

تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (IP/RS) محدوده معدنی طلای هیرد بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی

علی عسکری^{۱*}، محمدحسن کریم‌پور^۲، سید احمد مظاهری^۳ و آزاده ملک‌زاده شفاوردی^۴

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۲۹

چکیده

محدوده معدنی طلای هیرد در استان خراسان جنوبی و در ۱۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان بیرجند قرار دارد. در این محدوده توده‌های نفوذی مافییک تا اسیدی با ترکیب گابرو تا گرانیت در توالی آتشفشانی-رسوبی ترشیری نفوذ کرده و آنها را تحت تأثیر قرار داده‌اند. بر پایه مقدار پذیرفتاری مغناطیسی، این نفوذی‌ها در دوره مگنتیتی (اکسیدی) و ایلمنتی (احیایی) تقسیم‌بندی شده‌اند. مهم‌ترین دگرسانی‌هایی که در سطح زمین و گمانه‌های حفاری شناسایی شده‌اند عبارتند از: (۱) کوارتز-تورمالین-سرسیت؛ (۲) کربناتی؛ (۳) اسکارنی شدن و (۴) پروپیلیتیک. کانی‌سازی طلا و عناصر همراه (W, Sn, Bi, As, Sb, Pb, Zn, Ag) به صورت جانشینی، پراکنده، رگه-رگچه‌ای، توده‌ای، برشی و اسکارن در ارتباط با توده نفوذی گرانیتی-گرانودیوریتی احیایی و با فواصل مختلف نسبت به آن تشکیل شده است. مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی و کانه‌زایی کانسار طلای هیرد و مقایسه ویژگی‌های آن با ویژگی‌های ذخایر طلای شناخته شده در سطح جهان، نشان می‌دهد که این کانسار از نوع ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی (RIRGS) است. از آنجا که در این سامانه‌ها بیشترین ذخیره طلا همراه با سولفید است و در سقف استوک‌های گرانیتویدی احیایی کانه‌ساز و سنگ‌های هورنفلسی مجاور، شکل می‌گیرد، اکتشافات ژئوفیزیکی به روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی بر روی توده نفوذی گرانیتویدی احیایی و نواحی همجوار با هدف شناسایی بخش‌های پنهان کانی‌سازی، انجام شده است. تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی (IP-RS) با اطلاعات زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی منطقه، دلالت بر کانی‌سازی گسترده‌ای در حاشیه خاوری توده نفوذی و سنگ‌های دربرگیرنده دارد. در این ارتباط پنج ناحیه بی‌هنجار با بارپذیری بیش از ۳۰ میلی‌ولت بر ولت مشخص شده که به طور کلی می‌توان آنها را در دو دسته جداسازی کرد: (۱) بی‌هنجاری دارای پلاریزاسیون القایی بالا و مقاومت ویژه کم که ناشی از حضور فراوان سولفورهای فلزی به صورت پراکنده، رگچه‌ای و توده‌ای همراه با دگرسانی شدید سریستی است و (۲) بی‌هنجاری دارای پلاریزاسیون القایی بالا و مقاومت ویژه الکتریکی متوسط تا بالا که مشخص‌کننده وجود سولفورهای فلزی به صورت پراکنده و شدت زیاد دگرسانی سیلیسی-کربناتی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: هیرد، طلا، ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی، اکتشافات ژئوفیزیکی

*نویسنده مسئول: علی عسکری

E-mail: askari_48@yahoo.com

۱- پیش‌گفتار

محدوده معدنی طلای هیرد در فاصله ۱۴۰ کیلومتری جنوب بیرجند و ۲۵ کیلومتری شمال خاور معدن مس قلعه‌زری، در گستره‌ای میان ۱۰' ۵۹° تا ۱۵' ۵۹° طول جغرافیایی و ۵۵' ۳۱° تا ۰۰' ۳۲° عرض جغرافیایی قرار گرفته است (شکل ۱). این محدوده برای اولین بار در سال ۱۳۸۰ بر پایه مطالعات ژئوشیمیایی ناحیه‌ای و بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام گرفت به عنوان بی‌هنجاری طلا شناسایی شد. در مرحله پی‌جویی، از محدوده‌ای به وسعت ۱۰۰ کیلومتر مربع، نقشه زمین‌شناسی - معدنی با مقیاس ۱/۲۰۰۰۰ تهیه و چهار محدوده طلا دار با نام تارگت طلای شماره ۱ تا ۴ معرفی شد (شکل ۲). در طی عملیات اکتشاف عمومی تارگت ۱ (عسکری، ۱۳۸۸) و اکتشاف تفصیلی تارگت ۳ (عسکری و فیض، ۱۳۹۰)، نقشه‌های توپوگرافی-زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰ تهیه و با حفار ۲۴۵۲ متر مکعب ترانسه اکتشافی، ۴۹۸۸ متر گمانه اکتشافی و ۳۴۲۱ نمونه تجزیه شیمیایی، ذخیره‌ای نزدیک به ده تن طلا در این دو محدوده برآورد شده است. اکتشافات ژئوفیزیکی به روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی بر روی بخش‌هایی از جنوب خاور تارگت طلای شماره ۱ توسط گروه ژئوفیزیک سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۹۰-۱۳۸۹ اجرا شد. در این پژوهش با بهره‌گرفتن از مدل‌های ژنتیکی، سنگ‌شناختی و دگرسانی کانسار طلای هیرد، به تعبیر و تفسیر بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی پرداخته و در نهایت با تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و ژئوشیمی منطقه با داده‌های ژئوفیزیکی، محل‌های مناسب برای حفاری و شناسایی بخش‌های ژرفایی کانسار، پیشنهاد شده است.

۲- زمین‌شناسی عمومی

محدوده مطالعاتی در خاور خرد قاره ایران مرکزی، شمال خاور بلوک لوت و در مجاورت پهنه فلیش خاور ایران قرار گرفته است. شیل و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک، رسوبات کرتاسه شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل، آهک، مارن و توف، کهن‌ترین واحدهای چینه‌شناسی منطقه هستند که توسط یک دگرشیمی به توالی رسوبی - ماگمایی ترشیری می‌رسد. تشکیلات ترشیری با کنگلومرای قاعده‌ای پالئوسن شروع و واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن شامل آندزیت، آندزیت بازالت، داسیت، بازالت، لاتیت، توف، توفیت، شیل، سیلتستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا بر روی آن قرار گرفته است. توده‌های نفوذی گابرودیوریتی، مونزودیوریتی، کوارتز دیوریتی، کوارتز مونزویتیتی، گرانودیوریت و گرانیتی پس از ائوسن؟ در مجموعه سنگی یادشده نفوذ کرده و آن را تحت تأثیر قرار داده‌اند (شکل ۲). این توده‌های نفوذی را می‌توان بر پایه میزان پذیرفتاری مغناطیسی به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۵): I- نفوذی‌های سری مگنتیتی یا اکسیدی (پذیرفتاری مغناطیسی بیشتر از SI 10^{-5} * ۷۰) II- نفوذی‌های سری ایلمنتی یا احیایی (پذیرفتاری مغناطیسی کمتر از SI 10^{-5} * ۵۵).

۳- زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه، بخش جنوب خاور تارگت طلای شماره ۱ هیرد را پوشش داده که با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰ تهیه شده از آن (شکل ۳)، سنگ‌شناسی چیره، شامل شیل‌های سیلیسی شده با میان‌لایه‌های توف، لیتیک توف و کنگلومرای

دگرسانی تورمالینی بخش‌هایی از توده نفوذی گرانیتوئیدی احیایی و تشکیلات مجاور را تحت تأثیر قرار داده و با ظاهری کاملاً تیره رنگ از گرانیت‌ها متمایز می‌شود. گاهی شدت تورمالینی شدن به حدی است که در برخی بخش‌ها از توده نفوذی و سنگ اولیه اثری بر جای نمانده و سنگ تماماً به تورمالین و کوارتز تبدیل شده است. در نمونه دستی تورمالین‌ها کاملاً سیاه و در مقطع نازک به رنگ‌های سبز، آبی و قهوه‌ای دیده می‌شوند. تورمالین پراکنده به صورت پهنه‌دار دیده می‌شود که نشان‌دهنده تغییر ترکیب آن است و در برش‌های طولی به شکل شعاعی و خورشیدی خودنمایی می‌کند. هجوم سیالات غنی از کربنات و غنی از بور به سنگ اولیه موجب تشکیل تورمالین شده است.

دگرسانی سیلیسی در قالب رگه - رگچه‌های سیلیسی و همچنین در سنگ‌هایی که تحت تأثیر پهنه‌های گسلی قرار گرفته‌اند، دیده می‌شود. در این پهنه‌ها گاه به دلیل همزمانی تشکیل گسل‌ها با فعالیت‌های گرمایی، برش‌های گسلی - گرمایی دیده می‌شوند. این برش‌ها ترکیبی از کوارتزهای ریز بلور بی‌شکل، کلسیت، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است. دگرسانی سیلیسی مهم‌ترین دگرسانی گرمایی همراه طلا است و دامنه تغییرات وسیعی دارد به گونه‌ای که با دگرسانی تورمالینی با درجه حرارت‌های بالا و نیز دگرسانی سریستی و کربناتی که در درجه حرارت کمتری تشکیل می‌شوند، دیده می‌شود.

سریستی شدن یکی از مهم‌ترین دگرسانی‌های همراه با سولفیدهای طلا دار است. در برخی نمونه‌ها دگرسانی سریستی همراه با دگرسانی آرتزلیک دیده می‌شود. این دگرسانی عمدتاً به صورت پراکنده در متن توده نفوذی حضور دارد و کمتر به شکل رگه - رگچه‌ای دیده می‌شود. سریستی شدن پس از تورمالینی شدن رخ داده (اشراقی و همکاران، ۱۳۸۷) به گونه‌ای که در برخی بخش‌ها سریست، تورمالین را در برگرفته و در بخش‌هایی که شدت سریستی شدن بیشتر است، تورمالین به ندرت دیده می‌شود. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که پلاژیوکلازها مهم‌ترین کانی‌هایی هستند که تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند. این دگرسانی همراهی قابل توجهی با کانی‌های سولفیدی دارد.

دگرسانی کربناتی: این دگرسانی عمدتاً همزمان با سیلیسی شدن و سریستی شدن دیده می‌شود. کلسیت‌های بسیار ریزدانه به صورت پراکنده در متن سنگ همراه با کوارتز میکرو کریستالین و هیدروکسیدهای آهن و یا در قالب رگچه‌های کلسیتی در متن سنگ خودنمایی می‌کنند. پلاژیوکلاز و کانی‌های مافییک مهم‌ترین کانی‌هایی هستند که طی این دگرسانی به کلسیت تبدیل شده‌اند.

در دگرسانی کوارتز - تورمالین - سریست، رگچه‌های متعدد همدیگر را قطع کرده‌اند و می‌توان سن نسبی را برای آنها در نظر گرفت. این امر نشان می‌دهد که کانی‌سازی در چند مرحله صورت گرفته است و نسل‌های مختلفی از کانی‌ها به ویژه کوارتز به وجود آمده است. با توجه به همبستگی مستقیم عیار طلا با تراکم رگچه‌ها، می‌توان از حضور آنها در سطح و یا گمانه‌های حفاری برای شناسایی پهنه‌های عیاردار استفاده کرد.

اسکارنی شدن: در بخش‌های شمال باختر محدوده مطالعاتی، اسکارنی شدن گسترش زیادی دارد. واحدهای کنگلومرا به علت داشتن سیمان و گاه قله‌های آهکی، تحت تأثیر توده گرانیتوئیدی احیایی منطقه به اسکارن تبدیل شده‌اند. به‌طور کلی مهم‌ترین کانی‌های دیده شده در بخش‌های اسکارنوئیدی منطقه شامل: زوئزیت، کلینوزوئزیت، ولاستونیت، گارنت، اپیدوت، دیوپسید، کلسیت، کوارتز و کلریت است. در نمونه دستی، ولاستونیت به شکل بلورهای منشوری بلند و گارنت‌ها به رنگ سبز تا سبز قهوه‌ای و در مطالعات میکروسکوپی به صورت ایزوتروپ (گراسولار) و ایزوتروپ (آندرادیت) دیده می‌شوند. حضور کانی‌های بدون آب مانند گارنت و پیروکسن نشانه نوعی دگرگونی همبری ایزوکمیکال است که همزمان با نفوذ توده و تحت حرارت حاصل از آن در دمای

آهکی است (E^{SS}) که مرز زیرین آن بیشتر توسط آبرفت پوشیده شده است و واحد کنگلومرای انوسن (E⁶) به طور دگرشیب بر روی آن قرار دارد. واحد کنگلومرای با گسترش زیاد در بخش شمالی محدوده اکتشافی قرار گرفته و بلندترین ارتفاعات منطقه را به خود اختصاص داده است و همراه آن میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ، توف، لیتیک توف، داسیت و آگلومرا دیده می‌شود. در شمال خاور محدوده اکتشافی آندزیت‌های دگرسان شده رخنمون دارند. امتداد کلی این مجموعه تقریباً دارای روند خاوری - باختری با شیب متغیر است که این تغییر شیب به دلیل تأثیر گسل‌های راندگی، عادی، وارون و چین خوردگی است. مجموعه سنگی یادشده توسط دو توده نفوذی، گابرونوریت تا گابروئوریت در بخش شمالی و گرانیت تا گرانوئوریت در بخش جنوبی مورد نفوذ قرار گرفته‌اند (عسگری، ۱۳۸۸). بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های گرفته شده از این دو توده، مطالعه نقشه مغناطیس‌سنجی هوایی و مقایسه آن با نقشه زمین‌شناسی، داده‌های سنگ‌شناختی و مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های سطحی و ژرفایی نشان می‌دهد که توده نفوذی گابرونوریت - گابروئوریت شمال منطقه در رده نفوذی‌های اکسیدی یا مگنتیتی است و توده گرانیت - گرانوئوریت جنوب نقشه در رده نفوذی‌های احیایی یا ایلمنیتی قرار دارد (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۵).

۴- روش مطالعه

در پژوهش حاضر به منظور شناسایی بخش‌های پنهان کانه‌زایی، بررسی‌های زیر در گستره محدوده مطالعاتی انجام شده است:

- ۱- بررسی حفاریات سطحی در ناحیه معدنی هیرد از دید زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و ژئوشیمی.
- ۲- بررسی و مطالعه مغزه‌های حفاری در ۳ گمانه شناسایی به مترژ کلی ۴۱۰ متر
- ۳- مطالعه ۷۰ مقطع نازک، ۳۰ مقطع نازک - صیقلی و ۱۰ مقطع صیقلی از نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری.
- ۴- بررسی تجزیه ۳۸۵ نمونه برداشت شده از حفاریات سطحی و ژرفایی.
- ۵- تهیه نقشه زمین‌شناسی - معدنی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ از منطقه.
- ۶- تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی با استفاده از بررسی‌های تفصیلی زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی و بهره‌گیری از مدل ژنتیکی کانسارهای طلای مرتبط با توده‌های گرانیتوئیدی احیایی.

۵- دگرسانی

با توجه به اهمیت شناخت دگرسانی‌های همراه با کانه‌زایی و نقش آنها در تعبیر و تفسیر نتایج ژئوفیزیکی، دگرسانی‌های محدوده مطالعاتی به اختصار شرح داده می‌شود.

دگرسانی کوارتز - تورمالین - سریست: این دگرسانی بیشتر در بخش بالایی توده نفوذی احیایی و سنگ‌های دربرگیرنده آن دیده می‌شود و با کانی‌های کوارتز، تورمالین، سریست، کلسیت و سولفید شناسایی می‌شود و مهم‌ترین دگرسانی همراه با کانی‌سازی طلا در محدوده مورد پژوهش به‌شمار می‌رود. دگرسانی کوارتز - تورمالین - سریست به‌صورت رگه و رگچه‌های داربستی، صفحه‌ای و پراکنده همراه با کانی‌های کلسیت، کلریت، آرسنوپیریت، پیروتیت، پیریت، مارکاسیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن تشکیل شده است. میزان فراوانی کانی‌ها در رگچه‌ها و متن سنگ متفاوت و گوناگون است به گونه‌ای که شاید بتوان بر پایه فراوانی یک کانی، دگرسانی‌های جداگانه‌ای همچون تورمالینی، سیلیسی، سریستی و کربناتی را قائل شد. ولی با توجه به تکامل این مجموعه در فازهای متعدد کانه‌زایی، همپوشانی و تأثیر دگرسانی‌ها بر یکدیگر، نمی‌توان تفکیک و پهنه‌بندی دقیقی از آنها ارائه داد.

با توجه به درجه حرارت و فاصله از منشأ سیال در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل، اولین مرحله تشکیل کانه، در درجه حرارت‌های ۶۵۰-۴۷۵ درجه سانتی‌گراد است. در این مرحله اسکارن‌های پیروکسن-پلاژیوکلاز دیوپسیدی بدون آب تشکیل می‌شوند که معمولاً بدون کانی‌سازی طلا است ولی به‌طور محلی می‌توانند دارای شثلیت باشند (Brown et al., 2002). در درجه حرارت پایین‌تر، اسکارن‌های آبدار غالباً اکتینولیت‌دار یا زئوسیت - بیوتیت و اجتماعی از کانی‌های سولفیدی به‌وجود می‌آیند. کانی‌های سولفیدی درجه حرارت بالا، غالباً پیرویت و کالکوپیریت و سولفیدهای درجه حرارت پایین، آرسنوپیریت و پیریت هستند که با کمپلکس‌های دارای Bi, Te, Sb, Pb, Au همراه هستند (McCoy et al., 2002). رگچه‌های کوارتز همراه با شثلیت، فلدسپار پتاسیم و میکا اولین رگچه‌های تشکیل شده با سنگ میزبان نفوذی بوده که ممکن است تنها دارای سولفیدهای پراکنده و بدون طلا باشد. با کاهش درجه حرارت (۳۵۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد)، رگچه‌های کوارتز صفحه‌ای تشکیل می‌شود که ممکن است درصد کمی پیریت یا آرسنوپیریت همراه با ترکیبات Au-Bi-Te داشته باشد که این مجموعه برای کانی‌سازی طلا راهنمای خوبی هستند. رگه - رگچه‌ها در اطراف توده نفوذی معمولاً غنی از آرسنوپیریت و در فاصله بیشتر، دارای استینیت هستند (Mair et al., 2006). در مراحل نهایی تکامل سیال گرمایی، رگه‌های کوارتز همراه Pb-Zn-Ag تشکیل می‌شوند که معمولاً این اتفاق در محلی دورتر از محدوده هاله هورنفلسی شده، دیده می‌شود. این رگه‌های کوارتز - کربناتی دارای اسفالریت و گالن غنی از نقره هستند و گاه به فاصله ۳۰ کیلومتری توده نفوذی تشکیل شده‌اند. عیار و تناژ ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی دامنه وسیعی دارند و از ۱-۳۰۰ تن طلا با عیارهای ۱۰-۰/۷ گرم بر تن در آنها دیده می‌شود. کانی‌سازی درون سنگ‌های نفوذی یا سنگ‌های همجوار دارای عیار کم و تناژ بالا و ذخایر اسکارن و رگه‌ای که در فاصله دورتر از توده تشکیل می‌شوند معمولاً دارای عیار بالا و تناژ کم هستند. ذخایر طلای Dublin Gulch در کانادا و Fort Knox در آلاسکا که در حال حاضر استخراج می‌شوند، دارای عیار میانگین ۰/۹ گرم بر تن طلا هستند. ذخیره Fort Knox در حدود ۲۱۰ تن طلا برآورد شده است (Hart, 2007).

در ناحیه معدنی طلای هیرد بیشتر کانه‌زایی‌های یادشده شناسایی شده ولی عملیات اکتشاف تفصیلی، عمدتاً بر روی ذخایر رگه‌ای طلا در فاصله ۵-۱ کیلومتری توده گرانتیویدی احیایی، انجام شده است. کانی‌سازی طلا درون توده گرانتیویدی احیایی (محدوده مورد پژوهش)، دارای عیار بیشینه ۵/۱۸ گرم بر تن (ژرفای ۵۷ متری گمانه B7) است و در رگه سیلیسی - کربناتی طلا در تارگت شماره ۳، بیشترین عیار طلا ۵۷ گرم بر تن (ترانشه شماره ۹۹) اندازه‌گیری شده است (عسکری و فیض، ۱۳۹۰). همچنین عیار قلع در شماری از نمونه‌ها بالا بوده به گونه‌ای که در ترانشه ۱۵ عیار قلع تا ۳۰۰ گرم بر تن اندازه‌گیری شده است (عسکری، ۱۳۸۸). از آنجا که بیشترین ذخیره طلا در سامانه‌های طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی در پهنه‌های کشتی سقف شکننده استوک‌های گرانتیویدی احیایی کانه‌ساز و همچنین در سنگ‌های هورنفلسی مجاور توده شکل می‌گیرد، بنابراین این موقعیت‌ها محیط مناسبی برای کاوش‌های ژرفایی هستند (Hart et al., 2002) و انجام اکتشافات ژئوفیزیکی به روش پلازماسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی بر روی توده نفوذی کانه‌ساز و سنگ‌های دربرگیرنده با این دیدگاه انجام گرفته است.

۷ - تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی (IP-RS)

گستره مورد مطالعه با مساحت حدود ۱ کیلومتر مربع، با ۷ آرایش مستطیلی با مشخصات $AB=800$ متر، فواصل نیم‌رخ ۵۰ متر، فواصل ایستگاهی ۲۰ متر ($MN=20m$) و ۵ نیم‌رخ دوقطبی - دوقطبی با ویژگی‌های $AB=MN=20, 40, 60m$ توسط گروه ژئوفیزیک سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مورد پیمایش

حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و بدون اضافه شدن سیال‌های ماگمایی و گرمایی تشکیل شده است و از اصطلاح اسکارن پیشرونده برای آن می‌توان استفاده کرد (Mair et al., 2006). در درجه حرارت پایین‌تر و در دمای حدود ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد (Marsh et al., 2003)، اسکارن پسرونده (قهقراپی) شکل گرفته و در این مرحله، کانی‌های آبدار مانند اکتینولیت، زئوسیت - بیوتیت و سولفیدهای طلا در وجود آمده‌اند. اسکارن پسرونده در محدوده مطالعاتی با ستبرای کمتر از یک متر در بخشی از همبری توده نفوذی و کنگلومرای آهکی قابل مشاهده است.

دگرسانی پروپلیتیک: این دگرسانی بخش گسترده‌ای از محدوده مطالعاتی را به خود اختصاص داده است و همزمان با نفوذ توده گرانتیویدی احیایی با شدت‌های مختلف در واحدهای آتشفشانی - رسوبی میزبان و به مقدار کمتر در بخش‌هایی از توده نفوذی تشکیل شده است. دگرسانی پروپلیتیک با حضور کانی‌های کلریت، کربنات، آلپیت، اپیدوت، پیریت و گاه پیرویت قابل تشخیص است. کلریت کانی ثانویه اصلی این پهنه است که در همه جا با فراوانی مختلف دیده می‌شود و بیشتر از دگرسان شدن کانی‌های آهن و منیزیم‌دار مثل پیروکسن، هورنبلاند و بیوتیت به‌وجود آمده است. پلاژیوکلازها نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای به اپیدوت، کلینوژونزیت و مجموعه‌ای از کانی‌های رسی مانند سریسیت و کائولینیت تبدیل شده‌اند. از آنجا که دگرسانی پروپلیتیک گسترش و وسعت زیادی داشته ولی با پهنه‌های طلا در همراه نیست، معمولاً در اکتشاف پهنه‌های طلا در اهمیت چندانی ندارد.

۶- کانی‌سازی

کانه‌زایی در محدوده مورد بررسی به صورت جانثینی، پراکنده، رگه - رگچه‌ای (صفحه‌ای و داربستی)، توده‌ای، برشی و اسکارن در ارتباط با توده نفوذی گرانتی - گراندیوریتی احیایی محدوده اکتشافی و با فواصل مختلف نسبت به آن تشکیل شده است. کانی‌سازی طلا، قلع و تعدادی از عناصر همراه در درون توده نفوذی اسیدی تا حدواسط احیایی، سنگ‌های مجاور آن و در فواصل دورتر از توده در امتداد پهنه‌های گسلی شکل گرفته است. افزون بر بافت و ساخت متنوع، سنگ میزبان متفاوت، عیار و نوع کانی‌ها نیز به تناسب فاصله از توده نفوذی احیایی فرق می‌کنند. وجود توده گرانتیویدی احیایی، ناهنجاری‌های عناصر Au, Sn, As, Sb, Ag, Zn, Pb, W, Bi در اکتشافات ژئوشیمیایی منطقه، مجموعه کانی‌سازی سولفیدی (پیرویت، آرسنوپیریت، پیریت، مارکاسیت، اسفالریت، گالن، استینیت، استانتیت، کالکوپیریت) درون توده نفوذی احیایی و سنگ‌های میزبان، ساخت و بافت، دگرسانی تورمالینی، سیلیسی، سریسیتی، کربناتی، غنی بودن سیال گرمایی از CO_2 و شوری پایین آن در ناحیه معدنی طلای هیرد و مقایسه ویژگی‌های آن با ویژگی‌های ذخایر طلای شناخته شده در سطح جهان، کانساز طلای هیرد را در گروه سامانه‌های طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی (RIRGS) قرار داده است (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۵).

بر پایه مدل ژئوتیکی طرح شده برای این سامانه‌ها، کانه‌زایی‌های متعددی از حاشیه توده نفوذی به سوی بیرون می‌تواند تشکیل شود که شعاع تشکیل آنها تا ۳۰ کیلومتری توده نفوذی کانه‌ساز نیز ممکن است، برسد (شکل ۴). در این سامانه‌ها دست کم هفت نوع کانی‌سازی دیده می‌شود که به صورت پراکنده، جانثینی، توده‌ای، اسکارن (همبری و دورمرکز)، رگه - رگچه‌ای و برشی در فواصل مختلف نسبت به توده نفوذی احیایی تشکیل می‌شوند (Hart et al., 2000a; Hart, 2007). سرد شدن سیال ماگمایی، آمیزش آن با دیگر سیالات، واکنش با سنگ‌های درونگیر و متغیرهای ساختمانی از عواملی هستند که پاراژنز، کانی‌شناسی و پهنه‌بندی مرتبط با کانی‌سازی را کنترل می‌کند (Hart et al., 2000b; Hart & Goldfarb, 2005). بنابراین اجتماع متنوعی از فلزات بر پایه زمان و مکان، فاصله از منشأ سیال کانه‌ساز و نوع سنگ میزبان شکل می‌گیرد. بر پایه نظر (Hart, 2005), Hart et al. (2004), Marsh et al. (2003)، پهنه‌بندی ژئوشیمیایی و کانی‌سازی در اطراف ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی،

بی‌هنجاری شماره ۴ (شکل‌های ۶ و ۷)، در جنوب خاور محدوده مطالعاتی و در فاصله نیم‌رخ‌های ۵۵۰ تا ۷۵۰ جنوبی و میان ایستگاه‌های ۳۱۰ تا ۴۱۰ خاوری قابل تشخیص است. از دید زمین‌شناسی این بی‌هنجاری بر خلاف بی‌هنجاری‌های پیشین در واحد توف و شیل‌های سیلیسی دیده می‌شود و در سطح، رخنمون توده گرانیتوئیدی دیده نمی‌شود. آثاری از کانی‌سازی رگه - رگچه‌ای (صفحه‌ای) در سطح این بی‌هنجاری دیده می‌شود. افزون بر این نظر به اینکه متغیرهای زمین‌شناسی، زمین‌ساخت و دگرسانی در این بی‌هنجاری نسبت به دیگر بی‌هنجاری‌های منطقه تغییر چندانی نداشته است، می‌توان آن را مشابه با دیگران دانست و بی‌هنجاری شماره ۴ را در ارتباط با توده گرانیتوئیدی کانه‌ساز ژرفایی تعبیر و تفسیر کرد.

بی‌هنجاری شماره‌های ۵ و ۶ (شکل‌های ۶ و ۷)، در جنوب باختر محدوده مورد پژوهش و در فاصله نیم‌رخ‌های ۴۵۰ تا ۹۵۰ جنوبی قابل مشاهده است. بی‌هنجاری ۵ در جنوب باختر محدوده مطالعاتی، بر روی آبرفت‌های عهد حاضر واقع شده است و بارپذیری بالا و مقاومت ظاهری پایین آن تا حدودی می‌تواند تحت تأثیر آبرفت قرار گرفته باشد. اگرچه احتمال نفوذ توده گرانیتوئیدی و عملکرد آن در ژرفاهای بخش‌های جنوب باختر محدوده مورد پژوهش رانمی‌توان نادیده گرفت. با بررسی‌های انجام شده در بخش شمالی بی‌هنجاری ۶، آثار رگچه‌های داربستی و صفحه‌ای سولفیددار دیده شد که در سطح اکسیده شده‌اند، بنابراین این بی‌هنجاری، دست کم در بخش‌های شمالی می‌تواند از پتانسیل مناسبی برای کانی‌سازی برخوردار باشد. پس از تهیه نقشه‌های بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری و تعیین بی‌هنجاری‌ها، به منظور بررسی گسترش ژرفایی این بی‌هنجاری‌ها، ۵ نیم‌رخ دوقطبی - دوقطبی با ویژگی‌های $AB=20, 40, 60m$ بر روی نواحی بی‌هنجار برداشت شده است (جدول ۱). مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری این نیم‌رخ‌ها به روش مدل‌سازی وارون تهیه شده است (محمدی‌ویژه، ۱۳۹۰). برای تفسیر این نیم‌رخ‌ها به شرح مقاطع مربوط به دو نیم‌رخ DD100S و DD500S بسنده می‌شود که بر روی بی‌هنجاری شماره ۲ و ۳ (شکل‌های ۶ و ۷) برداشت شده است. بر پایه مقاطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری نیم‌رخ DD100S (شکل ۸)، پهنه بارپذیری در فاصله ایستگاه‌های ۲۰ تا ۱۰۰ باختری دیده می‌شود و از سطح تا ژرفای ۱۰۰ متری گسترش یافته است و انطباق خوبی با بی‌هنجاری مقاومت ویژه پایین دارد. این پهنه بر دگرسانی کوارتز - تورمالین - سریست منطبق بوده و کانی‌سازی طلا همراه با سولفیدهای آرسنوپیریت، پیریت، پیروتیت، اسفالریت و گالن در نمونه‌های برداشت شده از ترانسه T15 و گمانه B6 در نزدیکی بی‌هنجاری یادشده، نشان‌دهنده این است که این بی‌هنجاری می‌تواند پتانسیل بالایی برای کانی‌سازی داشته باشد. با توجه به مقاطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری نیم‌رخ DD500S (شکل ۹)، پهنه بارپذیری در فاصله ایستگاه‌های ۲۹۰ تا ۳۵۰ باختری قابل مشاهده است و تقریباً با شدت کم از سطح زمین شروع شده و تا ژرفای بیش از ۱۰۰ متر نیز ادامه دارد که در ژرفاها بر شدت بارپذیری افزوده می‌شود. در این نیم‌رخ برخلاف نیم‌رخ پیشین، بی‌هنجاری با بارپذیری بالا منطبق بر بی‌هنجاری با مقاومت ویژه متوسط تا بالا است. در سطح زمین رگه - رگچه‌های کوارتز - تورمالین سولفیددار درون شیل‌های سیلیسی میزبان توده نفوذی دیده می‌شود. برای این بی‌هنجاری نیز می‌توان کانی‌سازی سولفیدی پراکنده همراه با طلا و دگرسانی نسبتاً شدید سیلیسی - کربناتی را پیش‌بینی کرد.

۸ - نتیجه‌گیری

نفوذ توده گرانیتوئیدی احیایی در توالی آتشفشانی - رسوبی ناحیه هیرد، دگرسانی و کانه‌زایی گسترده‌ای را به همراه داشته است. دگرسانی پروپلیتیک و اسکارنی شدن در منطقه گسترش زیادی دارد ولی دگرسانی کوارتز - تورمالین - سریست و دگرسانی سیلیسی - کربناتی به دلیل همراهی با کانی‌سازی طلا اهمیت بیشتری دارد. کانی‌سازی طلا به صورت جانشینی، پراکنده، رگه - رگچه‌ای، توده‌ای، اسکارن و

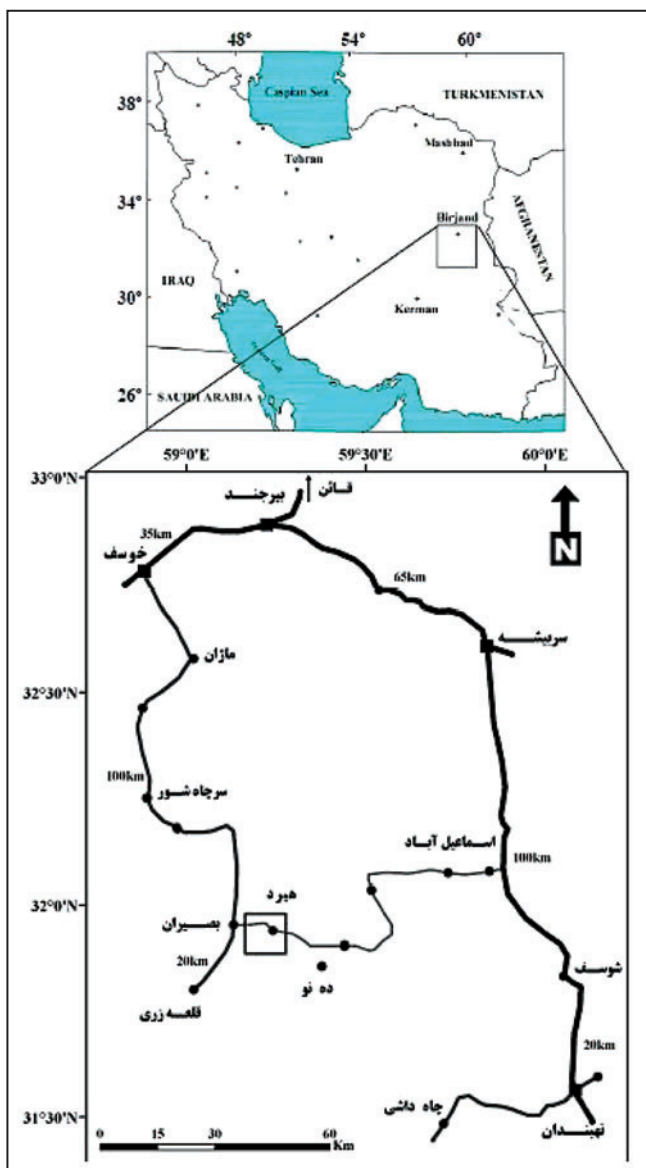
قرار گرفته است. در مجموع ۲۰۱۱ ایستگاه با روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده که از این تعداد ۸۷۵ ایستگاه با آرایش مستطیلی و ۱۱۳۶ ایستگاه با آرایش دوقطبی - دوقطبی اندازه‌گیری شده است. برای این منظور ابتدا خط مبنایی با امتداد شمالی - جنوبی در نظر گرفته شد. سپس نیم‌رخ‌های برداشت با فواصل ۵۰ متر به صورت عمود بر امتداد خط مبنای، از نیم‌رخ ۳۵۰ شمالی تا نیم‌رخ ۹۵۰ جنوبی علامت‌گذاری شد. در ادامه بر روی هر نیم‌رخ، ایستگاه‌ها با فاصله ۲۰ متر از ۴۳۰ باختری تا ۴۳۰ خاوری مشخص شد و متغیرهای بارپذیری ظاهری و مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. در این محدوده کمینه مقدار عددی بارپذیری ۲ و بیشینه آن ۵۰ میلی‌ولت بر ولت و مقدار عددی مقاومت ویژه ظاهری بین ۲۴ تا ۶۰۴ اهم متر است (محمدی‌ویژه، ۱۳۹۰). در نقشه بارپذیری و نقشه مقاومت ویژه ظاهری حاصل از آرایه‌های مستطیلی (شکل‌های ۶ و ۷)، شش ناحیه بی‌هنجار با بارپذیری بیش از ۳۰ میلی‌ولت بر ولت قابل تشخیص است که از شماره ۱ تا ۶ نامگذاری شده‌اند.

در مورد محدوده بی‌هنجاری شماره ۱ و ۲، اطلاعات سطحی و ژرفایی نسبتاً زیادی وجود دارد که در تعبیر و تفسیر دیگر بی‌هنجاری‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفته است. این بی‌هنجاری‌ها در میانه محدوده مورد بررسی و در فاصله نیم‌رخ‌های ۵۰ تا ۴۵۰ جنوبی و در فاصله ایستگاه‌های ۱۱۰ باختری تا ۷۰ خاوری دیده می‌شود (شکل‌های ۶ و ۷). ترانسه‌های اکتشافی T15, T16, T17 در بخش شمالی بی‌هنجاری شماره ۱ و تقریباً عمود بر امتداد آن حفر شده‌اند، افزون بر آن، گمانه‌های شناسایی B6, B7, B49 در محدوده این بی‌هنجاری قرار دارند. از دید زمین‌شناسی این بی‌هنجاری‌ها در حاشیه خاوری توده گرانیتوئیدی احیایی و تقریباً در مرز بین توده و شیل‌های سیلیسی شده میزبان شکل گرفته است. در نقشه مقاومت ظاهری، بی‌هنجاری شماره ۱ دارای مقاومت ظاهری بالا و بی‌هنجاری شماره ۲ مقاومت ظاهری پایینی دارد. گمانه‌های اکتشافی B6 و B7، از حاشیه باختری بی‌هنجاری شماره ۱ با شیب ۱۵ درجه در راستای N50E به سوی بی‌هنجاری شماره ۲ تا ژرفای ۱۰۸ متر حفر شده‌اند. بر پایه مطالعه مغزه‌های گمانه B6 و B7، در مغزه‌های با ژرفای کمتر از ۵۰ متر، رگچه‌های سیلیسی - تورمالینی و کربناتی با سولفید پراکنده نسبت به بخش‌های ژرفایی این گمانه‌ها فراوان‌تر هستند و بر عکس دگرسانی سریستی و مقادیر سولفید در بخش‌های ژرفایی گمانه‌ها، (که میل به سوی بی‌هنجاری شماره ۲ دارد) نسبت به بخش‌های سطحی بیشتر است، بنابراین مقاومت ظاهری بالا در بی‌هنجاری شماره ۱ را می‌توان با تراکم زیاد رگچه‌های داربستی و صفحه‌ای کوارتز - تورمالین و کلسیت مرتبط دانست. بررسی مغزه‌های گمانه B49 نیز این مسئله را تأیید می‌کند و مقاومت ظاهری پایین در بی‌هنجاری شماره ۲، به حضور دگرسانی شدید سریستی و سولفیدهای فلزی فراوان به صورت پراکنده، رگچه‌ای و توده‌ای مربوط است.

بی‌هنجاری شماره ۳ (شکل‌های ۶ و ۷)، در بخش شمال خاور محدوده مطالعاتی و در فاصله نیم‌رخ‌های ۱۰۰ جنوبی تا ۲۰۰ شمالی و در فاصله ایستگاه‌های ۱۵۰ تا ۲۷۰ خاوری قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری نیز در حاشیه شمال خاور توده نفوذی و در مجاورت با شیل‌های سیلیسی میزبان تشکیل شده است. امتداد بی‌هنجاری در راستای شکستگی‌هایی با روند تقریباً شمالی - جنوبی است. گفنتی است جریان سیال و کانی‌سازی در سامانه‌های طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی، به دلیل ژرفای نسبتاً زیاد، غالباً در پهنه‌های کشتی ایجاد شده در سقف توده نفوذی و سنگ‌های هورنفلسی شکننده دربرگیرنده، توسعه می‌یابد که این عوارض ساختمانی توسط حرارت سیال گرمایی کنترل می‌شود (Stephens et al., 2004). بر روی بی‌هنجاری شماره ۳، حفاریات اکتشافی انجام نشده ولی بررسی‌های صحرایی آثار کانی‌سازی سولفیدی که در سطح تبدیل به اکسیدهای آهن (لیمونیت و گوتیت) شده‌اند را نشان می‌دهد. مقدار طلا در تنها نمونه برداشت شده از این محدوده ۱/۵۷ گرم بر تن اندازه‌گیری شده است.

سپاسگزاری

این نوشتار در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۱۸۳۰۲/۳ مورخ ۱۳۹۰/۴/۱۲ دانشگاه فردوسی مشهد است. در پایان نگارندگان لازم می‌دانند از مسئولین و کارشناسان سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور به ویژه گروه ژئوفیزیک، سپاسگزاری کنند.



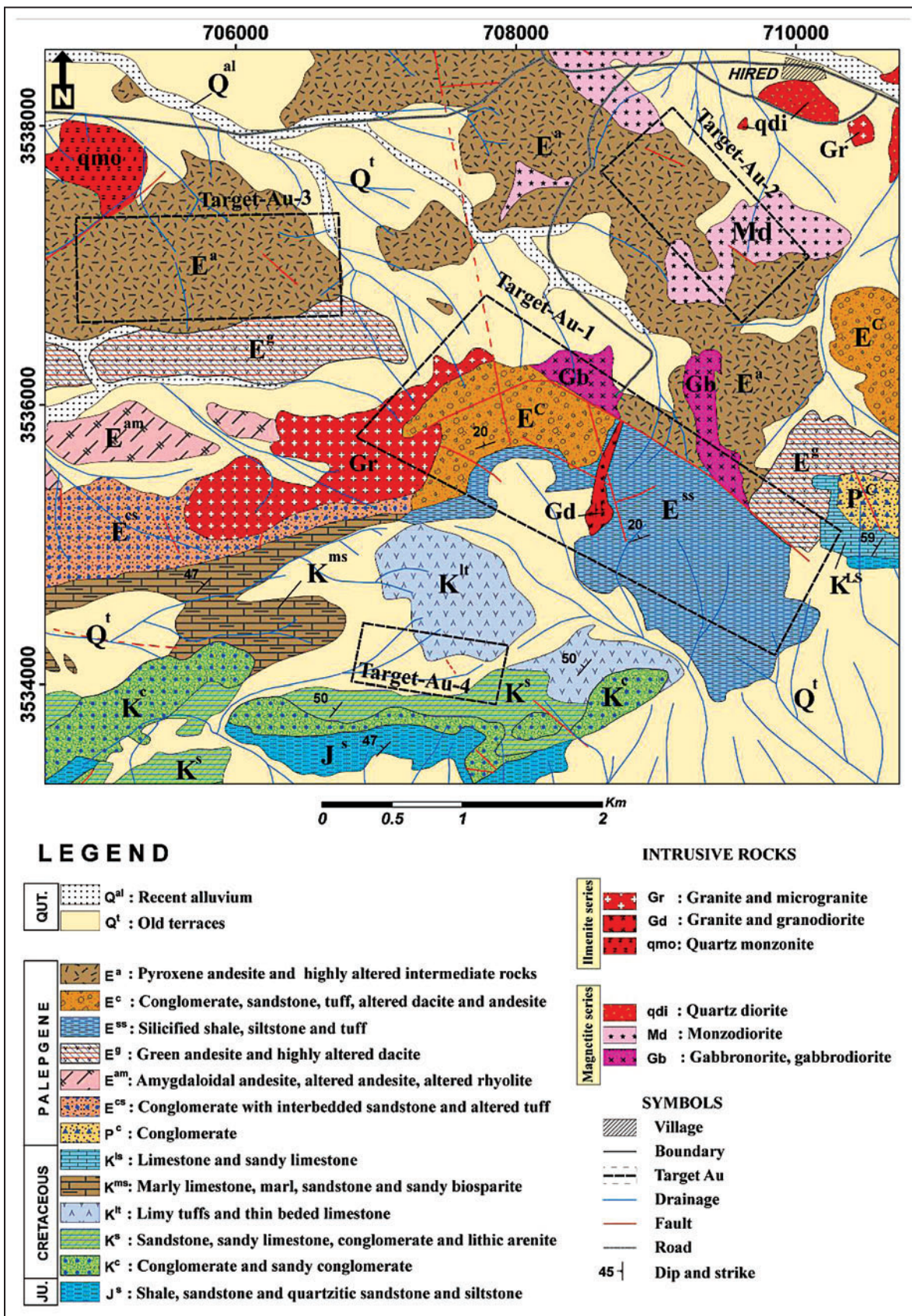
شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و راه‌های دسترسی به آن.

برشی در درون توده نفوذی احیایی، سنگ‌های مجاور آن و در فواصل دورتر از توده در امتداد پهنه‌های گسلی شکل گرفته است. افزون بر بافت و ساخت متنوع، سنگ‌میزبان متفاوت، محتوای فلزی، نوع کانی‌ها و عیار طلا نیز به تناسب فاصله از توده نفوذی احیایی فرق می‌کنند. مطالعات انجام شده در منطقه، کانسار طلای هیرد را در گروه سامانه‌های طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی (RIRGS) قرار داده است. در این نوع کانسارها بیشترین ذخیره طلا در پهنه‌های کششی سقف شکننده استوک‌های گرانیتوئیدی احیایی کانه‌ساز و همچنین در سنگ‌های هورنفلسی مجاور همراه با کانی‌های سولفیدی شکل می‌گیرد (Stephens et al., 2004). در محدوده مورد مطالعه با تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی و مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و ژئوشیمی حاصل از بررسی‌های صحرایی و بهره‌گیری از مدل ژنتیکی کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی، شش ناحیه بی‌هنجاری با بارپذیری بیش از ۳۰ میلی‌ولت بر ولت مشخص شده است (شکل ۱۰). این بی‌هنجاری‌ها منطبق بر پهنه‌های کانی‌سازی حاشیه توده گرانیتوئیدی احیایی و سنگ دربرگیرنده بوده و می‌توان آنها را در دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد:

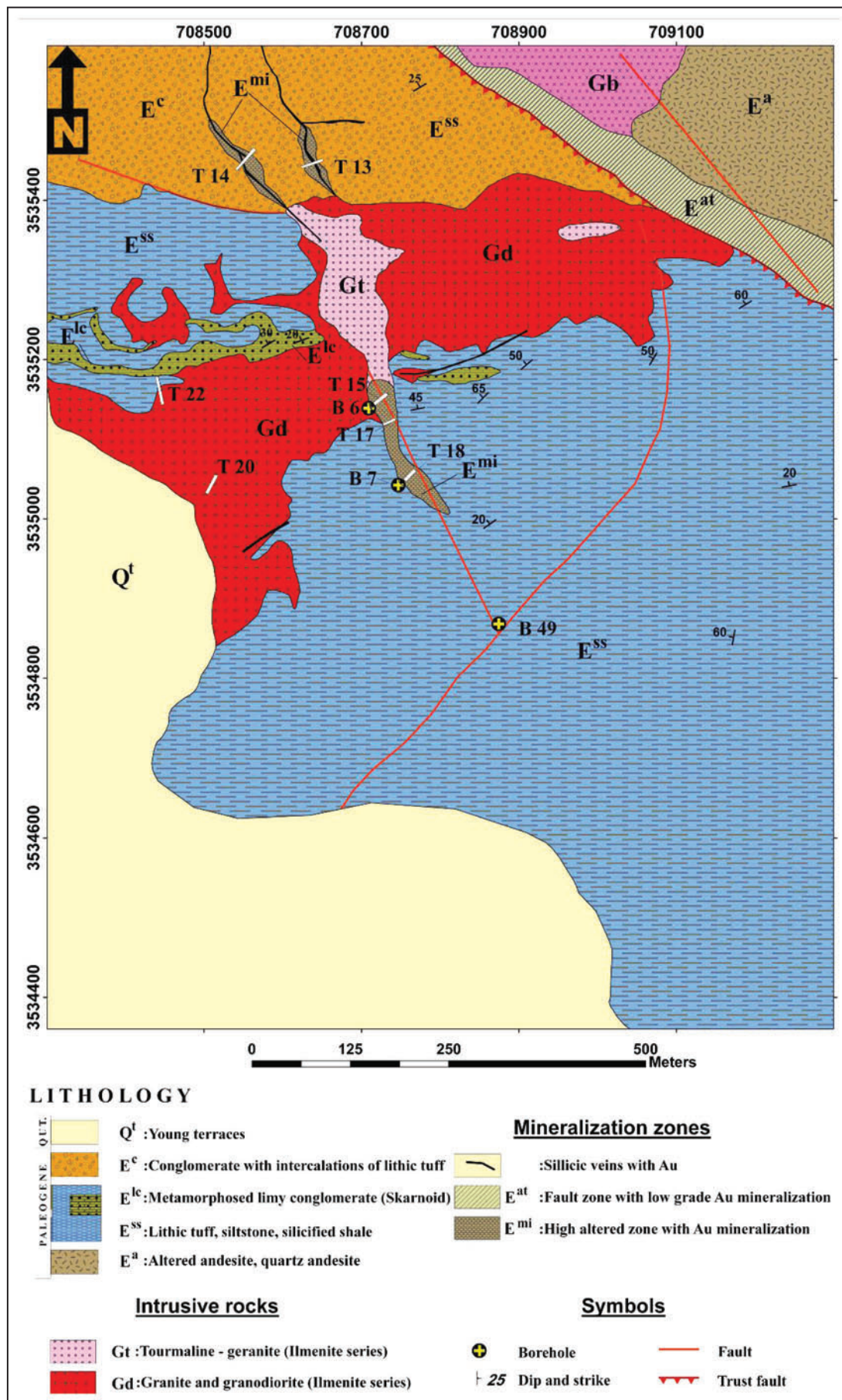
(۱) بی‌هنجاری دارای پلاریزاسیون القایی بالا و مقاومت ویژه کم که ناشی از حضور سولفورهای فلزی فراوان به صورت پراکنده، رگچه‌ای و توده‌ای همراه با دگرسانی شدید سربستی است. محدوده این نوع بی‌هنجاری در سه بخش از ناحیه مطالعاتی، بر روی نقشه‌های IP، RS و همچنین بر روی نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱۰) مشخص شده است.

(۲) بی‌هنجاری دارای پلاریزاسیون القایی بالا و مقاومت ویژه الکتریکی متوسط تا بالا که مشخص‌کننده وجود سولفورهای فلزی به صورت پراکنده و همراه با دگرسانی سیلیسی-کربناتی است. این بی‌هنجاری نیز در سه بخش از محدوده مورد تحقیق با وضوح بیشتری دیده می‌شود که گسترش آنها بر روی نقشه‌های IP، RS و همچنین بر روی نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱۰) دیده می‌شود.

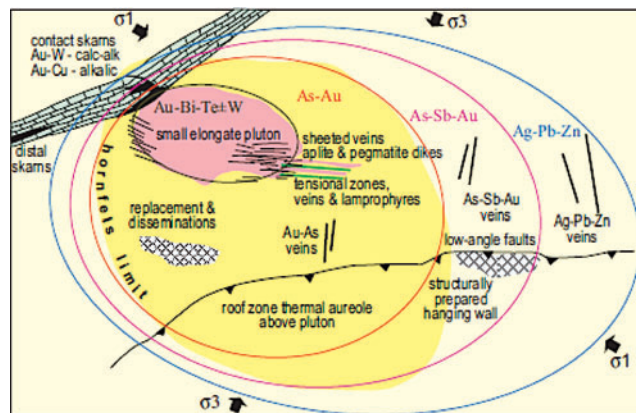
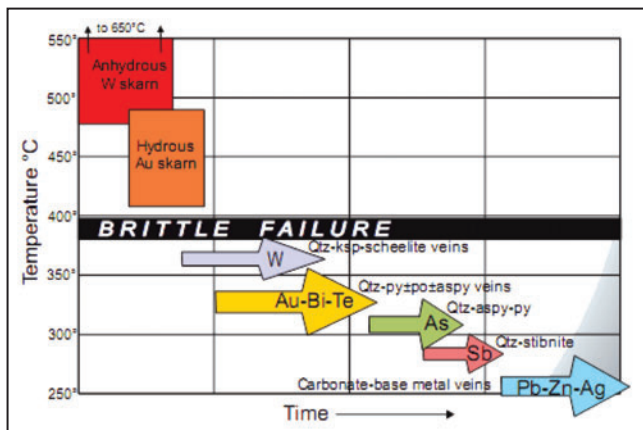
با این تفاسیر در محدوده مطالعاتی، کانه‌زایی عمدتاً در بخش خاوری توده گرانیتوئیدی احیایی شکل گرفته که احتمالاً عملکرد عوامل زمین‌ساختی پس از کانی‌سازی، سبب چرخش توده به سوی خاور شده است. نظر به اینکه در سوی جنوب و جنوب خاور محدوده، توده نفوذی در زیر آبرفت‌ها و رسوبات شیلی گسترش دارد، می‌توان در این مناطق انتظار کانی‌سازی را داشت. در پایان حفر دست کم یک گمانه اکتشافی بر روی هر یک از بی‌هنجاری‌های یاد شده تا ژرفای حداقل ۱۲۰ متر و گسترش اکتشافات ژئوفیزیکی به روش IP، RS در بخش‌های جنوب و جنوب خاور محدوده مورد مطالعه با ژرفای کاوش ۲۵۰ متر پیشنهاد می‌شود. همچنین با توجه به تشکیل هاله‌های هورنفلسی پیرویت‌دار در اطراف توده گرانیتوئیدی احیایی و همراهی پیرویت با مجموعه کانی‌های سولفیدی طلادار، برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی بر روی توده نفوذی یاد شده و نواحی هم‌جوار و دیگر توده‌های گرانیتوئیدی مشابه در منطقه می‌تواند کمک شایانی در امر اکتشاف طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی کند.



شکل ۲- بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۰۰۰۰ محدوده معدنی هیرد و نمایش مناطق طلادار بر روی آن با تغییرات (عسکری و صفری، ۱۳۸۲)

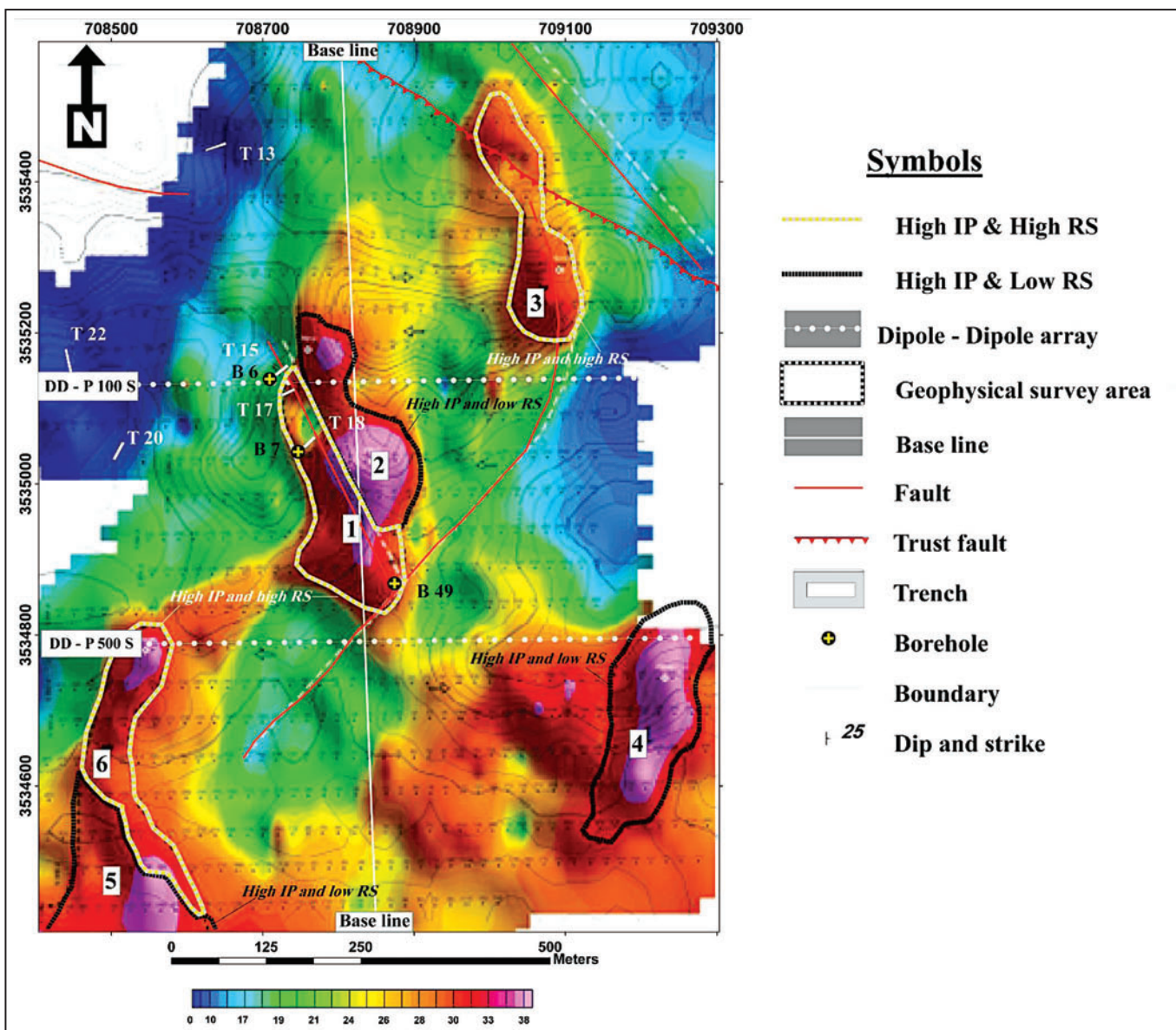


شکل ۳- نقشه زمین شناسی گستره مطالعاتی طلای هیرد

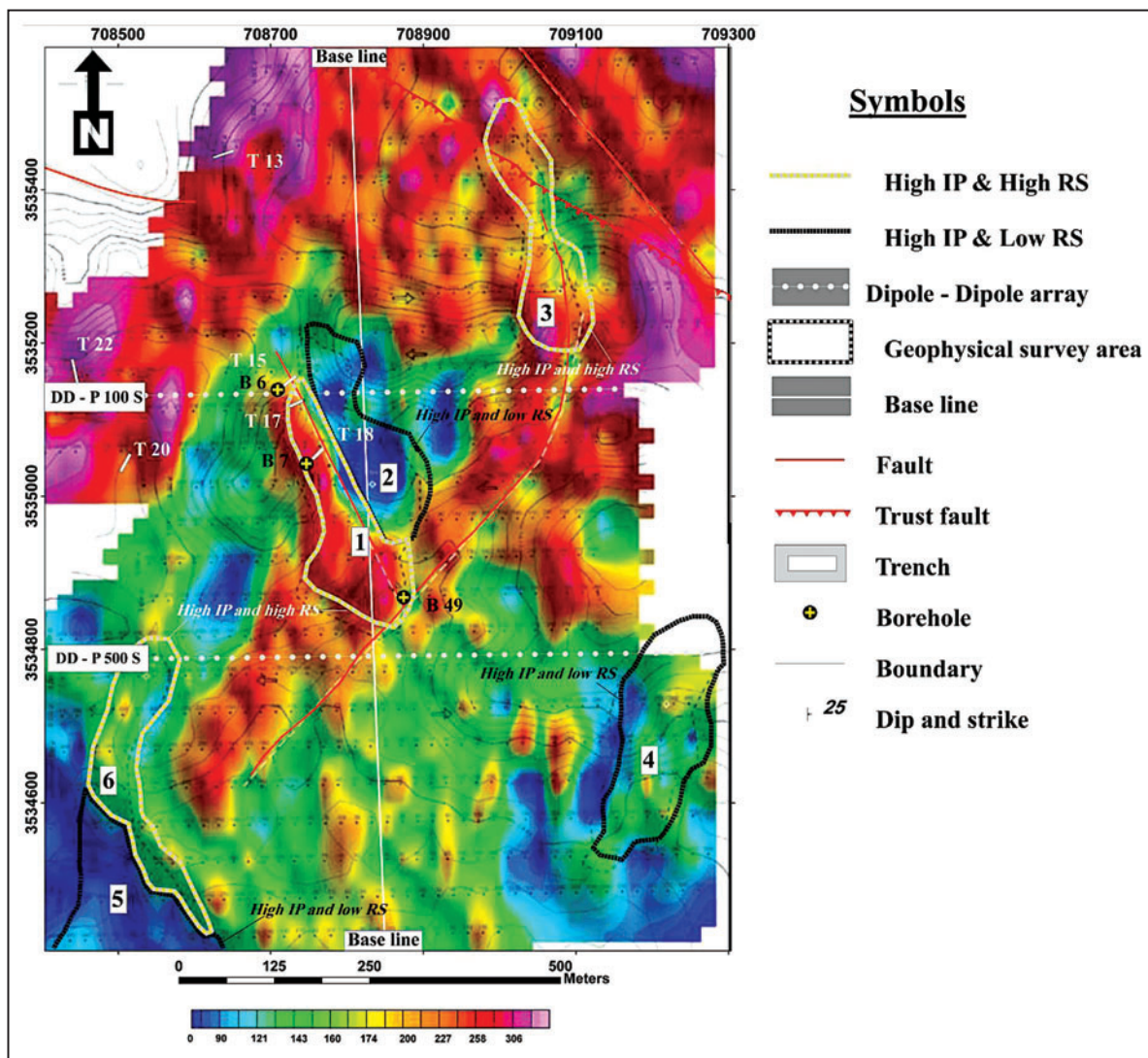


شکل ۵ - زون‌بندی ژئوشیمیایی عناصر در ذخایر RIRGS بر اساس درجه حرارت و فاصله از منشأ سیال کانه‌ساز (Hart, 2007)

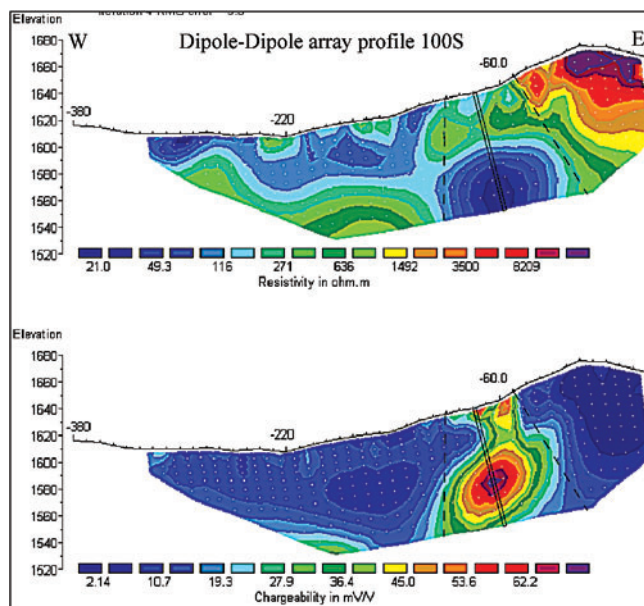
شکل ۴ - مدل نمادین از کانی‌سازی‌های مختلف مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی (Hart, 2007)



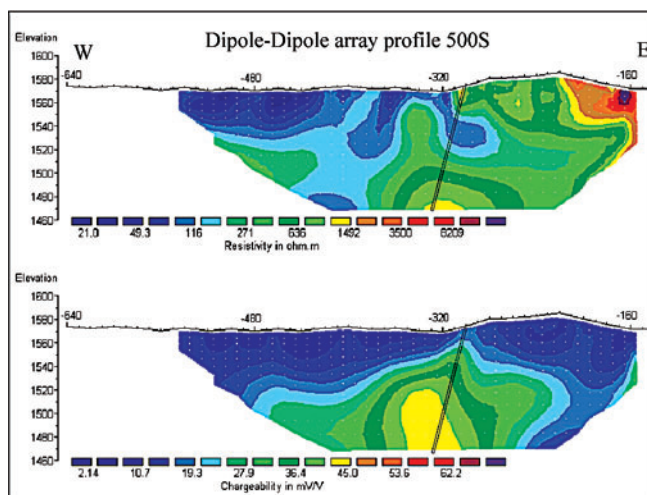
شکل ۶ - نقشه‌های بارپذیری محدوده مطالعاتی با تغییرات (محمدی‌ویژه، ۱۳۹۰)



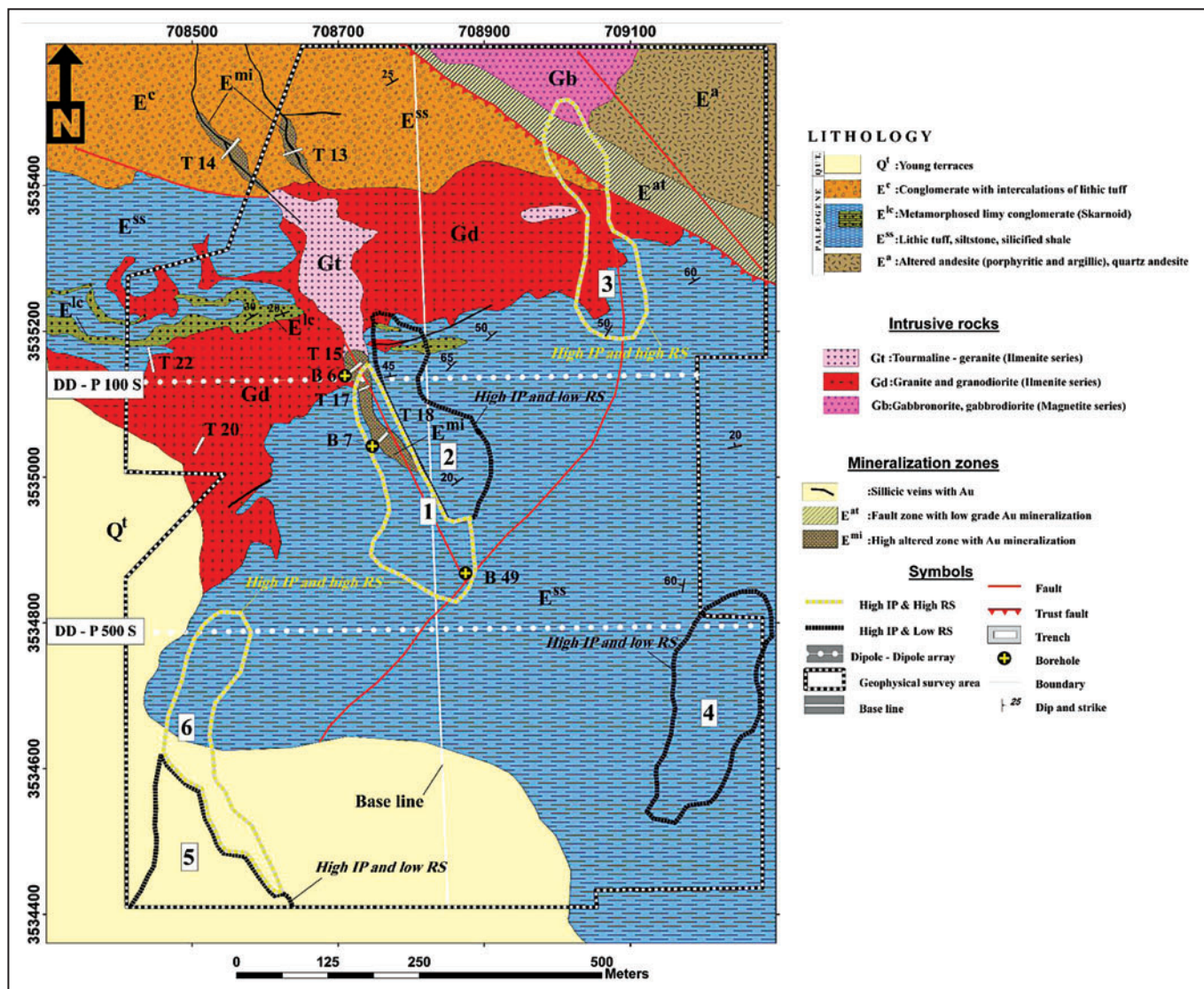
شکل ۷- نقشه مقاومت ویژه ظاهری محدوده مطالعاتی با تغییرات (محمدی ویزه، ۱۳۹۰)



شکل ۸- مقاطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری، نیمرخ 100S (محمدی ویزه، ۱۳۹۰)



شکل ۹- مقاطع دو بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری، نیمرخ 500S (محمدی ویزه، ۱۳۹۰)



شکل ۱۰- نقشه زمین شناسی گستره مطالعاتی طلای هیرد که بر روی آن بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی نشان داده شده است.

جدول ۱- ویژگی های نیمرخ های دوقطبی - دوقطبی برداشت شده در محدوده مطالعاتی.

نام نیمرخ	محدوده برداشت	فاصله الکتردی	پرش AB	پرش MN	طول
DD-0	70E تا 470E	۶۰ متر	۲۰ متر	۲۰ متر	۴۰۰ متر
DD-100S	330W تا 50E	۲۰ و ۴۰ متر	۲۰ متر	۲۰ متر	۳۸۰ متر
DD-250S	290W تا 150E	۴۰ متر	۲۰ متر	۲۰ متر	۴۴۰ متر
DD-500S	550W تا 150W	۴۰ و ۶۰ متر	۲۰ متر	۲۰ متر	۴۰۰ متر
DD-550S	90E تا 520E	۴۰ و ۶۰ متر	۲۰ متر	۲۰ متر	۴۳۰ متر

کتابنگاری

- اشراقی، ح.، راستاد، ا.، امامی، م. ه. و عسکری، ع.، ۱۳۸۷- کانه زایی طلای هیرد: نمونه ای از ذخایر طلای مرتبط با نفوذی های گرانیتوئیدی کاهیده در ایران (جنوب بیرجند)، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶۹، ص ۱۹-۲۰.
- عسکری، ع. و صفری، م.، ۱۳۸۲- گزارش نقشه زمین شناسی، معدنی ناحیه امیدبخش معدنی طلای هیرد، طرح اکتشافات مواد معدنی جنوب خراسان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۹۵ صفحه.
- عسکری، ع. و فیض، م.، ۱۳۹۰- طرح تلفیق لایه های اطلاعات پایه و تعیین نقاط امیدبخش مواد معدنی، گزارش اکتشاف تفصیلی کانسار طلای هیرد (تارگت شماره ۳)، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۸۰ صفحه.
- عسکری، ع.، ۱۳۸۸- طرح تلفیق لایه های اطلاعات پایه و تعیین نقاط امیدبخش مواد معدنی، گزارش اکتشاف عمومی کانسار طلای هیرد (تارگت شماره ۱)، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۴۷ صفحه.
- کریم پور، م. ح.، حیدریان شهری، م. ر.، ملک زاده شفاوردی، آ. و عسکری، ع.، ۱۳۸۵- پترولوژی توده های نفوذی، آلتراسیون، بررسی ژئوشیمی عناصر خاص، بررسی سیالات درگیر و مطالعات ژئوفیزیکی در منطقه کانی سازی طلای هیرد، مرکز تحقیقات ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۶۱ صفحه.
- محمدی ویژه، م.، ۱۳۹۰- اکتشاف طلا با استفاده از روش پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه هیرد - خوسف (استان خراسان جنوبی)، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۵ صفحه.

References

- Brown, V. S., Baker, T. & Stephens, J. R., 2002- Ray Gulch tungsten skarn, Dublin Gulch, central Yukon: Gold-tungsten relationships in intrusion related ore systems and implications for gold exploration, *in* Emond, D.S., Weston, L.H., and Lewis, L.L., ed., Yukon exploration and geology 2001: Exploration and Geological Services Division, Yukon Region, Indian and Northern Affairs Canada, p. 259-268.
- Hart, C. J. R. & Goldfarb, R. J., 2005- Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems: Proceedings of the 2005, New Zealand Minerals Conference, Auckland, November 13-16, p. 125-133.
- Hart, C. J. R., 2005- Classifying, distinguishing and exploring for intrusion related gold systems: The Gangué: Newsletter of the Geological Association of Canada Mineral Deposits Division, v. 87, p. 1, 4-9.
- Hart, C. J. R., 2007- Reduced intrusion-Related gold systems, Mineral deposits of Canada, special publication No.5, p.95-112.
- Hart, C. J. R., Baker, T. & Burke, M., 2000a- New exploration concepts for country-rock hosted, intrusion-related gold systems, Tintina Gold Belt British Columbia and Yukon Chamber of Mines, Special Volume 2, p. 145-172.

- Hart, C. J. R., Baker, T., Lindsay, M. J., Oliver, N. H. S., Stephens, J. R. & Mair, J. L., 2000b- Structural controls on Tombstone Plutonic Suite gold deposits, Tintina Gold Belt, Yukon [abs.]: Geological Society of America Abstracts with Programs, Cordilleran Section, v. 32, p. 6.
- Hart, C. J. R., Goldfarb, R. J., Lewis, L. L. & Mair, J. L., 2004- The Northern Cordillera Mid-Cretaceous Plutonic Province: Ilmenite/magnetite-series granitoids and intrusion-related mineralisation: Resource Geology, v. 54, n. 3, p. 253–280.
- Hart, C. J. R., McCoy, D., Goldfarb, R. J., Smith, M., Roberts, P., Hulstein, R., Bakke, A. A. & Bundtzen, T. K., 2002- Geology, exploration and discovery in the Tintina gold province, Alaska and Yukon: Society of Economic Geologists, Special Publication 9, p. 241–274.
- Mair, J. L., Goldfarb, R. J., Johnson, C. A., Hart, C. J. R. & Marsh, E. E., 2006- Geochemical constraints on the genesis of the Scheelite Dome intrusion-related gold deposit, Tombstone Gold Belt, Yukon, Canada: Economic Geology, v. 101, p. 523– 553.
- Marsh, E. E., Goldfarb, R. J., Hart, C. J. R. & Johnson, C. A., 2003- Geology and geochemistry of the Clear Creek intrusion-related gold occurrences, Tintina gold province, Yukon, Canada: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 40, n. 5, p. 681– 699.
- McCoy, D., Newberry, R. J., Severin, K., Marion, P., Flanigan, B. & Freeman, C., 2002- Paragenesis and metal associations in interior Alaska gold deposits: An example from the Fairbanks district: Mining Engineering, v. 54, 1, p. 33–38.
- Stephens, J. R., Mair, J. L., Oliver, N. H. S., Hart, C. J. R., Baker, T., Blenkinsop, T. G., Vearncombe, J. R. & Reddy, S. M., 2004- Structural and mechanical controls on intrusion-related deposits of the Tombstone gold belt, Yukon, Canada, with comparisons to other vein-hosted ore-deposit types: Journal of Structural Geology, v. 26, p. 1025–1041.