



ویژگی‌های ژئوفیزیکی کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا: مطالعه موردی در کانسار مس - طلای پورفیری دالی، استان مرکزی

مسلم فاتحی و هوشنگ اسدی هارونی*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

چکیده

ژئوفیزیک اکتشافی روشی ارزان، سریع و کارآمد برای شناخت عوارض زیر سطحی است. اما ژئوفیزیک روشی غیرمستقیم است و بهره‌برداری از اطلاعات ژئوفیزیکی مستلزم تفسیر دقیق و هدفمند داده‌های برداشت شده است. برای تفسیر کارآمد داده‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسارها، ابتدا باید شناخت کاملی از مدل کانسار و ویژگی‌های زمین‌شناسی از قبیل سنگ‌های میزبان، آلتراسیون‌ها، کانی‌شناسی و جایگاه کانی‌سازی در آن نوع کانسار داشت. قبل از حفر گمانه‌های اکتشافی، با استفاده از مطالعات ژنتیکی و داده‌های اکتشافی اولیه و همچنین شواهد سطحی باید یک مدل مفهومی برای کانسار مورد بررسی ارائه کرد و با توجه به ویژگی‌های آن مدل مفهومی، روش‌های ژئوفیزیکی مناسب، انجام و داده‌های اکتسابی تعبیر و تفسیر می‌شوند. در این پژوهش با توجه به مدل مفهومی و کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی عمومی کانسارهای مس - طلای پورفیری نظیر اهمیت زون پتاسیک با توجه به حضور کانی‌های همیافت مگنتیت، کالکوپریت، بورنیت و پیریت در استوک‌های دیوریتی، داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، مقاومت و ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی کانسار مس - طلای پورفیری دالی در ایران مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل غنی‌شدگی کانی‌های مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک و تهی‌شدگی آن در زون دگرسانی فلیک، روش مغناطیس‌سنجی روشی کارآمد برای زون‌بندی دگرسانی‌های مختلف در کانسارهای مس - طلای پورفیری است. همچنین با توجه به وجود کانی‌های سولفیدی به صورت افشان، روش پلاریزاسیون القایی، روشی مناسب برای تعیین گستره کانی‌های سولفیدی است. روش مقاومت و ویژه الکتریکی نیز برای ردیابی لیتولوژی، دگرسانی و کانی‌های فلزی مفید است. این پژوهش نشان داد که در کانسار مس - طلای پورفیری دالی، زون‌های با آنومالی مثبت و قوی مغناطیسی معیار بسیار مناسبی برای ردیابی کانسار است. شارژپذیری به شدت متأثر از درصد پیریت است و زون‌های با رسانایی و شارژپذیری خیلی زیاد و آنومالی‌های منفی مغناطیسی، منطبق بر هاله‌های زون‌های دگرسانی فلیک و آرژلیک است و دارای کانی‌سازی ناچیز است. آنومالی مغناطیسی، رسانایی بالا (رسانایی کم نیز زون‌های سیلیسی را نشان می‌دهد که حاوی کانی‌سازی هستند) و شارژپذیری متوسط تا بالا منطبق بر زون دگرسانی پتاسیک که حاوی کانی‌سازی سولفیدی مس و طلاست، دارند. این ویژگی‌های ژئوفیزیکی مهم‌ترین ردیاب کانی‌سازی در این کانسار است.

واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های ژئوفیزیکی، کانسارهای مس - طلای پورفیری، کانسار دالی، زون دگرسانی پتاسیک

مقدمه

ذخایر کانسارهای پورفیری مهم‌ترین منابع معدنی در کره زمین برای عناصر مس، مولیبدن، و رنیوم (Sillitoe, 2010) و همچنین مقدار قابل توجهی از طلا، نقره و دیگر فلزات را نیز فراهم می‌کنند (Cooke et al., 2014). کانسارهای پورفیری با تناژ بالا (۱۰ تا ۱۰۰۰ میلیون تن)، عیار کم ($0.5-1.4\% \text{ Cu}$; $0-1.8\text{g/t Au}$; $0-0.1\% \text{ Mo}$) و سولفیدهایی (کالکوپریت، بورنیت، مولیبدنیت، پیریت، کالکوسیت و غیره) که معمولاً به صورت افشان و یا در رگه‌های استوک‌ورک تشکیل می‌شوند، توصیف می‌شوند (Cooke et al., 1998; Sillitoe, 2010; Pirajno, 2010). کانی‌زایی در سیستم‌های پورفیری به صورت رگه‌ها و رگه‌چه‌های استوک‌ورک، برش‌های هیدروترمال و جایگزینی در سنگ دیواره تشکیل می‌شود. کانسارهای پورفیری تقریباً در عمق ۱ تا ۶ کیلومتری از سطح زمین تشکیل می‌شوند. اغلب کانسارهای پورفیری دارای ارتباط مکانی، زمانی و ژنتیکی با فرایند ژئودینامیک فرورائش در حاشیه‌های صفحات هم‌گرایی که مذاب‌های هیدروژن‌دار در گوشته زیر کمانی تولید می‌شوند، هستند (Cooke et al., 2014).

کانسارهای پورفیری اغلب بر اساس عناصر اقتصادی‌شان طبقه‌بندی می‌شوند و شامل دو زیر مجموعه اصلی مس-طلا و مس-مولیبدن پورفیری هستند. علاوه بر این دو نوع کانسار اصلی، کانسارهای پورفیری دیگری نظیر مس پورفیری، مولیبدن پورفیری، قلع پورفیری و تنگستن پورفیری نیز وجود دارد. همچنین می‌توان کانسارهای پورفیری را بر اساس ترکیب ماگمای سنگ‌های مرتبط با کانی‌سازی نیز طبقه‌بندی کرد که شامل دو زیر شاخه کانسارهای پورفیری کالک‌آلکال (پتاسیم کم، پتاسیم متوسط و پتاسیم بالا) و کانسارهای پورفیری آلکالین (اشباع از سیلیس و غیر اشباع از سیلیس) می‌شوند. پورفیری‌های آلکالین دارای سنگ میزبان دیوریتی بوده و منحصراً حاوی مس و طلا هستند؛ در حالی که کانسارهای کالک‌آلکالین دارای سنگ میزبان کوارتز مونزونیت بوده و اغلب حاوی مس و مولیبدن هستند (Sillitoe, 1997; Cooke et al., 2014).

امروزه روش‌های ژئوفیزیکی به صورت گسترده در اکتشاف کانسارهای پورفیری استفاده می‌شوند (Holliday and Cooke, 2007; Holden et al., 2011; Hoschke, 2011; Clark, 2014; Dentith and Mudge, 2014). روش‌های مدرن ژئوفیزیکی در تمام مقیاس‌ها برای شناسایی و تعیین ویژگی‌های کانسارهای مس پورفیری استفاده می‌شوند. در مقیاس ناحیه‌ای، مغناطیس هوابرد، لرزه‌نگاری، گرانی‌سنجی، رادیومتری تصویر و اطلاعات کلی از ساختارهای پوسته زمین و محیط‌های ماگمایی مرتبط با کانی‌زایی مس پورفیری را فراهم می‌کنند. زون‌های گسلی، حوضه‌های رسوبی و توده‌های نفوذی را می‌توان با استفاده از روش‌های گراویتی و مغناطیس‌سنجی هوابرد به نقشه درآورد. روش‌های ژئوفیزیکی همچنین در مقیاس محلی نیز استفاده می‌شوند. خواص فیزیکی کانی‌ها و آلتراسیون‌های مرتبط با کانسارهای پورفیری در نزدیک سطح زمین بسیار متغیر است. به عنوان مثال، توزیع محتوای مگنتیت درون یک کانسار پورفیری بر اساس نوع و شدت دگرسانی و سنگ منشأ و یا سنگ میزبان از فراوان تا عدم حضور متغیر است. بنابراین با استفاده از داده‌های مغناطیس هوابرد و زمینی با دقت بالا می‌توان زون‌های دگرسانی مختلف را شناسایی کرد (John et al., 2010).

در کانسارهای پورفیری کانی‌های سولفیدی متنوعی حضور دارند که برخی از آنها مانند پیریت حائز ارزش اقتصادی نیستند. وجود این نوع کانی باعث افزایش آنومالی‌های پلاریزاسیون القایی می‌شود. لذا این ویژگی باعث پیچیدگی تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی مرتبط با زون کانی‌سازی سولفیدی دارای ارزش اقتصادی در کانسارهای پورفیری می‌شود. تفسیر دقیق داده‌های ژئوفیزیکی مرتبط با کانسارهای پورفیری مستلزم تلفیق با اطلاعات دیگری نظیر نقشه‌ها و مقاطع زمین‌شناسی، آنومالی‌های ژئوشیمیایی و مدل‌های مفهومی این نوع کانسارهاست. برای تحلیل صحیح این داده‌ها ابتدا باید شناخت درستی نسبت به مدل زمین‌شناسی این نوع کانسارها، دگرسانی‌ها، ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی و سیستم کانی‌زایی در این کانسارها داشت. باید ویژگی‌های ژئوفیزیکی دگرسانی‌ها و زون‌های

مختلف را دانست و سپس با تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی کانسار موردنظر، تفسیری مناسب از داده‌های ژئوفیزیک ارائه کرد.

پژوهش‌ها و مقالات متعددی برای بررسی ارتباط بین کانی‌سازی در کانسارهای مس پورفیری با آنومالی‌های ژئوفیزیکی انجام شده است (John et al., 2010; Holden et al., 2011; Hoschke, 2011; Clark, 2014). طرح‌های تحقیقاتی گسترده‌ای نیز در جوامع بین‌المللی برای این منظور انجام شده است؛ اما متأسفانه در کشور ایران این پژوهش‌ها به صورت یکپارچه و جامع کمتر و شاید به ندرت انجام شده است (Malekzadeh Shafarodi et al., 2008; Abdi and Karimpour, 2010; Adelpour et al., 2016; Hosseini Zadeh and Honarmand, 2018) و مقالات یا کتاب‌های کمتری به زبان فارسی می‌توان یافت که ویژگی‌های ژئوفیزیکی کانسارهای مختلف را بررسی کرده باشند. نداشتن تحقیق و مطالعه در این زمینه باعث شده است که از داده‌های ژئوفیزیکی نتایج مناسب کمتری به دست آید و متأسفانه در ایران نگاهی منفی نسبت به انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی در جامعه اکتشاف معدن وجود دارد. برخلاف کشورهای پیشرفته در زمینه اکتشاف مواد معدنی مانند کانادا، استرالیا، کشورهای اسکاندیناوی، امریکا و اخیراً چین و هند که به درس ژئوفیزیک در برنامه‌های آموزشی فوق لیسانس و دکتری زمین‌شناسی اقتصادی اهمیت و توجه دارند، در ایران این درس در این گرایش در بعضی دانشگاه‌ها اختیاری و مانند حذف نگریسته می‌شود که زیان غیرقابل جبرانی برای دانش‌پژوهان این گرایش و مکتشفان آینده ایران است. به خصوص عدم شناخت برخی از کارشناسان مشغول در حوزه اکتشاف معدن نسبت به توانایی‌ها و محدودیت‌های روش‌های ژئوفیزیکی باعث شده است که انتظاراتی فراتر از توانایی‌های ژئوفیزیک که اغلب روشی غیرمستقیم در اکتشاف مواد معدنی است، داشته باشند و با کوچک‌ترین عدم انطباقی بین تفسیرهای ژئوفیزیکی با واقعیت کانسار به طور کلی این علم و روش را نادیده بگیرند. در صورت استفاده صحیح از روش‌های

ژئوفیزیکی و تفسیر مناسب از داده‌ها، می‌توان شناخت بهتری نسبت به کانسارهای اغلب پنهان موردبررسی داشت و هزینه حفاری‌های اکتشافی را به طور چشمگیری کاهش داد.

در این مقاله، کارآمدی روش‌های متعدد ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا بحث می‌شود و مدل‌های مربوط به ویژگی‌های ژئوفیزیکی این کانسارها ارائه می‌شوند. این مدل‌ها از مقالات معتبر انتشاریافته در این زمینه اقتباس شده‌اند. سپس بر اساس مدل‌های معرفی شده، داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، مقاومت و ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در کانسار مس - طلای پورفیری دالی واقع در استان مرکزی تفسیر و تحلیل می‌شوند. در انتها نتایج پردازش داده‌های ژئوفیزیکی با اطلاعات زمین‌شناسی و حفاریات اکتشافی این کانسار مقایسه، ارزیابی و اعتبارسنجی می‌شوند.

زمین‌شناسی کانسارهای مس-طلای پورفیری

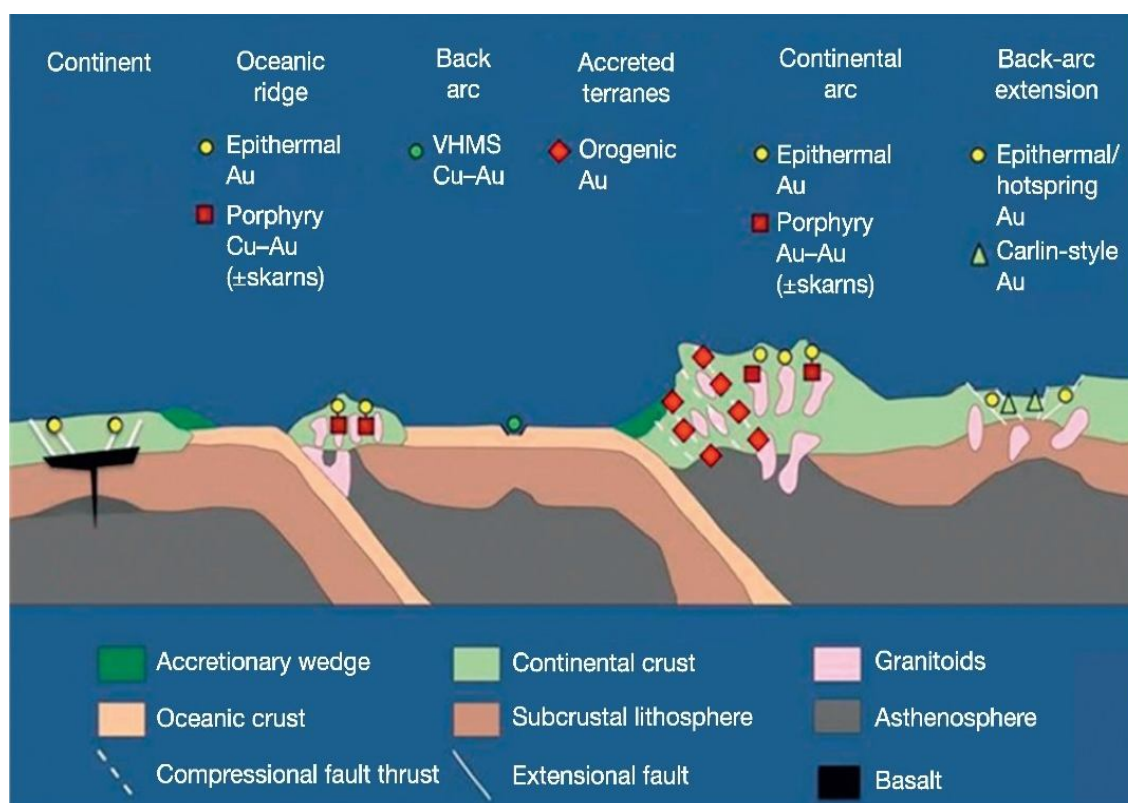
کانسارهای پورفیری اغلب در ارتباط با زون‌های فروورانش حاشیه قاره و جزایر کمانی هستند. در شکل ۱، موقعیت کانسارهای مس - طلای پورفیری و طلای اپی‌ترمال در این زون‌ها نشان داده شده است.

کانسارهای مس پورفیری اغلب مرتبط با توده‌ها و ترکیبات اسیدی تا حدواسط آذرین درونی جایگزین شده‌اند و در عمق‌های کم به صورت استوک‌های کوچک، دایک‌ها و برش‌ها تشکیل می‌شوند (John et al., 2010). سینگر و همکاران (Singer et al., 2008) انواع لیتولوژی‌های گزارش شده برای ۴۰۷ کانسار پورفیری مختلف را گردآوری کردند که هیستوگرام توزیع فراوانی آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. کوارتز مونزونیت، دیوریت، گرانودیوریت، داسیت، آندزیت و کوارتز دیوریت مهم‌ترین لیتولوژی‌های گزارش شده در ارتباط با کانسارهای پورفیری هستند (John et al., 2010).

کانسارهای پورفیری در مجموعه سنگ‌های آذرین درونی شکل می‌گیرند (شکل‌های ۱ و ۲). هندسه هریک از توده‌های آذرین از حالت دایک تا سیلندری، استوک و به ندرت پلوتون متغیر

سطح افق هستند و ابعاد قائم مشابه با ابعاد افقی دارند (John et al., 2010; Holden et al., 2011).

است (Cooke et al., 2014). ابعاد و هندسه کانسارهای مس پورفیری بسیار متغیر است، کانسارهای مس پورفیری که دچار تغییر شکل نشده‌اند، اغلب دارای شکل دایره‌ای یا بیضوی در



شکل ۱. جایگاه زمین‌ساختی کانسارهای مس - طلای پورفیری و برخی از کانسارهای وابسته و همراه (Groves et al, 1998)

Fig. 1. The tectonic setting of the Cu-Au porphyry and their related deposits (Groves et al, 1998)

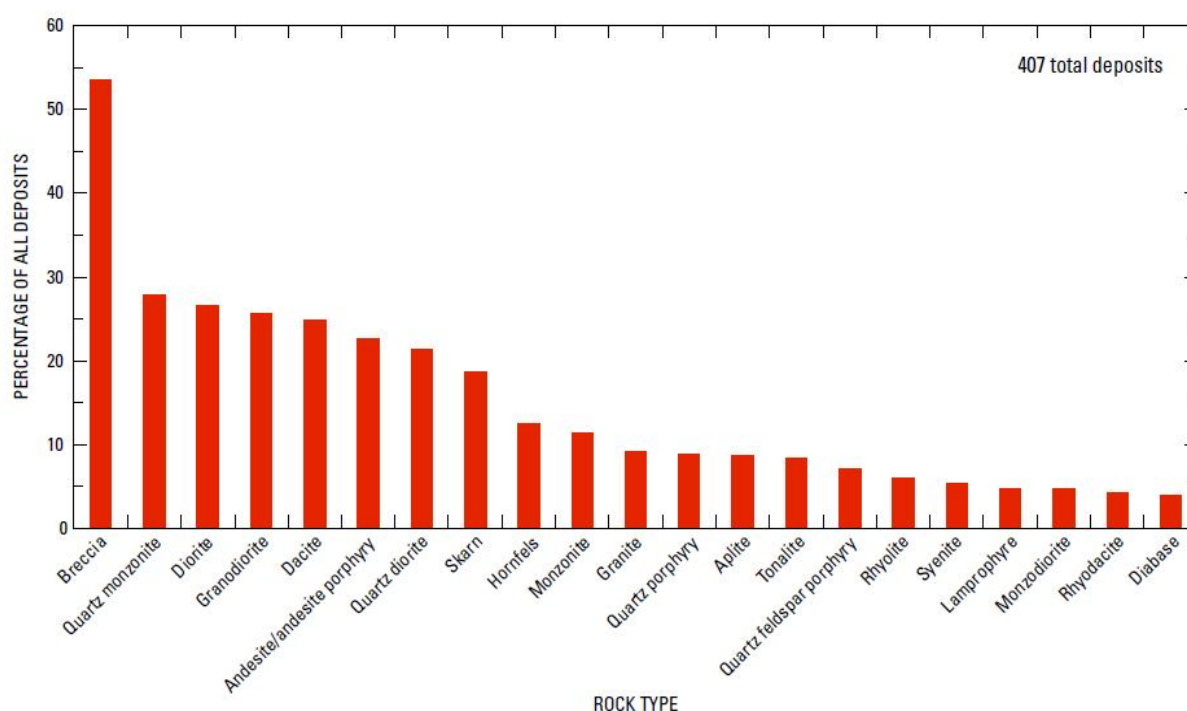
سیر تکاملی یک کانسار پورفیری، ابتدا در هسته سیستم دگرسانی پتاسیک ایجاد می‌شود که هاله دگرسانی پروپلیتیک آن را از اطراف احاطه می‌کند. کانسارهای مس - طلای پورفیری (دیوریتی) دارای آلتراسیون غالب پتاسیک در مرکز و پروپلیتیک در اطراف آن است. در حالی که کانسارهای مس - مولیبدن پورفیری (کوارتز - مونزونیتی) دارای زون‌بندی آلتراسیون پتاسیک در مرکز و به‌طرف خارج دارای آلتراسیون‌های فلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک است. در توده‌های نفوذی کوارتز - مونزونیتی مجموعه آلتراسیون پتاسیک اغلب حاوی کانی‌های کوارتز، فلدسپات پتاسیم، انیدریت

دگرسانی‌های مختلفی در کانسارهای پورفیری ایجاد می‌شوند. این دگرسانی‌ها تا چند کیلومتر به‌سمت بالا و در اطراف گسترش دارند و از نظر مکانی و زمانی دارای زون‌بندی هستند (شکل‌های ۳ و ۴). مهم‌ترین دگرسانی‌های مرتبط با کانسارهای مس پورفیری شامل: ۱- پتاسیک، ۲- سربستیک، ۳- آرژیلیک پیشرفته، ۴- آرژیلیک متوسط، ۵- پروپلیتیک، ۶- سدیک - کلسیک و سدیک، ۷- گرایزن و ۸- اسکارن هستند (John et al., 2010).

مجموعه دگرسانی‌های هیدروترمال در زون‌بندی سه بعدی درون و اطراف مرکز سیستم پورفیری کانه‌دار قرار دارند. در

کانی‌های سولفیدی در این زون دگرسانی شامل کالکوپریت، بورنیت و پیریت هستند. مگنتیت، مولیبدنیت، انیدریت و یا کلسیت دیگر کانی‌ها در این زون هستند (John et al., 2010).

± مگنتیت، کالکوپریت و بورنیت است. در توده‌های نفوذی دیوریتی مجموعه دگرسانی پتاسیک بیشتر حاوی بیوتیت ثانویه و مگنتیت با مقدار کمتر از کوارتز، فلدسپات پتاسیم، انیدریت و سولفیدهای مس و آهن هستند (Cooke et al., 2014).



شکل ۲. هیستوگرام توزیع لیتولوژی‌ها در کانسارهای مس پورفیری بر اساس اطلاعات برگرفته از سینگر و همکاران (Singer et al., 2008) (John et al., 2010)

Fig. 2. Histogram distribution of Cu porphyry deposits host rocks on the basis of Singer et al., 2008 (John et al., 2010)

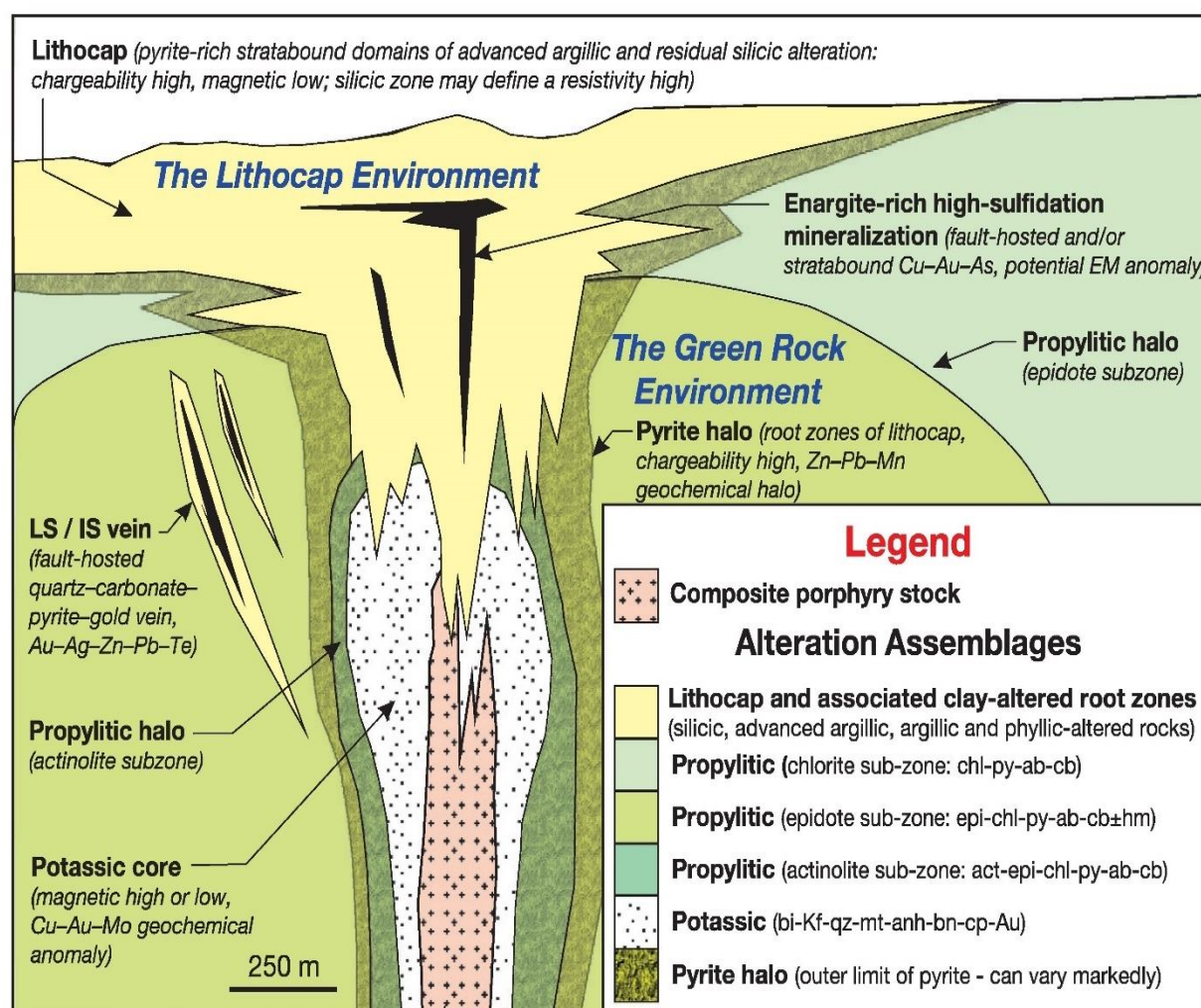
بالا، زون دگرسانی پتاسیک و هسته مرکزی کانسار منجر شود (Cooke et al., 2014).

مجموعه دگرسانی‌های تأخیری شامل فلیک (کوارتز، سریسیت، پیریت ± کالکوپریت)، آرژیلیک متوسط (ایلیت، کلریت، پیریت، کوارتز، کلسیت، هماتیت ± احتمالاً کالکوپریت)، آرژیلیک (کوارتز، کائولینیت، پروپیلیت، دیکیت، کائولینیت، پیریت ± انارژیت ± کولیت) هستند. این مجموعه غنی از کانی‌های رسی، اغلب توسط گسل‌ها متمرکز می‌شوند و در قسمت بالای سیستم بر روی دگرسانی‌های

گسترش سطحی و جانبی هاله‌های دگرسانی پروپلیتیک از هسته آلتراسیون پتاسیک بیش از چند کیلومتر است. زون دگرسانی پروپلیتیک را می‌توان به زیربخش‌های مختلفی تقسیم کرد: ۱- داخلی با دمای بالا (اکتینولیت، اپیدوت، کلریت، کلسیت، پیریت، مگنتیت ± هماتیت ± کالکوپریت)، ۲- اپیدوت دمای متوسط (اپیدوت، کلریت، کلسیت ± پیریت ± هماتیت ± کالکوپریت) و ۳- بیرونی، کلریت دمای پایین (کلریت، کلسیت، پیریت ± پیریت ± زئولیت). بنابراین به نقشه در آوردن این دگرسانی می‌تواند به حرکت به سمت مرکز، دمای

کالکوپیریت هستند که زون دگرسانی پتاسیک را قطع می‌کنند و در قسمت‌های بیرونی یا بالای سیستم رگه‌چه‌های پیریت-کالکوپیریت تا رگه‌چه‌های غنی از پیریت حضور دارند (John et al., 2010).

پتاسیک و پروپلیتیک که ابتدا شکل گرفته‌اند، بازنشانی می‌شوند (شکل ۳). دگرسانی‌های تأخیری اغلب توسط گسل‌هایی در مقیاس کانسار و ساختارهای تابعه کنترل می‌شوند (Cooke et al., 2014). سولفیدها در قسمت نزدیک به مرکز زون دگرسانی فلیک به صورت رگه‌چه‌های غنی از

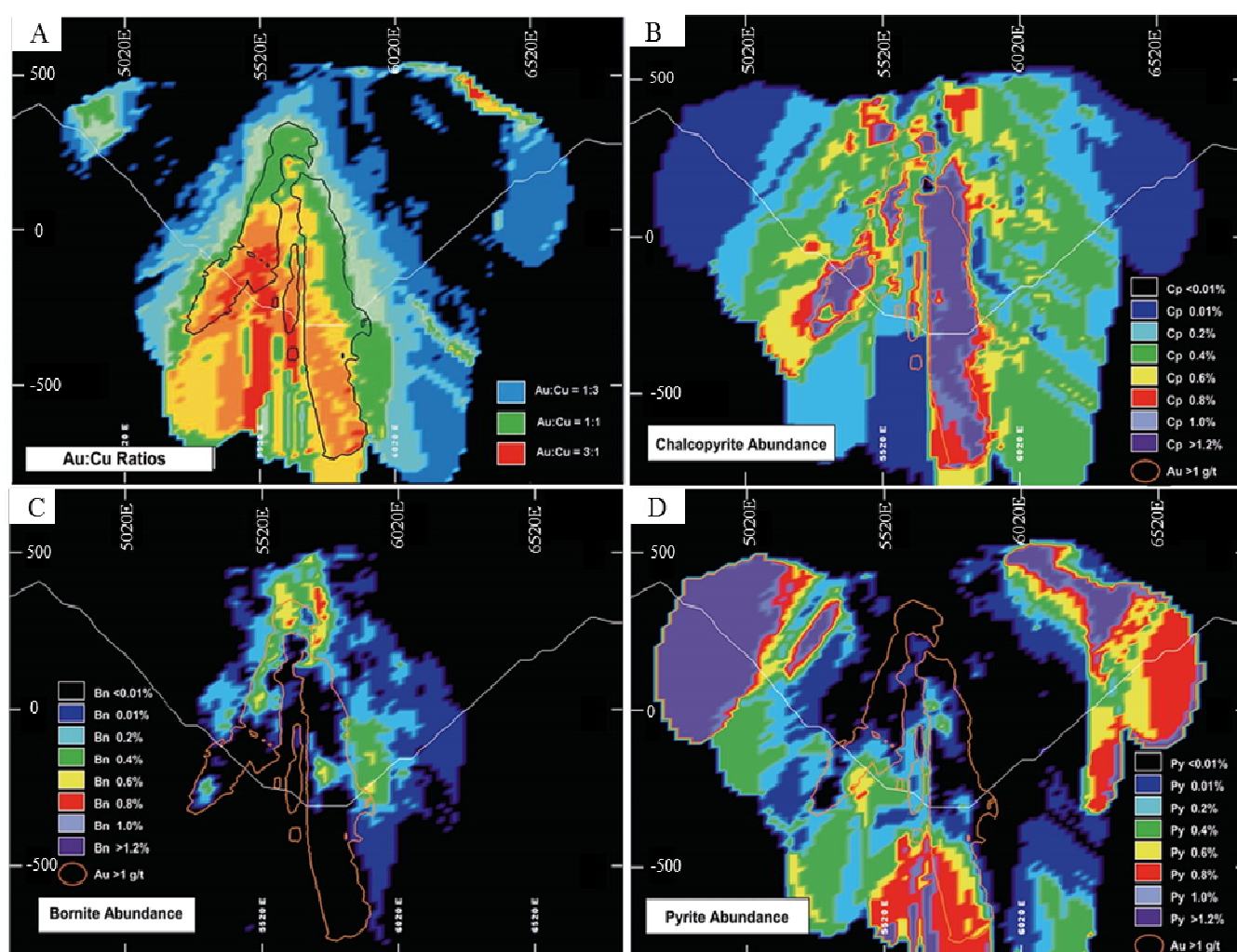


شکل ۳. تصویر شماتیک زون‌بندی دگرسانی در یک سیستم پورفیری. کانی‌سازی در زون دگرسانی پتاسیک و سنگ‌های دگرسان مجاور آن تشکیل می‌شود. در این مثال، در بالای سیستم کانی‌سازی پورفیری کلاهی سنگی (مجموعه دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک پیشرفته) قرار دارد که حاوی کانی‌سازی‌های اپی‌ترمال سولفیداسیون بالاست (ab: آلبیت، act: اکتینولیت، anh: انیدریت، Au: طلا، bi: بیوتیت، bn: بورتیت، cb: کربنات، chl: کلریت، cp: کالکوپیریت، epi: اپیدوت، hm: همتیت، kf: فلدسپات پتاسیم، mt: مگنتیت، py: پیریت، qz: کوارتز) (Cooke et al., 2014).

Fig. 3. Schematic illustration of alteration zoning of the porphyry system. Mineralization occurs in the potassic alteration zone and adjacent wall rocks. In this example, the porphyry has been partially overprinted by a lithocap (silicic and advanced argillic alteration assemblages) that contains a domain of high-sulfidation epithermal mineralization (ab: albite, act: actinolite, anh: anhydrite, Au: gold, bi: biotite, bn: bornite, cb: canronate, chl: chlorite, cp: chalcopryrite, epi: epidote, hm: hematite, kf: k-feldespar, mt: magnetite, py: pyrite, qz: quartz) (Cooke et al., 2014).

دارد. شکل C-۴ فراوانی کانی بورنیت است. در سطح، درصد این کانی بیشتر است و در اعماق از فراوانی آن کاسته شده است. شکل D-۴ فراوانی کانی پیریت را نشان می‌دهد. فراوانی این کانی در محل زون کانی‌سازی مس و طلا اغلب کمتر از یک درصد است؛ اما دو زون با درصد بالای پیریت در حواشی کانسار دیده می‌شود و در واقع زون‌های پر عیار را احاطه کرده‌اند.

در شکل ۴، توزیع کانی‌های سولفیدی در کانسار باتو هیجائو اندونزی نشان داده شده است. در شکل A-۴ نسبت عنصر طلا به مس نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق، این نسبت نیز افزایش یافته است. در شکل B-۴ درصد کانی کالکوپیریت نشان داده شده است. مرز زون‌های با عیار طلای بالاتر از ۱ گرم بر تن نیز با خط زرد رنگ مشخص شده است که انطباق قابل توجهی با زون‌های کانی‌سازی کالکوپیریت

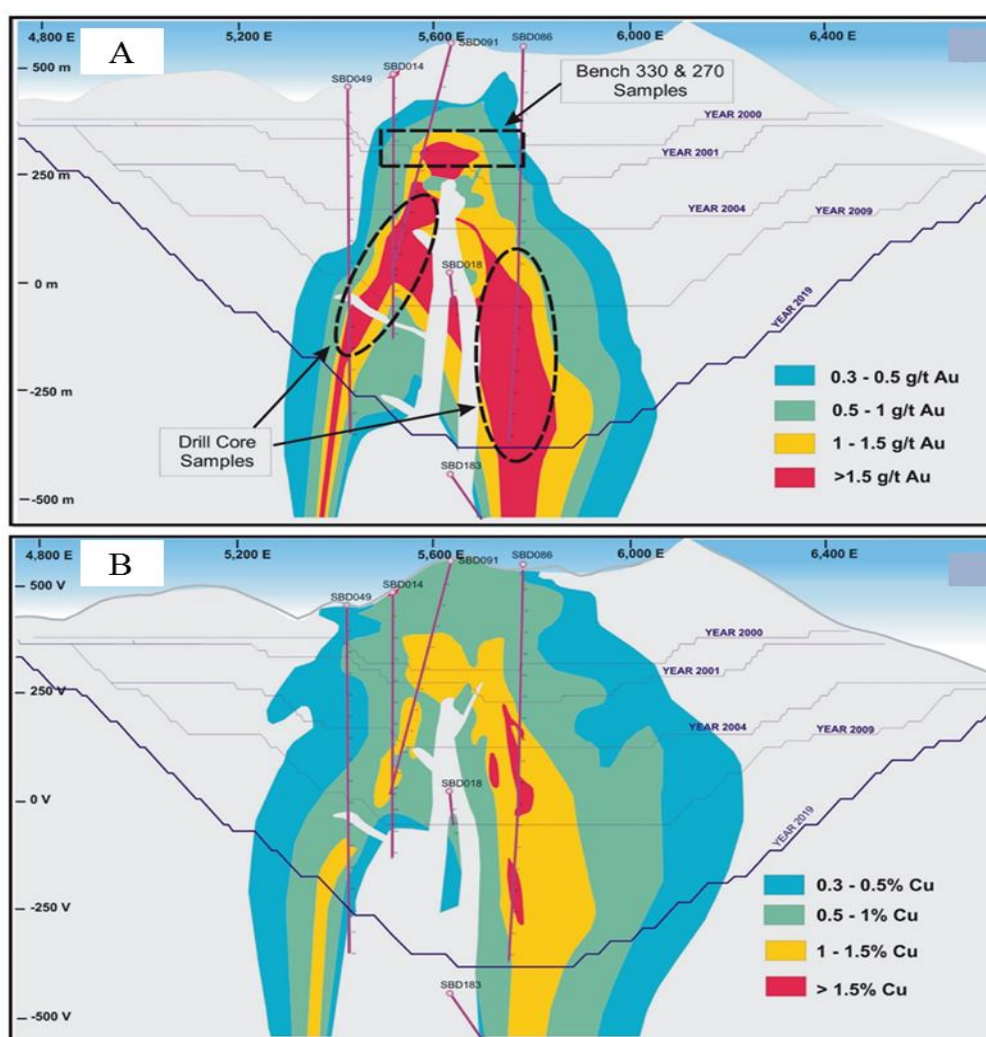


شکل ۴. مدل‌های عیاری و کانی‌شناسی در کانسار باتو هیجائو اندونزی A: نسبت عیار طلا (Au) به مس (Cu). خط مشکی مرز عیار طلای بالاتر از ۱ g/t است و خط سفید مرز پیت نهایی است. مدل‌های بلوکی فراوانی B: کالکوپیریت، C: بورنیت و D: پیریت که بر اساس نسبت S/Cu به‌دست آمده است (Arif and Baker, 2004)

Fig. 4. Grade and mineralization model at Batu Hijaou deposit, Indonesia. A: Ratio of Gold (g/t) per copper (%) grade. The black line shows the outline of gold grade >1 g/t, whilst the white line is the outline of ultimate open pit. Block models of B: chalcopyrite, C: bornite, and D: pyrite distribution and abundance on based on S/Cu ratios (Arif and Baker, 2004)

تلسکوپی شدید منجر شود و به کانی‌زایی سولفیداسیون بالا - پورفیری منتج شود. اما در مواردی که بالاآمدگی و شدت فرسایش کم است، لیتوکپ و کانی‌زایی سولفیداسیون بالای مرتبط با آن در فواصل چند صد متری یا خیلی بیشتر از کانسار پورفیری شکل می‌گیرد (Cooke et al., 2014). بیشترین تمرکز کانی‌سازی اقتصادی در کانسارهای مس پورفیری در زون پتاسیک و در حاشیه آن و مرز با زون دگرسانی فلیک است. تغییرات عیار طلا (شکل ۵-A) و عیار مس (شکل ۵-B) در کانسار پورفیری باتوهیجائو در اندونزی در شکل ۵ نشان داده شده است.

در محیط تشکیل کانسارهای پورفیری اغلب در عمق کمتر از یک کیلومتری سطح زمین در اثر جریان جانبی سیالات اسیدی از طریق افق‌های متخلخل، زون‌های گسترده‌ای از دگرسانی رسی که به عنوان لیتوکپ نامیده می‌شوند، صورت می‌گیرد. لیتوکپ‌ها اغلب دارای هسته‌ای از دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک پیشرفته هستند که در اطراف با آرژیلیک پیشرفته، آرژیلیک و پروپلیتیک احاطه می‌شوند. کانی‌زایی‌های اپی‌ترمال سولفیداسیون بالا ممکن است در نواحی کپ سیلیسی در بالای کانسارهای پورفیری رخ دهد. بالاآمدگی سریع و فرسایش در حین تکوین یک سیستم پورفیری ممکن است به حالت



شکل ۵. مقاطع قائم توزیع عیار A: طلا و B: مس در کانسار مس - طلای پورفیری باتوهیجائو، اندونزی، (Arif and Baker, 2004)

Fig. 5. Vertical sections of A: gold, and B: copper grade distribution of Batu Hijau porphyry Cu-Au deposit, Indonesia (Arif and Baker, 2004).

ویژگی‌های ژئوفیزیکی دگرسانی‌های مرتبط با کانسارهای مس - طلای پورفیری

دگرسانی در سیستم کانی‌زایی پورفیری باعث تغییر خواص سنگ‌ها و کانی‌های سنگ‌های دیواره می‌شود و در پی آن به غنی‌شدگی تعدادی از کانی‌ها در برخی زون‌ها و فقیرشدگی تعدادی کانی دیگر در زون‌های دگرسانی خاص منجر می‌شود. سولفیدهای مس و آهن (پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت و بورنیت) در بیشتر زون‌های دگرسانی سیستم کانی‌زایی مس پورفیری توزیع شده‌اند که اغلب دارای مقاومت پایین قابل شناسایی با روش‌های مدرن الکتریکی و الکترومغناطیسی هستند (John et al., 2010). دگرسانی همچنین باعث تغییراتی در فراوانی کانی مگنتیت در زون‌های مختلف می‌شود که کارایی روش مگنتومتري در شناسایی زون‌های دگرسانی مختلف را فراهم می‌کند. دگرسانی باعث تغییر در دیگر خواص فیزیکی زون‌های مختلف نیز می‌شود که می‌توان با استفاده از روش‌های مناسب ژئوفیزیکی زون‌های دگرسانی را تفکیک کرد.

تفسیرهای ژئوفیزیکی ذاتاً غیریکتا هستند و داده‌های ژئوفیزیک باید با اطلاعات زمین‌شناسی شامل نقشه‌های زمین‌شناسی و اطلاعات زمین‌شناسی زیرسطحی تفسیر شوند (John et al., 2010). بنابراین لازم است ابتدا ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی زون‌های دگرسانی مختلف در کانسارهای مس پورفیری را شناخت تا بتوان بر اساس مدل‌های موجود و شناخته‌شده، داده‌های ژئوفیزیکی را به بهترین روش تفسیر کرد. در ادامه ویژگی‌های ژئوفیزیکی زون‌های دگرسانی مختلف در یک سیستم کانی‌سازی مس پورفیری بحث خواهد شد.

خاصیت مغناطیسی

در رابطه با ویژگی‌های مغناطیسی کانسارهای مس پورفیری مقالات متعددی منتشر شده است که جامع‌ترین آنها مقاله کلارک (Clark, 2014) است. این قسمت برگرفته از این منبع است و علاقه‌مندان به درک بهتر و بیشتر از ویژگی‌های مغناطیسی کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا می‌توانند به این

منبع مراجعه کنند.

برداشت مغناطیس‌سنجی با سرعت بالا اطلاعاتی مقرون به صرفه از توزیع خاصیت مغناطیسی پوسته زمین در مقیاس‌های محلی تا ناحیه‌ای فراهم می‌کند. الگوی بی‌هنجاری‌های آشکارشده با برداشت‌های ژئوفیزیکی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای به‌نقشه درآوردن لیتولوژی، زون‌های متامورفیک و مجموعه دگرسانی‌های هیدروترمال، شناسایی ساختارهایی که ممکن است محل عبور ماگما و یا سیالات کانه‌ساز باشند، استفاده شوند. اثر مغناطیسی کانی‌سازی همواره مرتبط با منابع به‌شدت مغناطیسی نیست؛ بلکه می‌تواند با زون‌هایی با خاصیت مغناطیس‌شدگی ضعیف نیز مشخص شوند. برای مثال، ذخایر عناصر با ارزش اپی‌ترمال اغلب در سنگ‌های ولکانیک مافیک تا حدواسط و در زون‌های دگرسانی که مگنتیت در آنها تخریب شده است، تشکیل می‌شوند و دارای پاسخ مغناطیس هموار و کم هستند. در حاشیه این کانسارها ولکانیک‌های غیردگرسان با خاصیت مغناطیسی بیشتر وجود دارند که دارای پاسخ مغناطیسی با دامنه قوی هستند (Clark, 2014).

دگرسانی‌های هیدروترمال تأثیر زیادی بر روی خواص مغناطیسی سنگ‌ها و الگوی آنومالی‌های مرتبط با آنها دارند. بنابراین برداشت‌های مغناطیس‌سنجی در شناسایی این نوع دگرسانی‌ها و در برخی موارد کانی‌سازی درون آنها مفید خواهد بود (Clark, 2014). سیلیتو (Sillitoe, 1997; 1979) ارتباط بین کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا ($>0.4\text{g/t}$) و فراوانی مگنتیت در هسته آلتراسیون پتاسیک را بیان کرد (Clark, 2014). اثر مغناطیسی در کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا با کانسارهای فقیر از طلا متفاوت است (Clark, 2014).

ترکیب سنگ میزبان از دو طریق بر روی اثر مغناطیسی سیستم‌های کانه‌دار تأثیر می‌گذارد (Clark, 2014): الف) آنومالی‌های مغناطیسی ناشی از تباین مغناطیسی هستند. بنابراین خاصیت مغناطیسی سنگ‌های دیواره غیرآلتره به‌طور ذاتی بر روی اثر مغناطیسی سیستم‌های کانه‌دار تأثیر می‌گذارد.

به‌طور مثال، اگر توده‌ای نفوذی با خاصیت مغناطیسی متوسط درون سنگ دیواره‌ای با خاصیت مغناطیسی ضعیف، مانند کوارتزیت یا ولکانیک‌های سیلیسی نفوذ کند، در نقشه برگردان به قطب^۱ آنومالی مغناطیسی مثبت قوی ایجاد می‌کند. از طرفی دیگر، اگر همین توده درون سنگی با خاصیت مغناطیسی بالا، مانند بازالت بکر مگنتیت‌دار نفوذ کند، آنومالی منفی بر روی نمودار یا نقشه برگردان به قطب خواهد داشت.

ب) مجموعه دگرسانی، شامل کانی‌های مگنتیت که مرتبط با فاز خاصی از دگرسانی مرتبط با سیستم کانی‌سازی هستند.

بدیهی است که سطح فرسایش یک کانسار بر روی شدت اثر و آنومالی مغناطیسی آن تأثیرگذار باشد. پنهان‌شدن سیستم پورفیری زیر پوشش ضخیم جوان‌تر از واحد‌های لیتولوژیکی می‌تواند قابلیت تشخیص آن را تضعیف کند. حضور توالی ضخیم از رسوبات بدون خاصیت مغناطیسی بر روی منابع مغناطیسی، فقط به خاطر اینکه منشأ بی‌هنجاری مغناطیسی در عمق بیشتر قرار دارد، شدت آنومالی‌ها را کاهش می‌دهد و الگوی زون‌بندی را محو می‌کند، پنهان‌شدن در زیر توده‌های ولکانیکی با خاصیت مغناطیسی بالا نیز باعث ایجاد آنومالی‌های

قوی با طول موج کوتاه می‌شود و درنهایت موجب تضعیف آنومالی ناشی از توده اصلی شده و ممکن است توده اصلی غیرقابل تشخیص شود. در ادامه مثال‌هایی از وابستگی آنومالی‌های مغناطیسی مرتبط با یک کانسار مس پورفیری غنی از طلا به سطح فرسایش، سنگ میزبان و درصد غنی‌شدگی و توسعه‌یافتگی کانی‌های بیوتیت-مگنتیت در هسته زون دگرسانی پتاسیک ارائه خواهد شد (Clark, 2014).

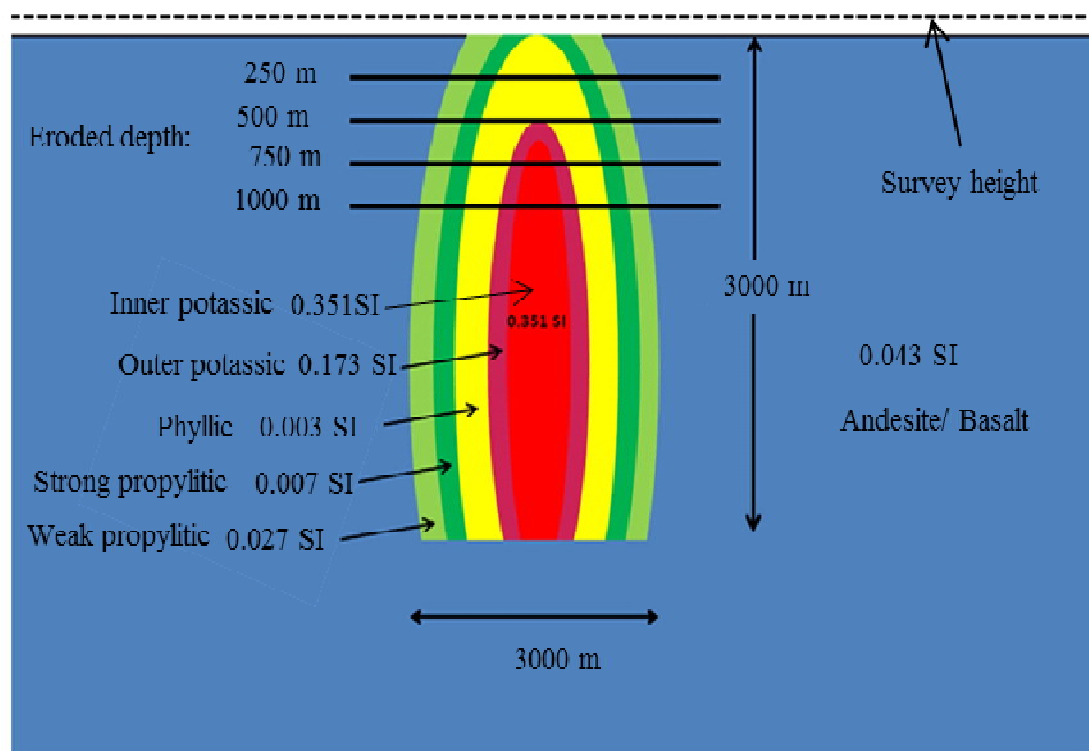
شکل ۶ مدل کانسار مس پورفیری غنی از طلا که بیشترین توسعه مگنتیت در زون پتاسیک رخ داده است و توسط یک سنگ آذرین نفوذی متوسط (گرانودیوریت) میزبانی می‌شود، را نشان می‌دهد. سنگ زمینه، سنگ آذرین بیرونی حدواسط تا مافیک مگنتیت‌دار (مانند آندزیت-بازالت) است. در این مورد، فرسایش کافی برای رخنمون‌یافتن کانسار رخ داده است. سطح بالای کانسار در عمق ۵۰۰ متری زیر سطح زمین قرار دارد و تنها نشانه کانی‌سازی رخنمونی از آلتراسیون پروپلیتیک است و در صورتی که مشاهده شود، ممکن است با اهمیت ناچیز فرض شود. خودپذیری مغناطیسی و ابعاد زون‌ها در جدول ۱ آمده است (Clark, 2014).

جدول ۱. ابعاد و خودپذیری مغناطیسی زون‌های دگرسانی در کانسار مس پورفیری غنی از طلا با بیشترین توسعه‌یافتگی مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون پتاسیک (Clark, 2014)

Table 1. Dimensions and susceptibilities of zones comprising the gold-rich porphyry copper model with maximal development of a magnetite-rich potassic core (Clark, 2014)

Zone	Diameter (m)	Width (m)	Depth extent (m)	Susceptibility (SI)
Inner potassic	360	360	2400	0.351
Outer potassic	600	120	2500	0.173
Phyllic	1000	200	3000	0.003
Strong propylitic	1200	100	3000	0.007
Weak propylitic	1500	150	3000	0.027
Andesite/basalt/ diorite/gabbro	Very large	Very large	3000	0.043

1. Reduced to the magnetic pole (RTP)



شکل ۶. مدل زون‌بندی دگرسانی در کانسار مس پورفیری غنی از طلا با بیشترین توسعه‌یافتگی مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون پتاسیک. اغراق عمودی در نظر گرفته نشده است. سنگ زمینه حدواسط تا مافیک مگنتیت‌دار (مانند آندزیت-بازالت) در نظر گرفته شده است. خطوط مشکی افقی سطوح فرسایش معادل ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ متر را نشان می‌دهند. موقعیت خط برداشت نسبت به سطح فرسایش‌نیافته با خط‌چین نشان داده شده است (Clark, 2014).

Fig. 6. Alteration zonation model of a gold-rich porphyry copper system with maximal development of a biotite-magnetite assemblage in the potassic zone. There is no vertical exaggeration. The host rock is magnetite-bearing intermediate to mafic rock (e.g andesite-basalt). The black horizontal lines indicate exposure level of the system after removal of 250, 500, 750 and 1000 m by erosion. The location of the calculated magnetic profile over the uneroded deposit is indicated by the dashed black line (Clark, 2014).

دگرسانی آرژلیک پیشرفته کم‌عمق متمایل شود؛ اما ویژگی مغناطیسی تغییری نخواهد کرد و تنها در نظر گرفتن یک غشا برای مدل‌سازی کافی است. زون فلیک در بخش‌های بیرونی به زون دگرسانی پروپلیتیک شدید رسیده است که به صورت نسبی ویژگی تخریب مگنتیت دارد و در بیرون به یک زون پروپلیتیک ضعیف و در نهایت در حاشیه به سنگ‌های غیر دگرسان^۱ می‌رسد (Clark, 2014).

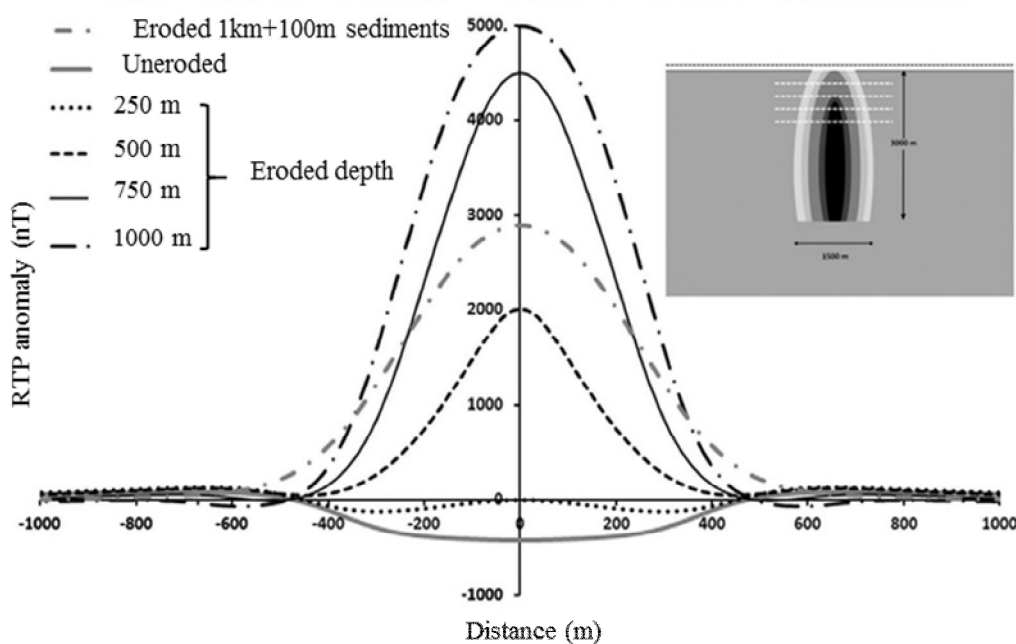
شکل ۷ پروفیل‌های پاسخ تئوری شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب کانسار مس پورفیری غنی از طلای مدل توصیف شده در شکل ۶ را نشان می‌دهد. اثر مغناطیسی شدیداً

زون پتاسیک داخلی به شدت کانه‌دار و غنی از مگنتیت است. این زون توسط یک زون بیرونی پتاسیک که حاوی مقدار کمتری اما همچنان قابل توجه از مگنتیت است، احاطه می‌شود. زون پتاسیک داخلی نشان‌دهنده توسعه نسبتاً شدید رگه‌چه‌های کوارتز-مگنتیت-فلدسپار پتاسیم است؛ در حالی که زون پتاسیک بیرونی معادل با دگرسانی بیوتیت-فلدسپار پتاسیم-کوارتز-مگنتیت است. دگرسانی فلیک با ویژگی تخریب مگنتیت با خاصیت مغناطیسی بسیار ضعیف به صورت غشایی دگرسانی پتاسیک را احاطه کرده است. در سطوح بالایی ممکن است این دگرسانی به سمت دگرسانی‌های آرژلیک پیشرفته و

1. fresh rocks

روی هسته اصلی مگنتیت است. همان‌طور که عمق سطح فرسایش افزایش یافته است، آنومالی مغناطیسی مثبت و قوی بر روی زون پتاسیک نمود بیشتری پیدا می‌کند (Clark, 2014).

به سطح فرسایش فعلی کانسار وابسته است. برای کانسار بدون فرسایش، آنومالی مغناطیس ضعیف مشاهده می‌شود که ناشی از ضخامت زیاد زون‌های دگرسانی با خاصیت تخریب مگنتیت بر



شکل ۷. پروفیل‌های مغناطیسی تئوری RTP بر روی مدل مس پورفیری غنی از طلا با بیشترین توسعه یافتگی مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون پتاسیک. این‌گونه کانسارها سیستم‌های نسبتاً مافیک مرتبط با محیط‌های جزایر کمانی یا ماگماتیزم آکالن (کالک‌آکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتیک) در محیط‌های قاره‌ای هستند. پروفیل‌ها مربوط به کانسار فرسایش نیافته و فرسایش یافته تا سطوح ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ متری از سطح زمین هستند. پاسخ مغناطیسی کانسار ۱۰۰۰ متر فرسایش یافته که در زیر ۱۰۰ متر رسوبات قرار گرفته با خط چین خاکستری مشخص شده است. برای تهیه این مدل شدت میدان مغناطیسی ۵۰,۰۰۰ نانوتسلا و ارتفاع برداشت ۱۰۰ متر بالای سطح زمین فرض شده است (Clark, 2014).

Fig. 7. Theoretical RTP magnetic profiles over a gold-rich porphyry copper model with a maximum development of a biotite-magnetite assemblage in the potassic alteration zone. Such deposits tend to be either relatively mafic systems in island arc environments or are associated with alkaline (e.g. high-K calc-alkaline to shoshonitic) magmatism in continental settings. Profiles are shown for an uneroded deposit and after removal of 250 m, 500 m, 750 m, and 1000 m by erosion. The magnetic response of 1000 m eroded deposit, which covered by 100 meters of sediment, is marked with a gray dashed line. Profiles were calculated assuming a geomagnetic field intensity of 50,000 nT and a sensor height of 100 m above the terrain (Clark, 2014).

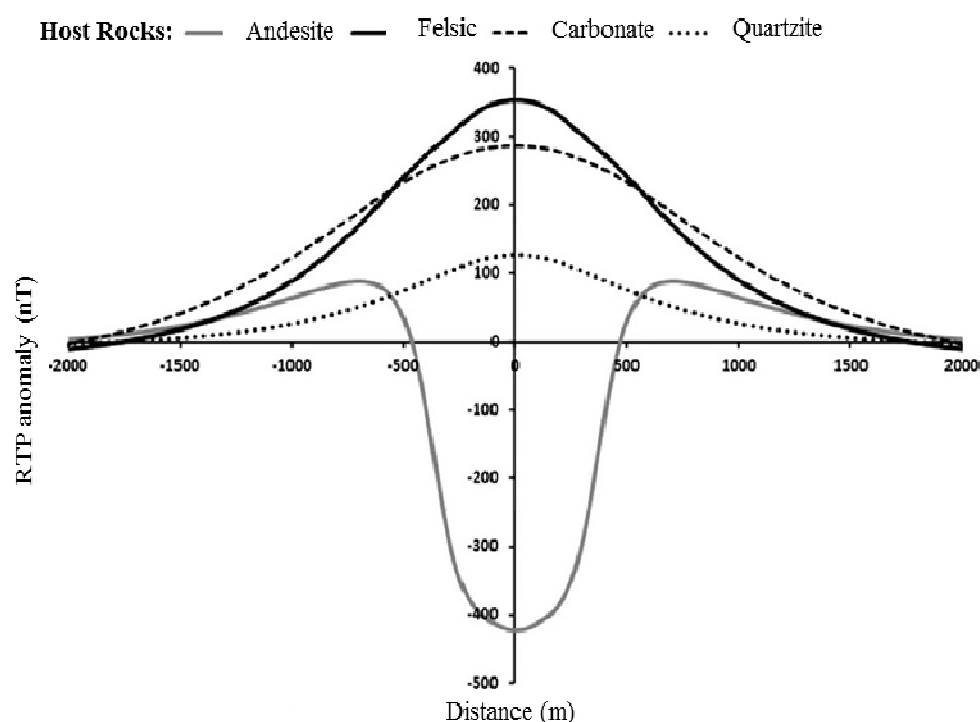
میزان‌های مختلف بر روی آنومالی‌های مغناطیسی تئوری برای کانسار مس پورفیری غنی از طلای فرسایش نیافته با بیشترین توسعه یافتگی مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک را نشان می‌دهد. برای سنگ میزبان آذرین مافیک تا حد واسطه، آنومالی مغناطیسی منفی مشاهده می‌شود (مانند شکل

مدل‌های دیگری شامل کانی‌سازی در سنگ میزبان‌های متفاوت مانند سنگ‌های رسوبی غیر فعال^۱ (مانند کوارتزیت) و سنگ‌های کربناته نیز انجام شده است. کوارتزیت (غیر آلتره و درون زون‌های پروپلیتیک و فلیک) و کربناته‌های غیردگرسان دارای خودپذیری مغناطیسی صفر هستند. شکل ۸، تأثیر سنگ

1. unreactive sedimentary rocks

آنومالی مثبت و قوی را ایجاد کرده است. برای سنگ میزبان غیرفعال مانند کوارتزیت، آنومالی مغناطیسی تنها ناشی از حضور توده نفوذی است. خودپذیری مغناطیسی سنگ میزبان کوارتزیت توسط دگرسانی‌ها دستخوش تغییر نشده و همچنان صفر باقی‌مانده است (Clark, 2014).

۷. برای سنگ میزبان اسیدی با خاصیت مغناطیسی ضعیف، اثر تخریب مگنتیت دگرسانی‌ها دارای اهمیت کمتری نسبت به هسته مگنتیت‌دار زون پتاسیک است و آنومالی مغناطیسی مثبت و با شدت زیاد دیده می‌شود که نشان‌دهنده حضور منشأ مغناطیسی مدفون در عمق زیاد است. برای سنگ میزبان کربناته، آنومالی مغناطیسی با اسکارن‌های حاشیه‌ای ترکیب‌شده و



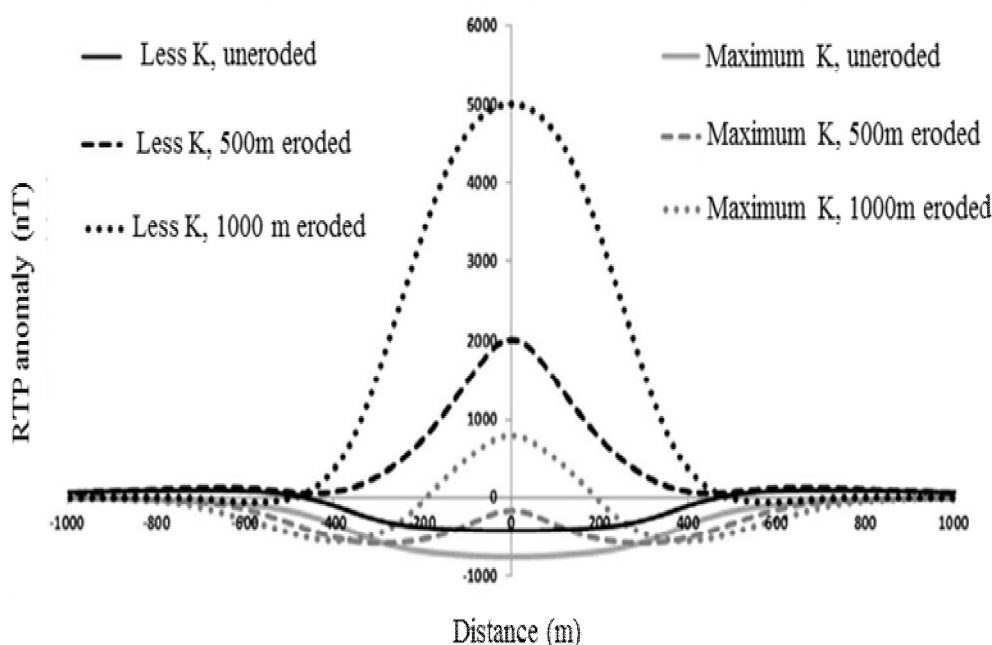
شکل ۸. پروفیل‌های مغناطیسی تئوری RTP برای سنگ میزبان‌های مختلف در کانسار مس پورفیری غنی از طلای فرسایش‌نیافته با بیشترین توسعه‌یافتگی مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون پتاسیک. پروفیل‌ها بر اساس محاسبات مشابه با شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۱ تهیه شده‌اند. سنگ میزبان فلسیک دگرسان‌نشده دارای خودپذیری مغناطیسی 0.004 SI است که در زون‌های پروپلیتیک ضعیف، پروپلیتیک قوی و فیلیک به ترتیب به 0.003، 0.002 و 0.001 کاهش یافته است. خودپذیری زون‌های پتاسیک نیز مانند شکل ۶ است. کوارتزیت (غیر هوازده و درون زون‌های فیلیک و پروپلیتیک) و کربنات غیر هوازده دارای خودپذیری مغناطیسی صفر هستند. برای این سنگ‌های رسوبی خودپذیری مغناطیسی زون دگرسانی پتاسیک 0.18 SI است و خودپذیری زون فیلیک حاشیه آن صفر است. اسکارن مگنتیتی که در میزبان کربناته تشکیل شده است، در فاصله ۷۰۰ متری از توده نفوذی قرار دارد و ۱۰۰ متر عرض و خودپذیری 0.2 SI دارد (Clark, 2014).

Fig. 8. Theoretical RTP magnetic profiles, for differing host rocks, over an uneroded gold-rich porphyry copper model with a maximum development of a biotite-magnetite assemblage in the potassic alteration zone. Profiles were calculated as described in Fig. 6. Fig. 7 and Table 1. The unaltered felsic host has a susceptibility of 0.004 SI, decreasing to 0.003, 0.002 and 0.001 in the weak propylitic, strong propylitic and phyllic zones, respectively. The susceptibility of the potassic zone is as in Fig. 6. Quartzites (unaltered, and within the propylitic and phyllic zones) and unaltered carbonates have zero susceptibility. For these sedimentary hosts, the potassically altered intrusion has susceptibility 0.18 SI, surrounded by phyllically altered intrusivewith zero susceptibility. Magnetite-skarn, developed distally within a carbonate host, near the marble contact 700 m from the intrusion, is 100 m wide and has $k = 0.2$ SI (Clark, 2014).

کالک‌آلکان، معمولاً در محیط‌هایی با پوسته ضخیم قاره‌ای تشکیل می‌شوند (Clark, 2014).

شکل ۹ مدل تئوری RTP بر روی کانسار پورفیری غنی از طلا که در سنگ‌های مافیک تا حدواسط جایگزین شده است را برای دو حالت توسعه‌یافتگی زیاد و کمتر مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک نشان می‌دهد.

مدل توصیف‌شده در بالا، مرتبط با کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا با درصد بالای مگنتیت در زون پتاسیک است. برخی کانسارها متمایل به سیستم‌های مافیک، به شدت اکسیدشده در محیط‌های جزایر کمانی یا مرتبط با ماگماتیسیم آلکان در محیط‌های قاره‌ای هستند. یک مجموعه مدل دیگر با مگنتیت ثانویه کمتر نیز در نظر گرفته شد. این مدل در سیستم‌های نسبتاً فلسیک یا کمتر اکسیده یا مجموعه‌های پتاسیم کم-متوسط



شکل ۹. پروفیل مغناطیس تئوری RTP بر روی کانسار مس پورفیری غنی از طلا، تشکیل‌شده در سنگ‌های حدواسط تا مافیک مگنتیت‌دار با بیشترین توسعه (K زیاد) و توسعه‌یافتگی معمولی‌تر (K کم) مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون پتاسیک. پتاسیم زیاد نشان‌دهنده سیستم‌های نسبتاً مافیک در جزایر کمانی یا سیستم‌های مرتبط با ماگماتیزم آلکان در محیط‌های قاره‌ای است. پتاسیم کمتر نشان‌دهنده سیستم فلسیک یا مجموعه‌های کالک‌آلکان دارای پتاسیم کم-متوسط در پوسته قاره‌ای ضخیم است. پروفیل‌ها مشابه با نمودار ۷ محاسبه شدند و برای کانسار غیر فرسایش‌یافته و سطوح فرسایش ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر محاسبه شدند (Clark, 2014).

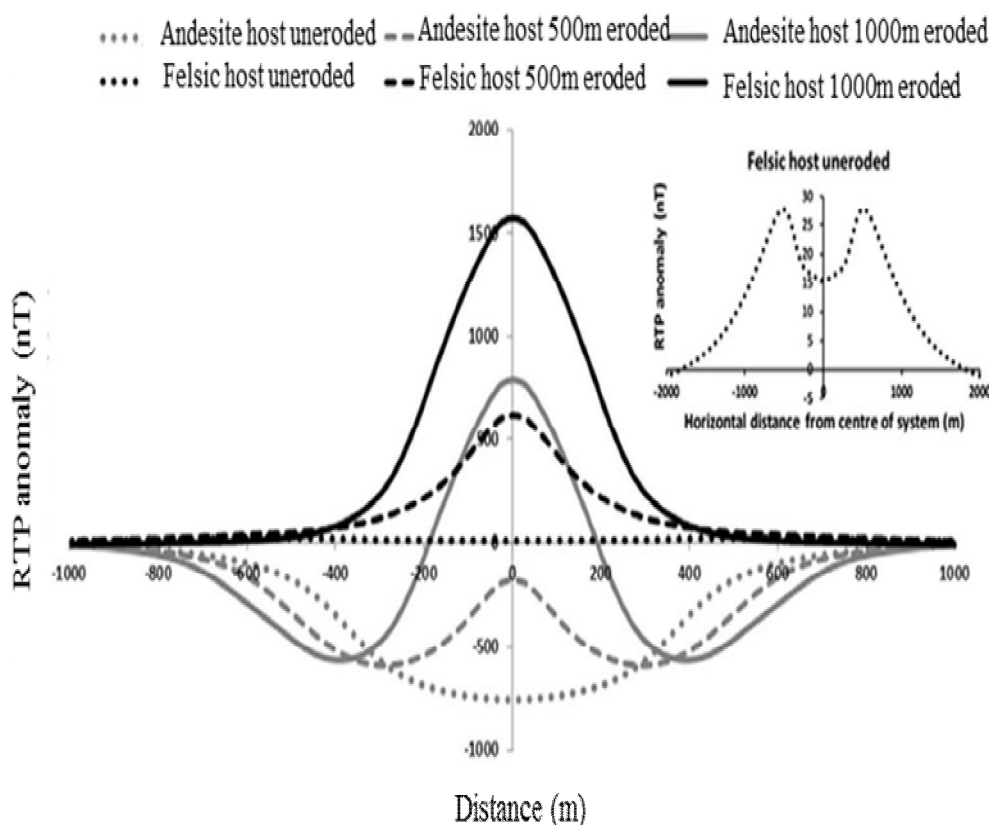
Fig. 9. Theoretical RTP magnetic profiles over gold-rich porphyry copper models, emplaced into magnetic mafic-intermediate rocks, with either maximum development (“maximum K” in the legend), or a more typical development (“less K”), of a biotite-magnetite assemblage in the potassic alteration zone. “Maximum K” represents relatively mafic systems in island arc environments or systems associated with alkaline magmatism in continental settings. “Less K” represents less strongly oxidised or relatively felsic systems, or low-medium K calc-alkaline associations, typically in areas with thick continental crust. Profiles were calculated as described in Fig. 7 and are shown for uneroded deposits and after removal of 500 m and 1000 m by erosion (Clark, 2014).

توسعه‌یافتگی مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک به ازای سنگ میزبان‌های متفاوت و سطوح فرسایش

شکل ۱۰ نمودار تغییرات شدت میدان مغناطیسی RTP بر روی کانسار مس پورفیری غنی از طلای غیر فرسایش‌یافته با

سنگ میزبان فلسیک اثر تخریب‌شدگی مگنتیت دارای اهمیت کمتر است و اثر سیستم فرسایش یافته زیاد و گسترده است که نشان‌دهنده حضور هسته پتاسیک مدفون‌شده در عمق است. برای سیستم غیر فرسایش یافته با سنگ میزبان فلسیک، اثر مغناطیسی بسیار ضعیف است (دامنه ۳۱ nT) که بیشترین اختلاف مغناطیس‌شدگی مربوط به هسته پتاسیک مدفون‌شده در عمق است که مغناطیس‌شدگی کمتری نسبت به زون معادل آن در شکل ۸ دارد (Clark, 2014).

مختلف را نشان می‌دهد. برای سنگ میزبان‌های آذرین مافیک-حدواسط مگنتیت‌دار (آندزیت-بازالت)، اثر مغناطیسی کانسار فرسایش نیافته یک آنومالی مغناطیسی کم است که نشان‌دهنده کنتراست منفی خودپذیری مغناطیسی در حجم زیاد و گسترده‌ای از زون دگرسانی فلیک و پروپلیتیک که تخریب‌شدگی مگنتیت دارند، با سنگ‌های غیر دگرسان مگنتیت‌دار اطراف است. با افزایش سطح فرسایش سیستم و رخنمون یافتن زون‌های عمیق‌تر یک آنومالی مرکزی قوی و مثبت درون حلقه‌ای از شدت‌های پایین دیده می‌شود. برای



شکل ۱۰. پروفیل مغناطیس تئوری RTP بر روی یک مدل کانسار مس پورفیری غنی از طلا با توسعه‌یافتگی معمولی مجموعه بیوتیت-مگنتیت در زون دگرسانی پتاسیک برای سنگ میزبان‌های مختلف و سطوح فرسایش متفاوت. پروفیل‌ها مانند آنچه در شکل ۳ توصیف‌شد، محاسبه شده‌اند. نمودار کوچک (inset) در این شکل پاسخ مغناطیسی شدت ضعیف (۳۰ نانوتسلا) سیستم با سنگ میزبان فلسیک بدون سطح فرسایش است که به وضوح در مقیاس اصلی نمودار دیده نمی‌شود. (Clark, 2014).

Fig. 10. Theoretical RTP magnetic profiles over a gold-rich porphyry copper model with a typical development of a biotite-magnetite assemblage in the potassic alteration zone, for differing host rocks and erosion levels. Profiles were calculated as described in Fig. 3. The inset shows the low amplitude (30 nT) signature of the uneroded system in felsic host rocks, which is not clearly visible at the scale of the main plot (Clark, 2014).

مدل‌های متنوع دیگری در مقاله کلارک (Clark, 2014) با فرضیات متفاوت وجود دارد که از ذکر تمام آنها در اینجا خودداری شده است. با توجه به مدل‌های مطرح شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا که در واحدهای آذرین حدواسط تا مافیک تشکیل می‌شوند، در زون پتاسیک غنی‌شدگی مجموعه بیوتیت-مگنتیت وجود دارد که باعث ایجاد آنومالی مثبت قوی در مرکز سیستم می‌شود. این آنومالی قوی و مثبت در اطراف با هاله‌های ضعیف و منفی احاطه می‌شوند. همچنین آنومالی‌های مغناطیسی در نمودارها حالت متقارن دارند و در نقشه به صورت دایره‌ای یا بیضوی قابل شناسایی هستند. البته شرایطی مانند عمق زون پتاسیک و ضخامت زون‌های دگرسانی فلیک، سنگ میزبان کانی‌سازی نیز بر روی نتایج تأثیرگذار هستند و ممکن است نتایج کاملاً متفاوت به دست آید.

رسانایی و پلاریزاسیون القایی

کانی‌ها و سنگ‌های مرتبط با دگرسانی‌های هیدروترمال اغلب دارای خواص الکتریکی متفاوتی هستند و بنابراین روش‌های ژئوفیزیکی که این خواص را شناسایی و مدل‌کنند، معمولاً مبنای شناسایی و تعیین ویژگی‌های کانسارهای مس پورفیری به صورت غیرمستقیم هستند. مشابه با توزیع کانی مگنتیت، خواص الکتریکی نیز نوع و ویژگی‌های دگرسانی‌های مختلف را تعیین می‌کنند. با توجه به حالت تقارن دگرسانی‌ها، آنومالی‌های الکتریکی نیز باید الگوی متقارن مشابهی را نمایش دهند (John et al., 2010).

روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی اغلب مقاومت الکتریکی سنگ‌ها و کانی‌های زیرسطحی را اندازه‌گیری می‌کنند. مقاومت الکتریکی سنگ‌ها و کانی‌ها محدوده بسیار گسترده‌ای دارند. به عنوان مثال، کوارتز بسیار مقاوم است (بیشتر از 10^5 اهم-متر)؛ در حالی که مس طبیعی شدیداً رساناست (حدود 10^{-8} اهم-متر). در پوسته بالایی، مقاومت واحدهای زمین‌شناسی به شدت به سیالات درون آنها و شوری‌شان، تخلخل، درجه خردشدگی،

دما و کانی‌های رسانا وابسته است. وجود سیالات شور درون حفره‌ها و شکستگی‌ها می‌تواند مقاومت را در مقایسه با سنگ‌های خشک تا چندین برابر کاهش دهد. مقاومت الکتریکی همچنین با حضور کانی‌های رسانای رسی، گرافیت و کانی‌سازی‌های فلزی سولفیدی نیز کاهش می‌یابد. زون‌های گسلی حاوی سنگ‌های خردشده زیادی هستند که امکان عبور سیالات را فراهم می‌کنند و باعث دگرسانی کانی‌ها می‌شوند و دارای مقاومت کم (کمتر از 10^0 اهم-متر) هستند. به طور کلی زون‌های کانه‌دار ماسیوسولفید، گرافیت، آب شور بسیار رسانا هستند (کمتر از 10^0 اهم-متر)، سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های هوازده، زون‌های کم سولفید، آب تازه، تقریباً مقاوم هستند (حدود 10^1 تا 10^{10} اهم-متر) و سنگ‌های آذرین و دگرگونی خیلی مقاوم هستند (بیشتر از 10^{10} اهم-متر) (John et al., 2010).

کانی‌های هیدروترمال مرتبط با روش‌های ژئوفیزیکی اکتشافی الکتریکی شامل پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، بیوتیت و سریسیت هستند. مشابه با مگنتیت، شدت و نوع دگرسانی‌ها با آنومالی‌های الکتریکی قابل شناسایی هستند. کمترین مقدار مقاومت ویژه الکتریکی بر روی زون دگرسانی فلیک واقع می‌شود که در زونی با شکستگی‌های فراوان و حرکت جریان سیالات واقع شده است (John et al., 2010).

امروزه معمولاً هم‌زمان با برداشت مقاومت ویژه الکتریکی، پلاریزاسیون القایی یا قابلیت شارژپذیری نیز انجام می‌شود. با توجه به خاصیت افشان و پراکنده‌بودن کانی‌های سولفیدی در کانسارهای پورفیری، شرایط برای اجرای روش IP بسیار مناسب است. در واقع روش IP ابتدا برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری توسعه داده شد و همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلاریزاسیون القایی مفهومی پیچیده است. به بیان ساده، آنومالی IP توانایی کانی یا سنگ برای عمل کردن به صورت خازنی الکتریکی را نشان می‌دهد. در کانسارهای پورفیری شدیدترین پاسخ IP مرتبط با زون دگرسانی فلیک (کوارتز-سریسیت-پیریت) است. معمولاً زون دگرسانی پتاسیک در هسته کانسار

برداشت رادیومتری می‌تواند موجب شناسایی توده‌های نفوذی پتاسیم‌دار و زون‌های دگرسانی پتاسیک شود؛ البته در صورتی که زون دگرسانی پتاسیک رخنمون داشته باشد و یا عمق آن کم باشد، این روش کارآمد خواهد بود (Holliday and Cooke, 2007).

جمع‌بندی ویژگی‌های ژئوفیزیکی دگرسانی‌های مختلف

در شکل ۱۱ نقشه دگرسانی و زمین‌شناسی (شکل ۱۱-A و D)، آنومالی مغناطیسی RTP (شکل ۱۱-B)، آنومالی رادیومتری پتاسیک (شکل ۱۱-C)، مقاومت ویژه الکتریکی (شکل ۱۱-E) و تغییرات توپوگرافی (شکل ۱۱-F) بر روی کانسار مس پورفیری آلومبرا در آرژانتین نشان‌دهنده شده است که از منبع هاشخی (Hoschke, 2011) برگرفته شده است. در این کانسار، آنومالی قوی میدان مغناطیسی RTP و پتاسیم منطبق بر زون پتاسیک مشاهده می‌شود. مقاومت ویژه الکتریکی زون‌های دگرسانی پتاسیک و فلیک کم هستند. زون‌های دگرسانی در مقایسه با سنگ‌های بکر دارای مقاومت کمتری در مقابل فرسایش هستند و فرسایش باعث ایجاد گودی بر روی کانسار شده است. البته در صورتی که زون دگرسانی سیلیسی که در بالای برخی از کانسارها شکل می‌گیرد، وجود داشته باشد، در مقابل فرسایش دارای مقاومت بیشتری است و بنابراین مرکز سیستم دارای ارتفاع بیشتری خواهد بود.

با توجه به مدل‌ها و ویژگی‌های ارائه‌شده برای خواص کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا می‌توان چنین خلاصه کرد که روش‌های مگنتومتری، رادیومتری و الکترومغناطیس روش‌های مفید هوابرد در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری هستند. در مقیاس کانسار روش‌های مگنتومتری زمینی، مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی متداول‌ترین روش‌هایی هستند که در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری استفاده می‌شوند. هاشخی (Hoschke, 2011) داده‌های ژئوفیزیک مرتبط با کانسارهای مس پورفیری و اپی‌ترمال متعددی را

حاوی کانی‌سازی سولفیدی کمی است، زون دگرسانی فلیک سولفید محتوای زیادی دارد، مانند پیریت و زون دگرسانی خارجی پروپلیتیک پیریت کمی دارد. بنابراین، زون دگرسانی فلیک یک زون هدف مهم برای روش IP است (John et al., 2010). شکل ۴ توزیع فراوانی کانی‌های سولفیدی مختلف در کانسار پورفیری باتوهیجائو را نشان می‌دهد. چنان که مشخص است در حاشیه کانسار درصد کانی‌های پیریت بسیار زیاد است و لذا ایجاد آنومالی‌های قوی شارژپذیری در حاشیه کانسار می‌کنند که در تفسیر باید به آنها توجه بسیار داشت.

گراویتی

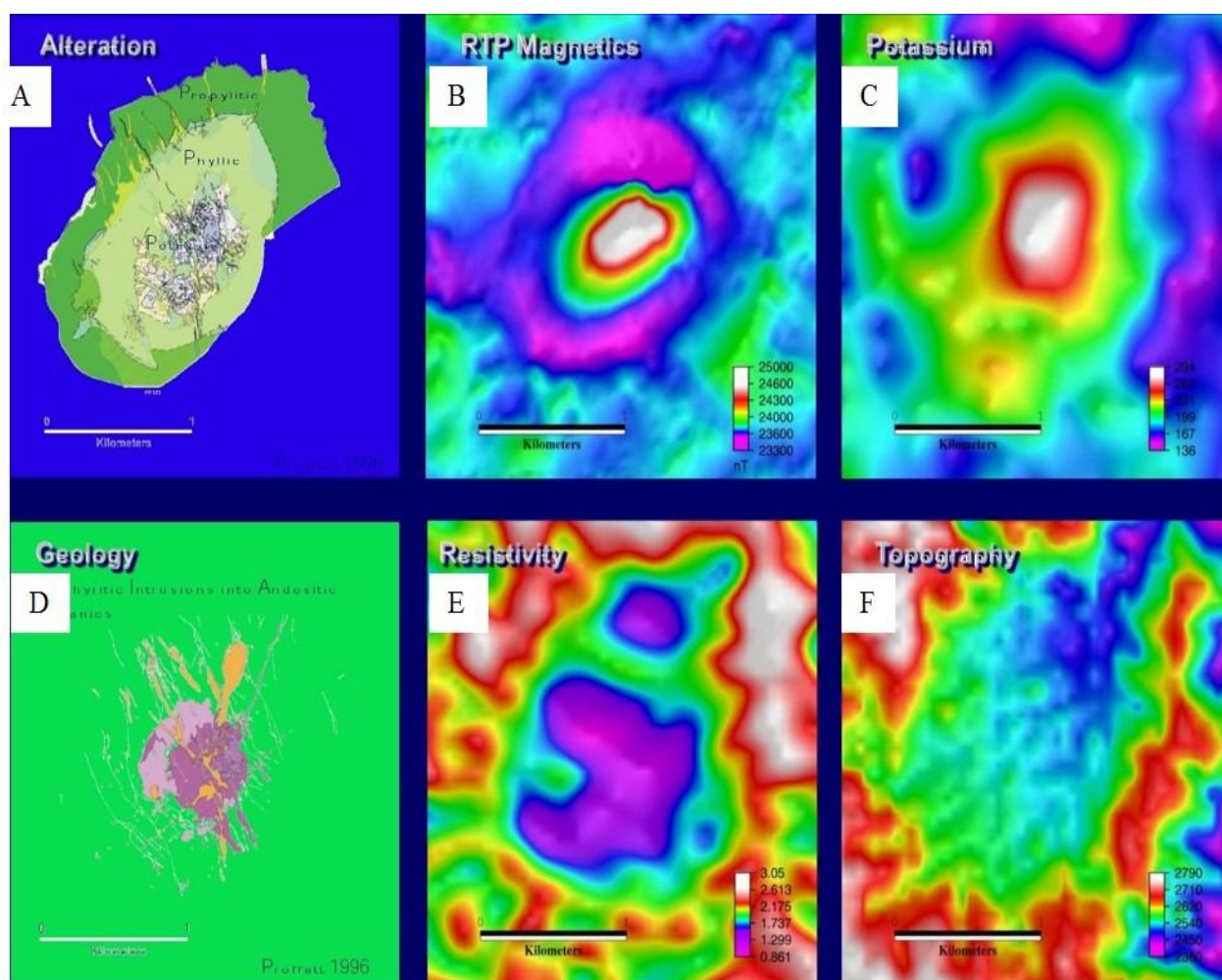
با بررسی مدل ژنتیکی کانسارهای پورفیری و سیستم دگرسانی مرتبط با آن می‌توان پیش‌بینی کرد که احتمالاً بین واحدها و زون‌های مختلف، اختلاف چگالی وجود دارد که امکان شناسایی آنها با استفاده از روش گراویمتری را فراهم می‌کند. اما با توجه به مشکلات برداشت گرانی‌سنجی مانند نیاز به تصحیحات دقیق توپوگرافی و پرهزینه بودن آن در مقایسه با روش‌های مغناطیس‌سنجی و الکتریکی، باعث شده است که گراویمتری برنامه‌ای متداول در اکتشاف کانسارهای پورفیری نباشد. برداشت گرانی‌سنجی به اطلاعات دقیق توپوگرافی منطقه نیاز دارد و همچنین فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است. در صورتی که هزینه‌های برداشت این روش مشابه با روش مغناطیس‌سنجی کم شود و دقت لازم برای انجام تصحیحات صورت گیرد (که با توسعه تکنولوژی امکان تحقق بخشیدن این امر وجود دارد)، می‌توان از آن به عنوان ابزاری در شناسایی دگرسانی‌های زون‌های مستعد کانی‌سازی نیز استفاده کرد (Holliday and Cooke, 2007).

رادیومتری

داده‌های رادیومتری که به‌طور هم‌زمان با داده‌های مغناطیس‌سنجی در برداشت‌های هوابرد تهیه می‌شوند، ابزاری مناسب برای تهیه نقشه زمین‌شناسی است. در محیط‌های پورفیری

کرد. شکل ۱۲ مدل پیشنهادی هاشخی (Hoschke, 2011) را نشان می‌دهد.

بررسی کرد و در نهایت مدل کلی و فراگیری برای خواص فیزیکی خودپذیری مغناطیسی، مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی کانسارهای مس پورفیری و اپی ترمال ارائه



شکل ۱۱. نقشه‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیک مربوط به کانسار مس-طلا پورفیری آلموبرا (Bajo de la Alumbrera) در آرژانتین. A: نقشه آلتراسیون، B: نقشه برگردان به قطب مغناطیسی، C: نقشه رادیومتری پتاسیم، D: نقشه زمین‌شناسی، E: نقشه مقاومت ویژه الکتریکی و F: نقشه توپوگرافی (تصویر از منبع هاشخی (Hoschke, 2011) گرفته شده است).

Fig. 11. Geological and geophysical maps of the Bajo de la Alumbrera porphyry Cu-Au deposit in Argentina. A: Alteration map, B: RTP map, C: radiometric K map, D: geological map, E: electrical resistivity map, and F: topographic map, (Hoschke, 2011).

است. در تفسیر داده‌ها باید به سطح فرسایش نیز توجه کرد. در شکل ۱۲-B مدل تغییرات خودپذیری مغناطیسی نشان داده شده است. قسمت‌های سفیدرنگ منطبق بر زون‌های دگرسانی با

در شکل ۱۲-A مدل زمین‌شناسی کانسارهای مس پورفیری و کانسارهای اپی ترمال سولفیداسون بالا که در قسمت‌های بالایی آن شکل می‌گیرد و دگرسانی‌های مرتبط با آنها نشان داده شده

تخریب مگنتیت است که کمترین خودپذیری مغناطیسی را دارد. قسمت‌های آبی پررنگ که تقریباً زون‌های کانی‌سازی است دارای بیشترین خودپذیری مغناطیسی و در هسته سیستم یک توده نفوذی تونالیتی با خودپذیری مغناطیسی متوسط و کانی‌سازی با عیار کم و یا عقیم است. در شکل ۱۲-C مدل تغییرات خودپذیری مغناطیسی نشان داده شده است. مقدار مقاومت ویژه الکتریکی بر روی کلاهی‌های سیلیسی که در سطح قرار دارند، بسیار بالاست و بیش از ۱۰۰۰ اهم-متر است. در قسمت‌هایی که رگه‌های سیلیسی تمرکز بالاتری دارند، مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند تا بیش از ۵۰۰۰ اهم-متر نیز افزایش یابد. در زیر کلاهی سیلیسی مقاومت ویژه به شدت کاهش می‌یابد و در محدوده چند ده اهم-متر (کمتر از ۱۰۰ اهم متر) متغیر است. این محدوده مقاومت ویژه الکتریکی امکان تفکیک زون‌های کانه‌دار در زون پتاسیک با زون‌های دگرسانی آرژیلیک و فلیک با کانی‌سازی کم امکان‌پذیر نیست. توده نفوذی تونالیتی که در مرکز سیستم قرار دارد، دارای مقاومت ویژه الکتریکی بالاتر نسبت به زون‌های دگرسانی اطراف است و در محدوده چند صد اهم متر تغییر می‌کند. شارژپذیری تقریباً در سطح در همه قسمت‌ها زیاد است؛ اما در عمق، آنومالی‌های تقریباً قائمی را نشان می‌دهد. در عمق دو زون با شارژپذیری بالا وجود دارند که ناشی از هاله‌های به شدت پیریتی هستند و ارتباطی با زون‌های پر عیار کانه‌دار ندارند. در مرکز سیستم زونی با شارژپذیری بالا وجود دارد که می‌تواند نشان‌دهنده زون‌های کانی‌سازی باشد.

مطالعه موردی: کانسار مس - طلای پورفیری دالی

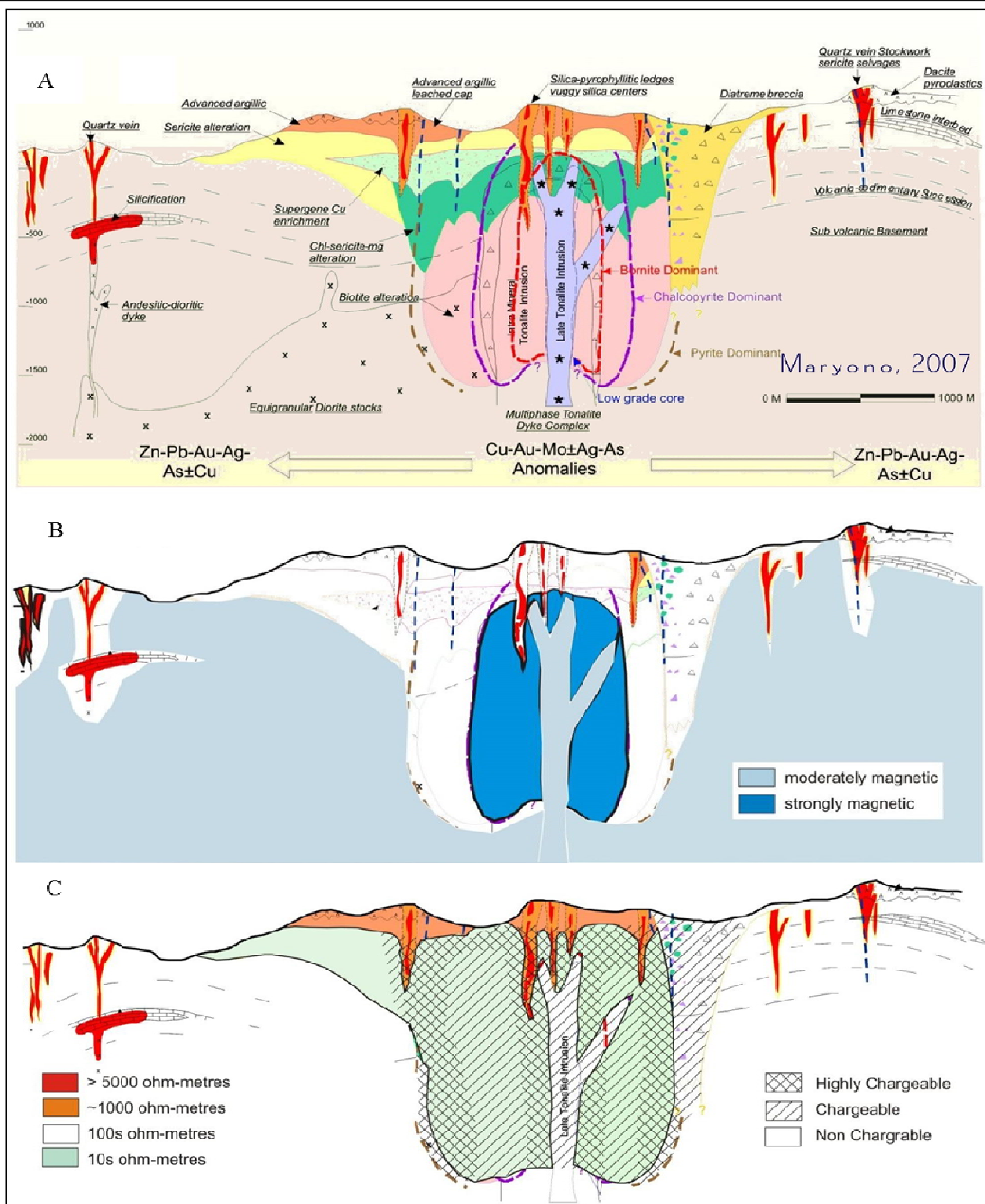
زمین‌شناسی و کانی‌سازی

کانسار مس - طلای پورفیری دالی یکی از مهم‌ترین کانسارهای اکتشاف شده در دهه اخیر در کمربند ولکانیکی ارومیه - دختر است. این کانسار از نظر تقسیمات کشوری در استان مرکزی، شهرستان دلجان و در نزدیکی روستای راوه واقع شده است. کانسار مس - طلای پورفیری دالی از نظر زمین‌ساختی بر روی لبه غربی کمربند ولکانیکی ارومیه - دختر و در نزدیکی برخورد

آن با زون سندج - سیرجان واقع شده است (شکل ۱۳). گستره محدوده معدنی دالی بر پایه توده‌های نفوذی و ولکانیک‌های دوران سوم و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سلفچگان - خورهه واقع شده است. این محدوده اغلب توسط سنگ‌های آذرین درونی حدواسط دیوریت، کوارتز دیوریت و تونالیت و به‌طور محلی ولکانیک‌های آندزیتی، ایگنبریت و سنگ‌های نیمه عمیق آندزیت پورفیری پوشیده شده است که برخی از این واحدهای سنگی تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال کاملاً به زون‌های دگرسان پتاسیک، سیلیسی، کوارتز - سریسیت (فلیک)، آرژیلیک و پروپلیتیک تبدیل شده‌اند. کانی‌سازی مس و طلای پورفیری اغلب به ترتیب اهمیت در ارتباط با دگرسانی‌های پتاسیک، سیلیسی شدن و به‌طور محلی فلیک است.

اکتشافات انجام شده در این محدوده، دو سیستم پورفیری که به فاصله ۱/۷ کیلومتری از هم واقع شده‌اند را اثبات کردند (2008، Asadi). این دو سیستم کانی‌سازی مس - طلا به عنوان تپه جنوبی و تپه‌های شمالی نامیده شده‌اند.

کانی‌سازی محدوده اکتشافی دالی در رابطه با مجموعه‌ای از استوک و دایک‌های کوارتز دیوریت پورفیری دگرسان شده آلگوموسن هستند که در امتداد ۵۵ درجه (شمال شرقی) و به طول ۴ کیلومتر در داخل یک زون گسله به عرض ۱-۲ کیلومتر و به مرکز یک استراتوولکان با ترکیب گدازه‌های آندزیتی و آذرآواری ائوسن نفوذ کرده‌اند. برخی از توده‌های نفوذی و به‌طور محلی ولکانیک و ساب‌ولکانیک‌های منطقه تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال به دگرسانی‌های نوع پتاسیک، فلیک، آرژیلیک، پروپلیتیک و سیلیسی تبدیل شده‌اند. کل سیستم دگرسان شده محدوده‌ای در حدود ۲۰ کیلومتر مربع را می‌پوشاند. تپه جنوبی با ابعاد تقریبی ۲۲۵×۱۹۰ متر با دگرسانی شدید پتاسیک (کوارتز، بیوتیت ثانویه، مگنتیت، کالکوپریت و پیریت) که با دگرسانی فلیک و پروپلیتیک احاطه شده است، مشخص می‌شود (Darabi Golestan et al., 2013a, 2013b; Asadi et al., 2015).

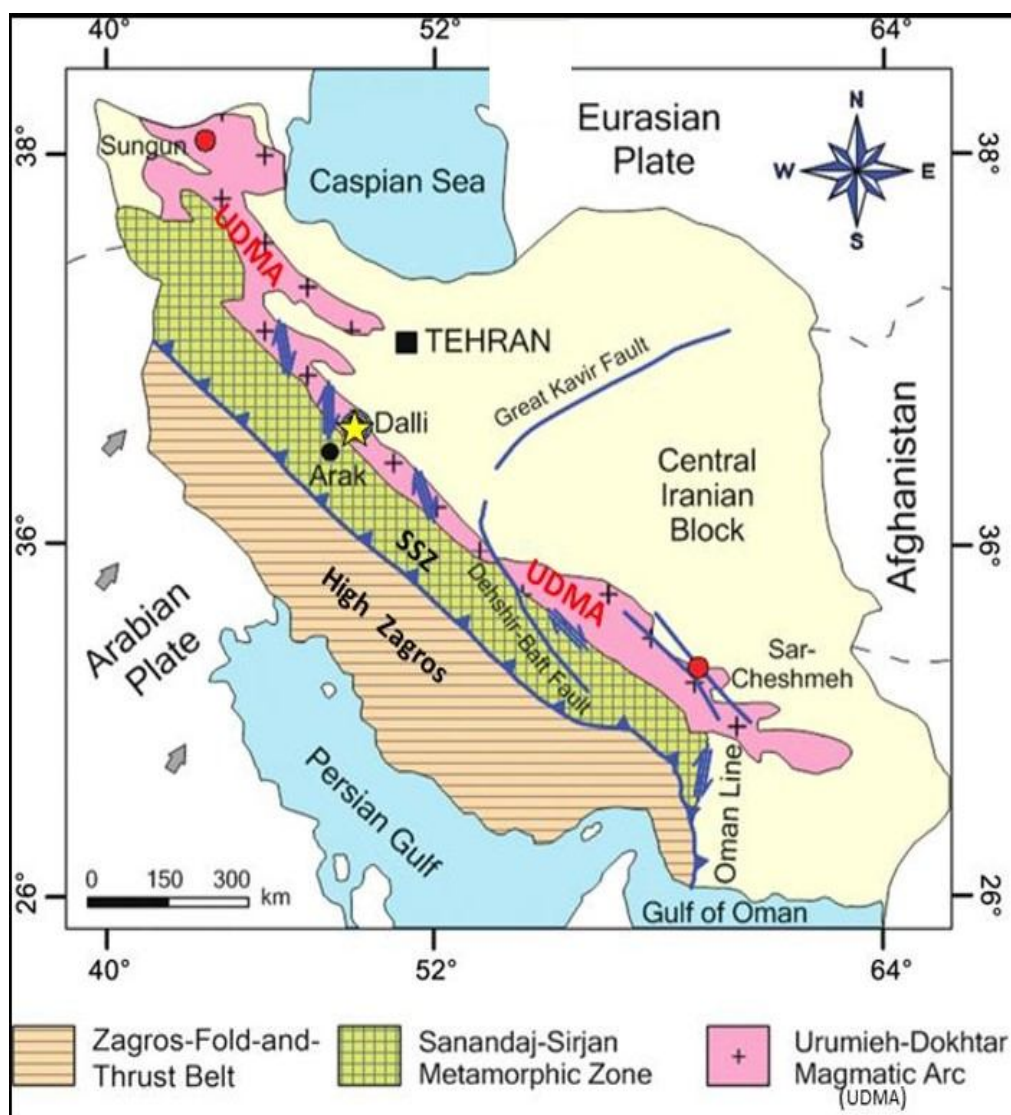


شکل ۱۲. مدل زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی کلی و تعمیم‌یافته کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال، A: مدل زمین‌شناسی و دگرسانی، B: مدل خودپذیری مغناطیسی و C: مدل مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری (Hoschke, 2011)

Fig. 12. Geological and general geophysical properties of porphyry and epithermal deposits, A: the geological and alteration model, B: magnetic susceptibility model, and C: electrical resistivity and chargeability model (Hoschke, 2011)

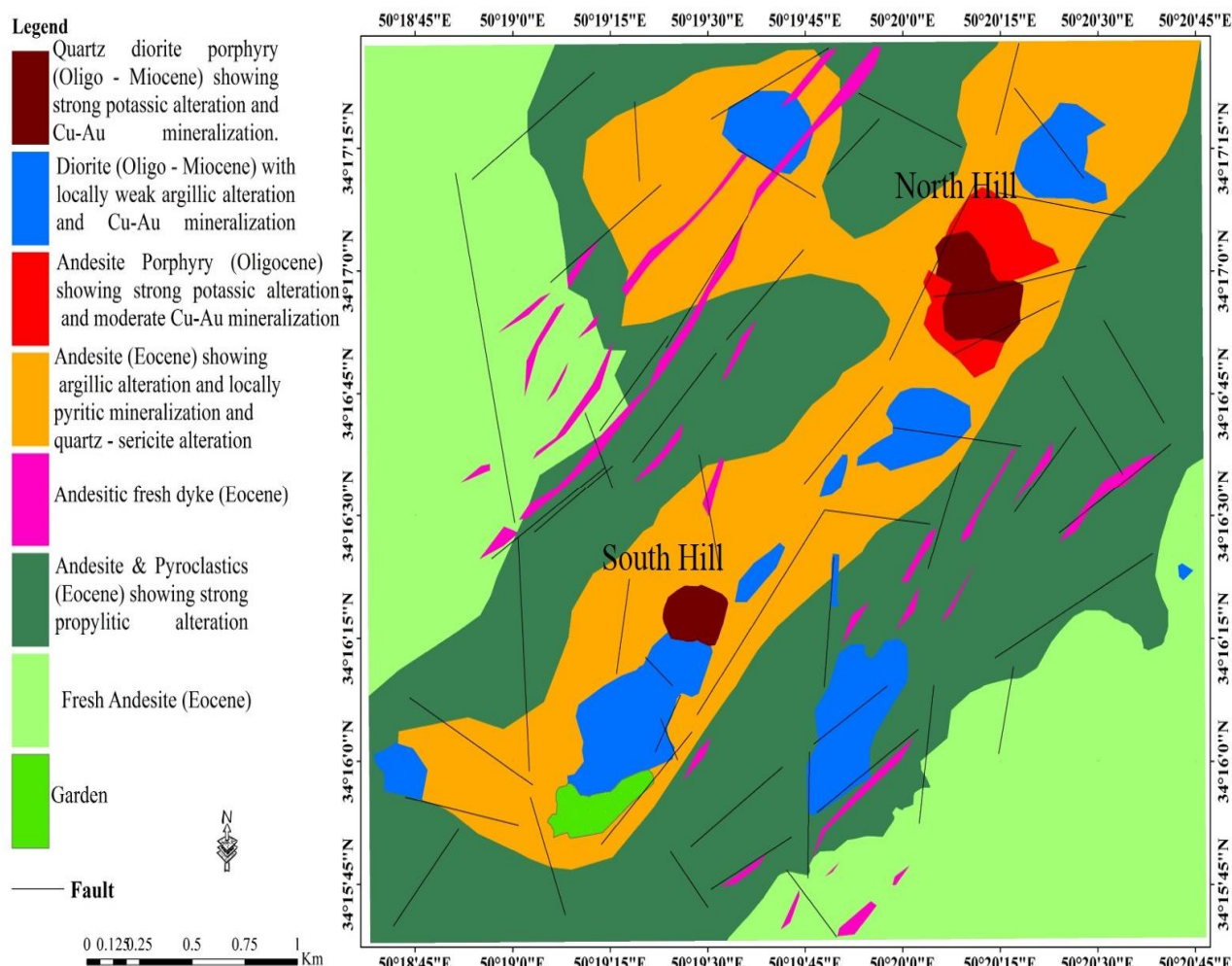
دانه‌های آزاد و ادخال‌ها در پیریت، کالکوپریت و کوارتز مشاهده می‌شود. زون کانی‌سازی اکسیدی شامل مالاکیت، آزوریت، کوپریت، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن می‌شود. زون غنی‌شده (سوپرژن) به صورت محدود (حدود ۸ متر در گمانه‌های ۱ و ۲) مشاهده شده است که با کالکوسیت و کولیت قابل تشخیص است (Asadi et al., 2015). موقعیت سیستم‌های پورفیری تپه‌های شمالی و جنوبی بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

بر اساس بررسی‌های آیتی و همکاران (Ayati et al., 2012) در تپه جنوبی، کانی‌سازی مس پورفیری افشان اغلب در ارتباط با دگرسانی پتاسیک است. هر دو کانی‌سازی مس و طلا نیز در استوک‌ورک‌ها و رگه‌های کوارتز-هماتیت-مگنتیت نیز تشکیل شده‌اند. زون کانی‌سازی هیوژن با کالکوپریت، پیریت، بورنیت، مگنتیت و ذرات طلای خالص مشخص می‌شود. کالکوپریت افشان در سنگ‌های دیوریتی دگرسان‌شده و رگه‌های کوارتز-مگنتیت رخ داده است. طلا به صورت



شکل ۱۳. موقعیت کانسار دالی بر روی نقشه زمین‌ساختی ایران

Fig. 13. Location of the Dalli deposit on the tectonic setting map of Iran



شکل ۱۴. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه دالی (اصلاح‌شده از اسدی (Asadi, 2008))

Fig. 14. Geological map of the Dalli deposit in the scale of 1:10000 (After Asadi, 2008)

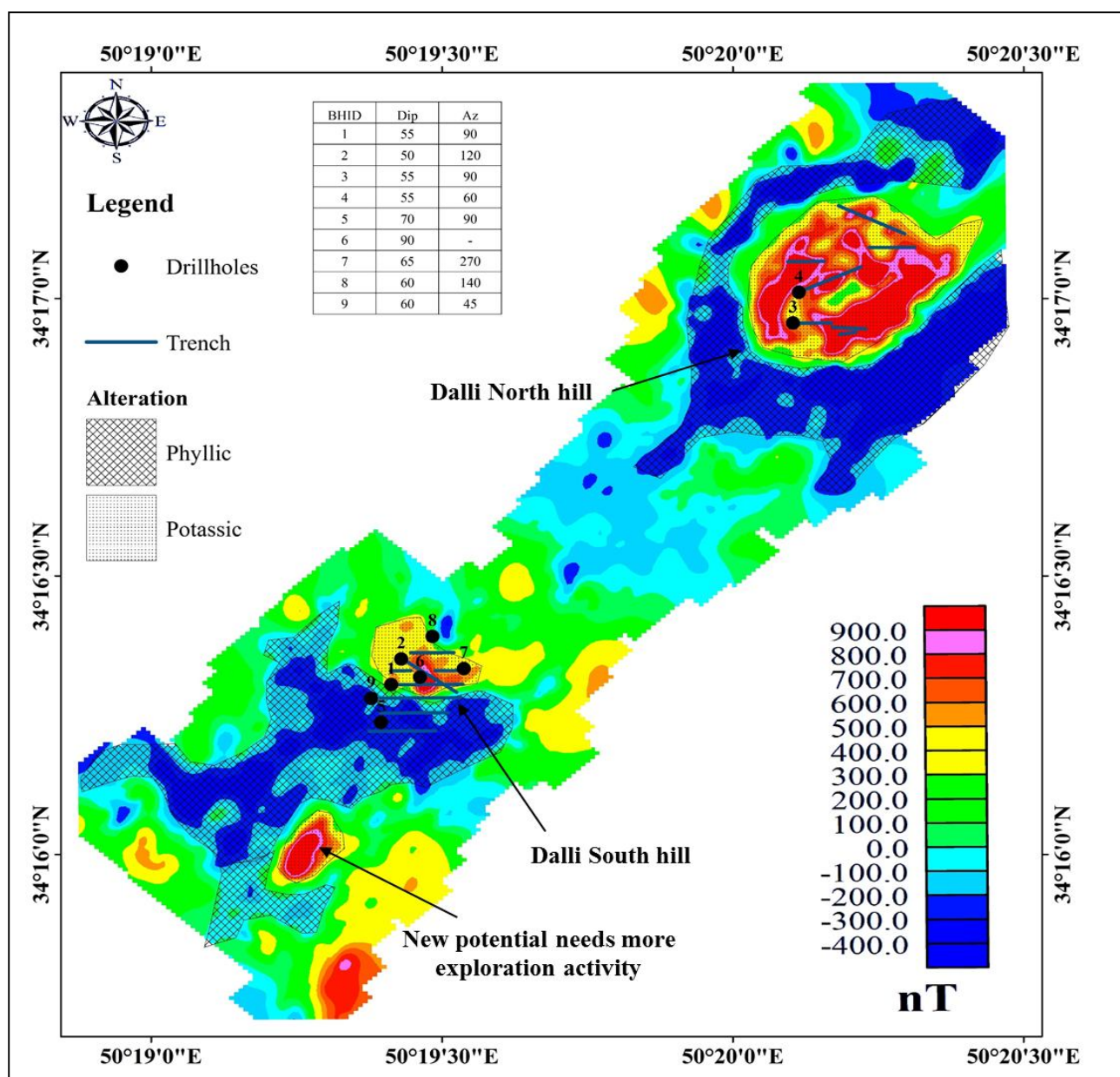
تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی

شده است. با توجه به اینکه مؤلفه مغناطیس باقی‌مانده در این کانسار اندازه‌گیری نشده است، تنها مؤلفه القای مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود. در این نقشه آنومالی‌های مثبت (قوی) و منفی (کم) دیده می‌شود که الگوی مشخصی از خود نشان می‌دهند. در این محدوده دو کانسار به نام‌های تپه‌های شمالی و جنوبی شناخته‌شده و حفاریات اکتشافی عمیق بر روی آنها انجام شده است. در کانسار دالی شمالی آنومالی مثبت و قوی بیضوی شکل بزرگ که آنومالی منفی و ضعیف به‌صورت هاله‌ای آنرا احاطه می‌کند، دیده می‌شود. آنومالی مثبت در

در محدوده کانسار مس-طلای پورفیری دالی، برداشت مغناطیس‌سنجی در شبکه‌ای ۱۰۰ در ۲۰ متر انجام شده و بر روی آنومالی‌های مغناطیسی ابعاد شبکه به نصف کاهش یافته است. مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در محدوده به‌ترتیب ۴۷۱۹۰ nT، ۵۲/۳ درجه و ۳/۹ درجه برای شدت میدان مغناطیسی زمینه، زاویه میل و زاویه انحراف مغناطیسی هستند. با کم کردن شدت میدان مغناطیسی برداشت‌شده از میدان مغناطیسی زمینه، شدت میدان مغناطیسی باقی‌مانده محاسبه شد. در شکل ۱۵، نقشه شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب در محدوده دالی نشان‌داده

پورفیری غنی از طلا مشاهده شود، در این کانسار وجود دارد که نشان‌دهنده نزدیکی هسته مرکزی دگرسانی پتاسیک به سطح زمین است. ابعاد زون دگرسانی پتاسیک در این زون تقریباً 450×600 متر است. در کانسار دالی شمالی دو گمانه و چندین ترانشه حفر شده است که زون‌های کانه‌دار را قطع کرده‌اند.

ارتباط با هسته مرکزی دگرسانی پتاسیک و حلقه آنومالی منفی احتمالاً در ارتباط با زون دگرسانی فلیک است. شدت میدان مغناطیسی بر روی زون پتاسیک به حدود 1800 nT و بر روی زون دگرسانی فلیک به 1000 nT - نیز می‌رسد. الگوی آنومالی متقارن و حلقوی شکلی که باید بر روی کانسارهای مس



شکل ۱۵. نقشه شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب کانسار دالی که زون‌های دگرسانی تفسیری، موقعیت ترانشه‌ها و گمانه‌های حفر شده بر روی آن نشان داده شده است.

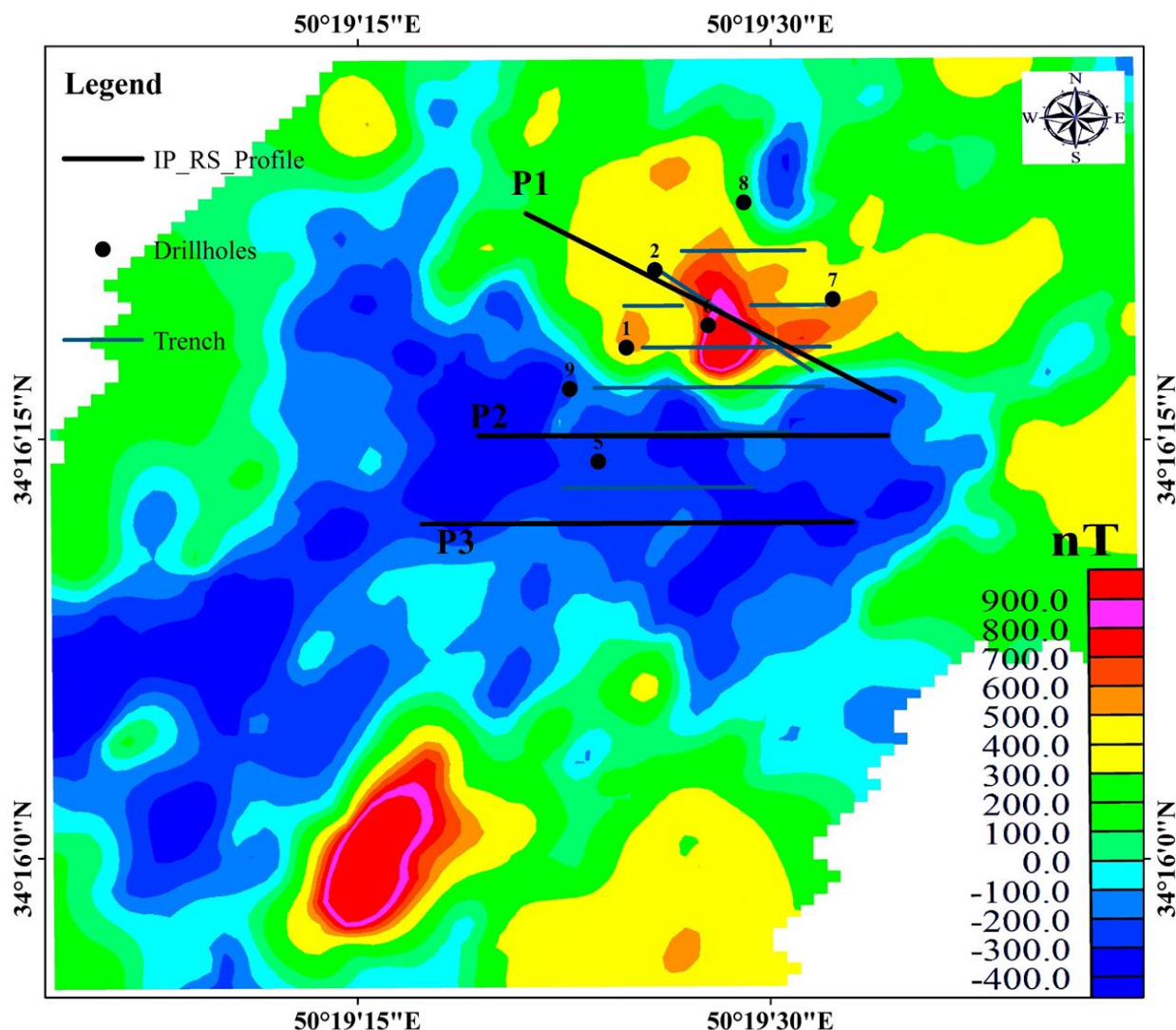
Fig. 15. The reduced to the magnetic pole map of the Dalli deposit overlain by the interpreted alteration zoning, trenches and boreholes.

کانسار دالی جنوبی نیز با یک آنومالی مغناطیسی مشاهده می‌شود که قسمت‌های مثبت آنومالی مربوط به زون دگرسانی پتاسیک است. در حاشیه آنومالی مثبت نیز زون وسیعی از آنومالی مغناطیسی منفی مشاهده می‌شود که ناشی از تخریب مگنتیت در زون دگرسانی فلیک است. گسترش کانسار دالی جنوبی حدود 180×250 متر است. در جنوب این نقشه نیز آنومالی بیضوی شکل قوی از شدت میدان مغناطیسی با گسترش حدود 130×240 متر دیده می‌شود که فعالیت‌های اکتشافی قابل توجهی بر روی آن انجام نشده است و بر اساس بررسی‌های مغناطیس‌سنجی حائز اهمیت و مستلزم بررسی‌های دقیق‌تر است. در حدود ۴۰ متر در ۲۰ متر در بالای آنومالی بیضوی شکل تپه جنوبی بر روی زمین کانی‌سازی مس-طلا در زون پتاسیک رخنمون دارد. موقعیت دگرسانی‌های تفسیری و گمانه‌های حفر شده و ترانشه‌ها بر روی آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. گمانه ۶ به صورت قائم و دیگر گمانه‌ها شیب‌دار حفر شده‌اند. تمام گمانه‌ها به ماده معدنی با عیار قابل توجه برخورد کرده‌اند؛ به جز گمانه ۵ که در یک زون آنومالی مغناطیسی با شدت منفی حفر شده است که نباید انتظار کانی‌سازی خوب در این قسمت‌ها داشت.

تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی

در کانسارهای دالی شمالی و جنوبی چند پروفیل با آرایه قطبی-دوقطبی برای برداشت پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی نیز اجرا شده است. برای برداشت این مؤلفه‌ها از دستگاه Scintrex IPR9 استفاده شده است. سه پروفیل بر روی کانسار دالی جنوبی و سه پروفیل در کانسار دالی شمالی اجرا شده که در اینجا از هر کانسار دو پروفیل که ویژگی‌های متمایزی دارند، انتخاب شده است. در شکل ۱۶ موقعیت دو پروفیل IP & RS بر روی نقشه شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب کانسار تپه جنوبی نشان داده شده است. نمودار شدت میدان مغناطیسی (شکل ۱۷-A) در امتداد پروفیل P1 و

نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی (شکل ۱۷-B) و شارژپذیری (شکل ۱۷-C) این پروفیل در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مدل بلوکی عیار مس و طلا (که با استفاده از گمانه‌های اولیه به دست آمده است) نیز در شکل ۱۸-A و B نشان داده شده است. در امتداد این پروفیل آنومالی مغناطیسی مثبت و قوی دیده می‌شود که منطبق بر زون کانی‌سازی است. در پروفیل P1 در فاصله ۱۴۰ تا ۲۸۰ زونی با مقاومت الکتریکی بالای ۴۰۰ اهم-متر در سطح وجود دارد که منطبق بر کلاهک سیلیسی است. در بخش‌های قبل نیز بیان شد که در برخی کانسارها در بالای کانسارهای پورفیری کلاهک‌های سیلیسی ایجاد می‌شوند. در این پروفیل شدت مقادیر شارژپذیری بسیار بالاست که نشان‌دهنده زون‌هایی با درصد بالای کانی‌های سولفیدی است. با افزایش عمق شدت آنومالی شارژپذیری افزایش و مقاومت ویژه الکتریکی کاسته شده است. مدل بلوکی نشان‌دهنده انطباق کانی‌سازی با مقادیر بالای شارژپذیری در مرکز پروفیل است. در مرکز پروفیل شدت میدان مغناطیسی نیز مثبت و بالاست. در جنوب شرقی پروفیل آنومالی شارژپذیری همچنان گسترش دارد؛ اما منطبق بر آنومالی مغناطیسی نیست و احتمال ارتباط آن با هاله‌های پیریتی بسیار زیاد است. در این قسمت حفريات کاملی برای تعیین دقیق وضعیت کانی‌سازی انجام نشده است. در امتداد این پروفیل دو گمانه حفر شده است. گمانه BH02 از عمق ۴۰ متری زونی با عیار متوسط طلا $1/4$ گرم بر تن و مس $0/8$ درصد برخورد کرده است که منطبق بر زون با شارژپذیری بین ۲۰ تا ۶۰ میلی ثانیه و مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم متر است. در ۳۰ متر ابتدای گمانه تغییرات شارژپذیری بین ۱۷ تا ۲۶ میلی ثانیه و مقاومت الکتریکی حدود ۱۰۰ اهم متر است. عیار متوسط طلا حدود $0/8$ گرم بر تن و عیار متوسط مس $1/2$ درصد است. بنابراین در این گمانه زون‌های با شارژپذیری بالای ۱۸ میلی ثانیه و مقاومت کمتر از ۱۰۰ اهم متر منطبق بر آنومالی مغناطیسی دارای عیار قابل توجهی از مس و طلا هستند.



شکل ۱۶. موقعیت پروفیل‌های IP & RS بر روی نقشه RTP در کنسار تپه جنوبی دالی

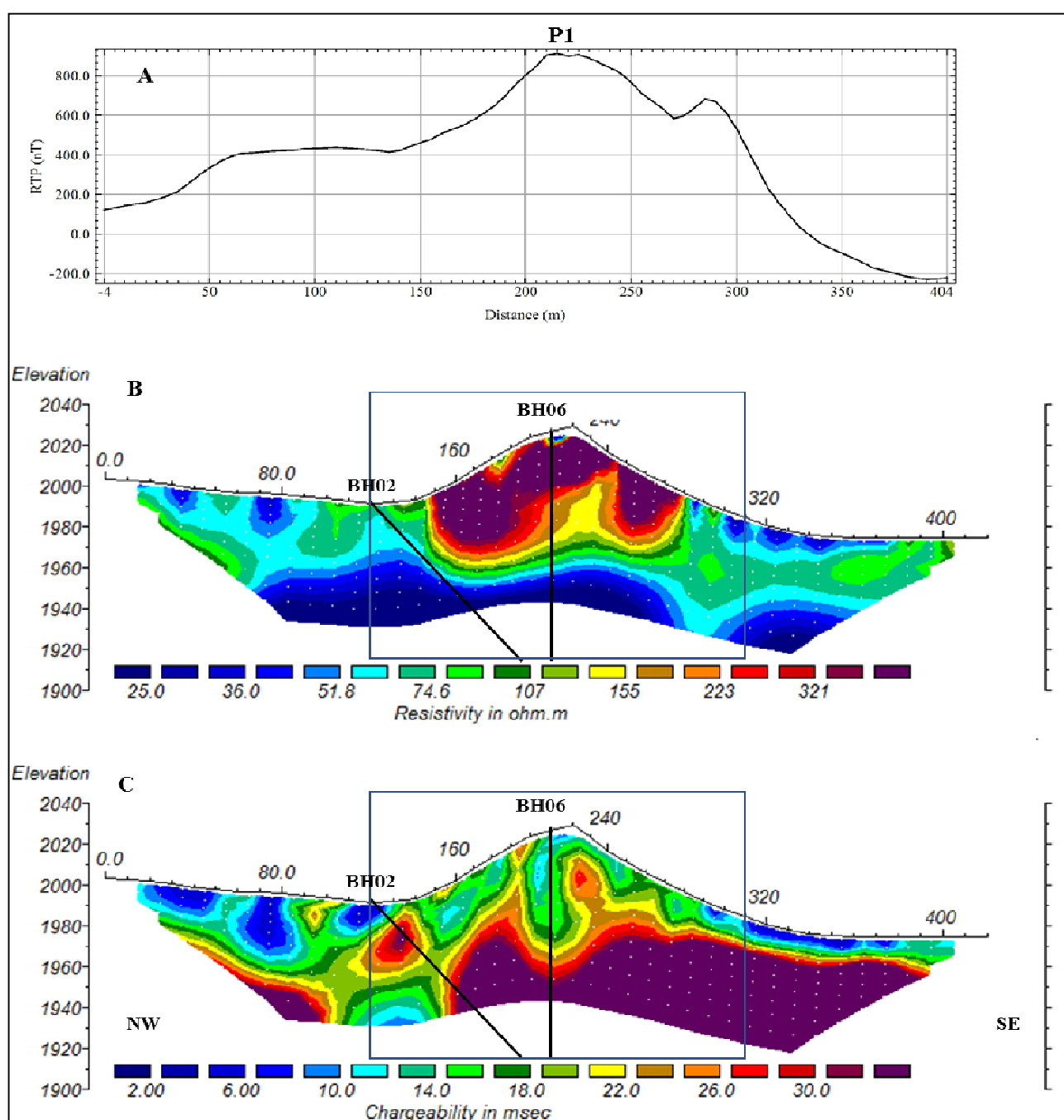
Fig. 16. Location of IP & RS profiles on the RTP map of the Dalli South Hill deposit

داشت. در نزدیکی این پروفیل گمانه‌ای حفر شده است که عیار مس و طلای آن و همچنین درصد پیریت در مغزه‌های آن به ترتیب در شکل ۲۰-A و B نشان داده شده است. درصد پیریت توسط کارشناس برداشت مغزه‌ها به صورت کیفی تعیین شده است. چنان که دیده می‌شود، به دلیل درصد بالای پیریت زونی با شارژپذیری بالا ایجاد شده؛ اما عیار مس و طلا کم است. البته رگه‌هایی با ضخامت‌های کم و پر عیار نیز مشاهده شده‌اند. در امتداد این گمانه تغییرات شارژپذیری بین ۱۷ تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه و مقاومت ویژه الکتریکی در بیشتر قسمت‌ها کمتر از ۱۰۰ اهم متر

در شکل ۱۹-A، B و C، به ترتیب نمودار میدان مغناطیسی برگردان به قطب و مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری پروفیل P2 نشان داده شده است. شدت میدان مغناطیسی بر روی این پروفیل منفی است که نشان‌دهنده زون‌های تخریب مگنتیت است. زونی با شارژپذیری بالا وجود دارد که گسترش بیشتری نسبت به پروفیل قبل هم دارد؛ اما منطبق با آنومالی‌های مغناطیسی منفی هستند و لذا در ارتباط با زون دگرسانی فلیک و یا آرتزلیک با درصد بالای پیریت هستند و کانی‌سازی قابل توجهی در این قسمت وجود نخواهد

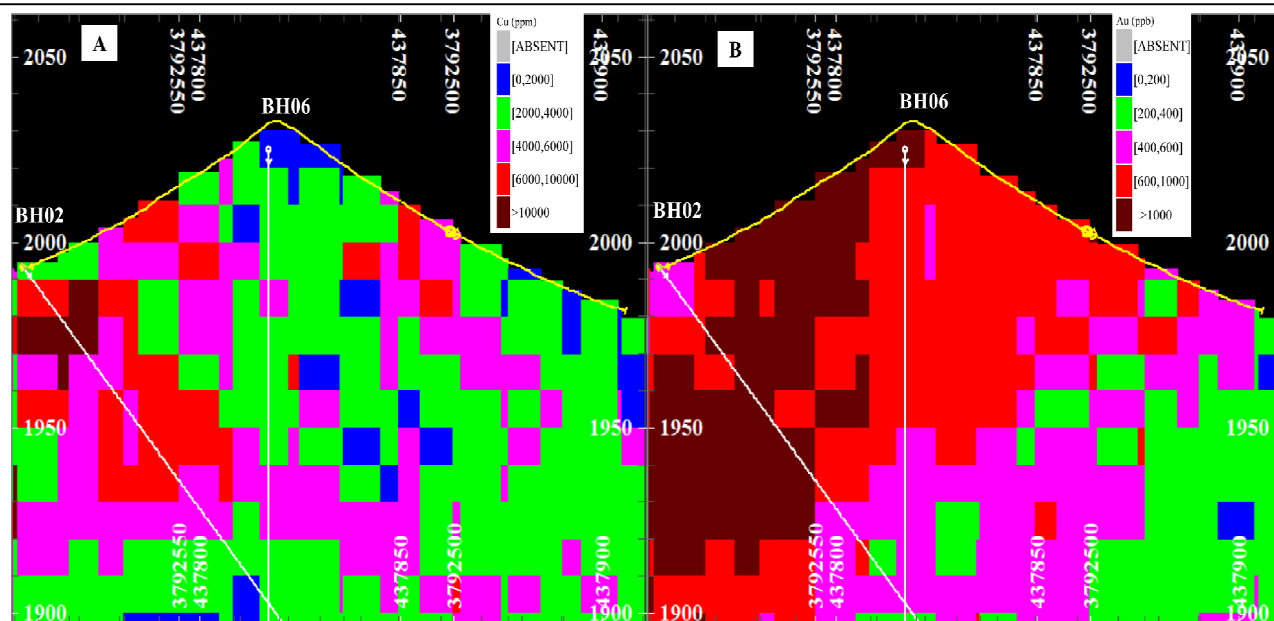
منفی میدان مغناطیسی برگردان به قطب دارای عیار کم مس و طلا هستند.

است. عیار متوسط مس و طلا نیز به ترتیب کمتر از ۰/۰۲ درصد و ۰/۰۲ گرم بر تن هستند. بنابراین در این گمانه زون‌های با مقاومت ویژه الکتریکی کم و شارژپذیری بالای منطق بر مقادیر



شکل ۱۷. مدل‌های ژئوفیزیکی کانسار دالی جنوبی در امتداد پروفیل P1. A: شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب، B: مدل مقاومت ویژه الکتریکی و C: مدل شارژپذیری (کادر آبی رنگ محدوده مدل عیاری در شکل ۱۸ را نشان می‌دهد).

Fig. 17. Geophysical models of the South Dalli deposit along the profile P1. A: Reduced to the magnetic pole (RTP), B: Electrical resistivity, and C: chargeability. The blue box shows the extend of block model in Fig. 18.



شکل ۱۸. مدل بلوکی عیار کانسار دالی جنوبی در امتداد پروفیل P1 (موقعیت مدل بلوکی بر روی شکل ۱۷ با کادر مشخص شده است). A: مس و B: طلا

Fig. 18. Grade block models of the South Dalli deposit along the profile P1 (frame of block model specified by a box in Fig. 17). A: Cu, and B: Au

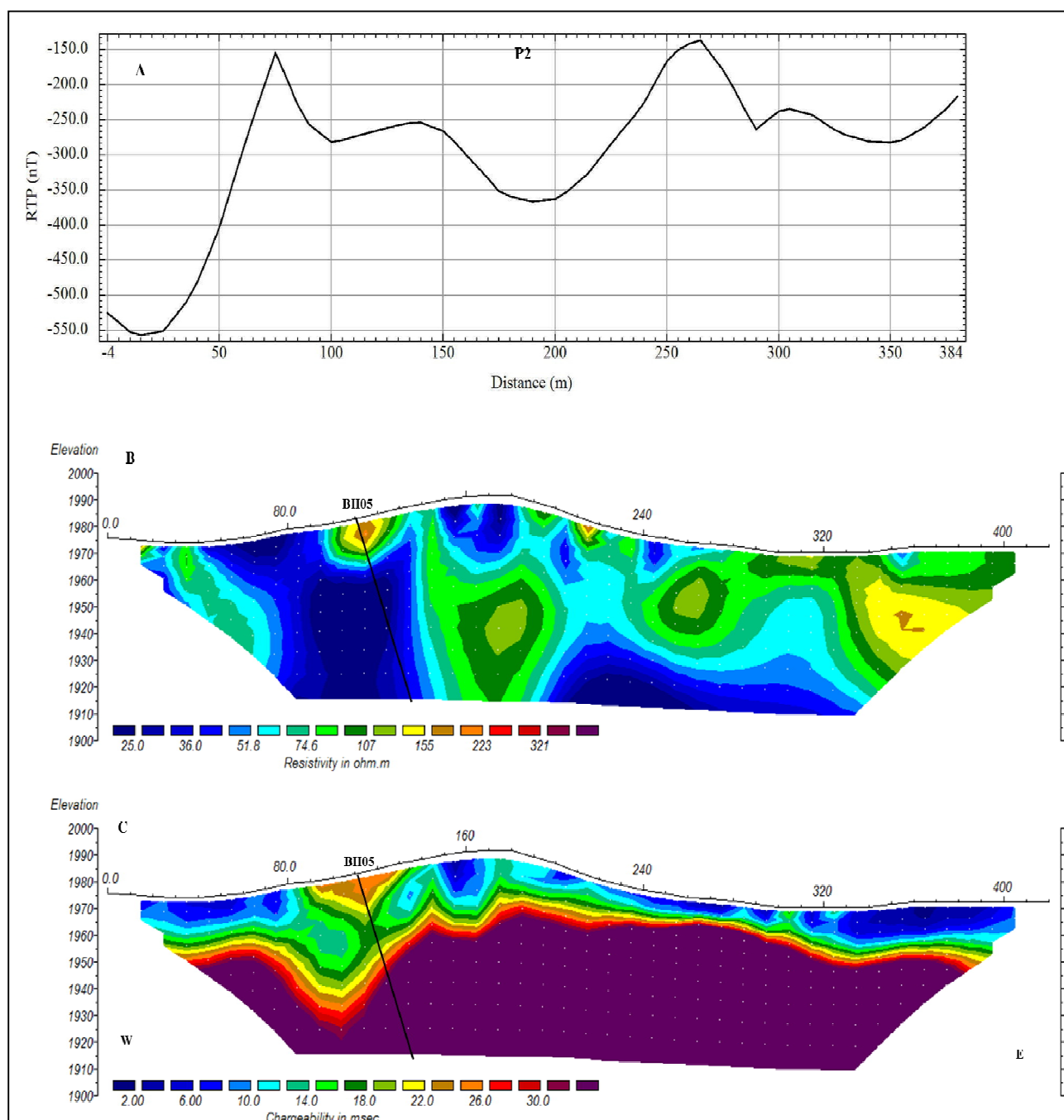
شارژپذیری افزوده شده است و عیار طلا و مس کمتر شده‌اند. درصد پیریت تخمینی در این گمانه نسبت به گمانه BH05 که بر روی پروفیل P2 حفر شده است، بسیار کمتر است و علت شارژپذیری کم در این مقطع نیز درصد پایین پیریت است. دگرسانی‌های پروپلیتیک و پتاسیک مهم‌ترین دگرسانی‌های مشاهده شده در این گمانه هستند. بنابراین در این پروفیل زون‌های با شارژپذیری کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه و مقاومت متوسط (۱۸۰ تا ۲۲۰ اهم-متر) و آنومالی مغناطیسی متوسط دارای عیار طلای نسبتاً خوب ولی عیار کم مس هستند و زون‌های با شارژپذیری کم و مقاومت ویژه الکتریکی پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم-متر) نیز شرایط مشابهی دارند.

در شکل ۲۴-A، B و C به ترتیب نمودار تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر گردان به قطب و مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری بر روی پروفیل P5 نشان داده شده‌اند. نمودار تغییرات عیار و پیریت تخمینی در این گمانه نیز به ترتیب در شکل ۲۵-A و B نشان داده شده‌اند. ۳۰ متر ابتدای گمانه منطبق بر مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم-متر و

موقعیت پروفیل‌های P4 و P5 که بر روی کانسار دالی شمالی اجرا شده‌اند، بر روی نقشه شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب در شکل ۲۱ نشان داده شده است. این دو پروفیل تقریباً بر روی آنومالی مغناطیسی مثبت اجرا شده‌اند و به صورت کامل هاله‌های دگرسانی کانسار را در بر نمی‌گیرند. در شکل ۲۲-A، B و C به ترتیب نمودار تغییرات میدان مغناطیسی برگردان به قطب و نتایج مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری پروفیل P4 و در شکل ۲۳-A و B، تغییرات عیار مس و طلا و درصد پیریت و نوع دگرسانی در گمانه شماره ۳ که در فاصله ۳۰ متری این پروفیل حفر شده است، نشان داده شده‌اند. این گمانه بر روی آنومالی مغناطیسی تقریباً متوسط (اما مثبت) و شارژپذیری کم حفر شده است. تا عمق ۷۰ متری این گمانه عیار متوسط طلا حدود ۰/۶ گرم بر تن و عیار متوسط مس حدود ۰/۱۲ درصد است. مقاومت ویژه الکتریکی در ۳۰ متر ابتدای گمانه ۱۸۰ تا ۲۲۰ اهم-متر و در عمق‌های بیشتر از مقاومت الکتریکی کاسته شده است. مقدار شارژپذیری هم تقریباً کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه است. در مرکز گمانه کمی به مقدار

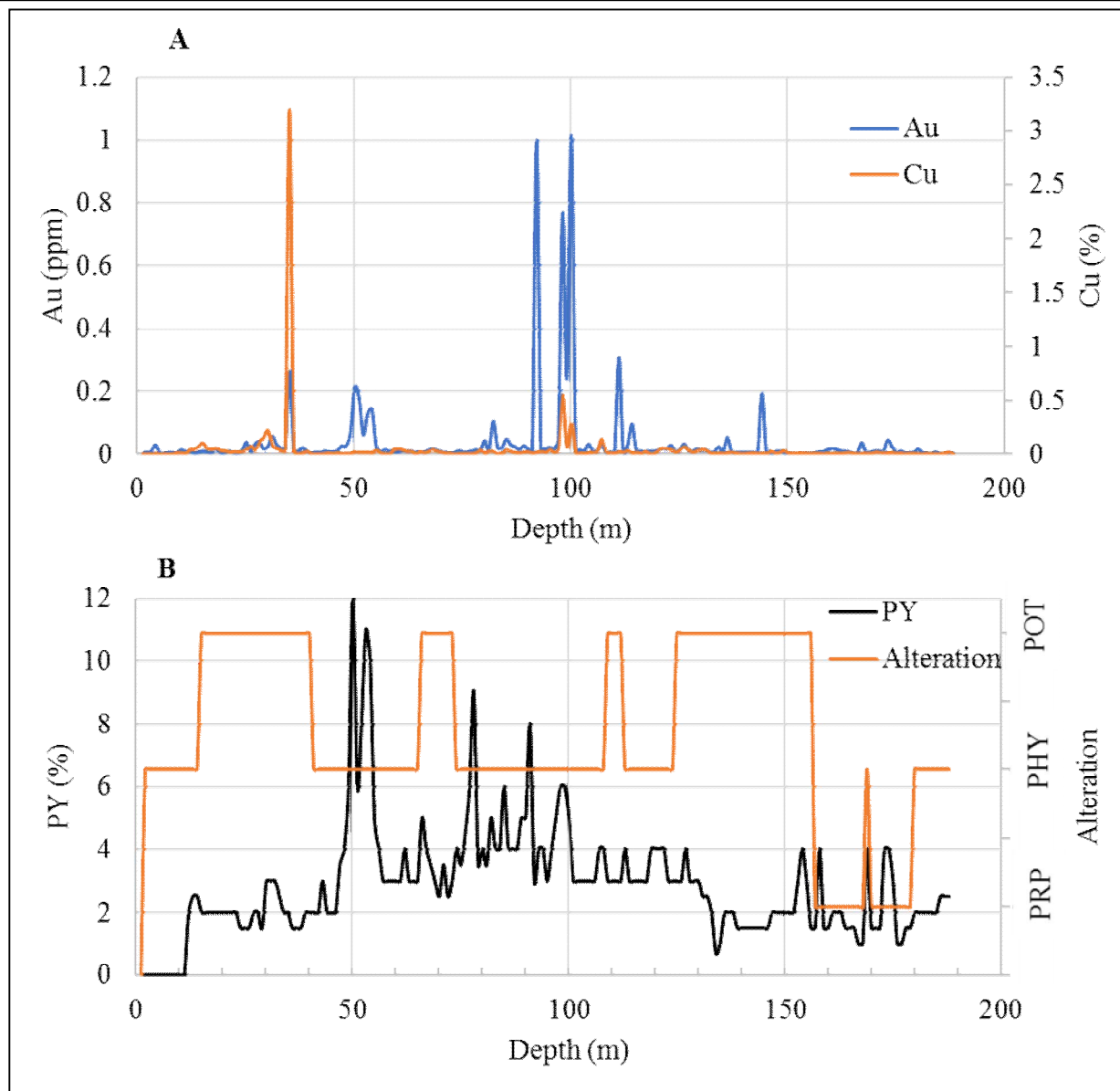
حدود ۱۰۰ اهم - متر است و شارژپذیری بیشتر از ۲۰ تا ۵۰ میلی‌ثانیه متغیر است.

شارژپذیری کمتر از ۱۵ میلی‌ثانیه است. در این قسمت عیار متوسط طلا حدود ۰/۶ گرم بر تن و عیار متوسط مس حدود ۰/۱۲ درصد است. در عمق‌های بیشتر مقاومت ویژه الکتریکی



شکل ۱۹. مدل‌های ژئوفیزیکی کانسار دالی جنوبی در امتداد پروفیل P2. A: شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب، B: مدل مقاومت ویژه الکتریکی و C: مدل شارژپذیری

Fig. 19. Geophysical models of the South Dalli deposit along the profile P1. A: Reduced to the magnetic pole (RTP), B: Electrical resistivity, and C: chargeability



شکل ۲۰. ویژگی‌های عیار و کانی‌شناسی در گمانه BH05 کانسار دالی جنوبی A: عیار طلا و مس، B: دگرسانی و درصد پیریت (این مقادیر توسط کارشناس برداشت مغزه‌ها تخمین زده شده است). (POT: pottasic, PHY: phyllic, PRP: propylitic).

Fig. 20. Grade and mineralogical properties in borehole BH05 of the South Dalli deposit. A: The variation of Au and Cu, and B: alteration and percentage of the pyrite (estimated qualitatively by the geologist). (POT: pottasic, PHY: phyllic, PRP: propylitic).

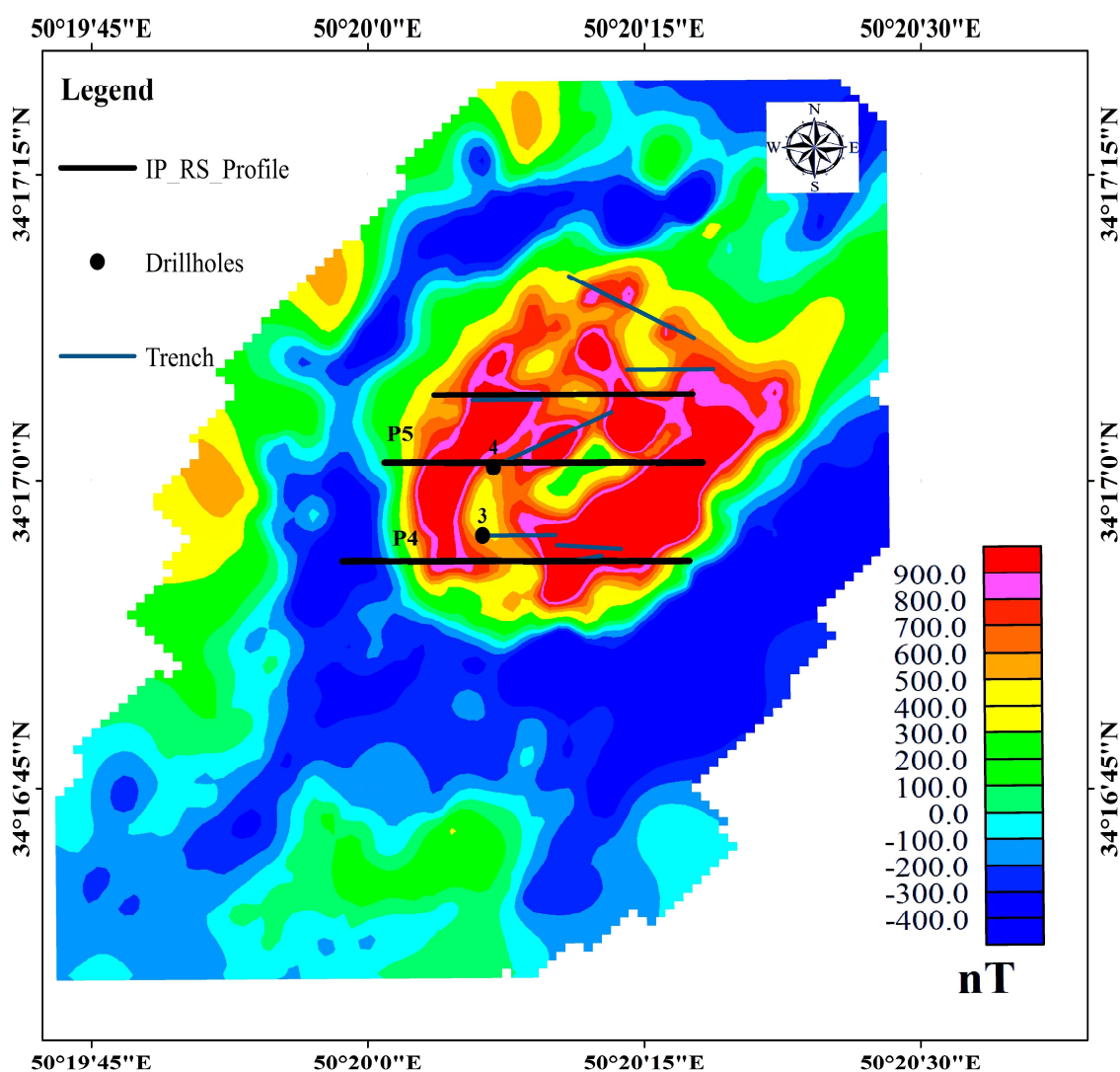
پایین مس و عیار طلای حدود ۰/۶ گرم بر تن هستند و زون‌های با شارژپذیری بالاتر و مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۱۰۰ اهم متر دارای عیار طلای حدود ۰/۳۶ گرم بر تن و عیار پایین مس هستند.

بنابراین در این کانسار از گمانه‌هایی که در مناطقی با

در این قسمت از گمانه عیار طلا ۰/۳۶ گرم بر تن و عیار مس ۰/۱ درصد است. بنابراین در این مقطع با افزایش شارژپذیری و مقاومت حدود ۱۰۰ اهم - متر مقدار عیار متوسط طلا کاسته شده است و عیار مس تقریباً ثابت و به‌طور کلی کم است. بنابراین در این مقطع، زون‌های شارژپذیری پایین و مقاومت کم دارای عیار

عمق بیش از ۴۰۰ متری کانسار نتوانسته است به خوبی گسترش
هاله‌های دگرسانی و زون‌های کانی‌سازی را تفکیک کند.

آنومالی‌های مغناطیسی و شارژپذیری حفر شده‌اند، نتیجه مطلوبی
حاصل شده است. البته باید توجه داشت که عمق برداشت‌های
IP & RS در این بررسی‌ها کمتر از ۱۰۰ متر است و با توجه به

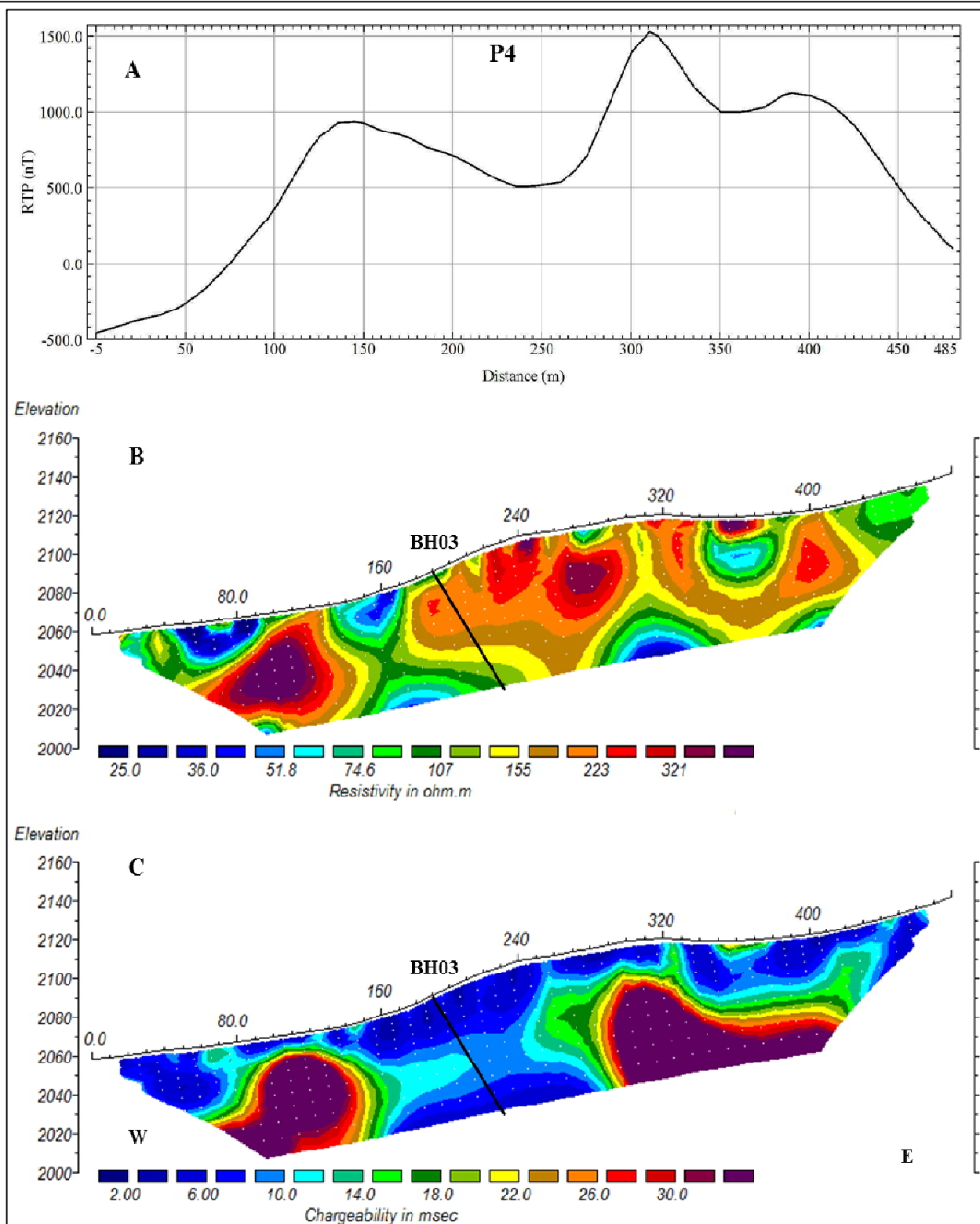


شکل ۲۱. موقعیت پروفیل‌های IP & RS بر روی نقشه RTP کانسار تپه شمالی دالی

Fig. 21. Location of IP & RS profiles on the RTP map of the Dalli North Hill deposit

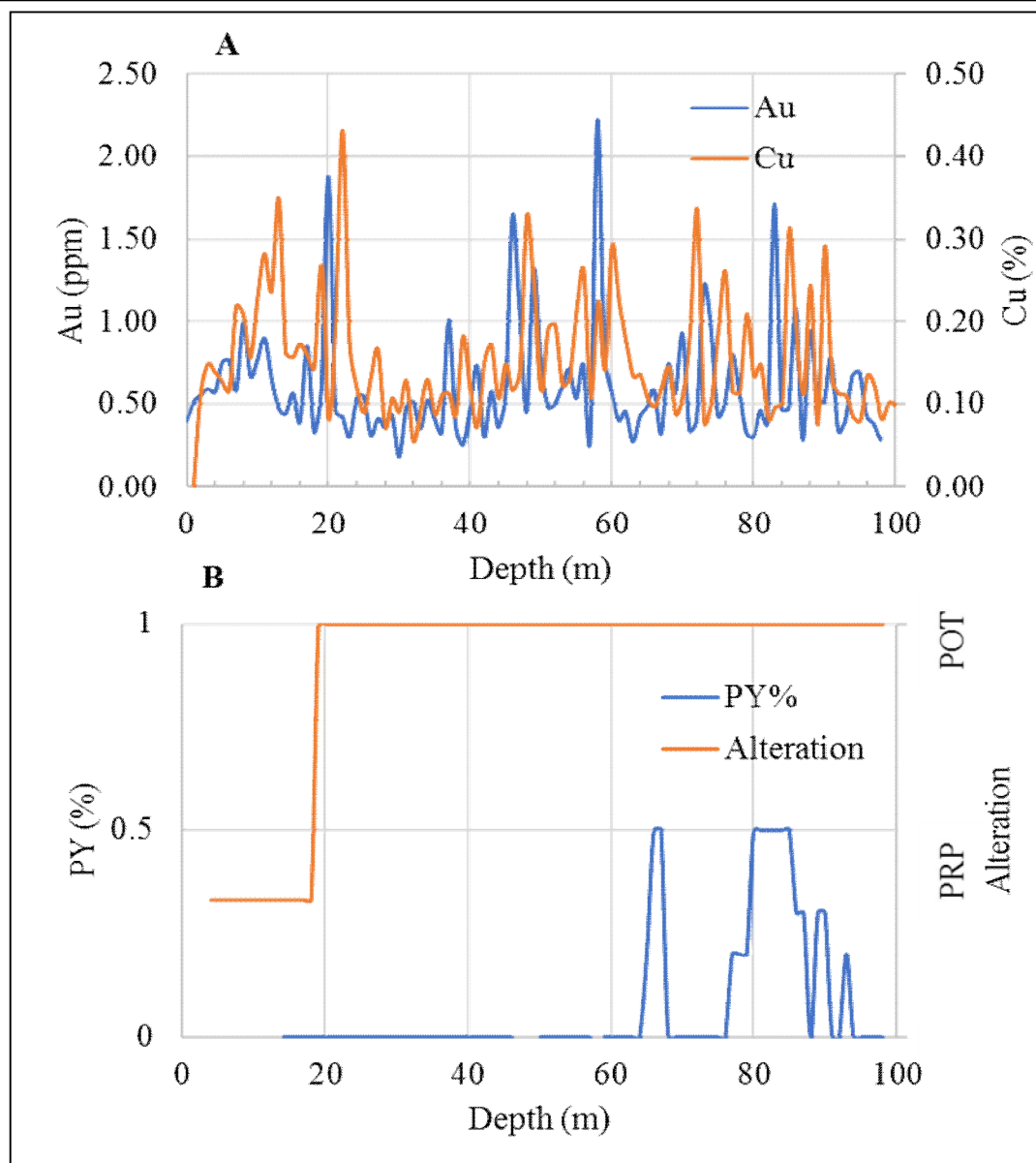
گمانه ۵ بسیار کم است و با زون کانی‌سازی برخوردی نداشته
است که منطبق بر آنومالی قوی از شارژپذیری، مقاومت ویژه
الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم متر و شدت میدان مغناطیسی منفی
است.

خلاصه نتایج مقایسه بین گمانه‌های اکتشافی و داده‌های
ژئوفیزیکی در جدول ۲ آمده است. گمانه‌های ۲ و ۶ زون
کانی‌سازی با عیار خوب مس و طلا را قطع کرده که منطبق بر
آنومالی مثبت مغناطیسی، شارژپذیری بالا و مقاومت ویژه
الکتریکی کمتر از ۱۰۰ اهم متر است. عیار متوسط مس و طلا در



شکل ۲۲. مدل‌های ژئوفیزیکی کانسار دالی شمالی در امتداد پروفیل P4. A: شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب، B: مدل مقاومت ویژه الکتریکی و C: مدل شارژپذیری

Fig. 22. Geophysical models of the North Dalli deposit along the profile P4. A: Reduced to the magnetic pole (RTP), B: Electrical resistivity, and C: chargeability.

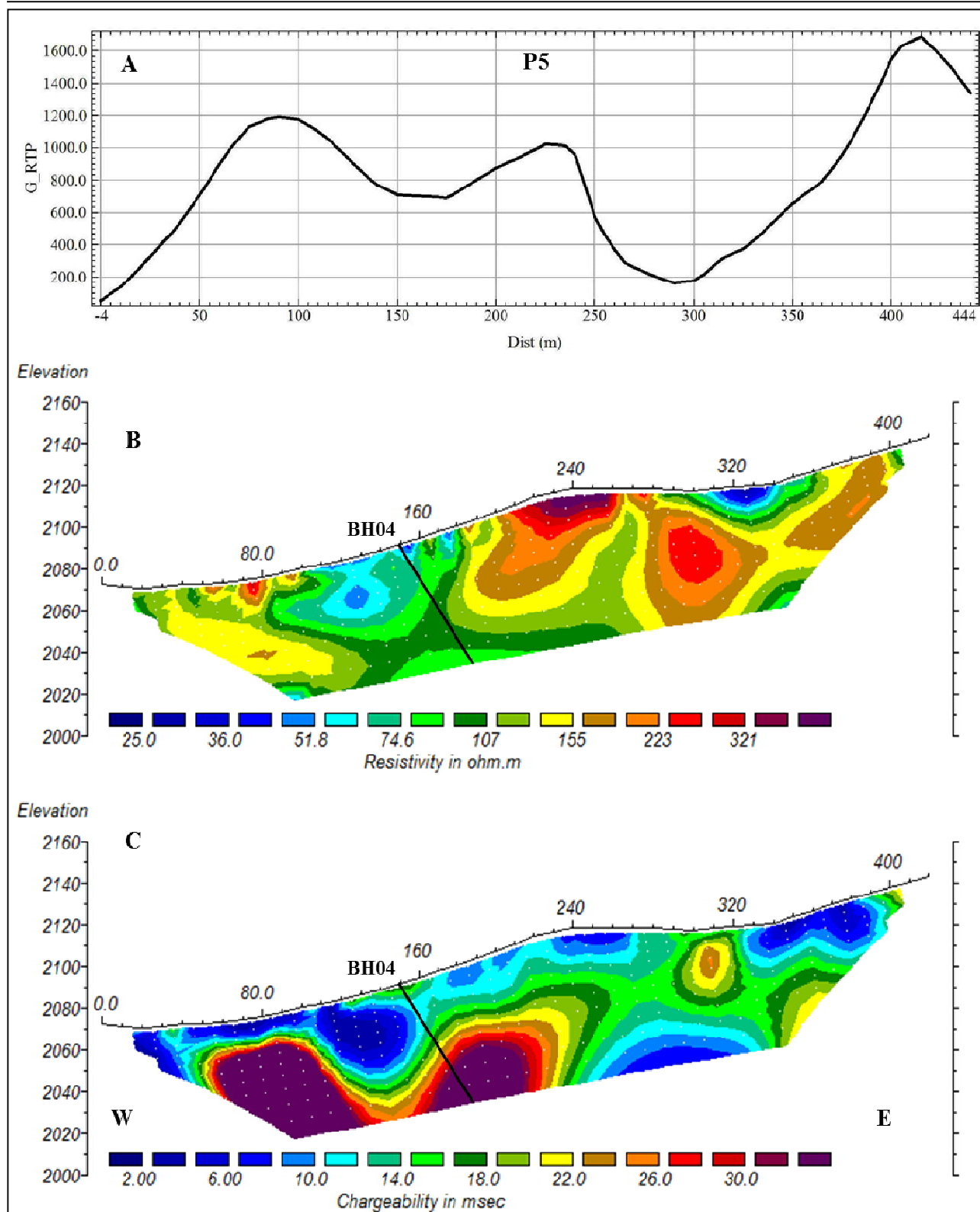


شکل ۲۳. ویژگی‌های عیار و کانی‌شناسی در گمانه BH03 کانسار دالی شمالی. A: عیار طلا و مس و B: دگرسانی و درصد پیریت

Fig. 23. Grade and mineralogical properties in borehole BH03 of the North Dalli deposit. A: Grade of Au, and Cu. B: alteration and percentage of the pyrite.

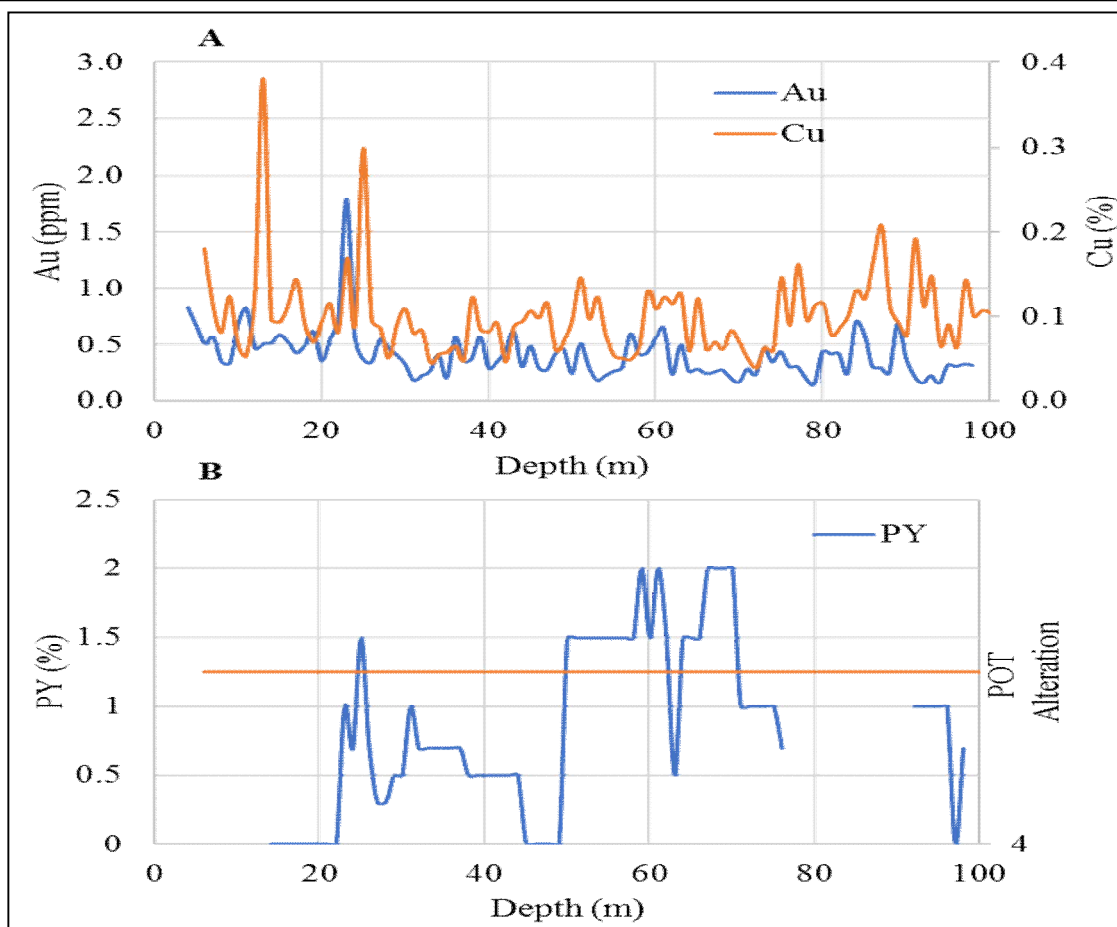
مس در هر دو یکسان و عیار طلا در زون با شارژپذیری کمتر، بیشتر است. این گمانه نیز بر روی آنومالی‌های متوسط مغناطیس واقع شده است. بنابراین زون‌های با شارژپذیری کم نیز می‌توانند بیانگر زون‌های کانی‌سازی باشند که این ویژگی باعث پیچیده‌تر شدن تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی می‌شود.

گمانه ۳ که در کانسار تپه شمالی حفر شده منطبق بر مقادیر کم شارژپذیری (کمتر از ۱۰) مقاومت کمتر از ۲۰۰ اهم متر و آنومالی متوسط میدان مغناطیسی است و عیار طلا در آن خوب و عیار مس کم است. این گمانه هرچند عیار مس آن کم است؛ زون کانی‌سازی را قطع کرده است. گمانه ۴ نیز تقریباً دو زون با شارژپذیری‌ها و مقاومت‌های متفاوت را قطع کرده است که عیار



شکل ۲۴. مدل‌های ژئوفیزیکی کانسار دالی شمالی در امتداد پروفیل P5. A: شدت میدان مغناطیسی برگردان به قطب، B: مدل مقاومت ویژه الکتریکی و C: مدل شارژپذیری

Fig. 24. Geophysical models of the North Dalli deposit along the profile P5. A: Reduced to the magnetic pole (RTP), B: Electrical resistivity, and C: chargeability.



شکل ۲۵. ویژگی‌های عیار و کانی‌شناسی در گمانه BH04 کانسار دالی شمالی. A: عیار طلا و مس و B: دگرسانی و درصد پیریت

Fig. 25. Grade and mineralogical properties in borehole BH04 of the North Dalli deposit. A: Grade of Au and Cu. B: alteration and percentage of the pyrite

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های ژئوفیزیکی و عیاری و دگرسانی در کانسار مس-طلا پورفیری دالی

Table. 2. Comparison of geophysical properties and grade analysis and alterations in the Dalli Cu-Au porphyry deposit.

Average grade of Au (ppm)	Average grade of Cu (%)	Magnetic anomaly	Chargeability (ms)	Electrical resistivity (Ohm.m)	Borehole
1.33	0.94	High positive anomaly	20-60	<100	BH02
0.5	0.4	High positive anomaly	20-50	<100	BH06
0.02	0.02	Negative anomaly	20-100	<100	BH05
0.6	0.12	Moderate positive anomaly	<10	180-220	BH03
0.6	0.1	Moderate positive anomaly	<10	<180	BH03
0.6	0.12	Moderate positive anomaly	<15	<100	BH04
0.36	0.1	Moderate positive anomaly	20-50	100	BH04

نتیجه‌گیری

ژئوفیزیک به‌عنوان روشی غیرمستقیم در اکتشاف کانسارهای فلزی و غیر فلزی جایگاه ویژه‌ای دارد که اطلاعات مفید زیرسطحی از آن حاصل می‌شود. نکته مهم در استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، شناخت روشی مناسب برای شناسایی و اکتشاف کانسار موردنظر و تفسیر دقیق و تلفیق آن با اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی است. برای تفسیر مناسب ابتدا باید مدلی مفهومی درباره کانسار مورد بررسی و نحوه تغییرات خواص فیزیکی در آن کانسار داشت. مدل مفهومی باید بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی سطحی تعیین و با افزایش اطلاعات به‌روزرسانی شود. برای تفسیر داده‌های ژئوفیزیک باید دانست که این داده‌ها احتمالاً بر روی چه کانساری برداشت شده‌اند. دانستن سنگ بستر زمینه و عمق تقریبی کانساری (سطح فرسایش) که باید بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی پیش‌بینی شوند، بسیار حائز اهمیت است. پس از انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی می‌توان مدل مفهومی را به‌روزرسانی و مدل‌های جدیدتری ارائه کرد. چنان‌که در مدل‌ها نیز نشان داده شد، کانسار پورفیری با ویژگی‌های یکسان که در اعماق مختلف یا در سنگ بسترهای متفاوت واقع شده است، می‌تواند پاسخ‌های بسیار متفاوتی داشته باشد. در این پژوهش داده‌های ژئوفیزیکی کانسار مس-طلا پورفیری دالی تحلیل و با نتایج حفريات اکتشافی مقایسه شد. در این کانسار گمانه‌هایی که بر روی آنومالی‌های منفی میدان مغناطیسی حفر شده‌اند، برخوردی با زون کانی‌زایی نداشته‌اند، هر چند زون‌هایی با شارژپذیری بالا و مقاومت ویژه الکتریکی کم را قطع کرده است. دو گمانه بر روی آنومالی‌های مثبت و قوی میدان مغناطیسی، شارژپذیری بالا و

مقاومت ویژه الکتریکی بالا در سطح (بیانگر زون‌های سیلیسی) و مقاومت کم در عمق حفر شده‌اند که با کانی‌سازی برخورد کرده‌اند. در کانسار تپه شمالی گمانه‌ها در آنومالی‌های مثبت و متوسط میدان مغناطیسی و شرایط متغیر شارژپذیری و مقاومت ویژه الکتریکی (با مقادیر کم یا زیاد) حفر شده‌اند که دارای عیار خوب طلا و کم مس هستند. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که آنومالی‌های مثبت و قوی مغناطیسی در این کانسار بیانگر زون‌های کانی‌سازی با عیار بالای مس و طلاست و در مکان‌یابی گمانه‌ها باید به این لایه اطلاعاتی توجه بیشتری کرد. آنومالی‌های شارژپذیری به شدت تحت تأثیر درصد کانی پیریت است و در صورتی که منطبق بر مقادیر منفی میدان مغناطیسی باشند، هاله‌های پیریتی را نشان می‌دهند. مقاومت ویژه الکتریکی زون‌های کانی‌سازی در سطح به دلیل وجود کلاهدک‌های سیلیسی زیاد و در عمق کم است. بنابراین در این کانسار و کانسارهای مشابه زون‌هایی با مقادیر بالای میدان مغناطیسی مثبت به همراه شارژپذیری و رسانایی بالا (بسته به عمق آنومالی رسانایی کم نیز می‌تواند زون‌های سیلیسی که حاوی کانی‌سازی هستند را نشان دهد) مناطق مطلوبی برای کانی‌سازی و حفاری‌های اکتشافی هستند.

علاوه بر نکات تفسیری بیان‌شده، نکته عملیاتی مهم درباره اجرای روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری این است که با توجه به گسترش عرضی و عمقی کانسارهای پورفیری باید پروفیل‌ها به گونه‌ای طراحی شوند تا زون‌های دگرسانی مختلف به‌خوبی شناسایی شوند و از تجهیزات و روش‌هایی با توان نفوذ به عمق‌های زیاد استفاده شود.

References

- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2010. Geology, alteration, mineralization, petrology, dating, geochemistry and aerogeophysics of Koohshah exploration area, Southwest of Birjand. Journal of Economic Geology, 1(4): 77–107. (in Persian with English abstract)
- Adelpour, M., Rasa, I., Masoudi, F. and Hosseini, M., 2016. Determination of Mineralization Zones Using Interpretation of IP and RS Data

- in The Garmab Copper Deposit (South Khorasan province). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 129–146. (in Persian with English abstract)
- Arif, J. and Baker, T., 2004. Gold paragenesis and chemistry at Batu Hijau, Indonesia: implications for gold-rich porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 39(5–6): 523–535.
- Asadi, H.H., 2008. Final exploration report of Dalli porphyry Cu–Au deposit, Markazi province. Technical Report. Dorsa Pardazeh Company, Isfahan, Report 01, 135 pp.
- Asadi, H.H., Porwal, A., Fatehi, M., Kianpouryan, S. and Lu, Y.J., 2015. Exploration feature selection applied to hybrid data integration modeling: Targeting copper-gold potential in central Iran. *Ore Geology Reviews*, 71(1): 819–838.
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi, H.H., Richards, J.P. and Jourdan, F., 2012. Petrology and geochemistry of calc-alkaline volcanic and subvolcanic rocks, Dalli porphyry copper–gold deposit, Markazi province, Iran. *International Geology Review*, 55(2): 158–184.
- Clark, D.A., 2014. Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper–gold systems: A review. *Tectonophysics*, 624–625 (1): 46–65.
- Cooke, D.R., Heithersay, P.S., Wolfe, R. and Calderon, A.L., 1998. Australian and western Pacific Porphyry Cu–Au deposits. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(4): 97–104.
- Cooke D.R., Hollings P., Wilkinson J.J. and Tosdal, R.M., 2014. Geochemistry of Porphyry Deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, USA, pp. 357–381.
- Dentith, M. and Mudge, S., 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, New York, 454 pp.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. and Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5): 7–27.
- Holden, E.J., Fu, S.C., Kovesi, P., Dentith, M., Bourne, B. and Hope, M., 2011. Automatic identification of responses from porphyry intrusive systems within magnetic data using image analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 74(4): 255–262.
- Holliday, J.R. and Cooke, D.R., 2007. *Advances in Geological Models and Exploration Methods for Copper ± Gold Porphyry Deposits*. Exploration in the New Millennium, Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Toronto, Canada.
- Hoschke, T.G., 2011. *Geophysical Signatures of Copper-gold Porphyry and Epithermal Gold Deposits, and Implications for Exploration*. ARC Centre of Excellence in Ore Deposits, University of Tasmania, Tasmania, 47 pp.
- Hosseinjani Zadeh, M. and Honarmand, M., 2018. Remote sensing and Aeromagnetic investigations in porphyry copper deposits for identification of areas with high concentration of gold: a case study from the central part of Dehaj-Sarduiyeh belt, Kerman, Iran. *Journal of Economic Geology*, 10(1): 237–254. (in Persian with English abstract)
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, F., Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of mineral deposit models for resource assessment. U.S. Geological Survey, Scientific Investigations, USA, Report 2010–5070–B, 169 pp.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Heidarian Shahri, M. R. and Karimpour, M.H., 2008. Mineralization and IP/RS and Magnetic geophysical survey in MA-I area and around it, Maher Abad Cu–Au porphyry exploration area, East of Iran. *Journal of Economic Geology*, 1(1): 1–17. (in Persian with English abstract)
- Pirajno, F., 2010. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Netherlands, 1250 pp.
- Sillitoe, R.H., 1979. Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 14(2): 161–174.
- Sillitoe, R.H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*,

- 44(3): 373–388.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry-copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Singer, D.A., Berger, V.I. and Moring, B.C., 2008. Porphyry copper deposits of the world - database and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey Open-File, USA, Report 2008-1155, 45 pp.



Geophysical signatures of the gold rich porphyry copper deposits: A case study at the Dalli Cu-Au porphyry deposit

Moslem Fatehi and Hooshang Asadi Haroni*

Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Submitted: Dec. 19, 2017

Accepted: Apr. 23, 2018

Keywords: *geophysical signature, porphyry copper-gold, Dalli deposit, potassic alteration*

Introduction

Geophysical exploration is an inexpensive, fast and efficient tool to provide valuable information about the sub-surface geological complications (Dentith and Mudge, 2014). Modern geophysical methods are widely used to identify and characterize porphyry copper deposits on various scales (Holden et al., 2011; Hoschke, 2011; Clark, 2014). It is often an indirect exploration method; therefore, an accurate data interpretation is required to extract the proper information associated with mineralization (Clark, 2014). For efficient interpretation of geophysical data in mineral exploration, it is initially important to understand the geological properties of a deposit (i.e., host rock, hydrothermal alteration system, mineralogical characteristics, texture, structural controls, zones of outcropping mineralization, etc.). Then, according to these properties and other genetic information, a conceptual model is defined to choose the proper exploration criteria and geophysical exploration methods to identify real anomalies associated with mineralization. Finally, the geophysical data are interpreted by considering the physical properties of the conceptual model. The conceptual model and the interpretation of geophysical data could be updated by using the new information acquired from the exploratory boreholes.

This paper discusses the effectiveness of several geophysical methods in exploration of gold-rich porphyry copper deposits, and presents the exploration models related to the geophysical features of such deposits. We mostly used the

related papers published in the same field to prepare these models. Then, on the basis of the defined geophysical signatures of the porphyry deposits, the IP&RS and magnetic data of the Dalli Cu-Au porphyry deposit were interpreted.

Materials and methods

Porphyry deposits are the most important source of copper, molybdenum and rhenium (Sillitoe, 2010) and provide significant amount of gold, silver and some other metals (Cooke et al., 2014). These are intrusion-related deposits which are geometrically symmetrical and are affected by different hydrothermal potassic, phyllic, argillic and propylitic alterations that often show a spatial zonation. Copper-gold mineralization mostly occur in the potassic alteration zone within the contact of the intrusive body and its adjacent wall rock.

The physical properties of minerals and hydrothermal alterations associated with porphyry deposits near the surface are very variable, and therefore allow the use of various geophysical methods for exploration of such deposits. In porphyry deposits, sulfide minerals are present in different alteration zones with varying abundance, which could provide the use of electrical resistivity (RS) and induction polarization (IP) surveys to detect them. In gold-rich porphyry copper deposits, phyllic alteration zone often contain sulfide mineralization, therefore, this zone could be identified by high chargeability anomalies and low resistivities in the induced polarization surveys. The potassic alteration zone

*Corresponding authors Email: hooshang@cc.iut.ac.ir

also contains sulfide minerals and is characterized in IP data with moderate to high-chargeability values. The IP method is the most extensively used geophysical approach in exploration of porphyry deposits.

Magnetic minerals are enriched and destroyed respectively in potassic and phyllic alteration zones. Therefore, a high circular or elliptical magnetic anomaly is detected at the potassic alteration zone and is surrounded by a low magnetic anomaly related to the phyllic alteration zone. Hence, the airborne and ground magnetic surveys are useful for targeting the copper-gold porphyry deposits. The potassic alteration zone consists of the radiometric K element facilitating the application of the radiometric survey for targeting this zone. Nevertheless, the investigation depth of the radiometric approach is less than a few centimeters, and therefore, it is suitable only for mapping the deeply eroded deposits in which the mineralization occurred in the potassic alteration zone.

Result

The ground magnetic and IP-RS geophysical data of the Dalli Cu-Au porphyry deposit were interpreted based on the proposed conceptual model of the geophysical signature of Cu-Au porphyry systems. Integrating and evaluating the geophysical processes with the result of preliminary drillings indicated that in the Dalli Cu-Au porphyry deposit, the zones with positive and strong magnetic anomalies, high to moderate chargeability and high conductivity, are associated with copper and gold mineralization. Therefore, these criteria should be considered in designing the additional/infill boreholes in further exploration plans for this deposit.

Discussion

The magnetic, IP and RS surveys are the most important and common geophysical methods for targeting the porphyry copper and gold deposits. In particular, implementation and integration of

these three methods can be more effective. Other geophysical approaches such as gravity, electromagnetic and seismic methods are also applicable for this purpose, but they are more expensive and complicated than the aforementioned approaches.

For proper analysis of the geophysical data, first, it is necessary to recognize the geological model, hydrothermal alteration and mineralization systems of the studied deposits and the geophysical signatures of each alteration zone. Then, an appropriate interpretation of geophysical data is provided through combining the geological information of the deposit with the geophysical data.

References

- Clark, D.A., 2014. Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics*, 624–625 (1): 46–65.
- Cooke D.R., Hollings P., Wilkinson J.J. and Tosdal, R.M., 2014. Geochemistry of Porphyry Deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, USA, pp. 357–381.
- Dentith, M. and Mudge, S., 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, New York, 454 pp.
- Holden, E.J, Fu, S.C., Kovesi, P., Dentith, M., Bourne, B. and Hope, M., 2011. Automatic identification of responses from porphyry intrusive systems within magnetic data using image analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 74(4): 255–262.
- Hoschke, T.G., 2011. *Geophysical Signatures of Copper-gold Porphyry and Epithermal Gold Deposits, and Implications for Exploration*. ARC Centre of Excellence in Ore Deposits, University of Tasmania, Tasmania, 47 pp.
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry-copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.