

کاربرد روش مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف کانه‌زایی مس و طلا در محدوده اکتشافی پلی‌متال باشماق هشترود

امیر امیرپور اصل میان‌دوآب^۱، قهرمان سهرابی^{۲*} و محمد نصیری گنجینه‌کتاب^۳

^۱ دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۲ دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۳ کارشناس ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۰۵)

چکیده

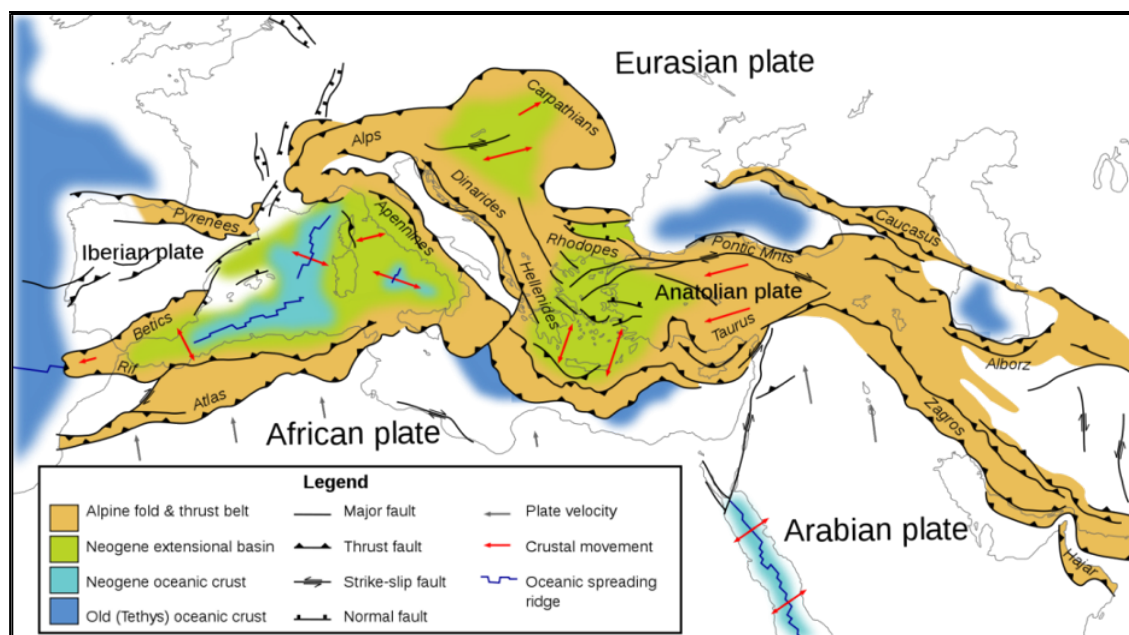
اثرات مغناطیسی سنگ‌ها ناشی از ترکیب مغناطیس القایی و بازماند موجود در آنهاست که این اثرات موجب ایجاد آشفتگی در میدان مغناطیسی زمین در محل حضور آن سنگ‌ها می‌شود. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی یا در اثر فرایندهای آتشفشانی یا رسوبی اولیه و یا در اثر فرایندهای ثانویه مانند دگرسانی‌ها ایجاد می‌شوند که هر دو این پدیده‌ها موجب تولید یا از بین رفتن کانی‌های مغناطیسی در محیط می‌شوند. در اکتشاف کانسارها، فرایندهای ثانویه تأثیرگذار بر سنگ‌ها که در آن سنگ میزبان یا ذخیره کانه‌زایی مرتبط با سامانه گرمایی (هیدروترمال) باشند، از اهمیت خاصی برخوردارند. کاربرد روش‌های اکتشافی زمین‌محیطی در این مورد به صورت پی‌جویی سیگنال مغناطیسی مرتبط با خود ماده معدنی است و یا مرتبط با سنگ‌های باطله همراه کانه‌زایی که می‌تواند به‌منزله یک روش غیرمستقیم برای اکتشاف کانسارهای مد نظر مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه نتایج حاصل از کاربرد روش مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف کانسار مس و طلا در محدوده پلی‌متال باشماق واقع در شهرستان هشترود استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه روش ژئوفیزیکی معمول برای اکتشاف کانسارهای مس، روش ژئوالکتریکی (قطبش القایی و مقاومت‌سنجی) می‌باشد، روش مغناطیس‌سنجی غالباً به‌عنوان یک روش غیرمستقیم اکتشاف کانه‌های مذکور مطرح می‌شود. بعد از مطالعات زمین‌شناختی مقدماتی و تعیین محل رخنمون‌ها و روند تقریبی کانه‌زایی، شبکه داده برداری شامل ۳۱ خط داده‌برداری شرقی - غربی به فاصله ۲۰ متر و فاصله نقاط ۱۰ متر طراحی و اجرا شد. البته حین داده‌برداری فاصله نقاط اطراف محل مرتبط با کانه‌زایی گاه تا ۲ متر نیز کاهش یافته است. در کل حدود ۳۰۰۰ نقطه داده‌ای برداشت شد. در مرحله پردازش، بعد از حذف اثر تغییرات روزانه، میدان صافی‌های کاهش به قطب، حذف اثر روند مغناطیسی و ادامه فراسو برای تفسیر بر روی نقشه انجام گرفته است. در نتیجه این برداشت‌ها، یک سیگنال منفی به طول تقریبی ۷۰۰ متر با شدت کم و روند شمال‌غربی - جنوب شرقی منطبق بر شواهد و رخنمون‌های کانه‌زایی مس - طلا به همراه چند سیگنال مثبت مرتبط با کانه‌زایی آهن (اولیژیست و مگنتیت) مشخص شد. با توجه به اینکه سیگنال‌های مثبت و منفی ظاهر شده حالت دوقطبی نداشته و از هم مجزا هستند، از صافی‌های مشتق افقی از جمله سیگنال تحلیلی استفاده نشد. باید توجه داشت آنچه به‌عنوان سیگنال منفی در این نقشه ظاهر شده است نشان‌دهنده زون خردشده میزبان کانه‌زایی مس و طلاست و باید برای تکمیل عملیات اکتشاف، داده‌برداری به روش IP انجام یابد. در مرحله مدل‌سازی نیز با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار ژئوسافت و با توجه به نتایج اعمال صافی ادامه فراسو، مدلی سه‌بعدی از زون شکسته دربرگیرنده کانسار مس ارائه شده است. نتیجه قابل برداشت از این مطالعه این است که انجام مطالعات نسبتاً ارزان مغناطیس‌سنجی در محدوده‌های مس خصوصاً در کانه‌زایی‌های مرتبط با شکستگی‌ها، با ارائه تصویری از گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه زمینه را برای به‌کارگیری بهینه روش‌های تکمیلی از جمله روش قطبش القایی فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی مس، ژئوفیزیک، مغناطیس‌سنجی، پلی‌متال باشماق

۱ مقدمه

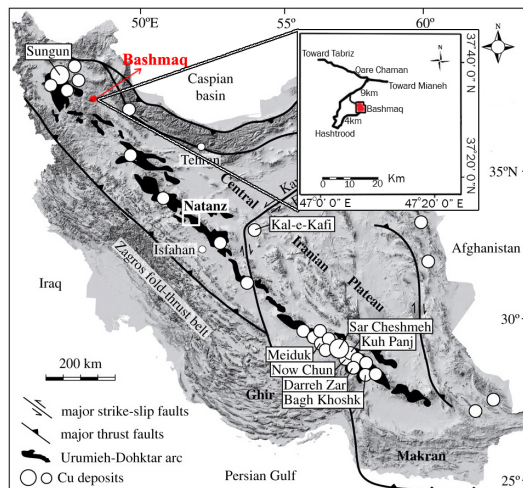
NE-SW می‌باشد (سهرابی، ۱۳۹۴). این وضعیت نشان‌دهنده شمالی-جنوبی بودن تنش اصلی مؤثر بوده است. در منطقه آذربایجان کانه‌زایی مس و طلا به اشکال مختلف (افشان، رگه‌ای و گاهی اسکارنی) رخ داده که در منطقه باشماق نوع رگه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. کمربند مس آلپ-همیالیا از کوه‌های آلپ در غرب اروپا شروع شده و بعد از عبور از کشورهای اروپای شرقی وارد ایران شده و از جنوب شرق به سمت افغانستان، پاکستان و هندوستان امتداد می‌یابد و به کوه‌های همیالیا ختم می‌شود (شکل ۱). بخش‌های غنی ذخایر مس ایران از منطقه آذربایجان در شمال غربی شروع شده و تا سیستان در جنوب شرقی ادامه دارد. کانسارهای مس-مولیبدن سونگون، بالوجه، مزرعه، انجرد و مسجدداغی جزو مهم‌ترین ذخایر و اندیس‌های مس در ایران محسوب می‌شوند که در شمال‌غرب آذربایجان قرار گرفته‌اند (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین). در شکل ۲ موقعیت محدوده مورد مطالعه نسبت به معادن مهم مس ایران نشان داده شده است.

منطقه آذربایجان بخشی از کمربند ماگمایی-متالورژیکی پونتید-قفقاز کوچک-البرز غربی بوده (سهرابی، ۱۳۹۴) که در ایالت متالورژیکی آلپ-همیالیا واقع شده است. ناحیه مورد مطالعه بر اساس زون‌بندی‌های زمین‌شناختی ایران در زون البرز غربی-آذربایجان (افتخارنژاد، ۱۹۷۵) و ایران مرکزی (آق‌ناباتی، ۱۳۸۳) قرار می‌گیرد. واحدهای کرتاسه (آهک و شیل)، نهشته‌های فیلیشی و ولکانیک‌های پالتوسن و اتوسن گسترده‌ترین واحدهای چینه‌شناسی در این منطقه می‌باشند. آثار فعالیت‌های آتشفشانی شدید اتوسن به همراه داسیت‌های میوسن وسعت زیادی از منطقه را پوشانده است. بر اثر حرکات کوه‌زایی فاز پیرنه در آغاز الیگوسن، توده‌های نفوذی متعدد به داخل سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی اتوسن و واحدهای کرتاسه نفوذ کرده و موجب چین‌خوردگی، دگرسانی و کانه‌زایی در آنها شده است. در محدوده مورد مطالعه روند عمومی اکثر ساختارهای زمین‌شناختی (چین‌ها، گسل‌ها، دایک‌ها و رگه‌های معدنی) NW-SE و گاهی E-W و به‌ندرت



شکل ۱. موقعیت ایران در کمربند جهانی مس یا کمربند آلپ-همیالیا (مرجع: www.Wikipedia.org).

سیلیسی-کربناتی بوده و حاوی کانه‌های سولفیدی مس (کالکوپیریت، کالکوسیت)، کربنات‌های مس (مالاکیت، آزوریت)، سیلیکات مس (کریزوکولا) و کانه‌های آهن از نوع اولیژیست و هیدرواکسیدهای آهن (لیمونیت، گوتیت) با محصول جانبی طلا می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۲. موقعیت محدوده نسبت به معادن مس ایران با پیکان قرمز به همراه نقشه راه‌های دسترسی (economicgeology.org).

۲ روش تحقیق

۲-۱ استفاده از مغناطیس‌سنجی در اکتشاف مس

روش مغناطیس‌سنجی قدیمی‌ترین روش ژئوفیزیک اکتشافی است که اساس آن اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین است. اکتشاف کانسارهای آهن، مس‌های نوع اسکارنی، نیکل و آزبست به دلیل همراهی با کانه‌های مغناطیسی، با برداشت‌های مغناطیس‌سنجی به راحتی میسر است (هالیدی و کوک، ۲۰۰۷؛ وان کرک وورت و همکاران، ۲۰۰۹). حتی برخی این روش را برای اکتشاف طلای پلاستی به علت همراهی آن با ماسه‌های سیاه حاوی مقادیر بالای مگنتیت، توصیه می‌کنند. میزان تغییرات شدت مغناطیسی بسته به شدت و نوع دگرسانی، حجم توده دگرسان شده، عمق توده و شکل آن متغیر است. اثرات مغناطیسی سنگ‌ها، ناشی از ترکیب مغناطیس‌القایی

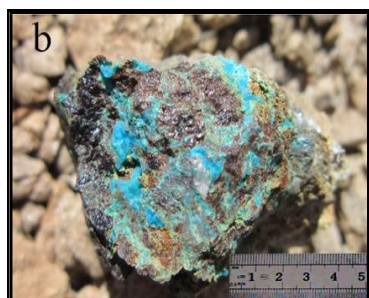
محدوده اکتشافی پلی‌متال باشماق در ۹ کیلومتری شمال شرق شهرستان هشترود و ۱۲۰ کیلومتری جنوب شرق تبریز قرار دارد (شکل ۲). از لحاظ زمین‌شناسی این محدوده در جنوب نقشه زمین‌شناختی ۱/۱۰۰۰۰۰ قره‌چمن قرار دارد. چهارگوش قره‌چمن از نظر ساختاری خود به دو زیرزون قره‌چمن-شهرچای در جنوب و زون بزقوش در شمال تقسیم شده است. محدوده کنونی بخشی از نوار ولکانوپلوتونیک بستان آباد-میانه بوده که به دلیل ایجاد زون‌های دگرسانی و کانه‌زایی از نظر متالورژی حائز اهمیت است. در این نوار کانه‌زایی پیریت و به ندرت کالکوپیریت در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در اثر نفوذ محلول‌های گرمابی ناشی از توده‌های گرانی رخ داده که به طور محلی پیریت در اثر فرایندهای سوپرژن به کانی‌های سولفاتی تبدیل شده است. محلول‌های اسیدی گردیده و چون ترکیب سنگ‌ها بیشتر اسیدی تا متوسط هستند در اثر دگرسانی، آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی (کائولینیت، مونت‌موریلونیت و ایلیت) تبدیل شده‌اند. وجود کانی‌های سیلیکاتی گروه زئولیت‌ها در توف‌های ریولیتی و مناطق دگرسان شده و همچنین در سنگ‌های نیمه‌نفوذی از نوع تفریتی (تراکی‌آندزیتی-تراکیتی) شایان ذکر است. در حوالی محدوده اکتشافی پرلیت در درون ریولیت‌ها و ایگنمبریت‌های الیگوسن و میوسن تشکیل شده که به لحاظ گستردگی و داشتن ذخایر شایان توجه از اهمیت اقتصادی برخوردار است.

عمده برونزدهای پرلیتی در پیرامون گجین-سلطان احمدلو و اول جاده سیدلر رخنمون دارند. شکل ۳ نقشه زمین‌شناختی محدوده باشماق را نشان می‌دهد. در داخل گرانیتهای روشن منطقه، به خصوص در حوالی روستاهای قاضی‌کندی و باشماق، آثاری از کانه‌زایی مس و آهن به صورت رگه‌ای در زون برشی مشاهده می‌شود. کانه‌زایی در این محدوده به صورت رگه‌های کانه‌دار

مثال‌های متعددی برای استفاده از روش مغناطیس‌سنجی، به‌خصوص مغناطیس‌سنجی هوابرد برای اکتشاف کانسار مس وجود دارد که برای نمونه می‌توان از پروژه مس در منطقه کادیا در استرالیا نام برد (هالیدی و کوک، ۲۰۰۷). در مطالعه حاضر، تغییرات میدان مغناطیسی، ناشی از زون کانه‌دار مس و طلا در محدوده پلی‌متال باشماق واقع در شهرستان هشتگرد استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که در کانسارهای مس در بسیاری موارد با توجه به فرایند دگرسانی بر روی سنگ میزبان، قسمت دگرسان‌شده با مغناطیس پایین‌تر نسبت به سنگ نادگرسان جدا می‌گردد، غالباً در محل کانه‌زایی انتظار می‌رود قله منفی بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده شود (وان کرک وورت و همکاران، ۱۹۹۷؛ سیلیتو، ۲۰۰۸؛ گون و دنیس، ۱۹۹۷؛ ایروین و اسمیت، ۱۹۹۰؛ فورد و همکاران، ۲۰۰۷؛ کوریوه، ۲۰۰۵؛ داب و همکاران، ۲۰۰۵).



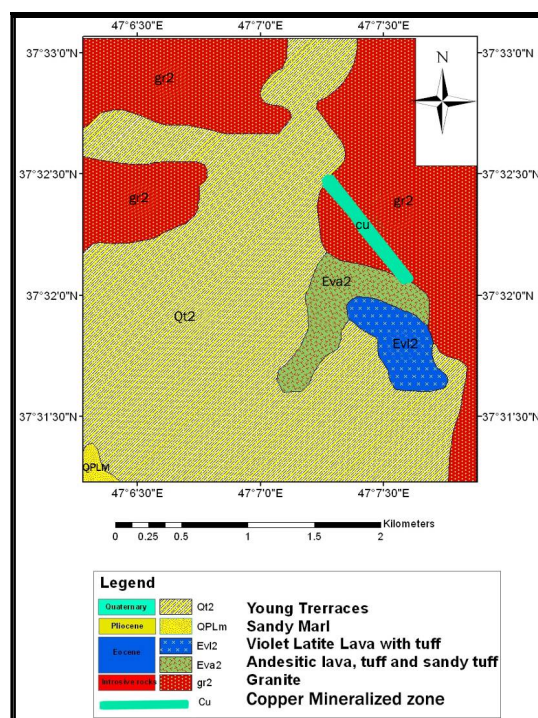
(الف)



(ب)

شکل ۴. نمونه‌های کانه‌دار در محدوده باشماق، (الف) کالکوپریت در مغزه حفاری و (ب) تبدیل کالکوپریت به مالاکیت و کریزوکولا در زون اکسیدان منطقه.

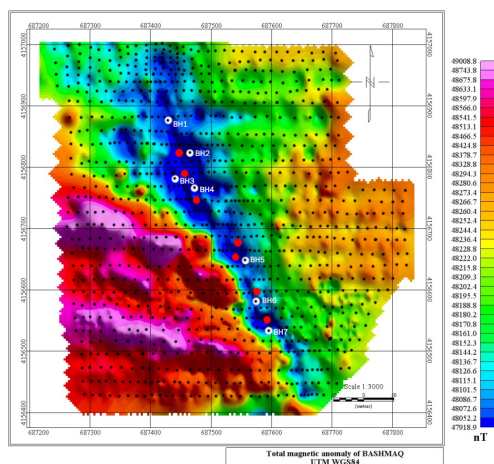
و بازماند موجود در آنهاست که این اثرات موجب ایجاد آشفتگی در میدان مغناطیسی زمین در محل حضور آن سنگ‌ها می‌شوند. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در اثر فرایندهای آتشفشانی یا رسوبی اولیه و یا در اثر فرایندهای ثانویه مانند دگرسانی‌ها ایجاد می‌شوند که هر دو این پدیده‌ها موجب تولید یا از بین رفتن کانی‌های مغناطیسی در محیط می‌شوند. در اکتشاف کانسارها، فرایندهای ثانویه تاثیرگذار بر سنگ‌ها که در آن سنگ میزبان یا ذخیره معدنی مرتبط با سامانه گرمایی (هیدروترمال) باشند، از اهمیت خاصی برخوردارند. کاربرد روش‌های اکتشافی زمین‌محیطی در این مورد به صورت بی‌جویی



شکل ۳. نقشه زمین‌شناختی محدوده مورد مطالعه.

سیگنال مغناطیسی مرتبط با خود ماده معدنی، زون در برگیرنده آن و یا مرتبط با سنگ‌های باطله همراه کانه‌زایی است که می‌تواند به‌منزله یک روش غیرمستقیم برای اکتشاف کانسارهای مد نظر مورد استفاده قرار گیرد.

مگنتیت آشکار شد. شکل ۵ سیگنال مغناطیسی را بعد از اعمال صافی کاهش به قطب مغناطیسی (برای جابه‌جایی سیگنال بر روی چشمه مولد میدان) به همراه نقاط برداشت نشان می‌دهد. روند این سیگنال به‌خوبی با محل رخنمون‌های کانه‌زایی مس مشاهده‌شده حین پیمایش زمین‌شناختی انطباق دارد. این سیگنال که عرض آن از ۱۰ متر تا بیش از ۱۰۰ متر است، نشان‌دهنده زون خردشده ولکانیکی-گرانیتی سیلیسی شده است که کانه‌زایی مس-طلا در داخل آن تشکیل شده است. در مرحله تفسیر، برای تخمین عمق زون کانه‌زایی معمولاً از صافی ادامه فراسو استفاده می‌شود (شارما، ۱۹۷۶). صافی ادامه فراسو با مقادیر ۱۰ تا ۱۲۰ متر و با فواصل ۱۰ متر بر روی داده‌های کاهیده به قطب اعمال شد تا تخمینی از گسترش عمق زون شکسته‌شده حاوی کانه‌زایی به‌دست آید (شکل ۶).



شکل ۵. نقشه میدان مغناطیسی کاهیده به قطب. دایره‌های مشکی، قرمز و سفید-سیاه به‌ترتیب نقاط داده برداری، محل رخنمون‌ها و گمانه‌های حفاری را نشان می‌دهند.

نتیجه‌ای که از اعمال صافی مذکور بر روی داده‌های مغناطیسی استنباط می‌شود این است که در بخش جنوب‌شرقی عمق زون شکسته‌شده حاوی کانه‌زایی احتمالاً تا حدود ۹۰ متر می‌رسد. در قسمت میانی، زون خردشده کمترین گسترش عمقی را داشته و سیگنال مربوطه در نهایت تا عمق ۵۰ متر امتداد دارد. در بخش

۲-۲ عملیات مغناطیس‌سنجی در زون مس و طلا دار باشماق

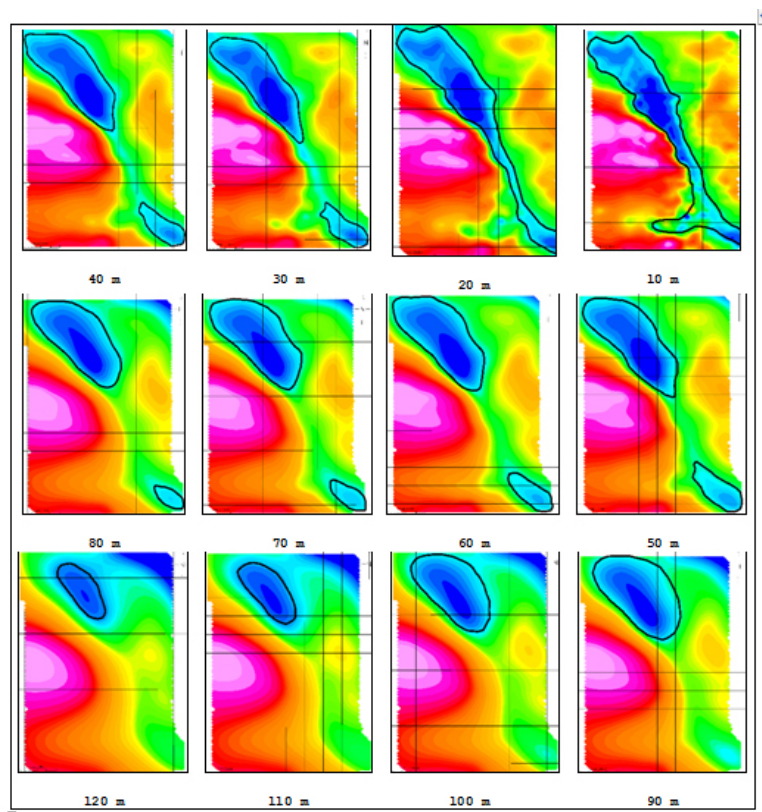
با توجه به گستردگی منطقه مورد نظر، رخنمون‌های قابل مشاهده کانه‌زایی، شرایط زمین‌ساختی که از عوامل اصلی کانی‌سازی در هر منطقه می‌باشند و همچنین با در نظر گرفتن زمان و هزینه بهینه، ابتدا شبکه برداشت به‌صورت پروفیل‌هایی به فاصله حدود ۲۰ متر شامل نقاط برداشت به فاصله ۱۰ متر با راستای شرقی-غربی طراحی شد. در طول برداشت با توجه به دامنه تغییرات میدان در حین اندازه‌گیری و برحسب اولویت‌های پیش‌آمده، در قسمتی از منطقه فاصله ایستگاه‌ها تا حدود ۲ متر کاهش داده شد. در کل نزدیک به ۳۰۰۰ قرائت انجام شد و مساحتی در حدود نیم کیلومتر مربع تحت پوشش قرار گرفت. برای داده‌برداری از یک مگنومتر GEM از نوع پروتون مجهز به سامانه DGPS استفاده شد. در مرحله پردازش، ابتدا داده‌های مربوط به بخش‌هایی از محدوده که بی‌هنجاری مغناطیسی قابل توجهی در آنها مشاهده نشده بود، از بانک اطلاعاتی حذف شد و فقط اطلاعات زون در برگیرنده بی‌هنجاری مورد استفاده قرار گرفت و در ادامه تغییرات روزانه میدان مغناطیسی که در ایستگاه‌های مشخصی در فواصل زمانی منظم ثبت شده بود، بر روی داده‌های خام اعمال گردید. در مرحله بعد، صافی کاهش به قطب مغناطیسی با استفاده از اطلاعات مدل IGRF بر روی داده‌ها اعمال شد. براساس اطلاعات IGRF، شدت میدان مغناطیسی زمینه در منطقه مورد مطالعه حدود ۴۸۲۰۰ نانوتسلا بوده و زوایای میل و انحراف میدان مغناطیسی به ترتیب ۵۶.۹ درجه و ۴.۱ درجه می‌باشند. بدین ترتیب، کلیه قرائت‌های بالاتر یا پایین‌تر از ۴۸۲۰۰ نانوتسلا، بی‌هنجاری محسوب شده و باید بررسی شوند. در نتیجه این برداشت‌ها یک سیگنال منفی با دامنه و شدت کم به طول حدود ۷۰۰ متر و روند شمال‌غرب-جنوب‌شرقی به همراه چند سیگنال مثبت مرتبط با کانه‌زایی اولیژیست و

همان مرز سیگنال در نظر گرفته شد. در ادامه اطلاعات رقمی نقشه‌های مذکور وارد نرم‌افزار data mine شده است. برای این منظور بخش مربوط به بی‌هنجاری منفی (رنگ آبی در شکل ۶) در عمق‌های مختلف، با رسم چندضلعی‌هایی رقمی شده‌اند و به این ترتیب با قرار دادن این چندضلعی‌ها بر روی هم و تولید یک شکل سه‌بعدی براساس آنها در نرم‌افزار data mine تصویری از زون شکسته شده کانه‌دار به دست آمده است (شکل ۷). همان‌طور که از نقشه‌های ادامه فراسوی می‌توان نتیجه گرفت، محدوده معدنی باشماق در قسمت میانی از لحاظ عمق کمترین گسترش را داشته و در این ناحیه زون شکسته شده حاوی کانسنگ تا عمق ۵۰ متر گسترش دارد. پس از عمق ۵۰ متر، زون کانه‌دار به دو قسمت شمال‌غربی و جنوب‌شرقی تقسیم شده است. گسترش عمقی و همچنین وسعت زون میزبان کانه‌زایی مس در مقاطع طولی مختلف، در قسمت جنوبی محدوده کمتر از قسمت شمالی آن است.

شمال‌غربی نیز ظاهراً زون شکسته شده تا بیشترین عمق (بیش از ۱۲۰ متر) ادامه دارد. با توجه به شدت پایین سیگنال مغناطیسی مد نظر، به نظر نمی‌رسد اثر هاله برای آن زیاد باشد و مرز بی‌هنجاری بسیار نزدیک به مرز افقی چشمه مولد آن باشد که در مرحله مدل‌سازی نیز این امر مد نظر قرار گرفته است.

۳ مدل‌سازی سه‌بعدی

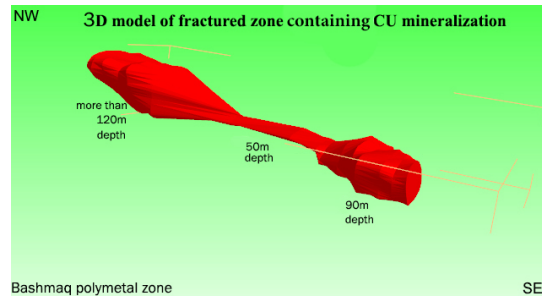
برای مدل‌سازی سه بعدی زون شکسته شده حاوی کانه‌زایی مس-طلا در منطقه باشماق از نتایج مربوط به اعمال صافی ادامه فراسوی بر روی داده‌های مغناطیسی استفاده شده است. با استفاده از نقشه‌های ادامه فراسوی حاصل از این عملیات، گسترش عمقی زون خرد شده گسلی حاوی ماده معدنی مشخص شد. همانگونه که پیشتر اشاره شد به دلیل شدت پایین سیگنال و عدم وجود هاله وسیع در اطراف آن، مرز افقی زون شکسته در هر عمق،



شکل ۶. نقشه‌های ادامه فراسوی ۱۰ متر تا ۱۲۰ متر برای مشاهده تغییرات زون کانه‌زایی (داخل منحنی سیاه) در عمق‌های مختلف

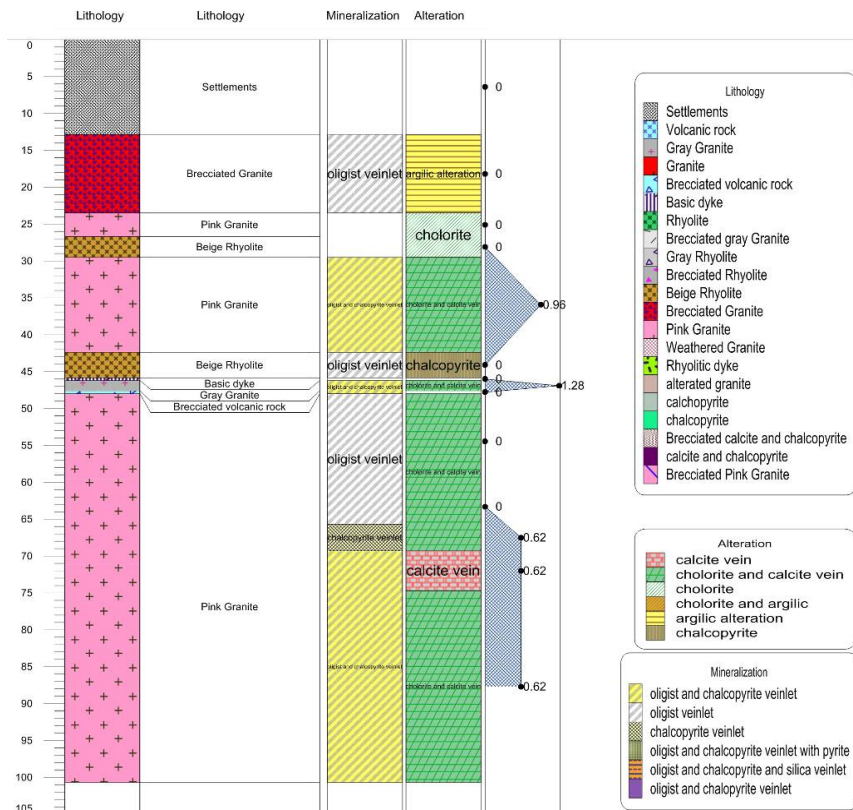
۴ بررسی درستی نتایج براساس حفاری اکتشافی

برای بررسی درستی نتایج مطالعات ژئوفیزیکی، هفت گمانه در نقاط مختلف بر روی بخشی از بی‌هنجاری منفی مغناطیسی حفر شد (شکل ۶). نتایج حاصل از حفاری‌ها با نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و مدل‌سازی مربوطه انطباق قابل قبولی دارد. برای نشان دادن این انطباق، نگاره‌برداری کامل چهار مورد از گمانه‌های حفر شده بر روی بی‌هنجاری ارائه شده است (شکل‌های ۸ تا ۱۱). براساس مطالعات انجام گرفته، کانه‌زایی مس (کالکوپریت) و آهن (اولیژیست) در گمانه‌های حفر شده به‌طور متناوب در زون‌های برشی و خرد شده از سطح زمین تا عمق ۱۲۷ متر وجود دارد. این در حالی است که عملیات حفاری با وجود آثار کانه‌زایی متوقف شده است.

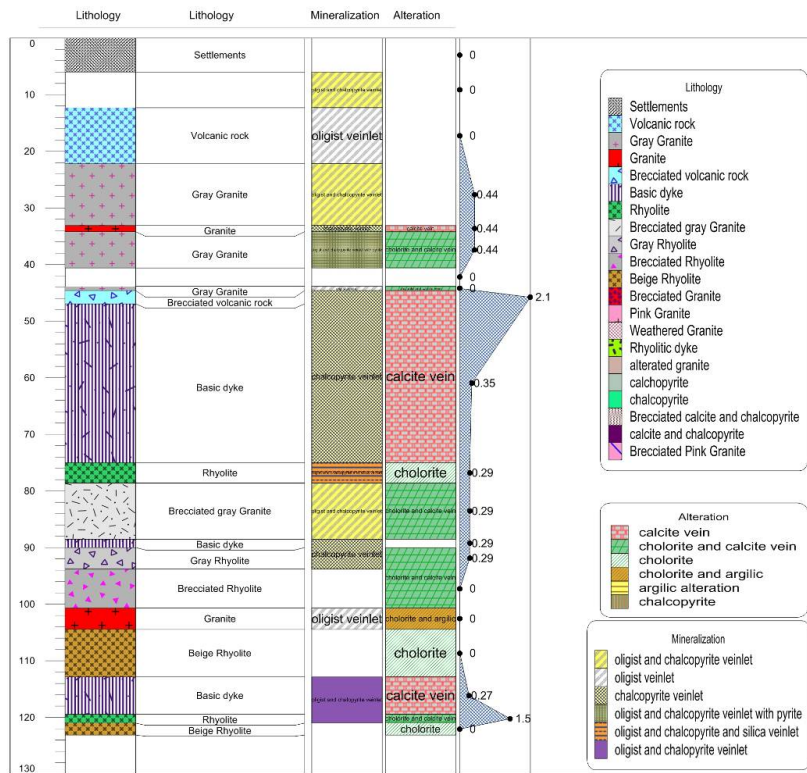


شکل ۷. مدل سه‌بعدی زون حاوی کانستگ در محدوده کانه‌زایی باشماق (خروجی نرم‌افزار data mine براساس داده‌های مغناطیسی).

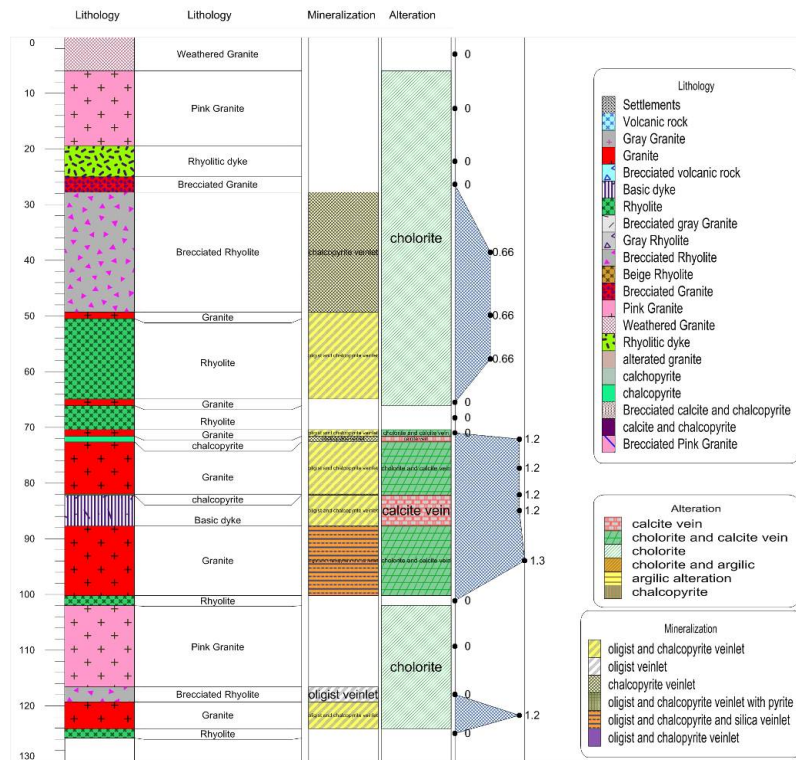
گسترش عمقی زون کانه‌دار در قسمت جنوبی محدوده باشماق تا حدود عمق ۹۰ متر از سطح زمین و در قسمت شمالی بیش از ۱۲۰ متر می‌باشد. تغییرات سنگ‌شناختی، دگرسانی، کانه‌زایی و زون‌های برشی (خرد شده) در یکی از گمانه‌های حفر شده در مرکز بی‌هنجاری در شکل ۸ نشان داده شده است.



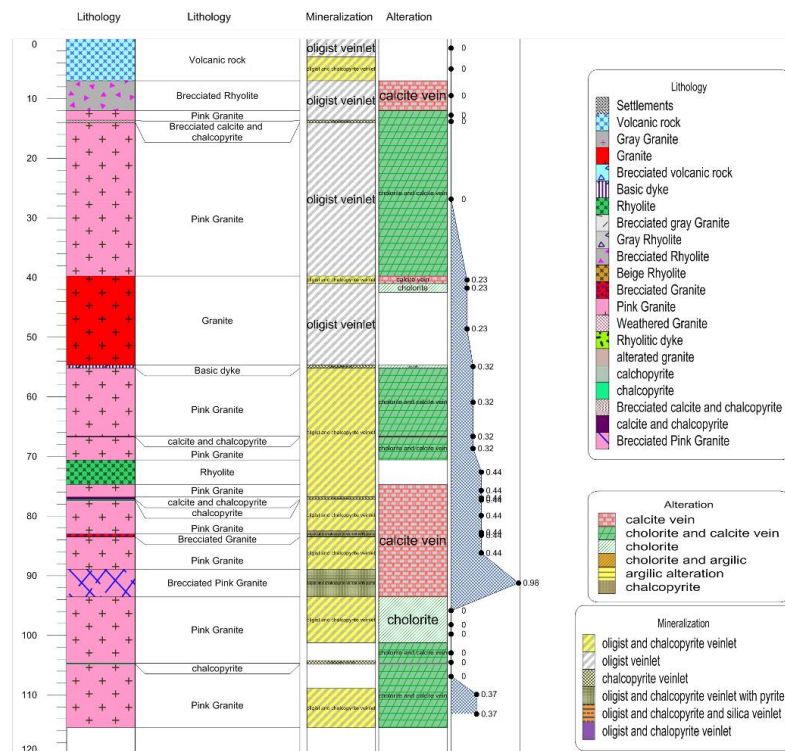
شکل ۸. نگاره گمانه BH1.



شکل ۹. نگاره گمانه BH2.



شکل ۱۰. نگاره گمانه BH3.



شکل ۱۱. نگاره گمانه BH4.

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش مغناطیس‌سنجی زمینی برای اکتشاف غیرمستقیم کانه‌زایی مس و طلا به همراه آهن در زون‌های خردشده و برشی، قبل از به کار بردن روش قطبش القایی استفاده شد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نقشه مغناطیسی حاصله با روند زون کانه‌دار در سطح و عمق انطباق خوبی دارد. عمق زون خردشده حاوی کانه‌زایی نیز با استفاده از صافی ادامه فراسو به صورت تقریبی تعیین شد که صحت آن از طریق حفر گمانه اکتشافی مورد تایید قرار گرفت. در نهایت انطباق یافته‌های حاصل از مطالعات مغناطیس‌سنجی در زون‌های کانه‌دار مرتبط با سامانه‌های شکستگی و گسلی به‌عنوان الگوی اکتشافی اولیه مورد استفاده قرار گرفت و برای سامانه‌های زمین‌شناختی مشابه توصیه می‌شود. درضمن، به‌کارگیری این روش و تلفیق آن با اطلاعات حاصل از روش قطبش القایی، مقاومت ویژه و بررسی

زمین‌شناختی برای تعیین دقیق عمق زون‌های کانه‌دار موثرتر است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌بینند از زحمات آقایان مهندس یاشار انصاری و مهندس محمد مهدی‌نیا تشکر نمایند.

منابع

آقائباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
سهرابی، ق.، ۱۳۹۴، بررسی متالورژی و ژئوشیمی ذخایر مولیبدن در نوار قره‌داغ-شیورداغ، آذربایجان شرقی، شمال‌غرب ایران: رساله دکتری، دانشگاه تبریز.
پایگاه ملی داده‌های علوم زمین: www.ngdir.ir

- Exploration Technology Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by B. Milkereit, 791–809.
- International Geomagnetic Reference Field (IGRF-11) wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/ Kyoto University
- Irvine, R. J., and Smith, M. J., 1990, Geophysical exploration for epithermal gold deposits: *J. Geochemical Exploration*, **36**, 375–412.
- Sillitoe, R. H., 2008, Geology and potential of the Caspiche porphyry copper-gold prospect, northern Chile: Unpublished company report prepared for Exeter Resource Corporation, June 2008.
- Sharma, P. V., 1976, *Geophysical Methods in Geology*: Elsevier Scientific Publishing Company, 428.
- Van Kerkvoort, G., Tolman, J., and Caspiche, O. H., 2009, Porphyry Au-Cu deposit, Maricunga Belt, Chile Exploration, discovery and resource development: Exeter Resource Corporation, Santiago, Chile Publication NewGenGold Conference, Perth, **23** November 2009.
- Corriveau, L., 2005, Iron oxide copper gold (\pm Ag \pm Nb, \pm P \pm REE \pm U) deposits: A Canadian perspective: Geological Survey of Canada, Open File 6130, 87.
- Dubé, B., Gosselin, P., Hannington, M. D., and Galley, A., 2005, Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits: Geological Survey of Canada, Open File 7630, 12.
- Eftekhari-Nazhad, J., 1975. Brief history and structural development of Azarbaijan: *Geol. Surv. of Iran*, Internal report, No. 8. Economicgeology.org
- Ford, K., Keating, P., and Thomas, M. D., 2007, Overview of geophysical signature associated with Canadian ore deposits: Geological Survey of Canada, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, **5**, 939–970.
- Gunn, P. J., and Dentith, M. C., 1997, Magnetic responses associated with mineral deposits: *AGSO J. Australian Geology and Geophysics*, **17**(2), 145–158.
- Holliday, J. R., Cooke, D. R., 2007, Advances in Geological Models and Exploration Methods for Copper \pm Gold Porphyry Deposits Plenary Session: Ore Deposits and