

مطالعات دورسنجی، زمین شناسی، کانی سازی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی کانسار آهن کوه بابا، جنوب هشتروند، شمال باختر ایران

مجید حافظ دریانی^۱، علی عابدینی^۲، فرهنگ علی یاری^۳ و علی اصغر کلاگری^۴

^۱دانشجوی دکترا، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

^۴استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶

چکیده

کانسار آهن کوه بابا در فاصله ۷۰ کیلومتری جنوب هشتروند، استان آذربایجان شرقی، شمال باختر ایران واقع است. این کانسار در بخش شمال باختری کمان ماگمایی ارومیه-دختر واقع بوده و از نظر ژئوتیک مرتب با توده های نفوذی گابرویی تا دیوریتی است. واحدهای سنگی رخنمون یافته در اطراف این ذخیره مشتمل بر سنگ های آتشفشانی-رسوبی الیگوسن، توده های نفوذی پلیوسن و گنبد های داسیتی پلیوسن هستند. سنگ میزبان اصلی کانی سازی آهن شامل واحدهای گابرو-نوریت، پروکسن هورنبلند گابرو-نوریت و مونزو دیوریت است. نفوذ سیالات گرمایی غنی از آهن به درون سنگ های میزبان، سبب تشکیل و توسعه پهنه های دگرسانی گسترده شده که توسط کانی های سیلیکاته سبز رنگ (اکتینولیت، کلریت و اپیدوت) و کانی سازی آهن مشخص می شود. مطالعات دورسنجی (با استفاده از تصاویر ماهواره ای Sentinel-2) مبین حضور خطواره ها، ساختارهای گسلی با روند شمال شرقی- جنوب غربی و پهنه های دگرسانی مختلف است. دگرسانی گرمایی پروپیلیتیک عمدتاً در بخش های داخلی کانسار غالب بوده که به تدریج در بخش های خارجی و پیرامونی و با توجه به تغییر ماهیت سنگ ها از بازیگ به حدواسط به پهنه های دگرسانی آرژیلیک تغییر می کند. بر اساس روابط صحرایی و مطالعات میکروسکوپی، کانسنگ ها بافت های توده ای، رگه-رگچه ای، برشی و پراکنده را به نمایش می گذارند. در زون پروپیلیتیک، مگنتیت همراه با اپیدوت و اکتینولیت است. مطالعات ژئوشیمیایی آشکار کرد که مقدار Fe(T) در نمونه های مغزه حفاری در بازه ای از ۳/۸۵ تا ۶۳/۲ درصد وزنی متغیر است. در این پژوهش، مطالعات مغناطیس سنجی زمینی با هدف دست یابی به اطلاعات عمقی و تخمین گسترش توده های نفوذی مرتبط با کانی سازی و نیز تعیین نقاط مناسب برای حفاری انجام گرفت. همچنین، نقشه های شدت کل، برگردان به قطب، سیگنال تحلیلی، مشتق اول قائم و ادامه فراسو با هدف شناسایی پهنه های بالقوه کانی سازی عمیق و کم عمق زیر سطحی تهیه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند که دو ناهنجاری، یکی در شمال و دیگری در بخش های مرکزی محدوده مورد مطالعه قابل تشخیص است که تقریباً منطبق بر محل توده های نفوذی هستند.

کلیدواژه ها: کانی سازی مگنتیت، مغناطیس سنجی زمینی، تصاویر ماهواره سنتینل، کوه بابا، هشتروند، ایران.

*نویسنده مسئول: فرهنگ علی یاری

E-mail: F.aliyari@uut.ac.ir

۱- پیش نوشتار

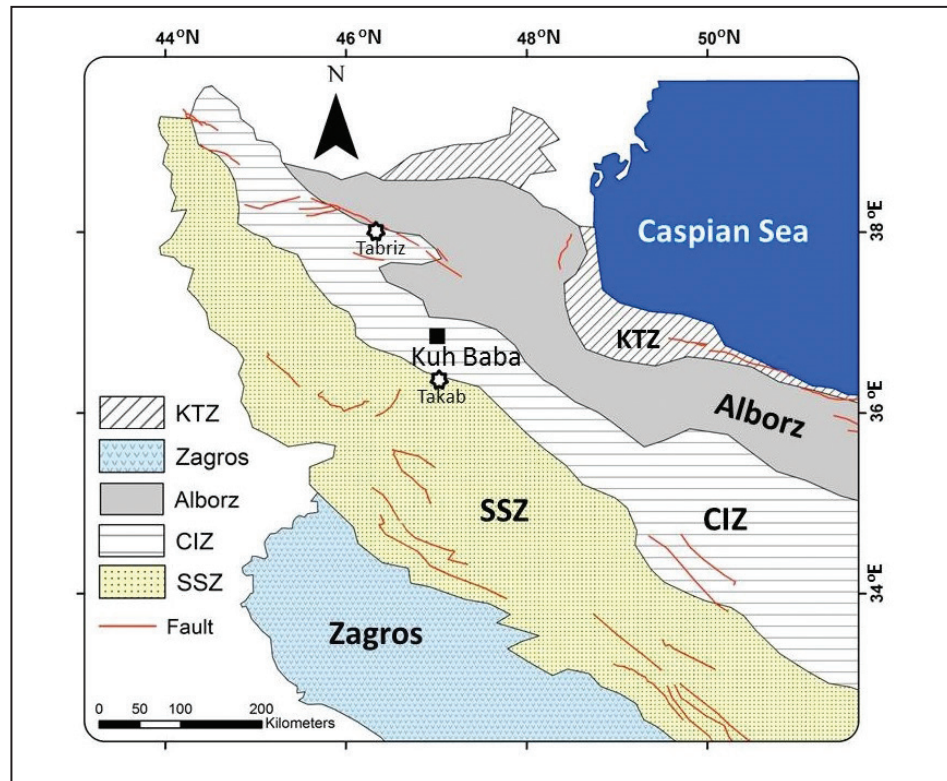
عملیات اکتشافی سامانه مند و هدفمند به صورت مرحله ای و تلفیق آنها با یکدیگر، نقش مهمی در کاهش هزینه های اکتشاف ذخایر معدنی و نتایج به دست آمده دارد. بر این اساس، در مراحل شناسایی و پی جویی و اکتشاف مقدماتی کانسارها، پردازش تصاویر ماهواره ای از جمله ابزارهایی هستند که می توانند در کاهش هزینه های اکتشاف ذخایر معدنی سهم به سزایی ایفا کند. داده های دورسنجی از پتانسیل بالایی جهت شناسایی پهنه های دگرسانی مرتبط با کانسارها و در نتیجه، اکتشاف ذخایر معدنی برخوردار هستند. تهیه نقشه زمین شناسی و شناسایی گسل ها و شکستگی هایی که در مقیاس های ناحیه ای و محلی، نهشته های معدنی را کنترل می کنند، نقش عمده ای در شناسایی مناطق مستعد و تمرکز عملیات اکتشافی در نقاط شناسایی شده دارند (Sabins, 1999).

اکتشافات ژئوفیزیکی به روش مغناطیس سنجی نیز از جمله روش های مطالعات ژئوفیزیکی است که از دیرباز برای فعالیت های اکتشافی در زمینه های مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر آهن مورد استفاده قرار گرفته است. برداشت اصولی و تفسیر صحیح داده های مغناطیس سنجی زمینی به همراه دیگر داده های اکتشافی می تواند ضمن کاهش هزینه ها، اطلاعات ارزشمندی در مورد موقعیت، عمق، و نحوه گسترش بخش های پنهان ذخایر آهن در اختیار پژوهشگران قرار دهد (کلاگری، ۱۳۸۹؛ Robinson and Coruh, 2005).

کانسار آهن کوه بابا در فاصله ۷۰ کیلومتری جنوب هشتروند و در فاصله ۱۴۵ کیلومتری جنوب شرق تبریز واقع است. بر اساس تقسیمات پهنه های زمین ساختی

ایران (آقناباتی، ۱۳۸۳؛ 1998؛ Aghanabati, 1991; Alavi, 1991)، این ذخیره بخشی از پهنه زمین ساختی ایران مرکزی است (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه در منطقه ای با مختصات $36^{\circ} 50' 01''$ تا $36^{\circ} 53' 10''$ عرض شمالی و $47^{\circ} 00' 16''$ تا $47^{\circ} 03' 16''$ طول شرقی در گستره ای به وسعت ۱۸ کیلومتر مربع واقع است. در پی جویی های اولیه، رخنمون هایی از کانی سازی آهن به صورت مگنتیت مشاهده می شود (شرکت مهندسی مشاور چکان، ۱۳۷۶) که با در نظر گرفتن زمین شناسی و دگرسانی گسترده در منطقه، اهمیت انجام عملیات مغناطیس سنجی زمینی مشخص شده است (شرکت زراذین گستر، ۱۳۷۹؛ عباسی و نقی زاده، ۱۳۸۷). همچنین، مطالعات زمین شناسی کانسار توسط مهندسی مشاور پیچاب کانسار (۱۳۹۱) و مغفوری و همکاران (۱۳۹۴) صورت گرفته است. اما تاکنون، پژوهشی در رابطه با مجموعه داده های به دست آمده از مطالعات دورسنجی، زمین شناسی، دگرسانی گرمایی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی کانسار به منظور تلفیق نتایج به دست آمده، انجام نگرفته است. لذا، هدف از انجام این پژوهش، تحلیل نتایج حاصل از بررسی های سطحی شامل مطالعات دورسنجی با استفاده از داده های ماهواره ای Sentinel-2، زمین شناسی، دگرسانی گرمایی و اطلاعات سطحی و عمقی به دست آمده از اکتشافات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی کانسار کوه بابا، به منظور ردیابی و شناسایی پهنه های کانه دار احتمالی در رخنمون های سطحی کانی سازی و نیز عمق نفوذ و جایگیری توده های نفوذی نیمه عمیق و کانی سازی همراه در منطقه، با هدف شناسایی و معرفی مناطق مستعد و پتانسیل دار است.

شکل ۱- نقشه تکتونیکی ساده شده نشان‌دهنده پهنه‌های رسوبی- ساختاری مختلف ایران و موقعیت کانسار آهن کوه بابا در آن (با اندکی تغییرات از آقابیانی، ۱۳۸۳؛ Alavi, 1991; Aghanabati, 1998). علایم اختصاری به کار رفته در این شکل عبارتند از: SSZ = پهنه ماگمایی- دگرگونی سندانج- سیرجان؛ KTZ = پهنه ساختاری خزر- تالش- زیوه؛ و CIZ = پهنه ایران مرکزی.



۲- زمین‌شناسی

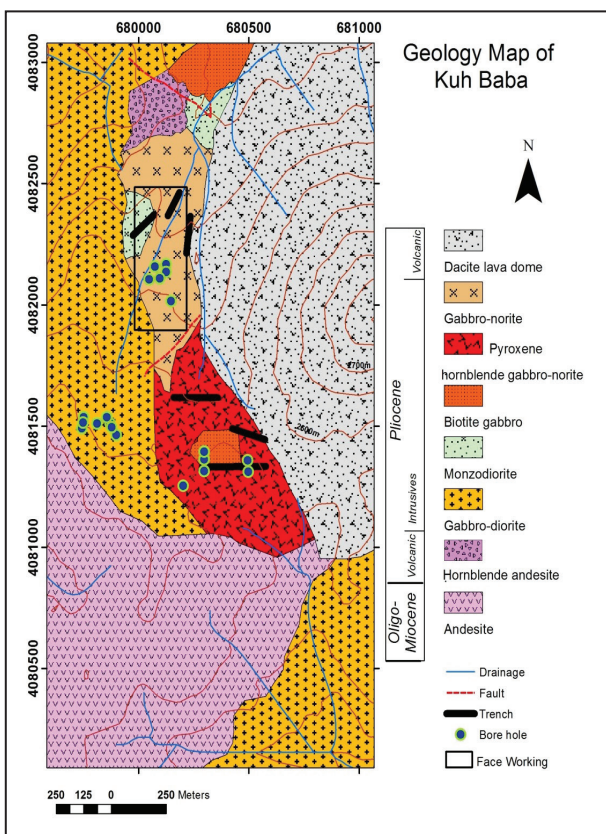
گرفته است (شکل ۲). این واحد، مرتفع‌ترین بخش منطقه را تشکیل می‌دهد و در قسمت شرقی محدوده مطالعاتی رخنمون دارد (شکل ۳- ج).

از نظر ناحیه‌ای، زمین‌شناسی منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی و رسوبی پرکامبرین، سنگ‌های دگرگونی پالئوزویک، توده‌های نفوذی و آتشفشانی الیگومیوسن، گنبد‌های گدازه‌ای پلیوسن و نهشته‌های جوان پلیوسن و کواترنری است (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۷۵). رخنمون‌های سنگی موجود در محدوده مورد مطالعه، عمدتاً شامل توالی‌های آتشفشانی- رسوبی الیگو- میوسن با تناوبی از مارن‌های سبز، زرد و خاکستری گچ‌دار، ماسه‌سنگ سبز- خاکستری همراه با گدازه‌های آندزیت پورفیری به رنگ خاکستری، قهوه‌ای و بنفش است که توسط توده‌های نفوذی گرانیت تا گرانودیوریت، گابرو و مونزودیوریت قطع شده‌اند (مهندسین مشاور پیچاب کانسار، ۱۳۹۱). گنبد آندزیتی- داسیتی کوه بابا، واحدهای آتشفشانی آندزیتی و نیز توده‌های نفوذی را قطع کرده و درون این مجموعه قرار گرفته است (شکل ۲).

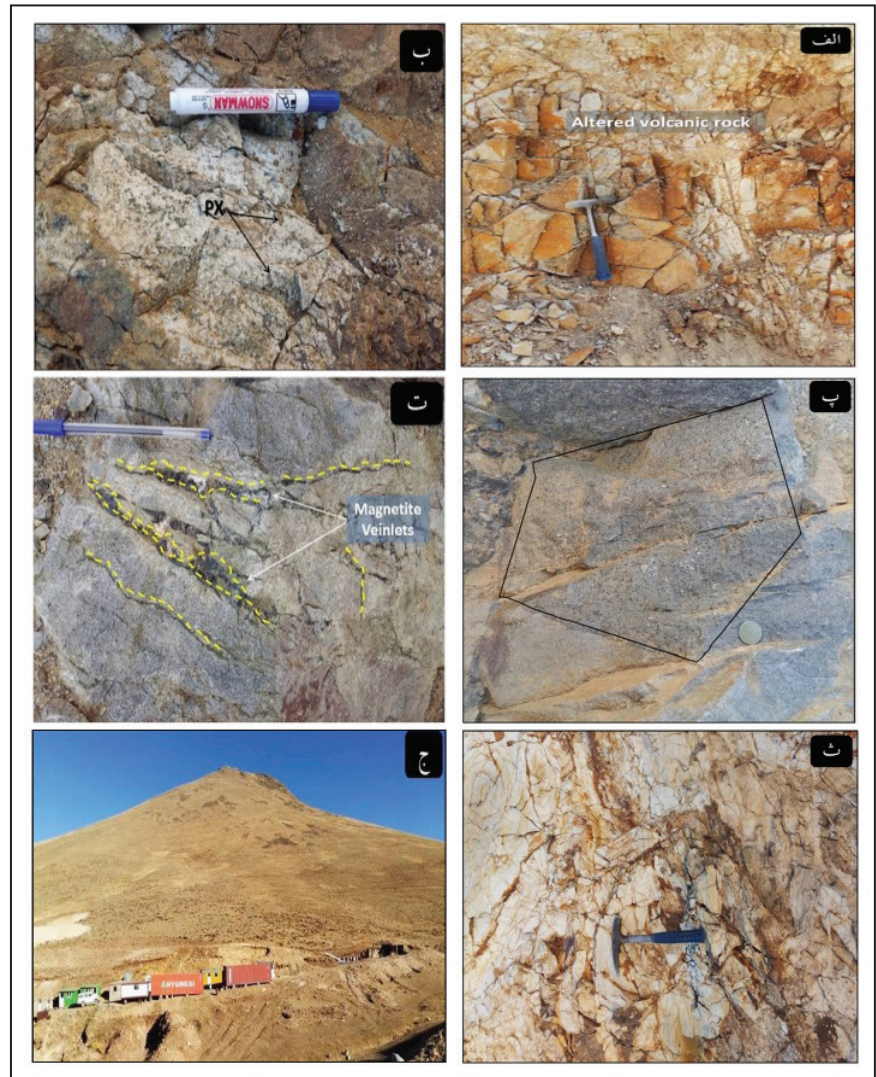
واحدهای آتشفشانی- رسوبی: شامل واحدهای آتشفشانی الیگو- میوسن با ترکیب حدواسط آندزیت- تراکی آندزیت است که در جنوب باختر کانسار کوه بابا رخنمون دارند (شکل ۲). در برنزدهای سطحی، این واحد به رنگ خاکستری تیره تا بنفش مشاهده می‌شود. بافت این واحد پورفیری بوده و تحت تأثیر دگرسانی‌های آرژلیک و پروپیلیتیک قرار گرفته است (شکل ۳- الف). واحدهای رسوبی منطقه مربوط به سازند قرمز زیرین (الیگو- میوسن) هستند که از نظر ترکیب سنگ‌شناسی شامل ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومراست. این واحدها در برخی بخش‌ها، توسط ماسه‌سنگ، کنگلومرا و توف‌های میوسن پوشیده شده‌اند (مهندسین مشاور پیچاب کانسار، ۱۳۹۱).

توده‌های نفوذی: این توده‌ها شامل گابرو- نوریت، پیروکسن هورنبلند گابرو- نوریت، هورنبلند آندزیت، هورنبلند گابرو، بیوتیت گابرو، دیوریت و مونزودیوریت است (شکل‌های ۳- ب، پ، ت و ث و ۴). توده نفوذی گابرو- نوریت، گسترده‌ترین واحد سنگی در رخنمون‌های سطحی محدوده کوه باباست. هورنبلند آندزیت به شکل دایک درون دیگر واحدها نفوذ کرده است (حافظ‌دربانی و همکاران، ۱۳۹۵) (شکل ۲).

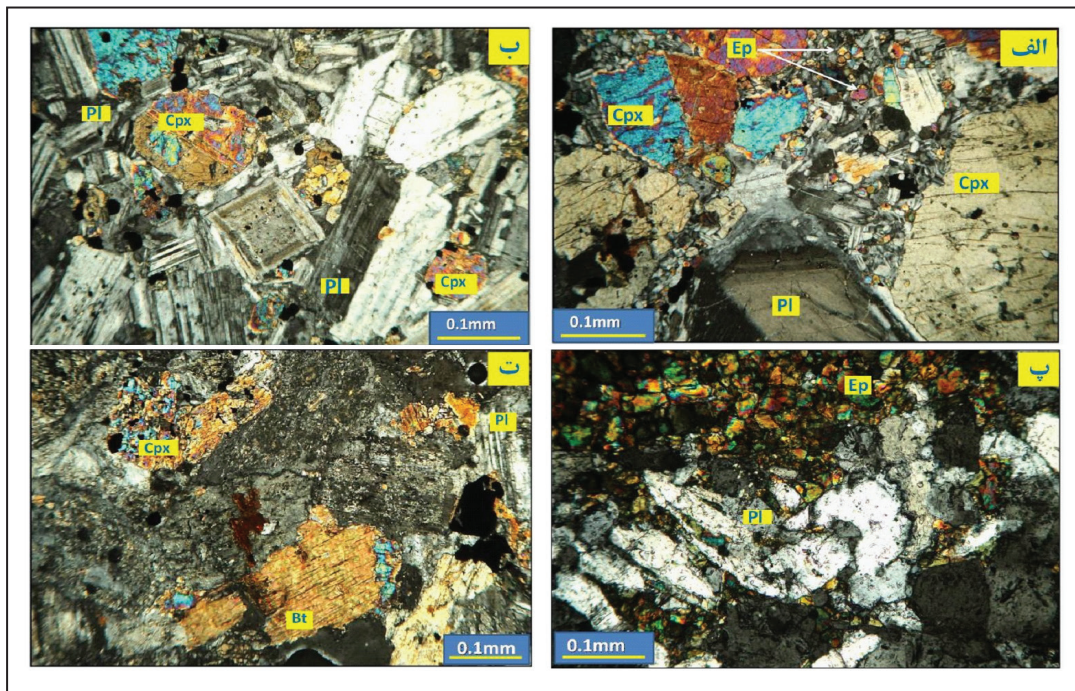
گنبد‌های داسیتی: گنبد گدازه‌ای آندزیت تا داسیتی کوه بابا، واحد آندزیتی الیگو- میوسن و نیز توده‌های نفوذی محدوده کانسار را قطع کرده و بر روی آن قرار



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی کانسار آهن کوه بابا با اندکی تغییرات از مغفوری و همکاران (۱۳۹۴). موقعیت سینه کار و گمانه‌های اکتشافی بر روی نقشه نشان داده شده است.



شکل ۳- واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده کانسار آهن کوه بابا. الف) واحد آندزیتی که تحت تأثیر دگرسانی آرزلیک قرار گرفته است؛ ب) توده نفوذی گابرو-نوریت با بافت گرانولار و رخنمون توده‌های و نسبتاً ملایم به رنگ خاکستری تیره؛ پ) واحد پیروکسن-هورنبلند گابرو-نوریت نسبتاً غیر دگرسان یا با دگرسانی ضعیف و مورفولوژی توده‌ای؛ ت) تشکیل رگه و رگچه‌های کوارتز-مگنتیت با ابعاد حداکثر ۲۰ در ۴ سانتی‌متر در واحد میزبان دیوریتی؛ ث) رگچه‌های مگنتیتی متقاطع در واحد میزبان هورنبلند آندزیت که طی فرایند اکسیداسیون و هوازدگی ثانوی مگنتیت توسط هماتیت و گوتیت جانشین شده است؛ ج) گنبد داسیتی کوه بابا که تمام واحدهای قبلی را قطع کرده است و مرتفع‌ترین بخش محدوده را تشکیل می‌دهد (دید رو به شرق).



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی سنگ‌های درونگیر و میزبان کانه‌زایی آهن در کانسار کوه بابا. الف) واحد گابرو نوریت با بافت گرانولار که حاوی کانی‌های پیروکسن و پلاژیو کلاز است؛ ب) توده نفوذی گابرو نوریت با بافت ساب‌افیتیک؛ پ) دگرسانی اپیدوتی در واحد دیوریت؛ ت) واحد بیوتیت گابرو با بافت هیپیدومورف گرانولار (پلاژیو کلاز= Pl، کلینوپيروكسن= Cpx، اپیدوت= Ep، بیوتیت= Bt) (نور تصاویر: XPL).

۳- روش مطالعه

به منظور مطالعه واحدهای زمین‌شناسی، تهیه نقشه زمین‌شناسی و بررسی دگرسانی گرمایی و کانی‌سازی کانسار آهن کوه بابا، ۵۰ نمونه در قالب مقاطع نازک و نازک صیقلی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مطالعات ژئوشیمیایی، آنالیزهای ICP-OES و جذب اتمی بر روی ۱۸۳ نمونه از ۲۰ گمانه اکتشافی در آزمایشگاه شرکت زرآما انجام شد. در روش آنالیز ICP-OES، روش آماده‌سازی انحلال اسیدی کامل (چهار اسید) با کد شناسایی ME-02، به منظور آنالیز همزمان ۳۴ عنصر اصلی و کمیاب به کار گرفته شد. حد آشکارسازی دستگاه مورد استفاده، از ۰/۱ گرم در تن برای عناصر کمیاب تا ۱۰۰ گرم در تن برای عناصر اصلی متغیر است. همچنین، بر اساس نتایج پی‌جویی‌های اولیه و نیز بررسی‌های زمین‌شناسی و گسترش دگرسانی گرمایی و روند کانی‌سازی در منطقه، اکتشافات ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی با ابعاد شبکه برداشت ۲۰×۱۰ انتخاب شد. بر این اساس، ۱۰۰۰۰ نقطه برداشت شده توسط دستگاه Proton مدل GSM19T ساخت شرکت کانادایی GEM (مهندسین مشاور پیچاب کانسار، ۱۳۹۱) در محیط نرم‌افزار Oasis Montaj 7.2 مورد پردازش قرار گرفت. افزون بر این، به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تصاویر سنتینل-۲ محدود، از سایت سازمان فضایی اروپا (www.esa.int/copernicus) تهیه شد و عملیات پیش‌پردازش‌های رادیومتر و هندسی بر روی تصاویر خام صورت پذیرفت.

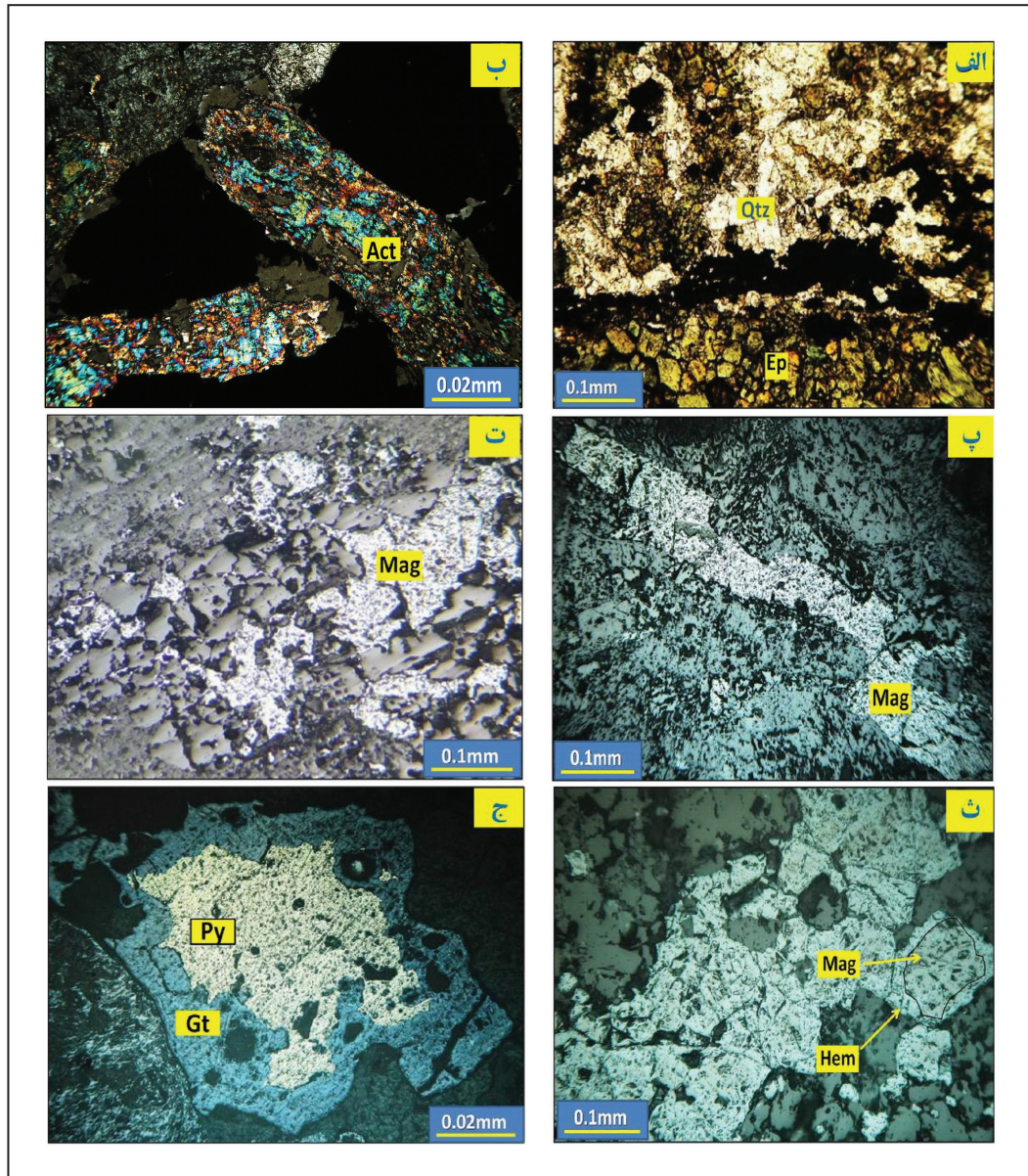
۴- کانی‌سازی آهن و دگرسانی گرمایی

با توجه به مطالعات صحرایی، شواهد سنگ‌شناسی و مطالعات میکروسکوپی، عمده‌ترین دگرسانی‌های گرمایی مطالعه شده، شامل پروپیلیتیک، سریستی، سیلیسی، سوسوریتی و آرژیلیک است. هر یک از پهنه‌های دگرسانی یاد شده، به تناسب فاصله از توده نفوذی اصلی و نیز کنترل‌کننده‌های ساختاری، با شدت‌های متفاوت در داخل توده نفوذی و سنگ‌های درونگیر گسترش یافته‌اند. درون توده نفوذی و در مجاورت

بلافاصل آن، مهم‌ترین دگرسانی مشاهده شده شامل دگرسانی اپیدوتی است که همراه با کانی‌سازی توده‌ای یافت می‌شود. دگرسانی اپیدوتی عموماً از تبدیل کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن به وجود آمده و شامل سه نوع بافت رگچه‌ای، زمینه‌ای و بافت آمیگدالی است که در واحدهای درونگیر و میزبان کانه‌زایی توسعه یافته است (شکل‌های ۵- الف و ۶- الف). با افزایش میزان فاصله از توده اصلی، دگرسانی‌های کلریتی و سیلیسی نیز به همراه دگرسانی اپیدوتی مشاهده می‌شود. از طرفی، سیالات منشأ گرفته از توده نفوذی، با توجه به ماهیت سنگ‌های درونگیر که عموماً از نوع حدواسط هستند، در بخش‌های فوقانی‌تر، این مجموعه را تحت تأثیر دگرسانی سریستی قرار داده‌اند. دگرسانی سریستی که تحت تأثیر دگرسانی پلاژیوکلازها و فلدسپارهای قلیایی به وجود آمده است، اغلب همراه با کانی‌سازی پراکنده و رگچه‌ای مگنتیت مشاهده می‌شود. دگرسانی اکتینولیتی که از تبدیل پیروکسن‌ها توسعه یافته است، عموماً به همراه مگنتیت‌ها در بخش‌های مرکزی کانی‌سازی مشاهده می‌شود (شکل ۵- ب). این دگرسانی در بخش‌های درونی سیستم، دگرسانی و کانه‌زایی واحدهای پیروکسن دیوریت و گابرو را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۶- ب). به طرف بخش‌های حاشیه‌ای، از شدت دگرسانی اکتینولیتی شدن کاسته می‌شود. با افزایش میزان فاصله از توده‌های نفوذی و نزدیک به سطح زمین، از شدت دگرسانی‌های قبلی کاسته شده و دگرسانی آرژیلیک، بخش نسبتاً وسیعی از رخنمون سنگ‌های منطقه را در سطح زمین تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی آرژیلیک، تقریباً خارج از بخش اصلی کانی‌سازی آهن توسعه یافته و واحدهای درونی و بیرونی حدواسط همانند آندزیت پورفیری و دیوریت را تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی کربناتی طی فرایند سوسوریتی شدن پلاژیوکلازها در بخش‌های حاشیه‌ای کانسار تشکیل و توسعه پیدا کرده است. دگرسانی کلریتی نیز در بخش‌هایی از منطقه، واحدهای درونگیر مانند گابرو را تحت تأثیر قرار داده است و عموماً همراه با کانی‌سازی پراکنده دیده می‌شود.

شکل ۵- بافت و ساخت‌های ماکروسکوپی کانی‌سازی آهن در محدوده کانسار آهن کوه بابا. الف) اپیدوت‌های ثانویه در زمینه‌ای از مگنتیت. اپیدوت احتمالاً بعد از نفوذ سیال غنی از آهن و از دگرسانی کانی‌های اولیه مانند پیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز تشکیل شده است؛ ب) تشکیل همزمان مگنتیت و اکتینولیت که در بخش‌های داخلی و نزدیک به منشأ کانی‌سازی مشاهده می‌شود. اکتینولیت احتمالاً ناشی از دگرسانی و تخریب کانی‌های پیروکسن سنگ منشأ با ترکیب گابرویی است؛ پ) کانی‌سازی توده‌ای آهن در بخش‌های درونی که احتمالاً ناشی از حجم وسیع سیال کانه‌دار است (دید رو به شمال شرق)؛ ت) بافت رگچه‌ای مگنتیت به همراه کوآرتز و اپیدوت فضای خالی و شکستگی‌های ایجاد شده را پر کرده است؛ ث) بلورهای درشت مگنتیت که توسط رگچه‌های تأخیری اکتینولیت- اپیدوت قطع شده، باعث خردشدگی سنگ‌ها شده و برش گرمایی را تشکیل داده است. مگنتیت به صورت ماتریکس قطعات سنگی را در بر گرفته است؛ ج) در بعضی بخش‌ها رگه‌هایی با لایه‌بندی منظم مشاهده می‌شود. ترتیب لایه‌بندی بر اساس زمان تبلور از قدیم به جدید عبارت است از مگنتیت- پیریت- کوآرتز.





شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی نور عبوری و انعکاسی از کانی‌ها، کانه‌ها و بافت‌های مختلف کانسار آهن کوه بابا، الف) دگرسانی اپیدوتی شدن همراه با دگرسانی سیلیسی شدن و کانی‌سازی رگه‌ای (نور تصویر: PPL)؛ ب) دگرسانی اکتینولیتی شدن همراه با کانی‌سازی که در بخش‌های نزدیک به منشأ کانه‌زایی مشاهده می‌شود (نور تصویر: XPL)؛ پ) کانه مگنتیت که به صورت رگچه‌ای در سنگ‌های درونگیر تشکیل شده است؛ ت) کانی‌سازی مگنتیت به شکل پراکنده که عموماً در بخش‌های بیرونی تر و با فاصله از منشأ کانه‌زایی مشاهده می‌شود؛ ث) پدیده مارتیتی شدن که به صورت گسترده و با شدت‌های مختلف در منطقه مشاهده می‌شود؛ ج) کانه‌زایی پراکنده پیریت که از حاشیه در حال تبدیل شدن به کانی گوتیت است (نور تصاویر پ تاج انعکاسی است) (کوآرتز = Qtz، اپیدوت = Ep، اکتینولیت = Act، مگنتیت = Mag، هماتیت = Hem، پیریت = Py، گوتیت = Gt).

کانی‌سازی توده‌ای کاسته و بر تعداد رگه و رگچه‌های مگنتیتی در واحد سطح افزوده می‌شود (شکل‌های ۵- ت و ۶- پ). افزون بر این، نفوذ ماگمای دارای محتوای Fe(T) زیاد به درون سنگ‌های منطقه باعث خردشدگی شدید در این مجموعه و ایجاد بافت برشی در بخش داخلی محدوده کانسار شده است (شکل ۵- ث). همچنین، با کاهش شدت کانی‌سازی و افزایش فاصله از بخش اصلی ذخیره کانسار، کانی‌سازی مگنتیت به صورت بافت پراکنده مشاهده می‌شود که نسبت به کانی‌سازی توده‌ای، برشی و رگه- رگچه‌ای مگنتیت، بخش کوچک‌تری را به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۶- ت). پیریت و کالکوپیریت، با فراوانی اندک طی مرحله تأخیری هیدروترمال به وجود آمده است. این دو کانی به صورت دانه‌ریز و پراکنده در زمینه سنگ‌های مافیک دگرسان شده‌اند (شکل ۶- ج) و نیز به صورت رگه‌ای همراه با مگنتیت در بخش‌های داخلی تر کانسار قابل مشاهده است (شکل ۵- ج). از نظر کانی‌شناسی

بر اساس مطالعات پتروگرافی، کانی‌های فلدسپار، کلینوپیروکسن و هورنبلند در مرحله پیش از کانی‌سازی مگنتیت و در سنگ میزبان دیده می‌شوند. بخش عمده کانی‌های دگرسانی شامل اکتینولیت، اپیدوت، کلریت، کوآرتز و سریست مربوط به مرحله نخست کانی‌سازی هستند (شکل ۷). کانی‌سازی آهن عمدتاً به صورت مگنتیت رخ داده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی مغزه‌ها، بیشترین فراوانی آهن به صورت Fe(T) ۶۳/۲۵ درصد وزنی و کمترین آن ۳/۸۵ درصد وزنی است. کانی‌سازی مگنتیت شامل چهار نوع بافت پرکننده فضاهای خالی و جانشینی، رگه- رگچه‌ای، برشی و دانه‌پراکنده است. با توجه به نفوذ ماگمای مافیک تا حدواسط درون سنگ‌های میزبان و نیز حجم وسیع کانی‌سازی، بافت توده‌ای، اصلی‌ترین فرم کانی‌سازی مگنتیت را به خود اختصاص داده است (شکل ۵- پ). از مرکز کانی‌سازی به سمت حاشیه کانسار، به تدریج از میزان

(شکل ۶- ث). گوتیت و کانی‌های رسی نیز دیگر کانی‌های مربوط به مرحله سوپرژن هستند و به ترتیب از تبدیل کانی‌های پیریت و فلدسپار شکل گرفته‌اند (شکل ۷).

کانسنگ، مهم‌ترین کانی ثانویه مشاهده شده در منطقه کوه بابا هماتیت است. مارتیتی شدن (تبدیل مگنتیت به هماتیت) پدیده‌ای است که با شدت‌های مختلف، در بسیاری از بخش‌های دارای کانی‌سازی مگنتیت مشاهده می‌شود.

Minerals	Pre-mineralization	Hydrothermal stage		Weathering
		Early stage	Late stage	
Feldspar	—————			
Clinopyroxene	—————			
Hornblende	—————			
Biotite	—————	-----		
Apatite	-----			
Magnetite		—————		
Pyrite			—————	
Chalcopyrite			-----	
Actinolite		—————	—————	
Quartz		—————	—————	
Chlorite		—————	—————	
Epidote		—————	—————	
Carbonates		—————	-----	
Sericite		—————	-----	
Hematite				—————
Goethite				-----
Clay minerals				—————

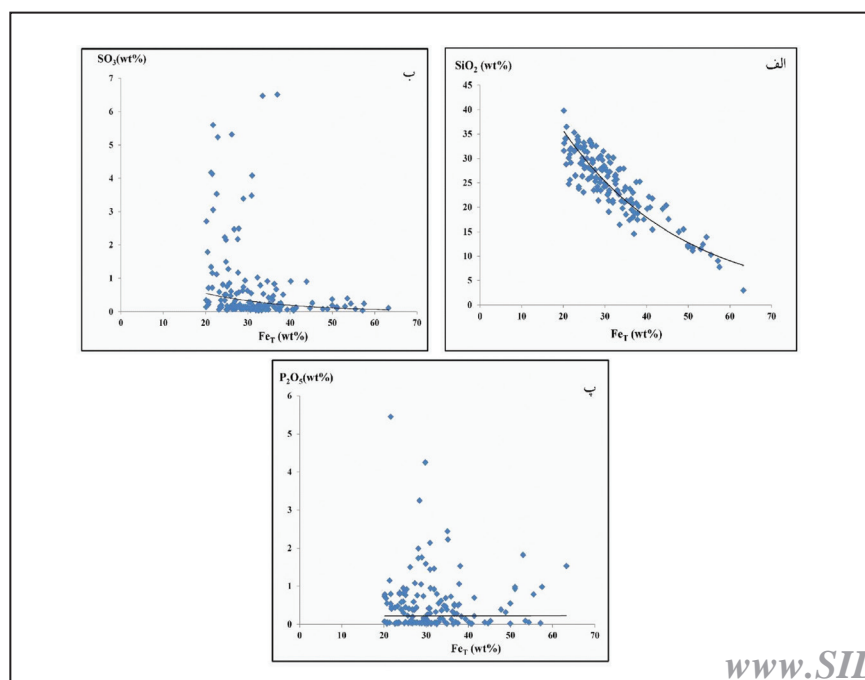
شکل ۷- توالی پاراژنتیک کانی‌ها و کانه‌ها در کانسار آهن کوه بابا.

۵- مطالعات ژئوشیمیایی

سیلیسی با کانی‌سازی آهن در محدوده کوه بابا مربوط است (Childress et al., 2016; Rojas et al., 2018). این موضوع در مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی نیز قابل تأیید است (شکل ۸- الف). همچنین با توجه به شکل ۸- ب، افزایش مقادیر SO_3 در برخی بخش‌ها با $Fe(T)$ رابطه‌ای عکس دارد که می‌تواند به دلیل حضور کانی‌های سولفیدی مثل پیریت و کالکوپیریت و کاهش $Fe(T)$ در آن بخش‌ها باشد. در دیاگرام P_2O_5 در مقابل $Fe(T)$ (شکل ۸- پ)، همبستگی معنی‌داری مشاهده نمی‌شود، که این موضوع با توجه به عدم همراهی کانی آپاتیت با مگنتیت در کانسار آهن کوه بابا، طبیعی به نظر می‌رسد (Montreuil et al., 2013; Huang et al., 2018).

گمانه‌های اکتشافی، بر پایه نتایج مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی منطقه کوه بابا، طراحی و حفاری شده‌اند (شکل ۲). عمق گمانه‌های اکتشافی از ۴۸ تا ۱۷۲ متر متغیر است. آنالیزهای شیمیایی انجام گرفته بر روی ۱۸۳ نمونه در جدول ۱ دیده می‌شود. حداکثر میزان P_2O_5 ، حدود ۴/۲۵ درصد وزنی و حداکثر میزان SO_3 حدود ۶/۵۱ درصد وزنی است (جدول ۱).

شکل ۸ همبستگی محاسبه شده به روش پیرسون را بر روی داده‌های نرمال‌سازی شده عناصر SO_3 ، SiO_2 ، $Fe(T)$ و P_2O_5 نشان می‌دهد. بر این اساس، مقدار $Fe(T)$ با SiO_2 همبستگی منفی دارد که همانند بسیاری از کانسارهای آهن، احتمالاً به عدم حضور دگرسانی



شکل ۸- نمایش مقادیر SO_3 ، SiO_2 و P_2O_5 در مقابل $Fe(T)$ (الف تا پ) در نمونه‌های مغزه حفاری برداشت شده از گمانه‌های اکتشافی.

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی تعدادی از نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌های اکتشافی کانسار کوه بابا.

Sample No.	Fet	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	Sample No.	Fet	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂
Abundances (wt. %)									
Detection limit (ppm)	۱۰۰	۱۰	۵۰	۹۰		۱۰۰	۱۰	۵۰	۹۰
91-KB-BH1-1	۲۸/۹۸	۰/۰۶	۰/۱۵	۳۰/۵	91-KB-BH5-62	۲۸/۸	۱/۰۵	۰/۶۳	۲۵/۰۹
91-KB-BH1-2	۲۰/۷۷	۰/۰۵	۰/۲۹	۳۶/۴۹	91-KB-BH5-63	۲۴/۶۵	۰/۳	۰/۵	۲۹/۵۲
91-KB-BH1-3	۲۶/۸۶	۰/۰۶	۰/۲۱	۳۲/۵۶	91-KB-BH5-64	۳۵/۱۷	۲/۲۳	۰/۲۴	۲۱/۳۷
91-KB-BH1-4	۳۲/۴	۰/۰۵	۰/۲	۲۶/۳۷	91-KB-BH5-65	۱۵/۵۱	-	-	-
91-KB-BH1-5	۲۷/۱۴	۰/۰۵	۰/۱۶	۲۹/۶۵	91-KB-BH5-66	۳۶/۷	۰/۴۹	۰/۶۷	۲۵/۷۵
91-KB-BH1-6	۲۸/۴۲	۰/۰۳	۰/۰۷	۳۰/۰۵	91-KB-BH5-67	۳۶/۲۸	۰/۳۴	۰/۸۳	۲۱/۶۸
91-KB-BH1-7	۳۷/۵۳	۰/۵	۰/۰۴	۲۰/۸۳	91-KB-BH5-68	۲۷/۷	۰/۴۴	۱/۱۷	۲۵/۳۲
91-KB-BH1-8	۲۷/۱۴	۰/۳۸	۰/۰۸	۲۷/۳۵	91-KB-BH5-69	۲۱/۶	۰/۸	۰/۷۲	۳۱/۷۴
91-KB-BH1-9	۳۴/۳۴	-	-	-	91-KB-BH6-70	۱۱/۵۹	-	-	-
91-KB-BH1-10	۱۷/۷۲	-	-	-	91-KB-BH6-71	۳۸/۳۶	۰/۲۱	۰/۵۱	۲۵/۲۵
91-KB-BH1-11	۳۶/۷	۰/۲۸	۰/۰۸	۲۳/۰۲	91-KB-BH6-72	۳۳/۶۷	۰/۳۷	۰/۵۳	۲۷/۸۶
91-KB-BH1-12	۳۳	۰/۰۶	۰/۱۱	۲۳/۵	91-KB-BH6-73	۲۶/۴۹	۰/۰۵	۰/۲۳	۳۳/۳
91-KB-BH1-13	۳۱/۳	۰/۰۳	۰/۱۷	۲۹/۱۳	91-KB-BH6-74	۲۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۱۴	۳۹/۷۹
91-KB-BH1-14	۲۴/۹۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۳۳/۲۴	91-KB-BH6-75	۴۰/۵۷	۰/۰۲	۰/۰۷	۲۲/۱۷
91-KB-BH1-15	۲۵/۷۶	۰/۰۳	۰/۱۴	۳۱/۳۱	91-KB-BH6-76	۲۶/۷۷	۰/۰۳	۰/۰۹	۳۳/۱۲
91-KB-BH1-16	۱۶/۶۲	-	-	-	91-KB-BH6-77	۳۱/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۸	۲۷/۲۴
91-KB-BH1-17	۱۵/۷۳	-	-	-	91-KB-BH6-78	۲۳/۴۶	۰/۰۵	۰/۱۵	۳۴/۴۸
91-KB-BH1-18	۲۳/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۶	۳۱/۶۵	91-KB-BH6-79	۲۳/۶۶	۰/۰۴	۰/۳۴	۳۳/۴۴
91-KB-BH1-19	۴۰/۸۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۱۹/۹۷	91-KB-BH6-80	۱۸/۴۹	-	-	-
91-KB-BH1-20	۳۰/۳۶	۰/۰۲	۰/۱۱	۲۷/۵۲	91-KB-BH6-81	۲۳/۴۶	۰/۰۳	۰/۱۶	۳۳/۸۶
91-KB-BH1-21	۱۹/۵۹	-	-	-	91-KB-BH6-82	۲۲/۹	۰/۰۴	۵/۲۳	۲۶/۵
91-KB-BH1-22	۱۳/۸۵	-	-	-	91-KB-BH6-83	۲۱/۳۲	۰/۰۴	۴/۱۷	۲۴/۷۵
91-KB-BH1-23	۱۲/۴۶	-	-	-	91-KB-BH6-84	۱۶	-	-	-
91-KB-BH1-24	۱۷/۴۵	-	-	-	91-KB-BH6-85	۱۷/۹۴	-	-	-
91-KB-BH1-25	۱۹/۰۶	-	-	-	91-KB-BH6-86	۱۷/۱۱	-	-	-
91-KB-BH1-26	۱۴/۳۵	-	-	-	91-KB-BH6-87	۱۰/۴۸	-	-	-
91-KB-BH1-27	۳۰/۶۳	۰/۰۶	۰/۰۵	۲۶/۳۳	91-KB-BH6-88	۹/۱	-	-	-
91-KB-BH1-28	۳۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۱	۲۸/۰۴	91-KB-BH6-89	۱۶	-	-	-
91-KB-BH1-29	۱۰/۸	-	-	-	91-KB-BH6-90	۱۱/۳۱	-	-	-
91-KB-BH1-30	۱۵/۲۳	-	-	-	91-KB-BH7-175	۵۳/۵۴	۰/۰۹	۰/۳۹	۱۲/۴۱
91-KB-BH2-91	۵۷/۱۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۹/۰۱	91-KB-BH7-176	۴۱/۴	۰/۲۲	۰/۱۱	۲۱/۸۱
91-KB-BH2-92	۴۹/۹۵	۰/۵۵	۰/۱۹	۱۱/۹	91-KB-BH7-177	۶۳/۲۵	۱/۵۳	۰/۱۱	۳
91-KB-BH2-93	۵۱/۰۶	۰/۹۳	۰/۱۴	۱۱/۶۹	91-KB-BH7-178	۵۷/۴۸	۰/۹۸	۰/۲۴	۷/۷۷
91-KB-BH2-94	۵۲/۹۹	۱/۸۲	۰/۱۶	۱۱/۴۶	91-KB-BH7-179	۲۶/۴	۰/۰۴	۰/۰۷	۳۳/۶۹
91-KB-BH2-95	۴۸/۸۵	۰/۳۲	۰/۰۸	۱۵/۴۹	91-KB-BH7-180	۳۰/۸	۰/۴۲	۰/۵۵	۳۰/۴
91-KB-BH2-96	۵۵/۴۷	۰/۷۹	۰/۰۸	۱۰/۲۷	91-KB-BH7-181	۲۶/۴	۰/۱	۰/۱۴	۳۳/۶
91-KB-BH2-97	۵۴/۳۷	۰/۰۵	۰/۲۴	۱۳/۹	91-KB-BH7-182	۳۶/۰۲	۰/۱۳	۰/۶۷	۲۳/۷۶

ادامه جدول ۱-

Sample No.	Fet	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	Sample No.	Fet	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂
Abundances (wt. %)									
Detection limit (ppm)									
91-KB-BH2-98	۴۳/۸۸	۰/۰۵	۰/۹	۱۹/۶۶	91-KB-BH7-183	۳۳/۲۷	۰/۱۵	۰/۰۴	۲۷/۷
91-KB-BH2-99	۴۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۹۱	۱۹/۶۷	91-KB-BH7-184	۲۹/۴۲	۰/۱۷	۰/۱۵	۲۹/۷
91-KB-BH2-100	۴۴/۷۱	۰/۰۳	۰/۱۱	۲۰/۳۹	91-KB-BH8-174	۳۶/۹۸	۰/۰۶	۶/۵۱	۱۴/۵۷
91-KB-BH2-101	۲۹/۶۳	۰/۰۳	۰/۰۹	۳۱/۴۷	91-KB-BH9-169	۵۱/۰۶	۰/۹۸	۰/۱	۱۱/۱۲
91-KB-BH2-102	۲۷/۶	۰/۰۴	۲/۱۷	۲۷/۶۵	91-KB-BH9-170	۳۸/۰۸	۱/۵۳	۰/۱۸	۲۰/۱۶
91-KB-BH2-103	۲۲/۶۳	۰/۰۲	۱/۱۲	۳۵/۳	91-KB-BH9-171	۲۹/۸	۴/۲۵	۰/۱۲	۲۴/۱۷
91-KB-BH2-104	۲۴/۸۴	۰/۰۳	۱/۴۹	۳۱/۹۲	91-KB-BH9-172	۳۲/۵۶	۰/۸	۰/۱۱	۲۶/۶۲
91-KB-BH2-105	۱۶/۲۸	-	-	-	91-KB-BH9-173	۲۵/۱۱	۰/۴۵	۰/۰۵	۳۱/۴۷
91-KB-BH2-106	۲۹/۸	۰/۰۳	۰/۱۴	۲۸/۵۱	91-KB-BH11-156	۳۴/۵	۰/۰۵	۰/۰۸	۲۷/۹۱
91-KB-BH2-107	۱۷/۳۸	-	-	-	91-KB-BH11-157	۲۷/۸۷	۰/۰۵	۰/۱۹	۳۲/۵۶
91-KB-BH2-108	۴۹/۹۵	۰/۰۲	۰/۳۷	۱۲/۲۴	91-KB-BH11-158	۳۲/۰۱	۰/۰۴	۰/۱۵	۳۰/۱۵
91-KB-BH2-109	۲۸/۹۸	۰/۰۳	۰/۷۴	۲۷/۸۴	91-KB-BH11-159	۳۷/۵۳	۰/۰۳	۰/۰۸	۲۵/۱۶
91-KB-BH4-114	۲۸/۹۸	۱/۷۶	۳/۳۹	۲۵/۷۶	91-KB-BH11-160	۴۵/۲۶	۰/۰۹	۰/۲۶	۱۷/۵۹
91-KB-BH4-115	۳۰/۹۱	۲/۱۴	۳/۴۸	۲۲/۹۹	91-KB-BH11-161	۳۱/۱۸	۰/۰۳	۰/۱۱	۲۹/۲۴
91-KB-BH4-116	۲۴/۸۴	۰/۸۳	۲/۱۵	۲۹/۹۲	91-KB-BH11-162	۳۲/۸۴	<	۰/۲۲	۲۵/۷۶
91-KB-BH4-117	۳/۸۶	-	-	-	91-KB-BH11-163	۲۰/۷	۰/۰۲	۰/۲۲	۳۴/۰۷
91-KB-BH4-118	۲۱/۸	۰/۴۱	۳/۰۵	۳۲/۰۹	91-KB-BH11-164	۴۷/۷۴	۰/۳۹	۰/۰۸	۱۴/۹۷
91-KB-BH4-119	۲۲/۶۳	۰/۴۴	۳/۵۳	۳۱/۴۵	91-KB-BH12-165	۳۱/۹	۰/۹۲	۰/۱۲	۲۱/۴
91-KB-BH4-120	۲۴/۵۶	۰/۶	۲/۲۳	۳۰/۰۶	91-KB-BH12-166	۳۱/۹	۱/۴۶	۰/۰۴	۲۰/۹۶
91-KB-BH4-121	۲۶/۷۷	۰/۳۹	۲/۴۷	۲۹/۷۳	91-KB-BH12-167	۳۶/۷	۰/۵۲	۰/۰۹	۱۷/۹۷
91-KB-BH4-122	۱۶/۸۳	-	-	-	91-KB-BH12-168	۳۰/۹۱	۱/۴۴	۰/۱	۱۹/۰۷
91-KB-BH4-123	۲۰/۱۴	۰/۷۴	۰/۳۴	۳۱/۵۵	91-KB-BH13-149	۳۵/۰۵	۲/۴۴	۰/۲۲	۱۸/۵۳
91-KB-BH4-124	۲۴/۵۶	۰/۹۵	۰/۵	۲۸/۸۳	91-KB-BH13-150	۳۷/۸۱	۱/۰۶	۰/۲۵	۱۷/۴۴
91-KB-BH4-125	۲۷/۰۴	۰/۵۹	۰/۳۳	۲۹/۱۲	91-KB-BH13-151	۲۸/۴۲	۳/۲۵	۰/۱۶	۲۱/۳۸
91-KB-BH5-31	۳۱/۰۲	۰/۹۵	۴/۰۸	۲۳/۴۶	91-KB-BH13-152	۴۱/۴	۰/۷	۰/۱۳	۱۵/۴۳
91-KB-BH5-32	۲۵	-	-	-	91-KB-BH13-153	۳۷/۸۱	۰/۵۲	۰/۱۷	۱۸/۷۶
91-KB-BH5-33	۲۱/۳۲	۱/۱۵	۱/۳۴	۳۰/۱۱	91-KB-BH13-154	۳۶/۴۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۱۹/۴۷
91-KB-BH5-34	۲۷/۸۷	۰/۷۶	۲/۴۹	۲۶/۱۷	91-KB-BH13-155	۲۸/۹۸	۰/۰۳	۰/۰۸	۲۳/۴۳
91-KB-BH5-35	۲۰/۲۲	۰/۷۹	۲/۷۱	۳۳/۱۳	91-KB-BH15-144	۳۰/۶۳	۰/۴۲	۰/۲۸	۲۲/۵۸

۶- مطالعات ژئوفیزیکی

۶-۱. نقشه پسماند شدت کل میدان مغناطیسی (Residual Magnetic)

(Anomaly Map)

همچنین یک زون ناهنجار کوچک‌تر در بخش شمالی محدوده قابل مشاهده است. امتداد عمومی ناهنجاری‌ها، شرقی-غربی و شیب آنها به سمت جنوب است. مقایسه نقشه پسماند شدت کل میدان مغناطیس با نقشه زمین‌شناسی نشان می‌دهد که موقعیت ناهنجاری‌های مغناطیسی با موقعیت توده‌های نفوذی مشاهده شده در سطح، در بخش‌های مرکزی منطبق است. این انطباق در بخش‌های شمالی کانسار، کمتر مشاهده می‌شود و در قسمت‌های جنوبی این همخوانی وجود ندارد که احتمالاً ناشی از حضور توده‌های نفوذی پنهان در بخش‌های زیرسطحی است.

در محدوده مورد بررسی، با استفاده از داده‌های به دست آمده از ۱۰۰۰۰ نقطه برداشت صحرایی (مهندسین مشاور پیچاب کانسار، ۱۳۹۱)، پس از اعمال تصحیحات لازم، نقشه شدت کل میدان مغناطیسی، طی این تحقیق تهیه و ترسیم شده است. حداقل میدان مغناطیسی در این نقشه با مقدار میدان ۱۴۲۱- نانوتسلا و حداکثر میدان با مقدار ۲۷۵۹۱ نانوتسلا مشاهده می‌شود که این اختلاف ناشی از وجود دو قطبی‌های مغناطیسی است. در نقشه پسماند شدت کل میدان مغناطیسی، یک زون ناهنجاری با شدت بالا در بخش‌های مرکزی کانسار مشاهده می‌شود.

ناهنجاری‌های بخش شمالی، مرکزی و غربی منطقه کوه بابا به ترتیب ۲۵۰، ۴۵۰ و ۲۵۰ متر است. همچنین، بخش‌های با ناهنجاری‌های به شدت پایین در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود که به احتمال فراوان با زون‌های گسلی و یا تبدیل مگنتیت به هماتیت مرتبط هستند. با توجه به تغییرات ایجاد شده، مقدار تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی نیز در نقشه برگردان به قطب نسبت به نقشه شدت کل تغییر می‌کند که در مقیاس رنگی کنار نقشه مربوطه نشان داده شده است (شکل ۹-الف).

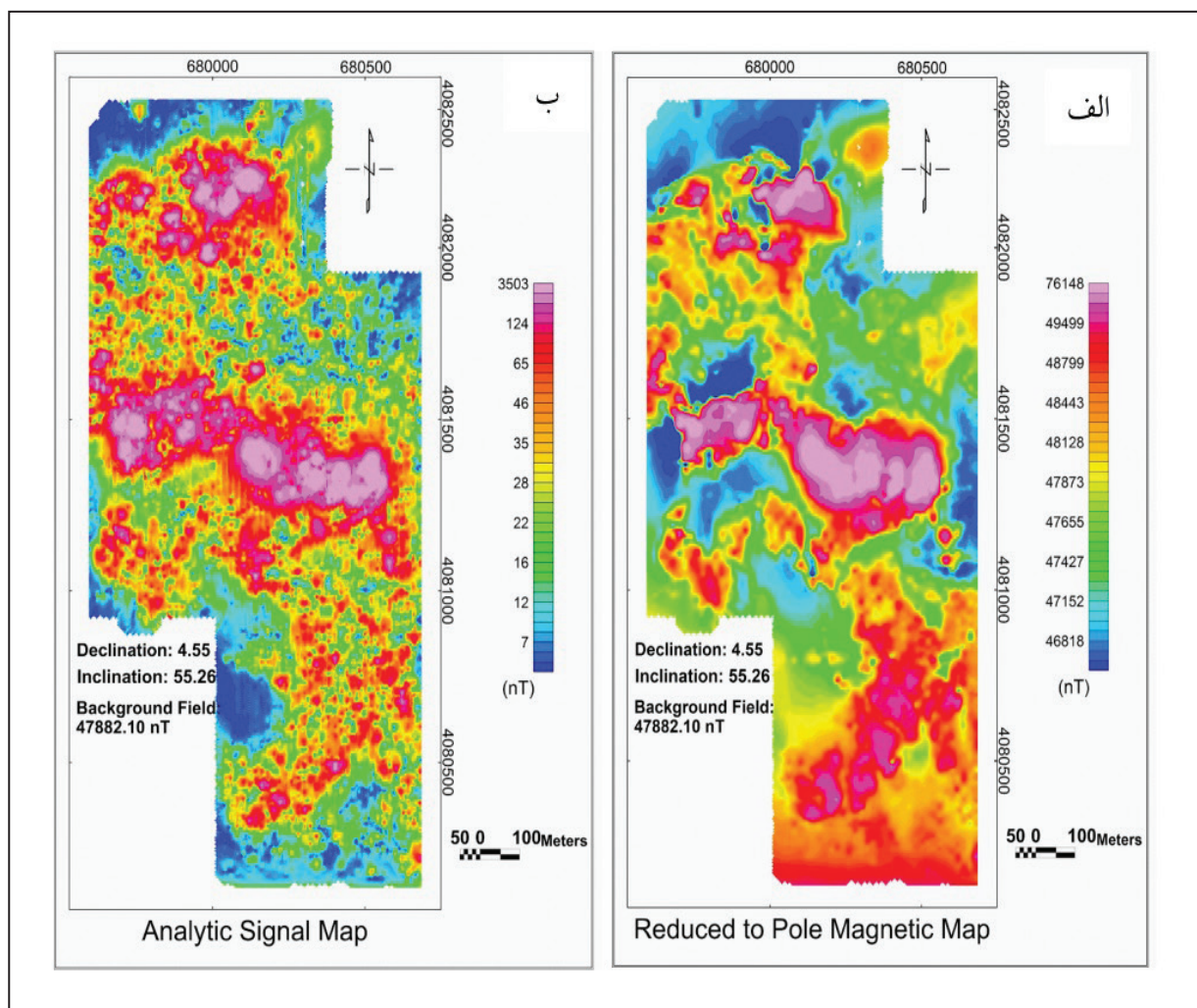
۳-۶. نقشه سیگنال تحلیلی یا گرادبان کل (Analytic Signal Map)

در نقشه سیگنال تحلیلی، بیشترین تغییرات منطبق بر ناهنجاری‌های نقشه برگردان به قطب است (شکل ۹-ب)، به گونه‌ای که نواحی دارای تغییرات زیاد (منفی یا مثبت)، دارای بیشترین مقادیر هستند. در این نقشه، دو روند کلی مشاهده می‌شود. روند تقریباً شمال شرقی-جنوب غربی در ناهنجاری بخش شمالی و روند تقریباً شرقی-غربی در ناهنجاری بخش مرکزی قابل تشخیص است. در این نقشه که با هدف مشخص شدن لبه‌های ناهنجاری ایجاد شده است، ابعاد ناهنجاری شمالی ۳۰۰ در ۲۰۰ متر و ناهنجاری مرکزی ۵۵۰ در ۱۷۰ متر است.

۲-۶. نقشه برگردان به قطب (Reduced to Pole Magnetic Map)

استفاده از فیلتر برگردان به قطب، شرایط بسیار مناسبی را جهت شناسایی محل و موقعیت واقعی ناهنجاری‌ها در یک محدوده فراهم می‌کند (Clark, 1997). با توجه به تأثیر زاویه میل و انحراف مغناطیسی در انحراف ناهنجاری‌های مغناطیسی نسبت به منبع ایجاد کننده خود، باید فیلتر مربوط به تصحیح زاویه میل و انحراف منطقه، بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال شود (Nakatsuka and Okuma, 2006; Nabighian et al., 2005). در این حالت، ناهنجاری‌ها به صورت عمودی در بالای منبع ایجاد کننده خود قرار گرفته و در نهایت، بر اساس داده‌های مغناطیسی انتقال داده شده به قطب، تفسیر اصلی انجام می‌شود (Arkani and Urquhart, 1990; Gunn et al., 1997).

مقادیر زاویه میل و انحراف مغناطیسی، منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۵۵/۴۳ و ۴/۹۲ درجه است. با بررسی نقشه برگردان به قطب (شکل ۹-الف) و مقایسه آن با نقشه پسماند شدت کل میدان مغناطیسی، میزان جابه‌جایی ناهنجاری‌ها در نقشه تهیه شده مشاهده می‌شود. ناهنجاری اصلی که با روند شرقی-غربی در محدوده کانسار واقع شده است، به سمت شمال جابه‌جایی نشان می‌دهد. طول



شکل ۹-الف) نقشه برگردان به قطب؛ ب) نقشه سیگنال تحلیلی کانسار آهن کوه بابا که نشان‌دهنده ابعاد ناهنجاری شمالی (۳۰۰ × ۲۰۰) و مرکزی (۵۵۰ × ۱۷۰) است.

۴-۶. نقشه مشتق اول قائم (First Vertical Derivative Map)

فیلتر مشتق اول قائم (گرادیان عمودی)، اثر ناهنجاری‌های عمیق با بسامد پایین را حذف می‌کند و تأثیر منابع کم عمق با بسامد بالا را به نمایش می‌گذارد. در نتیجه اثرات ناحیه‌ای و تداخل بین ناهنجاری‌های مجاور از بین می‌رود (Cooper and Cowan, 2004; Ford et al., 2007). شکل ۱۰- الف تغییرات شدت میدان در جهت قائم را نشان می‌دهد که طی آن به منظور آشکارسازی ناهنجاری‌های سطحی‌تر، اثر ناهنجاری‌های عمیق حذف شده است. بر این اساس، بخش عمده ناهنجاری‌ها، اغلب یکنواخت نیستند. وجود زون‌های دارای مقادیر منفی در بین ناهنجاری‌های با مقادیر مثبت، مبین حضور زون‌های اکسید شده‌ای است که مقادیری هماتیت به همراه مگنتیت دارند. انطباق نسبی ناهنجاری‌ها با رخنمون‌های موجود در منطقه کوه بابا نشان می‌دهد که روند شرقی- غربی ناهنجاری‌ها (شکل ۱۰- الف) نیز مانند نقشه برگردان به قطب قابل تشخیص است. افزون بر این، در نقشه گرادیان عمودی با توجه به حذف اثر میدان مغناطیسی حاصل از توده‌های عمیق‌تر، ناهنجاری‌های کوچک‌تری و ضعیف‌تری نسبت به نقشه برگردان به قطب در بعضی از نقاط قابل تشخیص است. این ویژگی در بخش شمال تا شمال شرقی ناهنجاری مرکزی قابل مشاهده است (شکل ۱۰- الف).

۷- مطالعات دورسنجی

در این بخش، به منظور تحلیل روند دگرسانی‌های گرمابی و شناسایی مناطقی با احتمال کانی‌سازی آهن در اطراف محدوده اکتشافی کوه بابا، تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در مقیاس ناحیه‌ای تهیه شده است. سپس، پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای مذکور، با استفاده از روش‌های تصحیح هندسی، رادیومتریک (به روش IARR) و اتمسفری در محیط نرم‌افزارهای ENVI 5.3 و ESA- Snap 3.0 اصلاح شده است.

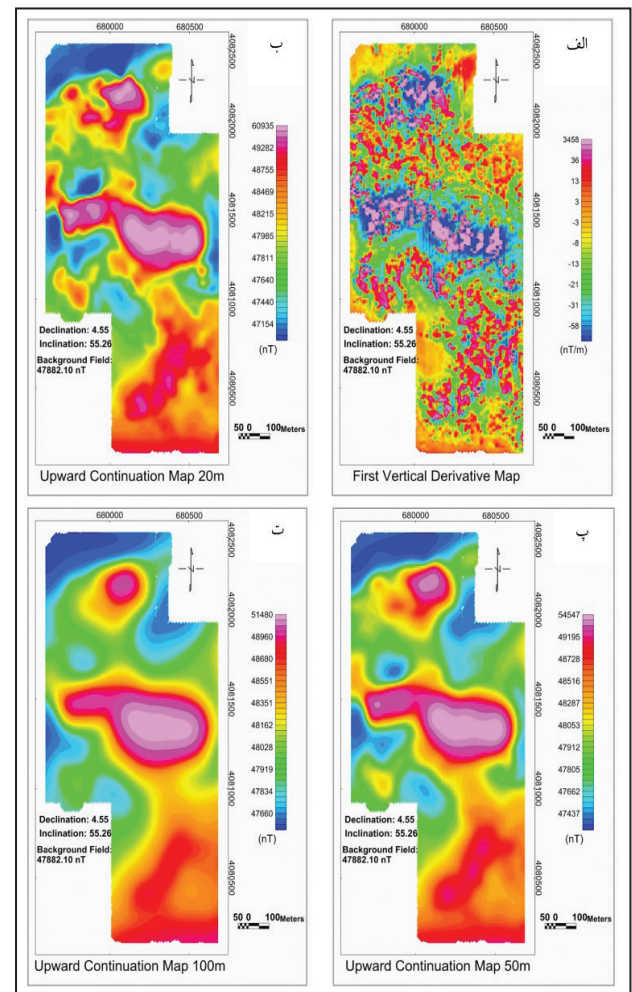
۷-۱. پردازش تصاویر به روش MTMF

روش‌های مختلفی در تحلیل تلفیقی برای تشخیص طیفی کانی‌ها در هر پیکسل به کار می‌رود (Glenn et al., 2005; Mundt et al., 2005). یکی از تکنیک‌هایی که به‌طور دقیق طیف مورد نظر را از زمینه آن جدا می‌کند، کاربرد الگوریتم MTMF است (Harris and Bryant, 2009). در این روش، با معرفی منحنی طیفی یک هدف خاص، فراوانی این هدف تعیین می‌شود. در حقیقت، نوع خاصی از تحلیل طیفی تلفیقی بر پایه روش‌های پردازش سیگنال شناخته شده است که می‌تواند انواع پوشش‌ها را بر مبنای ویژگی‌های طیفی آنها از یکدیگر متمایز کند (Harris and Bryant, 2009).

روش MTMF شامل سه مرحله اصلی است: ۱) اعمال تبدیل کسر کمترین نوفه MFN بر روی داده‌های انعکاسی (Green et al., 1988)، ۲) فیلتر تطبیقی برای تخمین فراوانی، ۳) تصحیح بخش ترکیبی (MT) mixture tuning برای مشخص کردن پیکسل‌های دارای خطای قطعی (Harris and Bryant, 2009).

در پردازش تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 منطقه کوه بابا، از باندهای طیفی واقع در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) و کوتاه (SWIR) کانی‌های کانولینیت، کلریت، هماتیت و کواتز کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استفاده شده است. سپس منحنی طیفی این کانی‌ها بر روی تصویر تصحیح شده بازسازی و با استفاده از تکنیک MTMF در شناسایی دگرسانی‌های پروپیلیتیک، آرزلیک، سیلیسی و نیز بازسازی اکسیدهای آهن به کار گرفته شد (شکل‌های ۱۱- الف و ب).

همان‌طور که در شکل ۱۱- الف نشان داده شده است، دگرسانی پروپیلیتیک بخش قابل توجهی از واحدهای سنگی را در قسمت‌های شمال شرق و مرکز و بخش‌های کوچک‌تری از غرب و جنوب تحت تأثیر قرار داده است. دگرسانی آرزلیک و اکسیدهای آهن نیز عمدتاً در بخش شرقی منطقه با روندی شمالی- جنوبی دیده می‌شوند (شکل ۱۱- ب) و در برخی نقاط با دگرسانی پروپیلیتیک همپوشانی دارند. به نظر می‌رسد، همراهی دگرسانی‌های آرزلیک و پروپیلیتیک با اکسیدهای آهن در بخش شرقی محدوده مطالعاتی، مشابه الگویی باشد که در مطالعات صحرائی این محدوده نیز مشاهده شده است. روند گسل‌ها اغلب شمال شرقی- جنوب غربی



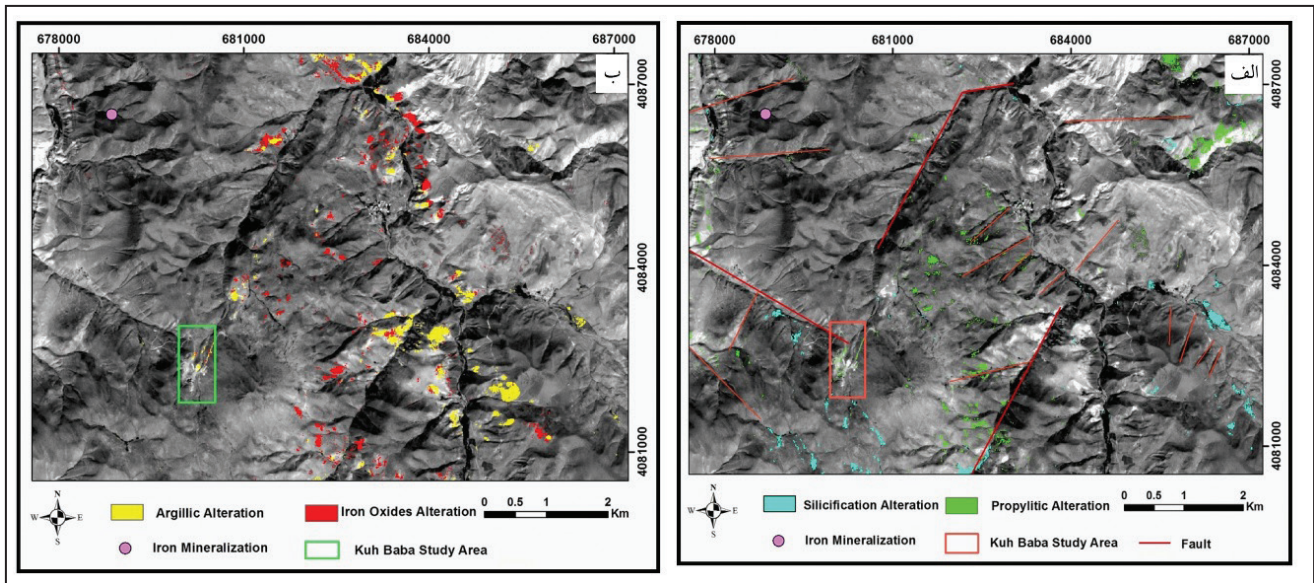
شکل ۱۰- الف) نقشه مشتق اول قائم؛ ب) نقشه ادامه فراسوی ۲۰ متر؛ پ) نقشه ادامه فراسوی ۵۰ متر؛ ت) نقشه ادامه فراسوی ۱۰۰ متر کانسار آهن کوه بابا.

۴-۵. نقشه‌های ادامه فراسو (Upward continuation map)

فیلتر ادامه فراسو اثر ناهنجاری‌های با طول موج کوتاه را حذف و دامنه بی‌هنجاری را تضعیف می‌کند و اختلالات موجود را کاهش می‌دهد. بنابراین، این فیلتر مانند یک روش پایین‌گذر عمل می‌کند (Tarlowski et al., 1997). فیلتر ادامه

شمالی- جنوبی است و به نظر می‌رسد که این روند با پراکندگی دگرسانی‌های

آرژلیک و اکسیدهای آهن ارتباط معناداری داشته باشد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- الف) نتایج حاصل از پردازش تصاویر به روش MTMF که پهنه‌های دگرسانی پروپیلیتیک و سیلیسی به ترتیب با رنگ‌های سبز و آبی نشان داده شده‌اند؛ ب) پهنه‌های دگرسانی آرژلیک و اکسیدهای آهن که به ترتیب با رنگ‌های زرد و قرمز نشان داده شده است.

۸- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارتند از:

- بر اساس شواهد صحرایی و مطالعات میکروسکوپی، احتمالاً تزریق توده‌های نفوذی مافیک تا حد واسطه به درون توالی‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن عامل اصلی کانی‌سازی در منطقه کوه باباست.
- دگرسانی‌های گرمابی در محدوده کوه بابا شامل دگرسانی اپیدوتی، سریسیتی، اکتینولیتی، سوسوریتی، آرژلیک و کلریتی ضعیف هستند. دگرسانی‌های گرمابی غالب به تدریج از دگرسانی‌های اپیدوتی، کلریتی و سریسیتی در بخش‌های داخلی به دگرسانی‌های کربناتی و آرژلیک در بخش‌های خارجی و پیرامونی کانسار تغییر می‌کند.
- مگنتیت مهم‌ترین کانی آهن در کانسار کوه بابا محسوب می‌شود که به صورت بافت‌های توده‌ای، رگه- رگچه‌ای، برشی و پراکنده قابل مشاهده است.
- در محدوده کانسار، دو ناهنجاری مغناطیسی با وسعت بالا دیده می‌شود، که یکی در شمال محدوده و دیگری در بخش مرکزی محدوده واقع هستند. روند هر دو ناهنجاری تقریباً شرقی- غربی است و خود از ناهنجاری‌های کوچک تری تشکیل شده‌اند. مقایسه نقشه زمین‌شناسی کانسار با ناهنجاری‌های مغناطیسی نشان می‌دهد که بین توده‌های نفوذی و ناهنجاری مرکزی، همخوانی وجود دارد. نتایج تجزیه

نمونه‌های ژئوشیمیایی از گمانه‌های اکتشافی کانسار آهن کوه بابا نیز، وجود آنومالی آهن را در ناهنجاری مرکزی نشان می‌دهد. با بررسی نقشه‌های ادامه فراسوی ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ متر مشخص می‌شود که کانی‌سازی آهن حداقل تا عمق ۱۰۰ متر ادامه یافته است.

- با آشکارسازی زون‌های دگرسانی محدوده کوه بابا، با استفاده از روش MTMF بر روی داده‌های تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2، پهنه‌های دگرسانی پروپیلیتیک، آرژلیک، سیلیسی و اکسیدهای آهن شناسایی و از یکدیگر تفکیک شدند. با بررسی نتایج به دست آمده از مطالعات دورسنجی و مقایسه آن با الگوی دگرسانی کانسار کوه بابا، به نظر می‌رسد که بخش شرقی کانسار برای مطالعات اکتشافی در آینده، امیدبخش‌تر باشد.

سپاسگزاری

نگارندگان این مقاله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه و شرکت سنگ آهن کوه بابا برخوردار بوده‌اند، لذا بدین وسیله نهایت سپاس و قدردانی خود را از مسئولین مربوطه اعلام می‌دارند. نگارنده، همچنین از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌کند.

کتابنگاری

- آفاباتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۳ ص.
- باباخانی، ع. و قلمقاش، ج.، ۱۳۷۵- نقشه زمین‌شناسی تخت سلیمان به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حافظ دریایی، م.، عابدینی، ع.، علی‌یاری، ف. و کلاگری، ع.ا.، ۱۳۹۵- زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی آهن در کانسار کوه بابا، جنوب هشتگرد، کمان ماگمایی ارومیه- دختر: تپ ماگمایی- هیدروترمال یا IOCG؟، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، زنجان، ایران.
- شرکت زراذین گستر، ۱۳۷۹- گزارش اکتشاف ژئوشیمیایی زون سندنج- سیرجان در جنوب بخش چارواپماق هشتگرد، سازمان صنایع و معادن استان آذربایجان شرقی.
- شرکت مهندسین مشاور چکان، ۱۳۷۶- گزارش پی‌جویی منطقه‌ای و پتانسیل‌یابی مواد معدنی شهرستان هشتگرد، اداره کل معادن و فلزات آذربایجان شرقی.
- عابدینی، ع.ا. و قلمقاش، ج.، ۱۳۸۷- گزارش مقدماتی اکتشاف آهن در کوه بابا، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کلاگری، ع.ا.، ۱۳۸۹- اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، چاپ دوم، ویراستاری جدید، چاپخانه دانشگاه تبریز، ۴۸۵ ص.

مغفوری، س.، موحدتیا، م. و حسین‌زاده، م.، ۱۳۹۴- زمین‌شناسی، کانه‌زایی، ساخت و بافت، توالی پاراژنتیکی کانسار آهن تیپ IOA کوه بابا، جنوب هشتگرد، شمال غرب ایران، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، تهران، ایران.
 مهندسین مشاور پیچاب کانسار، ۱۳۹۱- گزارش اکتشاف در محدوده کانسار آهن کوه بابا، وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۹۱ ص.

References

- Aghanabati, A., 1998- Major sedimentary and structural units of Iran (map). *Geosciences* 7: 29- 30.
- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103: 983- 992.
- Arkani, H. J. and Urquhart, W. E. S., 1990- Reduction to pole of North American magnetic anomalies. *Geophysics* 55: 218- 225.
- Blakely, R. J., 1996- *Potential Theory in Gravity and Magnetic Application*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 441 pp.
- Childress, T. M., Simon, A. C., Day, W. C., Lundstrom, C. C. and Bindeman, I. N., 2016- Iron and Oxygen Isotope Signatures of the Pea Ridge and Pilot Knob Magnetite-Apatite Deposits, Southeast Missouri, USA. *Economic Geology* 111: 2033- 2044.
- Clark, D. A., 1997- Magnetic petrophysics and magnetic petrology: Aids to geological interpretation of magnetic surveys. *Journal of Australian Geology and Geophysics* 17 (2): 83- 103.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2004- Filtering using variable order vertical derivatives. *Computers and Geosciences* 30: 455- 459.
- Ford, K., Keating, P. and Thomas, M. D., 2007- Overview of geophysical signatures associated with Canadian ore deposits. *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication* 5: 939- 970.
- Glenn, N. F., Mundt, J. T., Weber, K. T., Prather, T. S., Lass, L. W. and Pettingill, J., 2005- Hyperspectral data processing for repeat detection of Leafy Spurge. *Remote Sensing of Environment* 95: 399- 412.
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P. and Craig, M. D., 1988- A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26: 65- 74.
- Gunn, P. J., Madment, D. and Miligan, P. R., 1997- Interpretation of aeromagnetic data in area of limited outcrop. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17 (2): 175- 185.
- Harris, A. and Bryant, R. G., 2009- A multi-scale remote sensing approach for monitoring northern Peatland hydrology: Present Possibilities and Future Challenges. *Journal of Environment Management* 90: 2178- 2188.
- Huang, X. W., Zhou, M. F., Beaudoin, G., Gao, G. F., Qi, L. and Lyu, C., 2018- Origin of the volcanic-hosted Yamansu Fe deposit, Eastern Tianshan, NW China: constraints from pyrite Re-Os isotopes, stable isotopes, and in situ magnetite trace elements. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0794-4>.
- Montreuil, J. F., Corriveau, L. and Grunsky, E. C., 2013- Compositional data analysis of hydrothermal alteration in IOCG systems, Great Bear magmatic zone, Canada: to each alteration type its own geochemical signature. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 13: 229- 247.
- Mundt, J., Glenn, N. F., Weber, K. T., Prather, T. S., Lass, L. W. and Pettingill, J., 2005- Discrimination of Hoary Cress and determination of its detection limits via hyperspectral international journal of remote sensing image processing and accuracy assessment techniques. *Remote Sensing of Environment* 96: 509- 517.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D. and Ruder, M. E., 2005- The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics* 70 (6): 33- 61.
- Nakatsuka, T. and Okuma, S., 2006- Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. *Exploration Geophysics* 37 (1): 121- 128.
- Robinson, E. S. and Coruh, C., 2005- *Basic exploration geophysics*. John Wiley and Sons, Inc. Press, 567 pp.
- Rojas, P. A., Barra, F., Reich, M., Deditius, A., Simon, A., Uribe, F., Romero, R. and Rojo, M., 2018- A genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0777-x>.
- Sabins, F., 1999- Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14: 157- 183.
- Tarlowski, C., Gunn, P. J. and Mackey, T., 1997- Enhancements of the magnetic map of Australia. *Journal of Australia Geology and Geophysics* 17 (2): 77- 82.

Studies of remote sensing, geology, mineralization, geochemistry, and geophysics in the Kuh-Baba iron deposit, south of Hashtroud, NW Iran

M. Hafez Darbani¹, A. Abedini², F. Aliyari^{3*} and A. A. Calagari⁴

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

³Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

⁴Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 2018 February 01

Accepted: 2018 July 07

Abstract

The Kuh- Baba iron ore deposit is located in ~70 km south of Hashtroud, East- Azarbaijan province, NW Iran. The deposit is situated in northwestern part of the Urumieh- Dokhtar magmatic arc, and is genetically affiliated with intrusive bodies of gabbroic to dioritic composition. The lithologic units cropped out around this deposit include Oligo- Miocene volcanic-sedimentary rocks, Pliocene intrusive rocks, and Pliocene dacitic domes. The principal host rocks for the Fe mineralization include units of gabbro- norite, pyroxene hornblende gabbro- norite, and monzo- diorite. The infiltration of Fe- rich hydrothermal fluids into the host rocks caused the development of widespread alteration zones manifested by the presence of green silicate minerals such as actinolite, chlorite, and epidote, and of iron mineralization. Remote sensing investigations (using Sentinel satellite images) display the presence of lineaments, NE- SW trending fault structures, and various alteration zones. The dominant hydrothermal alteration in inner parts of the deposit is mainly propylitic (epidote, chlorite, sericite) which according to changes from mafic to intermediate host rock composition gradually changes to argillic outward the peripheral parts. Based upon field relations and microscopic examinations, the ores show massive, vein/veinlet, brecciated, and disseminated textures. In the propylitic zone, magnetite is accompanied by epidote and actinolite. The geochemical studies revealed that the FeT content in the diamond drill core samples varies from 3.85 wt% to 63.2 wt%. Ground magnetic survey was conducted in order to attain subsurface information, estimate the extent of intrusive bodies associated with mineralization, and determine the suitable drilling sites. Also, the maps of total magnetic field, reduced to pole magnetic, analytic signal, first vertical derivative, and upward continuation were prepared in an attempt to identify the potential deep and shallow subsurface mineralized zones. The obtained results show that two anomalies, one in the north and the other in the central parts of the study area, were recognized which almost correspond with the location of the intrusive bodies.

Keywords: Magnetite mineralization, Ground magnetic survey, Sentinel satellite images, Kuh-Baba, Hashtroud, Iran.

For Persian Version see 3 to 14

*Corresponding author: F. Aliyari; E-mail: F.aliyari@uut.ac.ir