



کاربرد داده‌های دورسنجی و مغناطیس‌سنجی زمینی در شناسایی زون‌های مستعد کانی‌زایی مس: مطالعه موردی منطقه راه‌چمن، استان خراسان رضوی

زهرا مختاری^{۱*}؛ عالیه سیفی^۲؛ حسین فردوسی^۳

۱- استادیار گروه فناوری فرآورده‌های طبیعی و فرآوری مواد معدنی، دانشکده فناوری‌های نوین بین‌رشته‌ای، دانشگاه نیشابور

۲- دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

۳- دکتری اکتشاف معدن، کارشناس اکتشاف سازمان زمین‌شناسی ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

* نویسنده مسئول مکاتبات: zahra.mokhtari@neyshabur.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، به منظور شناسایی و ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی مس پورفیری در منطقه راه‌چمن واقع در شمال‌غرب استان خراسان رضوی، از تلفیق داده‌های سنسجش از دور و مغناطیس‌سنجی زمینی استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای ASTER به منظور شناسایی و تفکیک زون‌های دگرسانی سطحی شامل آرژیلیک، فیلیک، پروپلیتیک و زون گوسان به کار گرفته شد، و داده‌های ژئوفیزیک مغناطیس‌سنجی زمینی برای تعیین زون پتاسیک به‌عنوان شاخص دگرسانی زیرسطحی مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله نخست، تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر ASTER انجام و سپس پردازش‌های طیفی با استفاده از روش‌های نسبت بانندی و پالایش تطبیقی (MF) صورت گرفت و نواحی دارای دگرسانی‌های سطحی شناسایی شد. نتایج حاصل نشان داد که دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک عمدتاً در بخش جنوبی واحدهای شیستی پرکامبرین - پالئوزوئیک گسترش یافته‌اند در حالی که دگرسانی پروپلیتیک در مجاورت سنگ‌های داسیتی مشاهده می‌شود. برای تحلیل زیرسطحی، بر روی داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده در قالب ۱۳۱۴۵ نقطه، مراحل پردازشی شامل تصحیحات روزانه، حذف اثرات IGRF و هم‌ترازسازی انجام شده و به‌منظور تفسیر داده‌ها از تبدیل انتقال به قطب، ادامه فراسو و سیگنال تحلیلی استفاده گردید. نتایج حاصل از نقشه‌های شدت کل میدان مغناطیسی، انتقال به قطب و سیگنال تحلیلی نشان داد که مقادیر بالای شدت مغناطیسی در نیمه جنوبی محدوده با زون پتاسیک غنی از مگنتیت تطابق دارد. همچنین در نقشه‌های ادامه فراسو، کاهش شدت ناهنجاری‌ها در جنوب‌غرب و افزایش آن‌ها در جنوب‌شرق با افزایش عمق مشاهده شد که بیانگر وجود توده‌های نفوذی در بخش‌های عمیق‌تر است. تحلیل سیگنال تحلیلی نیز همبستگی بالایی میان نواحی دارای تغییرات شدید مغناطیسی و زون‌های دگرسانی سطحی آشکار کرد. به‌طور کلی، تلفیق داده‌های سنسجش از دور و مغناطیس‌سنجی زمینی در این پژوهش، کارایی بالایی در شناسایی گسترش سطحی و زیرسطحی زون‌های دگرسانی مرتبط با سامانه‌های مس پورفیری نشان داد. نتایج حاصل، با تأیید وجود همبستگی بین دگرسانی‌های فیلیک - پتاسیک و ناهنجاری‌های مغناطیسی، نشانگر پتانسیل بالای منطقه راه‌چمن برای کانه‌زایی مس است. این دستاورد می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی مراحل بعدی اکتشاف تفصیلی و برنامه‌ریزی حفاری‌های هدفمند مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی

سنسجش از دور
مغناطیس‌سنجی زمینی
زون‌های دگرسانی
مس پورفیری
منطقه راه‌چمن

۱- مقدمه

اجزای اصلی سیستم کانه‌زایی شامل مجموعه‌ای از عوامل زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی است که به صورت همزمان یا متوالی در تشکیل و تمرکز مواد معدنی نقش دارند. به‌طور کلی، سیستم کانه‌زایی نتیجه‌ی برهم‌کنش میان سیالات حامل فلز، سنگ میزبان، و ساختارهای زمین‌ساختی فعال است که در طول زمان، موجب تمرکز اقتصادی عناصر معدنی در یک محدوده مشخص زمین‌شناسی می‌شود. محیط زمین‌ساختی محل تشکیل کانسار، مانند مناطق فرورانش، قوس‌های آتشفشانی، زون‌های برشی یا کمان‌های قاره‌ای در کنترل مکان و نوع کانسار نقش اساسی دارد. ترکیب و بافت سنگ درونگیر یا سنگ میزبان که ماده معدنی در آن جایگیر شده، بر نوع، شکل و الگوی کانه‌زایی تأثیر مستقیم می‌گذارد. تغییرات شیمیایی در سنگ میزبان به علت واکنش با سیالات کانه‌ساز رخ می‌دهد. این تغییرات معمولاً به صورت زون‌های دگرسانی (سیلیسی، آرژیلیک، فلیک، پروپیلیتی) در سطح نمایان می‌شوند. مهمترین عوامل در نوع دگرسانی رخ داده در یک واحد سنگی و کانی‌سازی احتمالی در یک محیط زمین‌شناسی، شیمی محلول گرمایی نظیر pH و Eh، نوع مواد محلول، میزان آب و نظایر آن و شرایط فیزیکوشیمیایی محیط نظیر جنس سنگ میزبان، نفوذپذیری، عمق، دمای محیط، جوشش و نظایر آن می‌باشند (Pirajno, F. 2009; Richards, J.P. 2011). همچنین ساختارهای زمین‌ساختی نظیر گسل‌ها، شکستگی‌ها و زون‌های برشی، مسیر حرکت سیالات معدنی را فراهم کرده و مکان تمرکز فلزات را تعیین می‌کنند. میزان تأثیر گسلها و شکستگی‌ها بر دگرسانی و کانی‌سازی در سنگها به میزان زیادی به جنس سنگ وابسته است (باقرپور و همکاران، ۱۳۹۸؛ رضایی، ۱۴۰۰؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۰).

سیستم‌های کانه‌زایی مس بر اساس نوع محیط زمین‌ساختی، سنگ میزبان و منبع سیالات کانه‌زا به چند گروه اصلی از جمله پورفیری، اپی‌ترمال، نوع مانتو، نوع لایه‌های سرخ (رسوبی) و ولکانوژن (VMS) تقسیم می‌شوند که هر کدام ویژگی‌های ساختاری، دگرسانی، و کانی‌شناسی متمایزی دارند (شوقانی مطلق، ۱۳۹۸). کانسارهای مس پورفیری در اثر نفوذ توده‌های گرانودیوریتی یا مونزونیتی به سنگ‌های آتشفشانی یا رسوبی شکل می‌گیرند و معمولاً با سامانه‌های رگه-رگچه‌ای همراه هستند. کانی‌های اصلی این نوع کانسارها شامل کالکوپیریت، پیریت، مولیبدینیت و بورنیت بوده و دگرسانی‌های شاخص آنها شامل پتاسیک، فلیک (سرسیستی) و آرژیلیک است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۰). در سامانه‌های مس پورفیری، دگرسانی از مرکز به بیرون به‌ترتیب شامل زون‌های پتاسیک، فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک است. در زون پتاسیک، حضور مگنتیت باعث ایجاد ناهنجاری مثبت مغناطیسی می‌گردد، در حالی‌که در زون‌های فلیک و آرژیلیک (به دلیل جایگزینی مگنتیت با هماتیت یا کانی‌های غیرفرومغناطیس) شدت مغناطیسی کاهش می‌یابد. از این رو بررسی تغییرات میدان مغناطیسی در سطح زمین یا با داده‌های هوابرد، می‌تواند محدوده زون‌های دگرسانی و سطح فرسایش سیستم پورفیری را تعیین کند.

مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های کلیدی ژئوفیزیکی در اکتشاف

کانسارهای مس پورفیری است و به‌ویژه در شناسایی زون‌های پتاسیک که دارای بیشترین مگنتیت هستند کاربرد فراوان دارد (بمانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسدی هارونی و اسدی هارونی، ۱۴۰۲). در مراحل اکتشاف مقدماتی، داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد برای تعیین نواحی دارای سنگ‌های آذرین مگنتیت‌دار و زون‌های دگرسانی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در حالی‌که در مرحله تفصیلی‌تر، مغناطیس‌سنجی زمینی برای مدل‌سازی هندسه و عمق ناهنجاری‌ها به‌ویژه در محدوده‌های با رخنمون کم کاربرد دارد (ملک‌زاده شفارودی و همکاران، ۱۳۸۸؛ حسینجانی‌زاده و هنرمند، ۱۳۹۷). در مطالعات پیشین صورت گرفته در برخی مناطق مانند چهارگنبد و ماهرآباد شرق ایران، تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی با نتایج IP/RS و رادیومتری به شناسایی مناطق کانه‌زایی مس-طلا با کارایی بالا منجر شده است؛ به‌طوری‌که ناهنجاری‌های مغناطیسی قوی معمولاً با زون‌های شدید کوارتز-مگنتیت و دگرسانی پتاسیک همبستگی دارند (ملک‌زاده شفارودی و همکاران، ۱۳۸۸؛ یزدی و همکاران، ۱۳۹۴). در کانسارهای مسجد داغی و قاهان، استفاده از مدل‌های مصنوعی و واقعی نشان داده است که می‌توان سطح فرسایش و زون پتاسیک غنی از کانسنگ را بر پایه‌ی پاسخ مغناطیسی تفسیر کرد (امامعلی‌پور و همکاران، ۱۳۹۰؛ محمدلو، ۱۳۹۶). از این رو، مغناطیس‌سنجی نه‌تنها برای ردیابی زون‌های کانه‌زایی پنهان، بلکه برای مدل‌سازی سه‌بعدی بدنه‌های مگنتیت‌دار در کانسارهای پورفیری ابزاری حیاتی محسوب می‌شود (حسینجانی‌زاده و هنرمند، ۱۳۹۷).

علاوه بر روش‌های ژئوفیزیک، داده‌های دورسنجی نیز برای شناسایی و تفکیک زون‌های دگرسانی‌های سطح زمین بسیار کاربردی هستند. این داده‌ها در اکتشافات مقدماتی برای شناسایی دگرسانی‌های آرژیلیک، فلیک و پروپیلیتیک به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند (حسینجانی‌زاده و هنرمند، ۱۳۹۷). تصاویر ASTER با دارا بودن باندهای طیفی مناسب ابزار مؤثری در شناسایی و تفکیک کانی‌های دگرسانی و در نتیجه تفکیک زون‌های دگرسانی محسوب می‌شوند (Duda et al., 2020). این سنجنده چندطیفی در بسیاری از پژوهش‌ها برای شناسایی و تفکیک کانی‌های دگرسانی در کانسارهای هیدروترمال به کار گرفته شده است (مختاری و سیفی، ۱۴۰۰؛ Mars, 2013; Honarmand et al., 2013; Chen et al., 2022; Mahmoud et al., 2023). پژوهشگران بسیاری در ایران به منظور اکتشاف کانسارهای هیدروترمال در قسمت مرکزی کمربند ارومیه-دختر موسوم به کمربند مس کرمان برای اکتشاف مس و همچنین برای ارتقاء روش‌های دورسنجی اکتشافی از تصاویر ASTER بهره گرفته‌اند (Ranjbar et al., 2003; Hosseinjanizadeh et al., 2013; Alimohammadi et al., 2017; Seifi et al., 2025).

محدوده مورد مطالعه راه‌چمن یک محدوده با پتانسیل کانه‌زایی مس پورفیری می‌باشد. شناخت و مطالعه پهنه‌های دگرسانی در این مناطق می‌تواند جهت عملیات اکتشافی در مقیاس ناحیه‌ای بسیار مفید واقع شود. در این پژوهش، بررسی جامع ویژگی‌های سطحی و زیرسطحی منطقه از طریق تلفیق داده‌های ماهواره‌ای ASTER و داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی انجام می‌گیرد. در این راستا، از تصاویر ASTER برای شناسایی و بارزسازی (Detection) دگرسانی‌های

را نشان می‌دهد که نشانه‌های از فعالیت‌های تکتونیکی شدید در زمان شکل‌گیری آن است. سنگ‌های پدید آورنده این مجموعه از شیست‌های کوارتز و آلبیت‌دار با خردشدگی شدید هستند که با مجموعه‌ای از سنگ‌های روشن کرم رنگ درهم آمیخته شده‌اند. این درهم آمیختگی احتمالاً با نفوذی‌های داسیتی (da) در راستای گسله راندگی ارتباط دارد. کانی‌های اصلی کوارتز، پلاژیوکلاز (آلبیت تا اولیگوکلاز) و کانی‌های میکایی (بیوتیت، کلریت-مسکویت) بوده که دارای جهت‌یافتگی همراه با چین‌خوردگی هستند.

انباشته‌های قاره‌ای نئوژن در منطقه مورد مطالعه شامل واحد کنگلومرای (Plc) است که در امتداد گسل‌های راندگی و پای کوهستان گسترش یافته‌اند. در این واحد قطعاتی متنوع از سازندهای کهر، سلطانیه، ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک و آهک‌های کرتاسه وجود دارد. رنگ همگانی آنها قرمز تا قهوه‌ای روشن رنگ بوده و دارای جورشدگی متوسط تا خوب هستند.

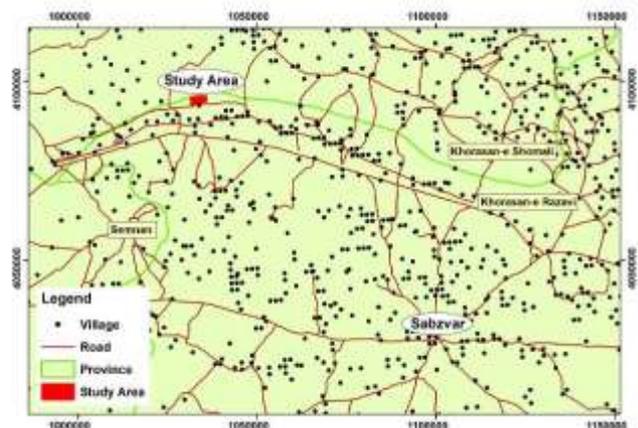
جدیدترین رسوبات منطقه نیز شامل مخروط افکنه‌ها و پادگان‌های جوان و کم ارتفاع (Qt2) است که در امتداد آبراهه‌های فصلی تشکیل شده‌اند. این رسوبات از نظر ترکیب، شامل قطعات ریز تا درشت از سنگ‌های واحدهای مجاور در زمینه‌های ماسه‌ای - رسی هستند. سیستم زهکشی در این مخروط افکنه‌ها هنوز تکامل یافته نیست و آن‌ها به‌طور مشخص از واحدهای قدیمی‌تر Qt1 قابل تفکیک‌اند. گسترش این رسوبات در امتداد دره‌ها و پای دامنه‌ها بیانگر فعالیت‌های سطحی جدید و پویایی ژئومورفولوژیکی منطقه است (بحرودی، بدون تاریخ).

منطقه راه‌چمن از دیدگاه زمین‌شناسی ترکیبی از سنگ‌های دگرگونه قدیمی، توده‌های نفوذی با ترکیب داسیت پورفیری، و کوارتز دیوریت پورفیری، رسوبات قاره‌ای نئوژن و نهشته‌های جوان کواترن را در بر می‌گیرد. حضور واحدهای دگرگونه هم‌راستا با گسل جغتای، توده‌های نفوذی داسیتی و دیوریتی در کنار رسوبات جوان‌تر نشان‌دهنده تاریخچه‌ای پیچیده از دگرریختی، فرسایش و رسوب‌گذاری چندمرحله‌ای است. بخش عمده‌ای از سنگ‌های دربرگیرنده توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی، دستخوش دگرسانی گرمایی شدیدی شده‌اند. براساس مطالعات حاضر، دگرسانی‌های فلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک در سطح زمین قابل تشخیص است. رخداد دگرسانی‌های گرمایی از یک طرف و ساختارهای گسلی فعال در منطقه از طرف دیگر، نقش مهمی در کنترل کانی‌سازیه‌های احتمالی به‌ویژه از نوع مس پورفیری در منطقه ایفا می‌کنند (Ranjbar et al., 2003).

سطحی نظیر آرژیلیک، فلیک، پروپلیتیک و زون گوسان استفاده شده و داده‌های مغناطیس‌سنجی برای شناسایی دگرسانی‌های زیرسطحی به ویژه زون پتاسیک به کار رفته است. هدف اصلی این پژوهش، تلفیق و تحلیل هم‌زمان داده‌های دورسنجی و مغناطیس‌سنجی به‌منظور شناسایی، تفکیک و تعیین زون‌های دگرسانی سطحی و زیرسطحی است تا در کمترین زمان و با صرف کمترین هزینه، محدوده‌های مستعد کانه‌زایی مس پورفیری در منطقه‌ی مورد مطالعه مشخص شود.

۲- مسیر دسترسی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی راه‌چمن در شمال غرب استان خراسان رضوی و در نزدیکی مرز مشترک با استان خراسان شمالی واقع شده است. این محدوده در فاصله‌ی حدود ۳۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان جغتای قرار دارد و از توابع بخش مرکزی این شهرستان به‌شمار می‌رود. دسترسی به منطقه از طریق جاده‌ی آسفالتی جغتای - راه‌چمن امکان‌پذیر است و پس از عبور از روستای راه‌چمن، مسیر خاکی به طول تقریبی ۵ کیلومتر به سمت شمال، به محدوده‌ی مورد مطالعه منتهی می‌شود. مسیرهای فرعی دسترسی نیز از سمت روستاهای تک‌سفید و نقاب وجود دارد که امکان ورود به بخش‌های مختلف محدوده را فراهم می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت و مسیر دسترسی به محدوده‌ی مطالعاتی راه‌چمن

از نظر زمین‌شناسی محدوده اکتشافی راه‌چمن در حد فاصل بین دو نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فرومد و جغتای واقع شده است. با توجه به آنکه بخش اعظم این محدوده در برگیرنده زمین‌شناسی فرومد قرار دارد، مبنای تفسیر زمین‌شناسی این پژوهش بر اطلاعات و داده‌های برگرفته از این نقشه است (شکل ۲). از نظر چینه‌شناسی و سنگ‌نگاری، واحدهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه بطور کلی از قدیم به جدید شامل ۱- سنگ‌های دگرگونه پرکامبرین-پالئوزوئیک، ۲- انباشته‌های قاره‌ای نئوژن و ۳- رسوبات عهد حاضر مربوط به کواترن است.

قدیمی‌ترین رخنمون‌های منطقه سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین-پالئوزوئیک متعلق به واحد شیستی PCK (هم ارز کهر) است. این واحد در امتداد گسل راندگی جغتای گسترش یافته و ساختاری هم‌راستا با آن

Filtering) استفاده شده است که پس از انجام پیش پردازش‌های لازم روی تصاویر ASTER، نتایج حاصل از این روش‌ها در ادامه آورده شده‌اند.

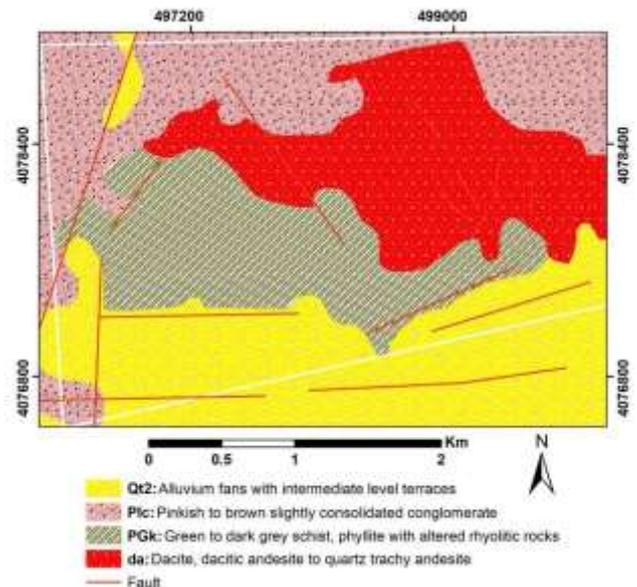
۳-۱- پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای

از آنجایی که عوامل مختلفی مانند خرابی حسگر، شرایط آب و هوایی، تغییرات زاویه خورشید نسبت به زمین باعث تخریب و کاهش کیفیت تصاویر ماهواره‌ای می‌شوند، این تصاویر نیاز به تنظیم و بازیابی از نظر هندسی و رادیومتری دارند (Pour et al., 2023). برای تولید تصویر ASTER سطح IT (مورد استفاده در این پژوهش) الگوریتم‌هایی مانند تصحیحات رادیومتری و ژئومتری، ضرایب تصحیح کراستاک (الگوریتم تکمیلی است که تأثیر بازتاب نور باند ۴ روی باندهای ۵-۹ را از بین می‌برد) ضرایب تبدیل نسبی روی تصویر ASTER سطح 1A انجام شده است به طوری که کاربر نیازی به انجام پردازش هندسی و رادیومتری در این سطح ندارد (Duda et al., 2020). دقت هندسی تصاویر مذکور با کمک نرم افزار گوگل ارث و نقاط کنترلی بررسی و مشخص شد که تصاویر از نظر هندسی دقیق بوده و به تصحیح هندسی نیاز ندارد. برای انجام تصحیح اتمسفری تصویر اخذ شده از روش تصحیح جوی سریع خط دید تصاویر ابرطیفی (FLAASH) تا تأثیرات جوی روی پیکسل‌های تصویر را حذف و تصاویر رادیانس را به تصاویر طیف بازتابی از سطح زمین تبدیل می‌کند (ITT Visual Information Solutions, 2008).

۳-۲- نسبت بانندی Band Ratio

نسبت بانندی یکی از روش‌های رایج در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که طی آن پیکسل‌های یک تصویر یا باند طیفی به پیکسل‌های متناظر آن تصویر یا باند دیگر بر اساس خصوصیات طیفی کانی مورد نظر (جذب و بازتاب) تقسیم می‌شود. روش نسبت بانندی تفاوت‌های ظریف در ویژگی‌های طیفی سنگ‌ها و خاک‌ها را افزایش داده و با تقسیم یک باند طیفی بر باند دیگر، اثرات توپوگرافی و نور خورشید را کاهش می‌دهد (Research System Inc., 2004; Richards, 2013).

انتخاب نسبت‌های بانندی بر اساس رفتار طیفی کانی‌های اکسید آهن در محدوده مرئی و کانی‌های دارای گروه هیدروکسیل و کربناته در محدوده SWIR داده‌های ASTER انجام شده است. تحلیل طیفی داده‌های ASTER نشان می‌دهد که طیف بازتابی واحدهای دگرسان شده مرتبط با کانی‌سازی و واحدهای دگرسان شده فاقد کانی‌سازی در باندهای SWIR (باندهای ۵ تا ۸) رفتار نسبتاً مشابهی داشته و در باند ۹ کاهش بازتاب ملایمی نسبت به باند ۴ نشان می‌دهند که با حضور کانی‌های هیدروکسیل دار و سیلیکاتی دگرسانی سازگار است. در مقابل، باند ۲ در محدوده مرئی برای سنگ‌های دگرسان شده دارای کانی‌سازی، به دلیل حضور اکسیدهای آهن (نظیر هماتیت و گوتیت)، افزایش بازتاب مشخص تری را نشان می‌دهد که یک ویژگی طیفی تشخیصی برای سطوح غنی از آهن فریک محسوب می‌شود. سنگ‌های دگرسان نشده اگرچه در اغلب باندهای SWIR رفتاری مشابه نشان می‌دهند، اما فاقد



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فرومد (بحرودی، بدون تاریخ)

۳-۲- بارزسازی دگرسانی‌های سطحی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، از تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی و تفکیک مناطق دگرسانی استفاده می‌شود. بدین منظور، باید تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک طیفی و مکانی مناسب انتخاب شود که قادر به شناسایی زون‌های دگرسانی دارای کانی‌سازی برمبنای ویژگی‌های طیفی کانی‌های دگرسانی مانند کائولینیت، مسکویت، کلریت و سایر کانی‌های دگرسانی و همچنین کانی‌های ثانویه آهن باشد. تصویر ASTER دارای باندهای مناسبی برای تفکیک کانیهای حاوی بنیان‌های Al-OH، Mg-OH و Fe-OH و برای شناسایی کانی‌های حاوی عناصر آهن، منیزیم و غیره می‌باشد (سیفی و همکاران، ۱۴۰۱).

سنجده تابش سنج بازتابی و گسیلش گرمایی فضا برد پیشرفته (ASTER) یک تصویربردار چندطیفی است که دسامبر ۱۹۹۹ در مدار قرار گرفت که با ۱۴ باند محدوده‌های مرئی فروسرخ نزدیک (۳ باند)، فروسرخ موج کوتاه (۶ باند) و فروسرخ حرارتی (۵ باند) طیف الکترومغناطیس تصویربرداری از سطح زمین را انجام می‌دهد. تصاویر مورد استفاده برای این پژوهش مربوط به تاریخ ۱۵ اکتبر ۲۰۰۵ می‌باشد. نقص سنجده فروسرخ موج کوتاه ASTER به دلیل حرارت خیلی بالای آشکارساز آن موجب شد که اطلاعات باندهای فروسرخ موج کوتاه از ۱ آپریل ۲۰۰۸ غیرقابل استفاده شود و تصاویر بعد از این تاریخ فاقد باندهای محدوده فروسرخ موج کوتاه باشد (Duda et al., 2020). پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER نیز با استفاده از نرم‌افزار تخصصی سنجش از دور ENVI (Environmental for Visualizing Images) نسخه ۵٫۶ (مربوط به سال ۲۰۱۵) انجام شد.

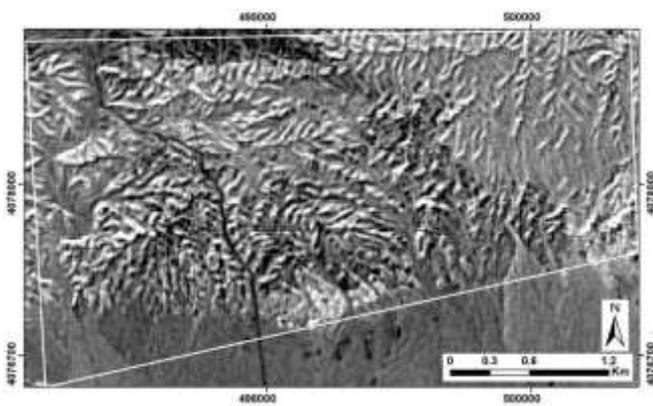
در این پژوهش به منظور بارزسازی (Detection) کانی‌های مرتبط با مناطق دگرسانی دارای کانی‌سازی از روش‌های نسبت بانندی (Band Ratio)، ترکیب رنگی کاذب (RGB) و پالایش تطبیقی (Matched)

برای بهبود کنتراست در ترکیب رنگی RGB استفاده شده است، نه به‌عنوان شاخص مستقیم یک کانی خاص. لازم به ذکر است که این نسبت‌ها و ترکیب رنگی حاصل از آن‌ها پیش‌تر توسط گبر و همکاران (۲۰۱۰) برای شناسایی نواحی دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی طلا در منطقه‌ی ابو مروات (Abu-Marawat) و توسط سیفی و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه تفتان استفاده شده است.

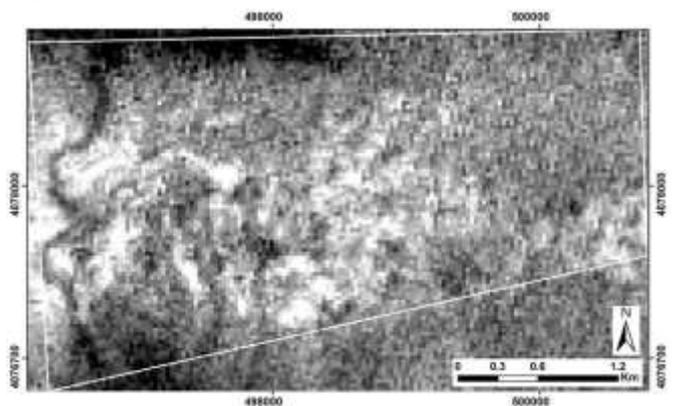
تصاویر حاصل از نسبت‌های باندی ۴/۸، ۴/۲ و ۸/۹ به صورت سیاه و سفید (gray scale) و تصویر رنگی کاذب (RGB) حاصل از این سه نسبت باندی برای تفکیک بهتر زون‌های دگرسانی دارای کانی‌سازی از در شکل شماره ۳ آورده شده است. در این ترکیب رنگی سنگ‌های دگرسان شده دارای کانی‌سازی با رنگ ارغوانی و سفید دیده می‌شوند که این مناطق عمدتاً با سنگ‌های دگرگونی و آذرین شامل شیست‌های پرکامبرین-پالئوزوئیک و نفوذی‌های داسیتی تطابق دارد.

پاسخ شاخص اکسید آهن در باند ۲ هستند (Gabr et al., 2010).

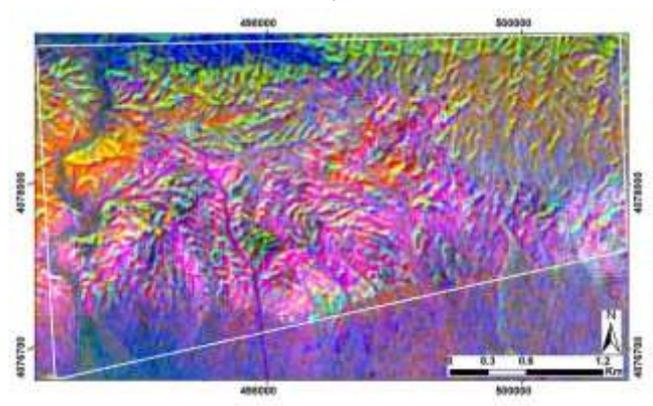
بر این اساس، انتخاب نسبت‌های باندی بر مبنای ایجاد کنتراست طیفی بین رفتار مرئی اکسیدهای آهن و رفتار SWIR کانی‌های دگرسانی صورت گرفته است. نسبت باندی ۴/۸ برای برجسته‌سازی نواحی دارای جذب قوی‌تر در باند ۸ (مرتبط با حضور مجموعه کانی‌های کلریت-اپیدوت=کربناته) نسبت به بازتاب مرجع در باند ۴ به کار رفته و باعث می‌شود که در کل نواحی دگرسان‌شده دارای کانی‌سازی، تفکیک آن‌ها از سنگ‌های زمینه و بخش‌های فاقد کانی‌سازی بهتر صورت گیرد و کنتراست تصویر افزایش یابد. نسبت ۴/۲ با مقایسه بازتاب بالای اکسیدهای آهن در باند ۲ با بازتاب نسبتاً پایدار باند ۴، باعث می‌شود که نواحی غنی از آهن فریک نسبت به سنگ‌های زمینه و بخش‌های فاقد کانی‌سازی بهتر تفکیک شوند و در تصویر روشن‌تر ظاهر شوند. نسبت باندی ۸/۹ اگرچه یک نسبت کلاسیک جذب به بازتاب محسوب نمی‌شود، اما تغییرات شیب طیفی در محدوده جذب SWIR (حدود ۳-۲ میکرون) را برجسته کرده و در این پژوهش صرفاً به‌عنوان مؤلفه‌ای کمکی



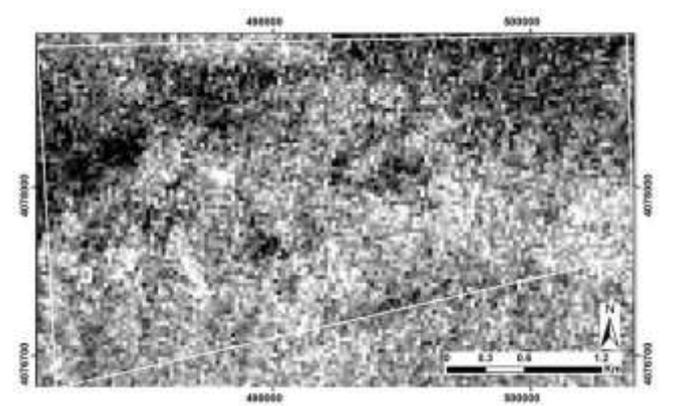
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳. تصاویر سیاه و سفید از نسبت‌های باندی (الف) ۴/۸، (ب) ۴/۲، (ج) ۸/۹ و (د) ترکیب رنگی کاذب حاصل از سه نسبت باندی ۴/۸، ۴/۲ و ۸/۹

طیف مرجع تخمین بزند. این روش پاسخ اعضای انتهایی شناخته شده را ماکزیمم کرده و پاسخ ترکیب ناشناخته زمینه را به حداقل می‌رساند، سپس علامت شناخته شده را تطبیق می‌دهد (Beiranvand Pour et al., 2012). برای شناسایی کانی‌های دگرسانی از طیف‌های موجود در

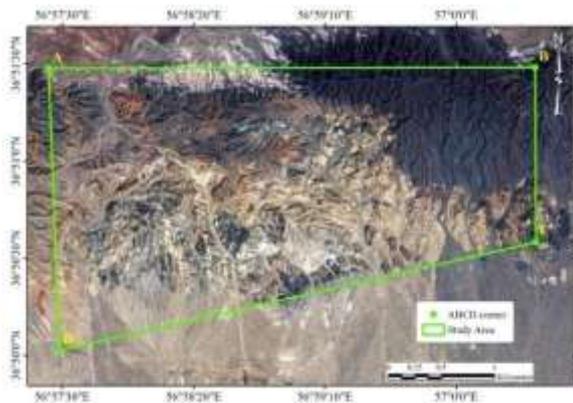
۳-۳- پالایش تطبیقی (Matched Filtering)

یکی دیگر از روش‌های مهم پردازش تصاویر ماهواره‌ای، روش پالایش تطبیقی (MF) است. روش پالایش تطبیقی جداسازی جزئی طیف انجام داده تا فراوانی اعضای انتهایی تعریف شده توسط کاربر را از یک مجموعه

۴- شناسایی دگرسانی‌های زیرسطحی منطقه با کمک

روش مغناطیس‌سنجی زمینی

به‌منظور شناسایی دگرسانی‌های زیرسطحی به ویژه زون پتاسیک و با توجه به فراوانی مگنتیت در این زون از روش مغناطیس‌سنجی می‌توان استفاده کرد. بدین منظور در این پژوهش یک شبکه برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی طراحی شد. بر اساس شواهد زمین‌شناسی و نتایج حاصل از داده‌های سنجش از دور، این شبکه به‌صورت پروفیل‌هایی با فواصل ۵۰ متر از یکدیگر در راستای شمال - جنوب و با فاصله نقاط برداشت ۲۰ متر در نظر گرفته شد (شکل‌های ۵ و ۶). در مجموع، در این محدوده ۱۳۱۴۵ نقطه داده مغناطیس با استفاده دو دستگاه مغناطیس‌سنج GEM برداشت گردید. همچنین یک دستگاه مغناطیس‌سنج GEM به عنوان ایستگاه مبنا نصب شد و ثبت موقعیت مکانی نقاط برداشت توسط GPS دو فرکانسه دستگاه‌های مغناطیس‌سنج و با دقت مکانی کمتر از ۲ متر انجام گرفت.



شکل ۵. مرز محدوده‌ی طراحی شده برای برداشت‌های مغناطیس‌سنجی در منطقه راه‌چمن

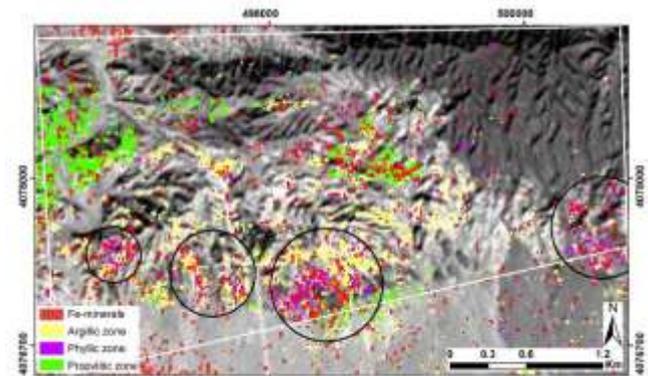


شکل ۶: نقشه هوایی طراحی خطوط برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی در محیط گوگل ارت

در فرآیند پردازش داده‌های مغناطیسی مراحل کنترل کیفیت داده‌ها، تصحیح روزانه داده‌ها، حذف مولفه محلی (IGRF) و هم‌ترازسازی داده‌ها انجام گرفت تا داده‌های نهایی بیانگر تغییرات مغناطیسی مرتبط با زون‌های دگرسانی و کانه‌زایی باشند. به منظور بررسی کیفی داده‌ها و اطمینان از برداشت و ثبت

کتابخانه طیفی USGS استفاده می‌شود. برای این هدف ابتدا طیف‌ها دسته‌بندی شده به طوری که طیف‌های مرتبط با هر دگرسانی در یک مجموعه قرار می‌گیرند و سپس بارزسازی توسط روش MF انجام می‌شود. در مرحله آخر مناطق بارز شده برای هر مجموعه کانی با یکدیگر ترکیب شده تا یک منطقه واحد برای هر زون دگرسانی به دست آید. لازم به ذکر است که برای دگرسانی آرژیلیک (به همراه آرژیلیک پیشرفته) مجموعه کانی‌های کائولینیت، مونتموریلونیت، آلونیت و پیروفیلیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای دگرسانی فلیک مجموعه کانی‌های مسکویت، ایلیت و ژاروسیت (حاصل از اکسیداسیون پیریت) و همچنین برای دگرسانی پروپلیتیک مجموعه کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت به کار برده می‌شوند. برای زون گوسان مجموعه کانی‌های ژاروسیت، گوتیت، لیمونیت و هماتیت مورد استفاده واقع می‌شوند.

در نتایج حاصل از روش MF مناطق بارز شده از دگرسانی‌های فلیک، آرژیلیک، پروپلیتیک و زون گوسان با واحدهای زمین‌شناسی به ویژه سنگ‌های نفوذی داسیتی و سنگ‌های دگرگونه دارای کانی‌زایی مس پورفیری همبستگی مکانی خوبی نشان می‌دهند (شکل ۴). دگرسانی‌های مذکور در قسمت جنوبی واحد دگرگونه شیبستی توسعه سطحی بیشتری نسبت به واحد نفوذی داسیتی از خود نشان می‌دهند. این احتمال وجود دارد که دلیل توسعه سطحی بیشتر واحد دگرگونه نسبت به واحد داسیتی به علت فرسایش بیشتر این واحد رخ داده باشد.



شکل ۴: شناسایی کانی‌های مرتبط با زون‌های دگرسانی مختلف با استفاده از روش MF

گرچه شناسایی واحدهای دگرسانی در سطح زمین می‌تواند نخستین گام در ارزیابی پتانسیل کانی‌سازی در یک منطقه باشد، اما تعیین میزان گسترش عمقی و پیوستگی زیرسطحی این زون‌ها برای تشخیص ارزش واقعی معدنی آن‌ها ضروری است. در واقع، تنها زمانی می‌توان دگرسانی‌ها را از نوع سطحی و ثانویه متمایز کرد که شواهدی از تداوم آن‌ها در اعماق زیرسطحی نیز وجود داشته باشد. از این‌رو، در این پژوهش به‌منظور بررسی توسعه زیرسطحی و تعیین پیوستگی عمقی زون‌های دگرسانی موجود در محدوده مورد مطالعه، از داده‌های مغناطیس‌سنجی استفاده شد. این داده‌ها با آشکارسازی ناهنجاری‌های مغناطیسی ناشی از تمرکز مگنتیت در زون‌های پتاسیک، امکان مدل‌سازی سه‌بعدی و تفسیر عمقی ساختارهای کانی‌سازی را فراهم می‌سازند.

می‌رسید. بدین منظور، مرحله‌ی هم‌ترازسازی (Levelling) نقشه شدت میدان مغناطیسی کل انجام گرفت تا خطاهای باقی‌مانده از مراحل پیشین تصحیح حذف و نقشه‌ای همگن و قابل اعتماد حاصل شود. از آنجا که در این برداشت، خطوط کنترلی واقعی (tie lines) در دسترس نبود، هم‌ترازسازی کلاسیک مبتنی بر tie-line قابل اعمال نبود. به همین دلیل از روش "خطوط کنترلی مجازی" (virtual tie-lines) استفاده شد. در این روش ابتدا یکسری خطوط در امتداد عمود بر خطوط اصلی رسم می‌شود. سپس مقادیر شدت میدان مغناطیسی برای این خطوط کنترلی از روی گریدی که نیاز به هم‌ترازسازی دارد نمونه‌گیری می‌شود. اثرات مربوط به خطای هم‌ترازسازی روی این خطوط کنترلی با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر مناسب حذف می‌شوند و در نهایت این خطوط بعنوان خطوط کنترلی برای هم‌ترازسازی استفاده می‌شوند. این فرایند باعث کاهش مؤثر آثار خطی هم‌جهت با خطوط برداشت گردید.

۴-۱- نقشه‌های شدت کل میدان، انتقال به قطب و گرادیان میدان کل مغناطیسی

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی انجام شده شامل حذف نویز و اسپایک، تصحیحات روزانه، تصحیح IGRF و هم‌ترازسازی داده‌ها است (Reynolds, 2011). در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در محدوده معدنی راه‌چمن به دلیل وجود زوایای میل (Inclination) و انحراف میدان مغناطیسی (Declination)، ناهنجاری‌ها به صورت دوقطبی مشاهده می‌شوند. از این رو در تفسیر و تعیین محل دقیق ناهنجاری‌ها، باید این ویژگی دوقطبی بودن مدنظر قرار گیرد. این نقشه عمدتاً برای شناسایی و تفکیک دوقطبی‌های مغناطیسی حاصل از توده‌های دارای خاصیت مغناطیسی استفاده می‌شود.

در شکل ۷ (الف) نقشه شدت میدان مغناطیسی کل منطقه نمایش داده شده است. بر اساس داده‌های برداشت‌شده، مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین شدت میدان مغناطیسی در این محدوده به ترتیب ۴۸۴۵۴، ۵۰۶۸۵ و ۴۹۶۷۴ نانوتسلا بوده و انحراف معیار داده‌ها ۱۱۲٫۷ نانوتسلا به دست آمده است. دامنه نسبتاً محدود تغییرات شدت میدان مغناطیسی نشان می‌دهد که تغییرات مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه ملایم بوده و الگوی ناهنجاری‌ها بیشتر به صورت تغییرات تدریجی و موضعی ظاهر شده‌اند. در بخش جنوبی منطقه، مقادیر شدت میدان مغناطیسی کل نسبت به سایر نواحی بیشتر است. همچنین در قسمت میانی منطقه چند ناهنجاری موضعی با دامنه نسبتاً بالاتر از میانگین مشاهده می‌شود. در مقابل، در بخش مرکزی محدوده، نواحی با شدت میدان مغناطیسی کمتر نسبت به میانگین منطقه گسترش دارند. مقایسه فضایی این الگوها با نقشه زون‌های دگرسانی حاصل از پردازش داده‌های دورسنجی نشان می‌دهد که بین برخی ناهنجاری‌های مغناطیسی و محدوده‌های دگرسانی هم‌پوشانی مکانی وجود دارد.

در عرض‌های مغناطیسی بین ۲۰ تا ۷۰ درجه، ناهنجاری‌های

داده‌هایی با خطای قابل قبول، ابتدا تمامی داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده به صورت پروفیل‌به‌پروفیل مورد بررسی قرار گرفتند. در این مرحله، فاصله بین نقاط برداشت و نیز فواصل بین پروفیل‌ها کنترل شد تا از انطباق آن‌ها با شبکه برداشت طراحی‌شده و عدم تأثیر خطاهای پیمایش اطمینان حاصل شود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در این محدوده برداشت‌ها بصورت منظم و منطبق بر فواصل پروفیل طراحی‌شده انجام شده‌اند؛ به طوری که میزان خطای جانبی نقاط نسبت به محور پروفیل کمتر از ۱۰ متر، میانگین فاصله نقاط روی هر پروفیل برابر با ۱۳/۶ متر و حداکثر فاصله بین نقاط ۵۳/۳ متر بوده است.

بررسی اولیه داده‌های شدت میدان مغناطیسی برداشت‌شده نشان داد که داده‌ها از نظر وجود نویز، اسپایک و مقادیر پرت، فاقد مشکل قابل توجه هستند. با این حال، داده‌های ایستگاه مبنا در قرائت‌های اولیه روز نخست، به دلیل جابه‌جایی خودرو حامل دستگاه، دچار اسپایک و دریافت شده بودند که تصحیحات لازم بر روی آن‌ها اعمال گردید. به منظور ثبت و تصحیح تغییرات روزانه میدان مغناطیسی از یک دستگاه مغناطیس‌سنج پروتون GEM-GSM19T به عنوان ایستگاه ثابت استفاده شد. این دستگاه داده‌های مغناطیس را با فاصله زمانی ۶۰ ثانیه‌ای ثبت نمود. این داده‌های ثبت شده به منظور وجود طوفان مغناطیسی در زمان برداشت نیز بررسی شدند. نتایج نشان داد که بیشینه تغییرات سه ساعته میدان در ایستگاه مبنا کمتر از ۲۵ نانوتسلا بوده است؛ از این رو می‌توان از عدم وقوع طوفان مغناطیسی در مدت برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی اطمینان حاصل نمود. تغییرات داده‌های مغناطیس روزانه پس از اعمال فیلتر به منظور هموارسازی و حذف نویزهای احتمالی، روی داده‌های برداشت شده اعمال گردید تا اثرات زمانی از روی داده‌ها حذف شود. به منظور حذف اثرات روزانه ابتدا میانگین داده‌های روزانه محاسبه و و از مقادیر اصلی کسر شد تا میزان تغییرات روزانه به دست آید. سپس نتایج حاصل براساس همسانی تاریخ و زمان به داده‌های اصلی اضافه و تغییرات روزانه از داده‌های اصلی کسر گردید تا اثرات زمانی از داده‌های مغناطیسی نهایی حذف شود.

از آنجا که هدف برداشت‌های اکتشافی در این پژوهش، شناسایی ناهنجاری‌های نزدیک به سطح و بخش فوقانی پوسته است، لازم است اثر ناهنجاری‌های ناشی از میدان مغناطیسی در نواحی عمیق‌تر نظیر گوشته و هسته حذف شود. برای این منظور از مدل میدان مرجع بین‌المللی زمین IGRF استفاده گردید. داده‌های مغناطیسی محدوده راه‌چمن در دو بازه زمانی با فاصله بیش از ۴ ماه برداشت گردید و تغییرات ناشی از این اختلاف زمانی در مدل IGRF محاسبه شده و به صورت یک تغییر ناگهانی در نظر گرفته شد. میزان تغییرات IGRF در این محدوده حدود ۵۰ نانوتسلا بود که روی داده‌های برداشت شده اعمال گردید.

از آنجا که هدف نهایی از برداشت داده‌ها و پردازش آنها، اکتشاف سامانه‌های مس پورفیری زیرسطحی و استفاده از این داده‌ها برای تعیین مرزهای زمین‌شناسی حاصل از تفاوت‌های دگرسانی و لیتولوژی بود، تهیه نقشه‌ای یک‌دست و بدون اثرات خطی بین پروفیل‌ها ضروری به نظر

محل و عمق چشمه‌های مغناطیسی کاربرد دارد (Nabighian, 1972). ویژگی مهم این روش آن است که وابستگی کمی به جهت مغناطیده‌شدن سنگ‌ها و جهت میدان مغناطیسی زمین دارد. این بدان معنی است که تمام اجسام با هندسه یکسان دارای گرادیان میدان کل یکسانی هستند به طوری که قله آنها متقارن بوده و مستقیماً بالای لبه اجسام پهن و مرکز اجسام باریک قرار می‌گیرد. بنابراین، نقشه گرادیان میدان کل یا "بزرگی سیگنال تحلیلی" یک نمایش قابل فهم و ساده و در عین حال قابل اعتماد از هندسه منبع مغناطیسی را ارائه می‌دهد که با استفاده از آن نواحی دارای بیشترین تغییرات مغناطیسی به‌خوبی آشکار می‌شود (Reynolds, 2011). بزرگی سیگنال تحلیلی $A(x, y)$ شدت میدان کل T در حالت سه بعدی با رابطه (۳) تعریف می‌شود (Blakely, 1995):

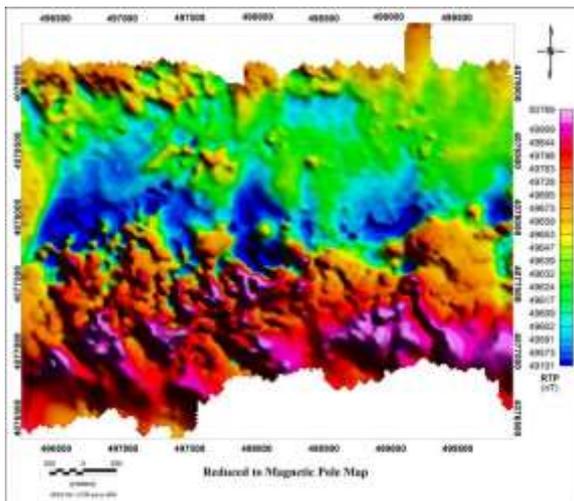
$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

که $\frac{\partial T}{\partial x}$ ، $\frac{\partial T}{\partial y}$ و $\frac{\partial T}{\partial z}$ مشتقات میدان در سه راستای x ، y و z هستند. نقشه‌ی گرادیان میدان کل مغناطیسی برای منطقه راه‌چمن در شکل ۷ (ج) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر بالای گرادیان عمدتاً در نیمه‌ی جنوبی محدوده مطالعه متمرکز شده‌اند.

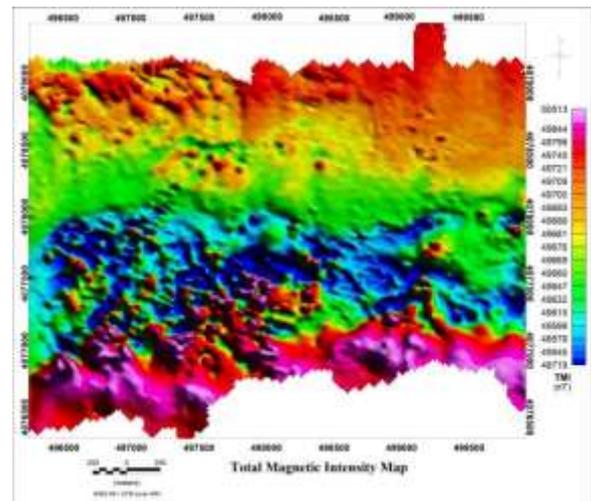
مغناطیسی به‌دلیل اثر زاویه میل (I) و زاویه انحراف (D) میدان مغناطیسی زمین به‌صورت غیرمتقارن نسبت به منبع خود ثبت می‌شوند. این اثر علاوه بر جابه‌جایی مکانی ناهنجاری‌ها، موجب تغییر در شکل ظاهری آن‌ها نیز می‌گردد. به‌منظور کاهش این اثرات، تبدیل انتقال به قطب (RTP) بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی اعمال شد. این تبدیل داده‌ها را به حالتی تبدیل می‌کند که گویی اندازه‌گیری در قطب مغناطیسی زمین انجام شده است، به‌طوری‌که ناهنجاری‌ها به‌شکل متقارن‌تر و متمرکزتر نسبت به منبع ظاهر می‌شوند (Blakely, 1995). انتقال به قطب در حوزه‌ی فرکانس با استفاده از عملگر ریاضیاتی زیر انجام می‌شود (Grant and Dodds, 1972):

$$L(\theta) = 1 / [\sin(I) + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2 \quad (1)$$

که θ راستای عدد موج، I زاویه‌ی میل مغناطیسی و D زاویه‌ی انحراف مغناطیسی است. با توجه به مقادیر زاویه میل و انحراف مغناطیسی در محدوده راه‌چمن (به‌ترتیب ۵۶٫۴ و ۵ درجه)، فیلتر RTP بر روی داده‌ها اعمال گردید. نقشه حاصل از این تبدیل در شکل ۷ (ب) نشان داده شده است. در این نقشه، الگوی ناهنجاری‌های مغناطیسی نسبت به نقشه میدان کل متمرکزتر بوده و جابه‌جایی جانبی ناهنجاری‌ها کاهش یافته است. به‌طور کلی، نقشه RTP منطقه مورد مطالعه را به سه بخش اصلی با مرزهای تقریباً افقی از نظر توزیع شدت ناهنجاری‌ها تفکیک می‌کند. یکی دیگر از نقشه‌های کاربردی در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی نقشه‌ی گرادیان میدان کل مغناطیسی است. این ابزار در تعیین

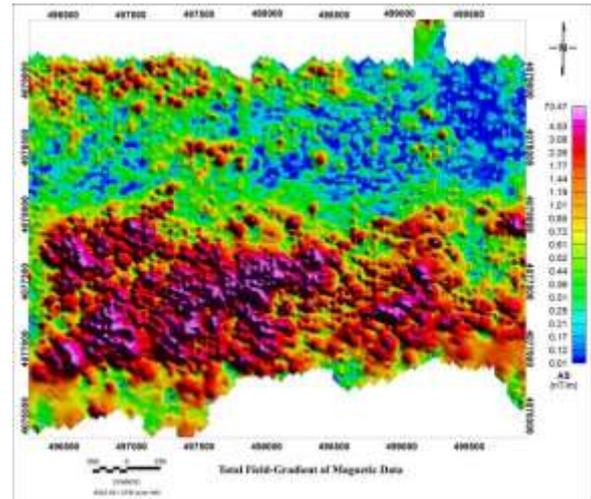


(ب)



(ف)

شکل ۷. الف) نقشه شدت کل میدان مغناطیسی، ب) نقشه انتقال به قطب مغناطیسی، ج) نقشه گرادیان میدان کل مغناطیسی



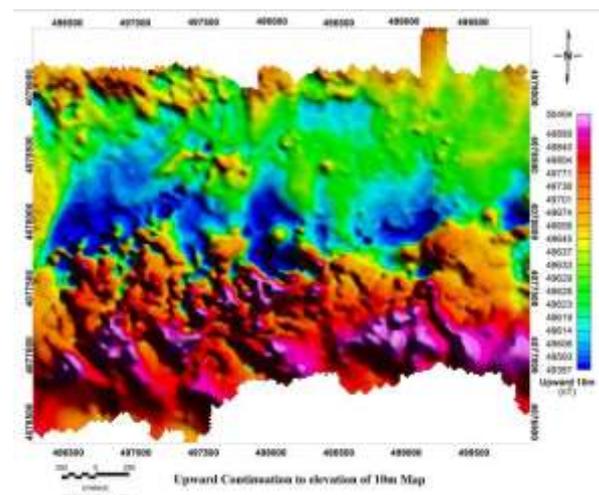
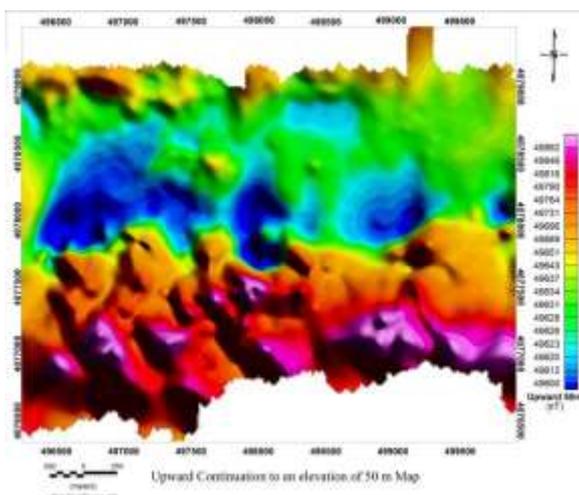
(ج)

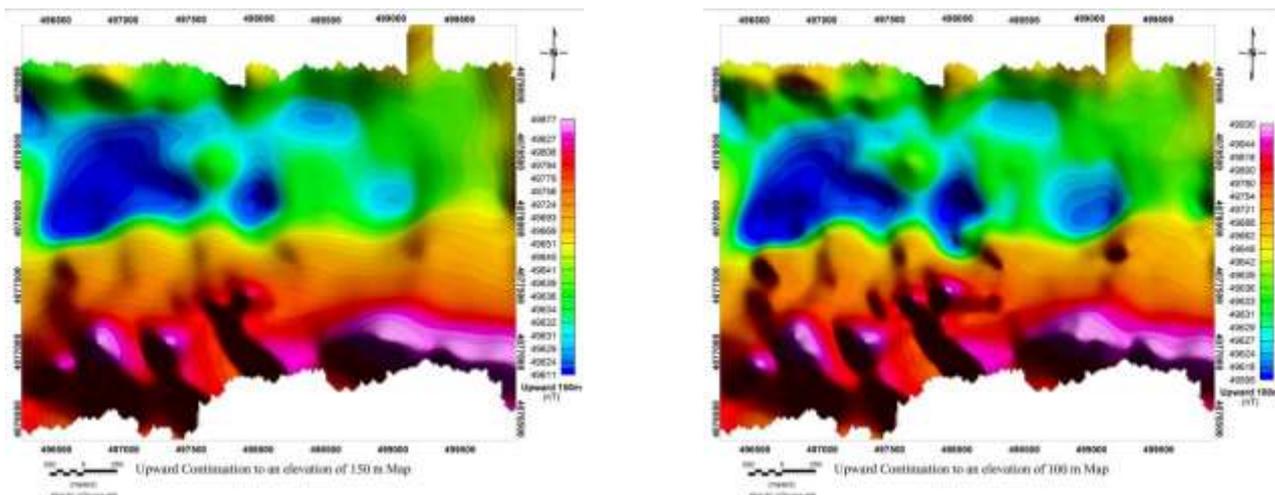
که $F(k_x, k_y)$ تبدیل فوریه میدان اندازه‌گیری شده بر روی سطح $z=0$ و $F(k_x, k_y, z)$ تبدیل فوریه میدان محاسبه شده بر روی سطح z و k_x و k_y مؤلفه‌های عدد موج در دو راستا هستند. برای بررسی تغییرات ناهنجاری‌های مغناطیسی با عمق، نقشه‌های ادامه فراسوی داده‌ها در سطوح ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری تولید و در شکل ۸ کنار یکدیگر ارائه شده تا نحوه تغییر ناهنجاری‌ها مشخص‌تر گردد. مشاهده این نقشه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ادامه فراسو، دامنه و گستره ناهنجاری‌ها در بخش جنوب‌غربی منطقه کاهش می‌یابد. در مقابل، در بخش جنوب‌شرقی منطقه، دامنه و گسترش ناهنجاری‌ها با افزایش ارتفاع ادامه فراسو، افزایش می‌یابد.

۴-۲- فیلتر ادامه فراسو

روش‌های ادامه فراسو و ادامه فرسو فرآیندهایی است که توسط آن داده‌های میدان مغناطیسی از یک سطح مینا به طریق ریاضی بر روی سطوح تراز در بالا یا در زیر مینای اصلی تصویر می‌شوند. در ادامه فراسو، داده‌ها بر روی سطحی بالاتر از سطح برداشت شده بازتولید می‌گردند که این فرآیند در عمل سبب هموارسازی داده‌ها می‌شود (Reynolds, 2011). هنگامی که هدف مطالعه، شناسایی ناهنجاری‌های عمیق‌تر است، جهت از بین بردن اثر ناهنجاری‌های کم عمق از روش ادامه فراسو استفاده می‌شود. رابطه (۲) برای ادامه فراسو در فضای فوریه استفاده می‌شود (Blakely, 1995):

$$F(k_x, k_y, z) = F(k_x, k_y) \exp(-|k|z) \quad (2)$$





شکل ۸. نقشه‌های ادامه فراسو ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متر محدوده راه‌چمن

۵- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی اکتشافی سطحی و زیرسطحی منطقه‌ی راه‌چمن با کمک تصاویر ماهواره‌ای ASTER و داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی بود. نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER به‌وضوح توزیع سطحی زون‌های دگرسانی کلیدی (فیلیک، آرژلیک، پروپلیتیک و گوسان) را در منطقه راه‌چمن آشکار ساخت. تمرکز این دگرسانی‌ها، به‌ویژه انواع مرتبط با کانی‌سازی (ارغوانی-سفید در ترکیب رنگی کاذب)، در واحدهای شیستی پرکامبرین-پالئوزوئیک و در مجاورت توده‌های نفوذی داسیتی، به خوبی قابل تشخیص هستند و می‌توانند به عنوان اولین نشانه یا سرنخ‌ها از کانه‌زایی مرتبط با توده‌های نفوذی (مس پورفیری) را ارائه دهند. با این حال، همان‌طور که اشاره شد، ارزیابی پتانسیل واقعی معدنی مستلزم درک توسعه عمقی این پهنه‌ها است. داده‌های مغناطیس‌سنجی به‌عنوان ابزاری برای پاسخ به این سؤال کلیدی به کار گرفته شدند. هم‌پوشانی مکانی قابل‌توجه بین ناهنجاری‌های با دامنه بالا در نقشه‌های شدت کل و سیگنال تحلیلی (به‌ویژه در نیمه جنوبی منطقه) با زون‌های دگرسانی سطحی شناسایی شده از مطالعات دورسنجی، تأییدی بر ارتباط ژنتیکی این پدیده‌ها است. نقشه شدت کل میدان، تغییرات محسوسی را مطابق با تغییرات لیتولوژی آشکار می‌سازد، به‌گونه‌ای که دامنه‌های بالا در جنوب با زون دگرسانی پتاسیک و دامنه‌های پایین در بخش مرکزی با زون دگرسانی فیلیک هم‌پوشانی دارند. این الگو در نقشه سیگنال تحلیلی (که وابستگی به جهت مغناطیسه شدن ندارد) نیز تأیید می‌شود و تمرکز شدید ناهنجاری‌ها در نیمه جنوبی، همبستگی واضحی را بین دگرسانی سطحی و منابع مغناطیسی زیرسطحی نشان می‌دهد. تحلیل روند تغییرات با عمق (نقشه‌های ادامه فراسو) این تفسیر را تکمیل می‌کند. کاهش سریع دامنه ناهنجاری‌ها در جنوب‌غرب حاکی از ماهیت سطحی‌تر کانه‌زایی در آن بخش است، در مقابل، افزایش یا تداوم پایدار ناهنجاری مغناطیسی در بخش جنوب‌شرقی- حتی در سطوح فراسوی بالا- نشان‌دهنده وجود یک منبع مغناطیسی عمیق، پیوسته و با حجم قابل‌توجه در زیرسطح است که احتمالاً مرتبط با توده‌های نفوذی در آن ناحیه باشد. این الگو با وجود توده‌های نفوذی عمیق در منطقه و یا زون‌های دگرسانی شدید و

گسترده‌ای که تا عمق زیادی ادامه یافته‌اند، سازگاری دارد.

در مجموع، تلفیق یافته‌های دورسنجی و مغناطیس‌سنجی، اطلاعات ارزشمندی درباره عمق و گسترش احتمالی کانه‌زایی ارائه داد. راه‌چمن ارائه داد. شایان ذکر است که به دلیل محدودیت دسترسی میدانی به منطقه مورد مطالعه، اعتبارسنجی این یافته‌ها به‌صورت غیرمستقیم و از طریق تطابق با داده‌های مغناطیسی معتبر موجود انجام شد. نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا مرزهای سطحی و نوع دگرسانی‌ها را تعیین کرد، و مغناطیس‌سنجی با آشکارسازی تغییرات زیرسطحی و تعیین عمق و تداوم منابع مغناطیسی (عمدتاً مگنتیت مرتبط با دگرسانی پتاسیک و کانی‌سازی)، به ارزیابی پتانسیل عمقی کانه‌زایی پرداخت. بر این اساس، بخش جنوب‌شرقی محدوده به دلیل تداوم ناهنجاری مغناطیسی در عمق، هم‌پوشانی با دگرسانی‌های بارز سطحی و مجاورت با توده‌های نفوذی، به‌عنوان اولویت اول برای مطالعات تفصیلی بعدی از جمله مطالعات ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای، لیتوژئوشیمی و حفاری‌های اکتشافی مس پورفیری معرفی می‌شود. این نتایج می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای مطالعات اکتشافی پیشرفته و برنامه‌ریزی حفاری‌های هدفمند در محدوده‌های معدنی استفاده شوند.

۶- سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله صمیمانه از اداره کل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه شمال‌شرق به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های مغناطیس‌سنجی و پشتیبانی فنی کارشناسان محترم سپاس‌گزاری می‌کنند. همچنین، از زحمات همکاران گرامی در نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی و نیز داوران ارجمند که با نظرات سازنده خود به ارتقای کیفیت این مقاله یاری رساندند، قدردانی می‌شود.

۷- منابع

اسدی هارونی، ه. و اسدی هارونی، پ.، ۱۴۰۲، معیارهای اکتشافی کانسار مس و مولیبدن پورفیری کهنک در استان اصفهان، پترولوژی، ۱۴ (۴)، ۷۵-۱۰۰.

کانی سازی و اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP/RS و مغناطیس سنجی زمینی در محدوده MA-I و اطراف آن، منطقه اکتشافی مس-طلا پورفیری ماهرآباد، شرق ایران، زمین شناسی اقتصادی، ۱ (۱)، ۱-۱۷.

یزدی، ز.، جعفری راد، ع.ر. و خیرالهی، ح.، ۱۳۹۴، شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و دگرسانی مرتبط با مس پورفیری با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوایی، مطالعه موردی: برکه یکصدهزارم چهارگنبد، استان کرمان، علوم زمین، ۹۵، ۹۴-۸۵.

Alimohammadi, M., Alirezaei, S. and Kontak, D. J., 2015, Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo-Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran, *Ore geology reviews*, 70, 290-304.

Blakely, R.J. (1995) *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Chen, Q., Zhao, Z., Zhou, J., Zhu, R., Xia, J., Sun, T., ... and Chao, J., 2022, ASTER and GF-5 satellite data for mapping hydrothermal alteration minerals in the longtoushan Pb-Zn deposit, SW China, *Remote Sensing*, 14(5), 1253.

Duda, K., Daucsavage, J., Siemonsma, D., Brooks, B., Oleson, R., Meyer, D. and Doescher, C., 2020, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance Product (ast_11t), US Geological Survey, USA.

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.

Hosseinjanizadeh, M., Tangestani, M. H., Roldan, F. V. and Yusta, I., 2013, 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.

Honarmand, M., Ranjbar, H. and Shahabpour, J., 2013, Combined use of ASTER and ALI data for hydrothermal alteration mapping in the northwestern part of the Kerman magmatic arc, Iran, *International Journal of Remote Sensing*, 34(6), 2023-2046.

ITT Visual Information Solutions., 2008, FLAASH module user's guide, FLAASH Module Version 4.5.

Mahmoud, H. A., Karelina, E. V., Markov, V. E., Diakonov, V. V. and Vikentyev, I. V., 2023, Image processing for ASTER remote sensing data to map hydrothermal alteration zones in East Kazakhstan, *RUDN Journal of Engineering Research*, 24(1), 95-104.

Mars, J. L., 2013, Hydrothermal alteration maps of the central and southern Basin and Range province of the United States compiled from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

امامعلی‌پور، ع.، خاتمان، م.ا.، اسکویی، ر. و عبدالهی شریف، ج.، ۱۳۹۰، الگوی زمین‌شناسی، دگرسانی و بی‌هنجاری مغناطیسی کانسار مس پورفیری مسجد داغی (شرق جلفا)، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲ (۲)، ۷۷-۸۹.

باقرپور، ح.، مختاری، م.ع.ا.، کوهستانی، ح.، نباتیان، ق. و مهدی‌خانی، ب.، ۱۳۹۸، کانه‌زایی اپی‌ترمال فلزات پایه (نقره) نوع سولفیداسیون حدواسط در کانسار گویچه بیلاق، جنوب باختر زنجان، زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۱ (۴)، ۵۴۵-۵۶۴.

بحرودی، ا.، بدون تاریخ، گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فرومد، شماره ۷۳۶۳، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

بمانی، م.، مجتهدزاده، س.ح. و انصاری، ع.ح.، ۱۳۹۸، بررسی و تطبیق داده‌های ژئوفیزیکی با دگرسانی‌ها در کانسار مس علی‌آباد دامک، نشریه مهندسی منابع معدنی، ۱ (۱۱)، ۲۱-۴۳.

حسینجانی‌زاده، م. و هنرمند، م.، ۱۳۹۷، 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، زمین‌شناسی اقتصادی، ۱ (۱۰)، ۲۳۷-۲۵۴.

حسینی، م.ر.، قادری، م. و علیرضایی، س.، ۱۳۹۰، انواع سیستم‌های رگه-رگچه و ارتباط آنها با کانه‌زایی در کانسار مس تخت گنبد، شمالشرق سیرجان، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ۲۲ آذر ۱۳۹۰.

رضایی، ف.س.، ۱۴۰۰، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی پیدایش کانه‌زایی گرافیت-مس-تیکل و آهن در افیولیت‌های سبزوار (جنوب جغتای)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

سیفی، ع.، حسینجانی‌زاده، م. و مختاری، ز.، ۱۴۰۱، سنجش از دور کانی‌های مرتبط با منابع زمین‌گرمایی در ژئوتوریسم و اکتشاف منابع؛ مطالعه موردی تفتان، جنوب‌شرق ایران، چهارمین کنفرانس انجمن سنجش از دور زمین‌شناختی ایران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ۱۴ و ۱۵ اسفند ۱۴۰۱.

شوقانی مطلق، م.، ۱۳۹۸، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و الگوی رخداد کانه‌زایی مس در توالی آتشفشانی-رسوبی ائوسن-الیگوسن، شمال کاهک سبزوار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدلو، ع.، ۱۳۹۶، تفسیر و مدل‌سازی مستقیم داده‌های مغناطیس به منظور تعیین سطح فرسایش مناطق کانی‌زایی مس پورفیری با مطالعه موردی کانسار قاهان استان مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مختاری، ز. و سیفی، ع.، ۱۴۰۰، بارزسازی مناطق دگرسان شده با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصاویر ASTER در منطقه معدن فیروزه نیشابور، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۱۱ (۲۸)، ۲۲-۱.

ملک‌زاده شفاوردی، آ.، حیدریان شهری، م.ر. و کریم‌پور، م.ح.، ۱۳۸۸،

- (ASTER) data (No. 2013-1139), US Geological Survey.
- Nabighian, M. N. 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section; its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507-517.
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes associated with meteorite impacts. In *Hydrothermal processes and mineral systems* (pp. 1097-1130). Springer, Dordrecht.
- Pour, A.B., Ranjbar, H., Sekandari, M., et al., 2023, Remote sensing for mineral exploration. In *Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration* (pp. 17-149), Elsevier.
- 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, In *Map Asia Conference, Kuala Lumpur* (pp. 13-15).
- Research System Inc., 2004, ENVI User's Guide, Version 4.1.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell, 712p.
- Richards, J.P. (2011). Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews*, 40(1), pp.1-26.
- Richards, J.A., 2013, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Seifi, A., Esmaily, A. and Mokhtari, Z., 2021, A new hybrid method for epithermal gold exploration using multi-sensor satellite data in Sistan and Baluchestan Province (Iran), *Ore Geology Reviews*, 138, 104357.
- Seifi, A., Yousefi, S., Aryafar, A., Hosseinjanizadeh, M., Salajegheh, A. and Farhadian, H., 2025, Evaluation of decision tree on ASTER statistical data for segregating alteration zones in Darrehzar deposit, Iran, *Earth Science Informatics*, 18(3), 481

