 1979. Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 14(2): 161–174.
- Silva, A.M., Pires, A.C. and McCaffery, A., 2003. Application of airborne geophysical data to mineral exploration in the uneven exposed terrains of the Rio Das Velhas greenstone belt. *Revista Brasileira de Geociencias*, 33(2): 17–28.
- Tayebi, M.H. and Tangestani, M.H., 2015. Sub pixel mapping of alteration minerals using SOM neural network model and Hyperion data. *Earth Science informatics*, 8(2): 279–291.
- Tayebi, M.H., Tangestani, M.H., Vincent, R.K. and Neal, D., 2014. Spectral properties and ASTER-based alteration mapping of Masahim volcano facies, SE Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 287: 40–50.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, USA, 770 pp.
- Titley, S.R., 1978. Copper, molybdenum, and gold content of some porphyry copper systems of the southwestern and western Pacific. *Economic Geology*, 73(5): 977–981.
- Tommaso, I.D. and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 32(1-2): 275–290.
- Waterman, G. and Hamilton, N., 1975. The Sarcheshme Phorphyry Copper Deposit. *Economic Geology*, 70(3): 568–576.
- Zhang, X., Pazner, M. and Duke, N., 2007. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *(ISPRS) Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(4): 271–282.



Remote sensing and Aeromagnetic investigations in porphyry copper deposits for identification of areas with high concentration of gold: a case study from the central part of Dehaj-Sarduiyeh belt, Kerman, Iran

Mahdieh Hosseinjani Zadeh* and Mehdi Honarmand

Department of Ecology, Research Institute of Sciences and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Submitted: Feb. 1, 2016

Accepted: Sept. 28, 2016

Keywords: *Aeromagnetic data, Porphyry copper deposits, Remote Sensing, Gold, Dehaj-Sarduiyeh belt of Kerman*

Introduction

Remote sensing has shown tremendous potential in the identification of alteration zones. The importance of this science for mineral exploration and recognition of alteration zones with lower cost, time, and manpower is confirmed in many studies (Amer et al., 2012; Hosseinjani Zadeh et al., 2014; Tayebi and Tangestani, 2015; Shahriari et al., 2015). Gold is one of the byproducts in most of the porphyry copper deposits (PCDs). Although the gold assay is partly low and reaches between 0.012- 0.38 g/t in these deposits, the high tonnage of copper deposits provides a considerable source of gold which has an important economic value (Kerrick et al., 2000). Extension, intensity of alteration, assays and the type of mineralization vary in different deposits. For instance, many Au-poor porphyry copper deposits in southwest USA, Central Asia, and west of South America are associated with widespread phyllic alteration (Kesler et al., 2002). In addition, there is a positive correlation between gold and magnetite in PCDs (Kesler et al., 2002; Shafiei and Shahabpour, 2008; Sillitoe, 1979). Therefore, aeromagnetic investigation could be useful in identification of these deposits. The aim of this research is discrimination of alteration zones and investigation areas with high concentration of gold through processing of remote sensing and aeromagnetic data.

Materials and methods

A number of prone areas with different concentrations of gold in Dehaj-Sarduiyeh copper belt including Sar Kuh, Abdar, Meiduk, Sarcheshmeh, Darrehzar, Sara, Iju and Seridune were investigated using the processing of Advanced space borne thermal emission and reflection radiometer (ASTER), and aeromagnetic data. Pre-processing acts such as crosstalk correction and Internal Average Relative Reflection (IARR) calibration were implemented on the ASTER data in order to remove noise and acquire surface reflectance. The alteration minerals were discriminated by implementation of appropriate algorithms such as color composite and partial sub-pixel method, and Mixture tuned matched filtering (MTMF) on a pre-processed and calibrated ASTER data. The results were verified by field surveys and laboratory analyses such as spectroscopic studies, optical microscopy, and XRD. The boundary of each deposit was determined by the results obtained from ASTER data. The aeromagnetic data were also processed using different filters like the reduced to the pole first and second vertical derivatives. Then the aeromagnetic data were clipped according to the boundaries determined with ASTER data and were exported into the GIS environment along with the determined abundances of altered minerals for the investigation of the characteristics of areas with a high concentration of gold.

*Corresponding authors Email: mh.hosseinjani@gmail.com

Results

The results of ASTER image processing revealed that the distribution of phyllic alteration is high in the area. It is shown that most of the poor-Gold porphyry copper deposits are associated with widespread phyllic (Kesler et al., 2002). Therefore, the high exposure of phyllic confirms the low amount of gold in the study area. According to aeromagnetic results, the maximum and minimum differences in magnetic intensity were observed at Abdar- Sarkuh and Iju- Seridun, respectively which have high and low concentrations of gold in these deposits. In addition, the results which were obtained from reduced to pole transform revealed most correspondence with gold differences in the deposits.

Discussion

ASTER datasets were conducted on the eight porphyry copper deposits (PCDs) of Urumieh–Dokhtar magmatic belt including Sar Kuh, Abdar, Meiduk, Sarcheshmeh, Darrehzar, Sara, Iju and Seridun to investigate and detect the high potential areas for gold mineralization. ASTER false color composite image of bands 4, 6, and 8 in red green, and blue determined argillic and sericite altered rocks, as light red to pink, and propylitic altered rocks, as dark to light green. The results obtained from MTMF revealed that sericite is the dominant alteration mineral in the area. The discriminated minerals at most occurrences, including Sarcheshmeh, Meiduk, Sereidun, Darrehzar, Abdar and Iju showed a circular to elliptical pattern with sericite as dominant zone, scattered kaolinite and sparse alunite–pyrophyllite, surrounded by a combination of epidote, chlorite, and calcite. Investigation of aeromagnetic data by applying different filters showed that the magnetic intensity is high in areas with a high concentration of gold. For example, the maximum differences in magnetic intensity were observed at the Sar Kuh and Abdar which contain a higher concentration of gold.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the

Institute of science and high technology and environmental sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran for their financial support during this study under the contract number 7.395.

References

- Amer, R., Kusky, T. and Mezayen, A.E., 2012. Remote sensing detection of gold related alteration zones in Um Rus area, Central Eastern Desert of Egypt. *Advances in Space Research*, 49(1): 121–134.
- Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M.H., Roldan, F.V. and Yusta, I., 2014. Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data. *Advances in Space Research*, 53(3): 440–451.
- Kerrich, R., Goldfarb, R., Groves, D. and Garwin, S., 2000. The geodynamics of world-class gold deposits: characteristics, space-time distribution, and origins. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors.), *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists, Incorporation. Littleton, Colorado. pp. 501–552.
- Kesler, S.E., Chryssoulis, S.L. and Simon, G., 2002. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews*, 21(1–2): 103–124.
- Shafiei, B. and Shahabpour, J., 2008. Gold distribution in porphyry copper deposits of Kerman region, Southeastern Iran. *Journal of Science, Islamic Republic of Iran*, 19(3): 247–260.
- Shahriari, H., Honarmand, M. and Ranjbar, H., 2015. Comparison of multi-temporal ASTER images for hydrothermal alteration mapping using a fractal-aided SAM method. *International Journal of Remote Sensing*, 36(5): 1271–1289.
- Sillitoe, R.H., 1979. Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 14(2): 161–174.
- Tayebi, M.H. and Tangestani, M.H., 2015. Sub pixel mapping of alteration minerals using SOM neural network model and Hyperion data. *Earth Science informatics*, 8(2): 279–291.