مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۲۰، شماره ۲، ۱۴۰۵، صفحه ۶۹-۸۰ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.30499/ijg.2026.425940.1553

شناسایی زون‌های کانی‌سازی مس-طلای پورفیری با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی، مطالعه موردی محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا، کشور کانادا

مسلم جهانتیغ[1*] و حمیدرضا رمضی[2]

[1] دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
[2] استاد، گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۴)

چکیده

داده‌های مغناطیس هوایی در محدوده بریتانیا کلمبیا در کشور کانادا برای تفسیر و استخراج خطواره‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی استفاده شده است. در این مقاله از روش اتوماتیک برای استخراج ساختارها استفاده گردیده است. محدوده مطالعاتی در کشور کانادا قرار دارد و به لحاظ کانی‌سازی مس-طلای پورفیری حائز اهمیت می‌باشد. برای استخراج ساختارها و نفوذی‌های پورفیری از مرکز هدف گزاری اکتشافی (CET) نرم‌افزار ژئوسافت استفاده شده است. با استفاده از این روش ابتدا واحدهای پورفیری موجود در محدوده مورد مطالعه و به کمک نقشه برگردان به‌قطب استخراج گردید. سپس ساختارهای سطحی با استفاده از نقشه مشتق قائم مرتبه اول استخراج گردید و نقشه ساختارهای خطی محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش اتوماتیک استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد که ساختارها در محدوده مورد مطالعه عمدتاً روند شمال غرب- جنوب شرق دارند ولی بعضاً ساختارهایی با روند شمالی- جنوبی، شرقی غربی و شمال شرق- جنوب غرب نیز در محدوده مشاهده می‌شوند. نواحی با چگالی بالای خطواره‌های مغناطیسی منطبق با اندیس‌های مس پورفیری موجود در محدوده مطالعاتی می‌باشند تطابق اندیس‌های مس پورفیری با ساختارهای مغناطیس نقش موثر گسل‌ها را در تشکیل کانسارهای مس پورفیری را تایید می‌کند.

کلمه‌های کلیدی: بریتانیا کلمبیا، مغناطیس هوایی، مس پورفیری، مشتق اول، ژئوسافت

[*] نگارنده رابط: moslemmine@gmail.com

۱ مقدمه

اکتشاف کانسارها از کانسارهای مس پورفیری، طلا الماس و دیگر کانسارها شامل مراحل شناسایی و پی‌جویی، به نقشه در آوردن سطحی و زیرسطحی، برداشت‌های ژئوفیزیکی و حفاری‌های عمیق است (آروگوندادی و همکاران، ۲۰۲۲). .برای دسترسی بهتر به نواحی پرپتانسیل داشتن اطلاعات در مورد نوعی کانی‌سازی مورد نظر امری ضروری است (آنابابا و آجاکایی، ۱۹۸۷). بنابراین شناخت نشانه‌های کانی‌سازی امری ضروری است. نشانه‌های کانی‌سازی شامل گسل‌ها، توده‌های نفوذی و پورفیری درزه و شکاف‌ها و دگرسانی‌ها می‌باشد که ابزار مفیدی در پتانسیل‌یابی کانی‌سازی است (اسینوو و همکاران، ۲۰۲۰). ارتباط مکانی بین نشانه‌های کانی‌سازی و کانی‌سازی‌ها، امکان مکانیابی این کانسارها را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال گسل‌ها مجراهای مناسب را برای هدایت محلول‌های کانه‌زا فراهم می‌کنند و توده‌های نفوذی موتور حرارتی کانی‌سازی‌ها هستند (آروگوندادی و همکاران، ۲۰۲۲). که سبب واکنش‌های شیمیایی در اطراف توده‌های نفوذی وتجمع کانسارها در اطراف آن‌ها می‌شود. مدلسازی پتانسیل معدنی نواحی امیدبخش را برای اکتشاف کانسارها مشخص می‌کند (سانسوی و آمیگون، ۲۰۲۰)

گرانیتوییدها را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: گرانیتوییدهای سری ایلمنیت یا سری S که گرانیت‌های رسوبی هستند که خاصیت مغناطیسی پایینی دارند و سری مگنتیت یه گرانیت‌های تیپ I که گرانیت‌های ناشی از ذوب سنگ‌های آذرین هستند که خاصیت مغناطیسی بالاتری دارند. گرانیتوییدهای های سری ایلمنیت و سری مگنتیت براساس میزان مگنتیت آنها طبقه بندی می‌شوند که توسط خودپذیری مغناطیسی آنها که بین ۱-۳ است، شناسایی می‌شوند. گرانیت‌های سری مگنتیت عمدتاً خودپذیری مغناطیسی بالاتری نسبت به گرانیت‌های سری ایلمنیت دارند. انواع مختلفی از کانی‌سازی در این سنگ‌های گرانیتوییدی گزارش شده است (باربارین، ۱۹۹۹).

در اکتشاف کانی‌ها و مطالعه تکتونیک ناحیه‌ای، داده‌های مغناطیس هوایی نقش اساسی در بررسی ویژگی‌های فیزیکی ساختارهای ناحیه‌ای و واحدهای سنگی زیر سطحی فراهم می‌کند که این بررسی در وسعت زیادی صورت می‌گیرد. داده‌های مغناطیس هوایی ابزار مناسبی در بررسی ساختارهای زمین‌شناسی شامل گسل‌ها، کنتاکت‌ها و واحدهای زمین‌شناسی، گرادیان‌های زمین‌گرمایی، توده‌های پورفیری مانند و نواحی مطلوب برای کانی‌سازی می‌باشد (آروگوندادی و همکاران، ۲۰۲۲).

از داده‌های مغناطیس هوایی به‌طور گسترده در مطالعه مس پورفیری استفاده شده است (مانیستون و همکاران، ۲۰۱۹: سان و همکاران، ۲۰۲۰).

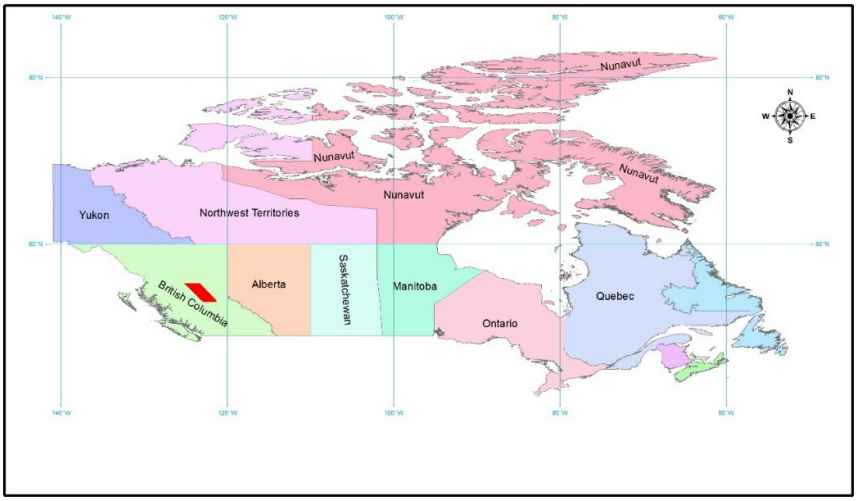
عابدی و همکاران (۲۰۱۳) از داده‌های مغناطیس هوایی برای شناسایی مس پورفیری در مرکز ایران استفاده کردند. براساس این تحقیق مناطق امیدبخش حاصل انطباق مناسبی با اندیس‌های مس پورفیری موجود در محدوده مورد مطالعه دارد.

والی و همکاران (۲۰۱۹) از داده‌های مغناطیس هوایی برای تعیین آلتراسیون‌ها و اکتشاف مس پورفیری در محدوده بریتیش گلمبیا در کشور کانادا استفاده کردند.

ریاحی و همکاران (۲۰۲۳) از تلفیق داده‌های مغناطیس هوایی و رادیومتری برای پی‌جویی مس پورفیری در محدوده شهربابک در استان کرمان استفاده کردند.

چندین کانسار شامل طلا، مس، سرب، روی و ... در محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا شناسایی شده است. از جمله کانسار مهم شناسایی شده در این محدوده کانسارهای مس طلای پورفیری می‌باشد. با توجه به اینکه

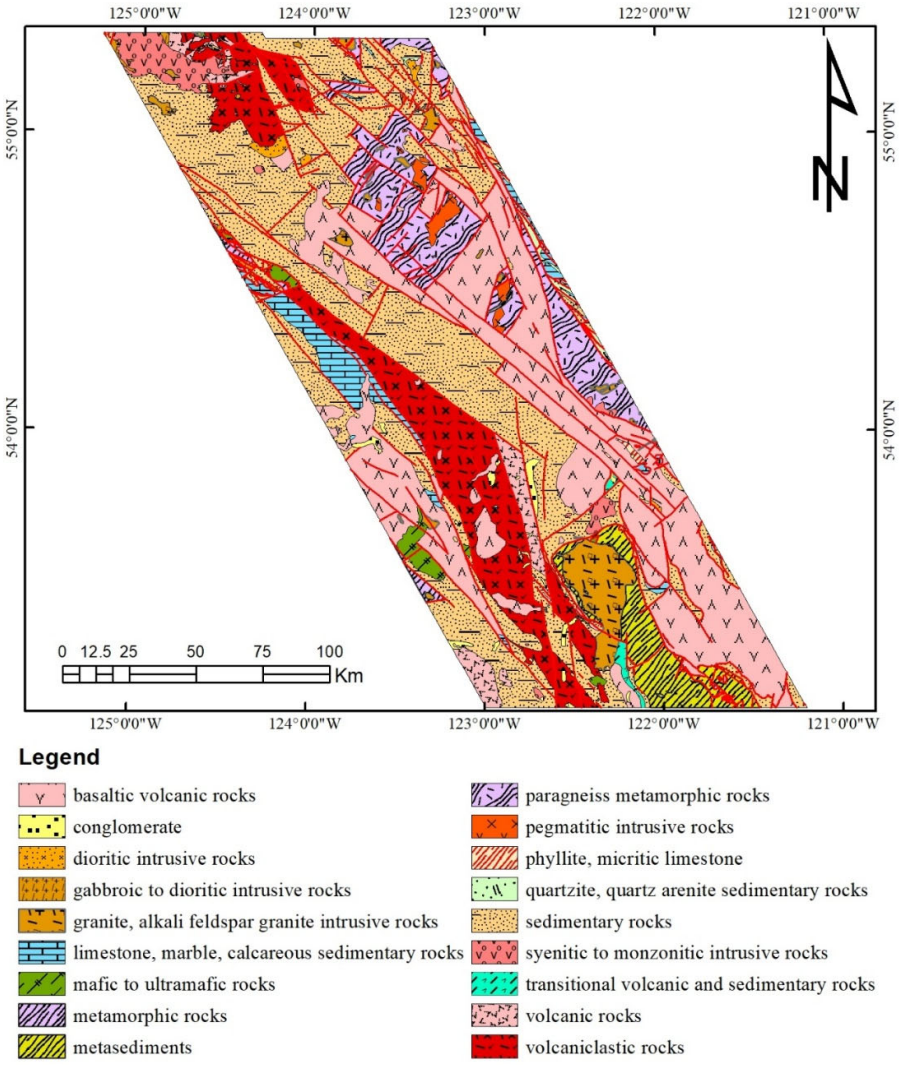
این کانسارها و کانی‌های همراه و نشانه‌های معدنی آن ممکن است علایم مغناطیسی ایجاد کند و با توجه به اینکه این منطقه به‌صورت پوشیده می‌باشد داده‌های مغناطیس هوایی می‌تواند ابزار مناسبی در شناسایی نواحی کانی‌زا باشد. با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا در کشور کانادا میزبان چندین کانی‌سازی مس پورفیری می‌باشد و با توجه به اینکه گرانیتوییدهای موجود در محدوده مورد مطالعه از تیپ I می‌باشد از داده‌های مغناطیس هوابرد در مطالعه ساختارهای زمین‌شناسی و ارتباط آنها با کانی‌سازی مس پورفیری در این محدوده استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را در کشور کانادا نشان می دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده موردمطالعه.

۲ زمین‌شناسی

کانسارهای پورفیری با بالا آمدن ماگما ور در نتیجه سرد شدن آن‌ها می‌باشد. مراحل مختلف سرد شدن ماگما در تشکیل کانسارهای پورفیری بافت پورفیری را در سنگ‌های آذرین به‌ویژه سنگ‌های ساب ولکانیک ایجاد می‌کند. این فرآیند باعث جدا شدن مواد نامحلول می‌شود و باعث تشکیل کانسارهای مس، طلا، مولیبدن، قلع و روی در اطراف توده‌های پورفیری می‌شوند. از نظر زمین‌شناسی پایه منطقه را اغلب سنگ‌های رسوبی تشکیل می‌دهند که بانفوذ واحدهای آذرین در امتداد گسل‌ها در برخی مناطق به‌صورت محلی دگرگون شده‌اند. واحدهای رسوبی به‌جز کنگلومرا که مربوط به سنوزوئیک است، اغلب به دوران پالئوزوئیک تعلق دارند. سنگ‌های ولکانیکی در منطقه شامل بازالت و سنگ‌های ولکانو کلاستیک است. که بخش اعظم محدوده را به خود اختصاص داده‌اند. سنگ‌های ولکانوکلاستیک مربوط به دوران مزوزوئیک هستند، اما بازالت¬ها طی سه دوره زمانی پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک در محدوده تزریق شده‌اند. از دیگر واحدهای سنگی در محدوده سنگ‌های پلوتونیک هستند که گابرو، دیوریت، سینیت تا مونزونیت و گرانیت را شامل می‌شوند. سنگ‌های پلوتونیک به‌جز گابرو و دیوریت‌ها که به پالئوزوئیک تعلق دارند، همه دارای سن مزوزوئیک و سنوزوئیک هستند. از دیگر رخنمون‌های سنگی مشاهده شده در محدوده می‌توان سنگ‌های اولترامافیک و درجات مختلف دگرگونی را نام برد.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده موردمطالعه (مونیستون و همکاران، ۲۰۱۹).

شکل ۲ تنوع واحدهای سنگی در محدوده را نشان می‌دهد.

۳ داده های مورد استفاده در این مطالعه

داده‌ای مورد استفاده در این تحقیق توسط سازمان زمین‌شناسی کشور کانادا برداشت شده است. توضیح این داده به‌شرح زیر است:

داده های مغناطیس هوایی مورد استفاده بخشی از پروژه کوئست (QUEST) می باشد و شامل ۲۵۴۹۹ کیلومتر خط پرواز می‌باشد. امتداد خطوط برداشت ۹۰ درجه و فاصله خطوط ۴۰۰۰ متر و فاصله نقاط ۵۰۰ متر می‌باشد. گرید بندی داده‌ها با روش Minimum curvature انجام شده است و اندازه سلول گرید ۵۰۰ متر می‌باشد.

۴ روش های تفسیر داده

داده های مغناطیس هوایی همانند داده‌های گرانی هوایی

در به نقشه درآوردن ساختارهای زیرسطحی در اکتشاف کانسارها بویژه کانسارهای پورفیری به‌طور موفقیت‌آمیزی استفاده شده است (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۳).

برای تفسیر بهتر داده‌های مغناطیس هوایی ابتدا فیلتر برگردان به‌قطب روی دادهای مغناطیس هوایی پیاده شد (بارانوف و ناودی، ۱۹۶۴). روش برگردان به‌قطب یک تکنیک متداول است که در آن داده‌های شدت میدان مغناطیس کل را دوباره محاسبه کرده و در حالتی قرار می‌دهد که میدان القایی شیب ۹۰ درجه داشته باشد درست همانند آنکه در قطب شمال مغناطیسی قرار دارد. در واقع این عمل وابستگی میدان مغناطیسی را به زاویه میل از بین می‌برد و آنومالی مغناطیسی را درست دربالای توده مغناطیده قرار می دهد (ژیائو و وانگ، ۲۰۱۷).

از قسمت مرکز هدف‌گزاری اکتشافی نرم‌افزار ژئوسافت ((Centre for exploration targrting (CET) استفاده شده تا ساختارهای زمین‌شناسی به‌طور خودکار از داده‌های مغناطیس هوایی استخراج شود. این فرآیند با حذف نویز و سیگنال پس زمینه به‌دست می‌آید و این امر از طریق نقشه‌های متوالی که شامل انحراف معیار بدست می‌آید که شامل تغییرات مغناطیسی و تقارن فاز برای پیدا کردن ناپیوستگی‌ها و ساختارهای خطی می‌باشد هولدن و همکاران، ۲۰۱۱). آنالیز ساختارها برا ی این انجام می‌شود تا موقعیت ناپیوستگی‌ها و تغییر امتدادها حاصل شود. روش آنالیز پورفیرهای هم‌مرکز کمک می‌کند تا محل بالا آمدن محلول‌های هیدروترمال مشخص شود که از طرق آنالیز پورفیری CET در نرم‌افزار ژئوسافت انجام می‌شود،که این عملیات روی نقشه برگردان به‌قطب انجام می‌شود. مرکز هدف‌گزاری اکتشافی یک الگوریتم مناسب برای بهبود تشخیص ساختارها و ساختارهای زیرسطحی با استفاده از داده‌های میدان پتانسیل است (هولدن و همکاران، ۲۰۰۸). این روش به‌صورت خودکار ساختارها و آنومالی‌های مغناطیسی مرتبط با کانی‌سازی را استخراج می‌کند.

این عملیات در چهار مرحله انجام می‌شود (۱) تبدیل ساختارهای حلقوی یا تبدیل ویژگی دایره‌ای (۲) استخراج مرکز این ساختارها (۳) تبدیل کنتراست دامنه (۴) استخراج مرز این ساختارهای حلقوی.

تبدیل ساختار حلقوی تبدیل ویژگی دایره ای (CFT) الگوریتمی را تطبیق می‌دهد که تبدیل تقارن شعاعی را محاسبه می‌کند (لوی و زلینسکی، ۲۰۰۳) که ساختارهای دایره‌ای را تشخیص می‌دهد. این تبدیل، مراکز ویژگی‌های دایره‌ای را شناسایی کرده و به‌ترتیب محل همگرایی و واگرایی شیب‌های تصویر را برجسته می‌کند. این افزونه به کاربر اجازه می‌دهد تا پارامترهایی را ارائه دهد که اندازه شعاع، دایره‌ای بودن و کامل بودن ویژگی‌های مورد مطلوب را مشخص می‌کند (الدوسوکی و الخطیب، ۲۰۱۶).

استخراج مرکز ساختارها افزونه‌ای است که مرکز ساختارها را با استفاده از تبدیل ویژگی دایره¬ای استخراج می‌کند. این روش با حذف پاسخ‌های دایره‌ای غیرحداکثر در هر قسمت از داده‌ها و در عین حال حفظ حداکثر مقدار به‌دست می‌آید. سپس آستانه‌گزاری اعمال می‌شود تا فقط مراکز ویژگی مهم حفظ شوند. خروجی‌ها یک فایل پایگاه داده و یک فایل چند ضلعی هستند. فایل پایگاه داده مراکز دایره‌ای، تقارن شعاعی و شعاع را مشخص می کند که منجر به بهترین پاسخ می شود. فایل چند ضلعی، برای هر مکان ، مرز دایره‌ای است که بهترین پاسخ تقارن شعاعی را ایجاد می‌کند. این موضوع امکان ترسیم ویژگی‌های دایره‌ای شناسایی شده را فراهم می‌کند (هولدن و همکاران، ۲۰۱۱).

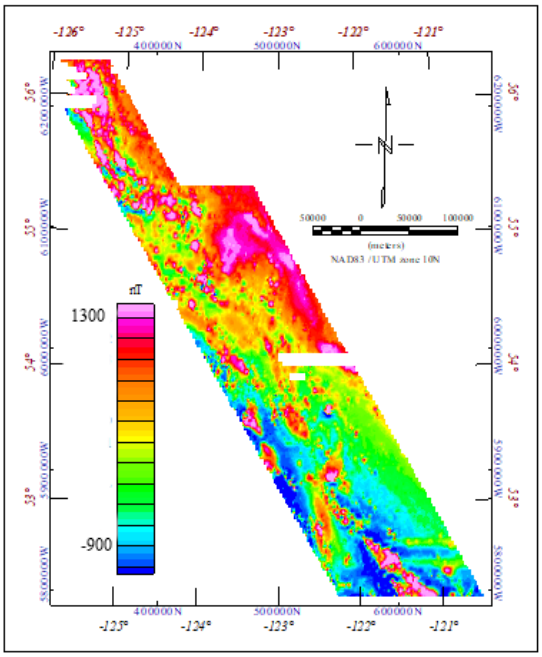
افزونه تبدیل کنتراست دامنه کنتراست دامنه مغناطیسی ویژگی‌های دایره‌ای را در فواصل خاص از محیط اطرافشان اندازه‌گیری می‌کند تا مرزهای ویژگی را

برجسته کند. یک ویژگی دایره‌ای در خروجی تبدیل کنتراست مغناطیسی به‌عنوان یک هاله ظاهر می‌شود که با لبه دایره‌ای مشخصه منطبق است (هولدن و همکاران، ۲۰۱۱).

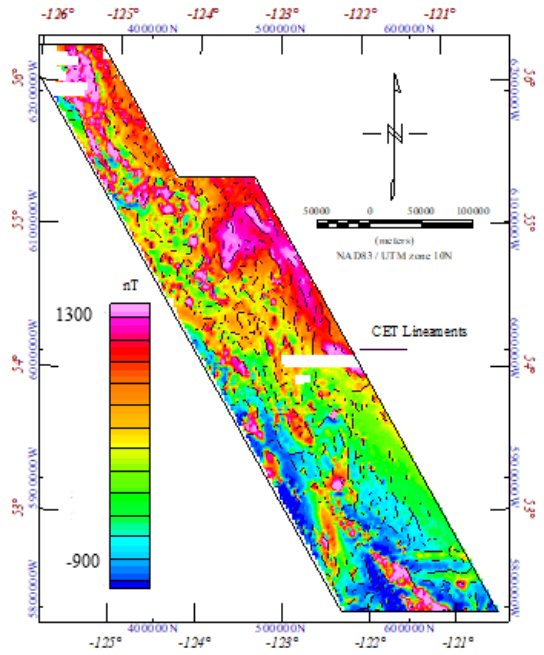
افزونه استخراج مرز این ساختارهای حلقوی با استفاده از یک الگوریتم کانتور فعال، مرزها را مشخص می‌کند (ویلیاوم و شاه، ۱۹۹۰). خطوط فعال خطوطی هستند که با استفاده از تکنیک به‌حداقل رساندن انرژی به‌طور مکرر به مرزهای ویژگی کشیده می‌شوند. انرژی اسپلاین تابعی است (بیش از نقاط کنترل اسپلاین) از دو محدودیت داخلی که شکل اسپلاین را کنترل می‌کند، یعنی کشش و انحنا، و یک محدودیت تصویر که مرزهای مشخصه‌ای را تعیین می‌کند (الدوسوکی و الخطیب، ۲۰۱۶).

۵ تفسیرهای کیفی

تبدیل کاهش به‌قطب برای داده‌های مغناطیس هوایی محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا با استفاده از زاویه میل ۷۴/۴ و زاویه انحراف ۲۴/۴ انجام شده است. بدلیل زاویه پرشیب میل داده‌های مغناطیسی برای محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا تفاوت چندانی بین داده‌های مغناطیس کل و داده‌های برگردان به‌قطب وجود ندارد. تغییرات شدت میدان مغناطیسی در نقشه برگردان به‌قطب از ۵۶۵۲۱ نانوتسلا تا ۵۷۵۶۶ نانوتسلا می‌باشد (شکل ۳). شدت بالای میدان مغناطیسی با رنگ قرمز و شدت پایین با رنگ آبی مشخص شده است. تغییرات شدت میدان با آنومالی‌های میدان مغناطیسی با طول‌موج کوتاه که عمدتاً روند شمال غرب- جنوب شرق دارند مشخص شده‌اند. شدت میدان مغناطیسی به خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها بستگی دارد که تابع خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها می‌باشد. نقشه برگردان به‌قطب داده‌های مغناطیس هوایی چند آنومالی مغناطیسی با روند شمال غرب- جنوب شرق در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. طرح کلی آنومالی‌های مغناطیسی تابع لیتولوژی محدوده مورد مطالعه می باشد.



شکل ۳. نقشه مغناطیس هوایی محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا بعد از اعمال برگردان به قطب.



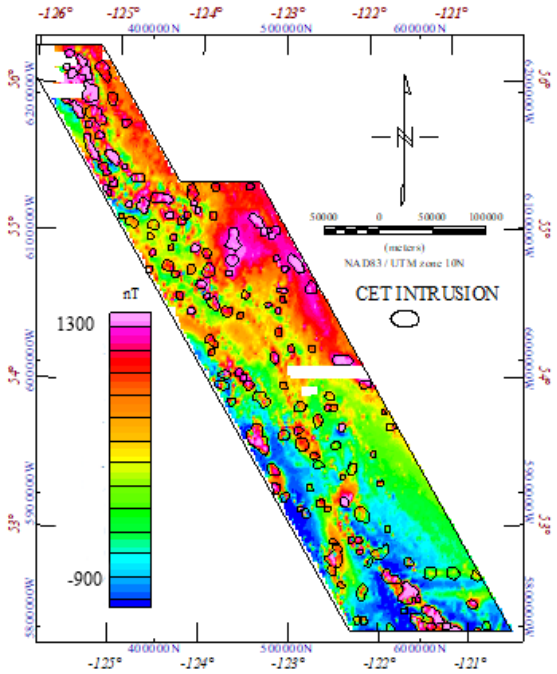
شکل ۴. نقشه استخراج خطواره های محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش اتوماتیک.

۵-۱ آنالیز گرید اکتشافی (CET)

نقشه گسل‌های برداری شده گسل‌های های محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا در شکل ۴ نشان داده شده است. این نقشه نشان می‌دهد که ساختارهای خطی در محدوده مورد مطالعه با طول و امتداد مختلف وجود دارد. امتداد این ساختارها در محدوده مورد مطالعه عمدتاً با امتداد آنومالی‌های مغناطیسی یکسان می‌باشد و روند شمال غرب- جنوب شرق دارند. اما ساختارهایی با امتداد شمالی- جنوبی، شرقی- غربی، و شمال شرق- جنوب غرب نیز در محدوده مورد مطالعه وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که توزیع مکانی اندیس‌های کانی‌سازی منطبق با پیچیدگی ساختارهای خطی می‌باشند و این تاثیر محلول‌های هیدروترمال در کانی‌سازی در محدوده شهربابک را نشان می دهد.

۵-۲ آنالیز پورفیری اکتشافی

بر اساس نظر هولد و همکاران ۲۰۱۱، استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی ابزار بسیار مفیدی در اکتشاف کانسارها می‌باشد بویژه زمانی که محلول های هیدروترمال تغییر در خاصیت مغناطیسی سنگ ها ایجاد می‌کنند. دگرسانی‌ها همراه با کانسارهای مس پورفیری دگرسانی‌های دایره شکلی را ایجاد می‌کنند که این دگرسانی‌ها اطراف توده‌های نفوذی را احاطه می کنند (هولدن و همکاران، ۲۰۱۱). این توده‌های نفوذی و زون‌های دگرسان اطراف آنها معمولاً همراه با آنومالی‌های مثبت مغناطیسی هستند. در مرکز آنومالی بالای مغناطیسی دارند و از اطراف با آنومالی‌ها منفی مغناطیسی احاطه می‌شوند. این آثار مغناطیسی را می‌توان با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی ثبت کرد. توده های پورفیری که با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی استخراج شده‌اند در شکل ۵ نشان داده شده‌اند که در واقع آنومالی بالای مغناطیسی دارند و در اطراف با آنومالی منفی احاطه شده‌اند.

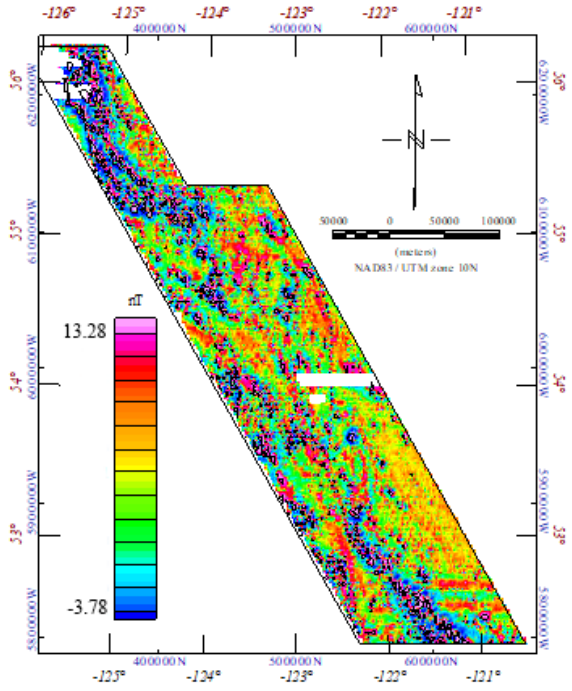


شکل ۵. نقشه استخراج گرانیتوییدهای موجود در محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش اتوماتیک.

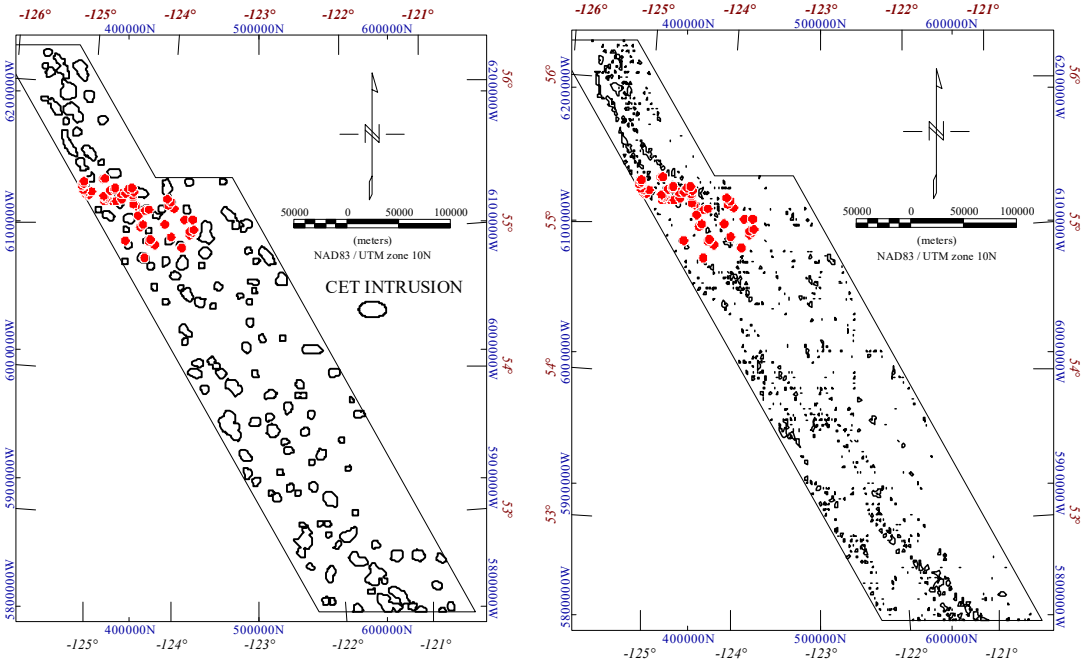
آلتراسیون‌های هیدروترمال ممکن است باعث ایجاد خاصیت مغناطیسی و یا باعث مغناطیس‌زدایی شوند. برخی از این ساختارهای خطی (دایک مانند) منطبق با گرانیت‌های تیپ I هستند. همانطور که در شکل نشان داده شده است این توده‌های پورفیری در شکل با امتداد شمال غرب- جنوب شرق در محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شوند که در واقع نواحی با پیچیدگی بالای ساختارهای خطی می‌باشند. همچنین در نواحی با پیچیدگی بالای ساختارهای خطی، تراکم نفوذی ها بیشتر است. همچنین اندیس‌های کانی‌سازی مس در بالا یا در نزدیکی توده‌های پورفیری قرار دارند. با استفاده از این نتایج می‌توان بیان کرد که وجود و جایگیری توده‌های پورفیری عمدتاً منطبق با ساختارها می‌باشد.

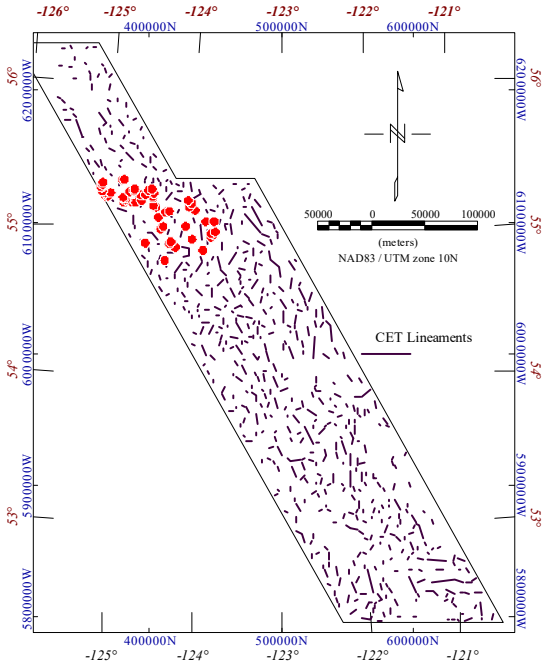
۶ مشتق قایم مرتبه اول

مشتق قایم مرتبه اول یک ابزار مهم برای استخراج ساختارهای سطحی مرتبط با ساختارهای زمین‌شناسی می‌باشد. به‌دلیل اینکه مشتق قایم اول حساس به منابع مغناطیسی نزدیک سطح می‌باشد با نقشه گسترش رو به بالا مطابقت دارد و و تاکید به آنومالی‌های محلی دارد و آنومالی‌های ناحیه‌ای را کاهش می‌دهد (محمد و همکاران، ۲۰۲۲). مشتق قایم مرتبه اول را برای حذف طول‌موج های بلند ناشی از منابع مغناطیسی به‌کار برد. کانتورهایی با مقادیر صفر مرز مناسبی برای تشخیص بین ساختارهای خطی و سطحی می‌باشد. نقشه مشتق قایم مرتبه اول یک فیلتر می‌باشد که آنومالی‌هایی با طول‌موج کوتاه را برجسته می‌کند و ساختارهای سطحی شامل گسل‌ها و کنتاکت‌ها را استخراج می‌کند. به‌طور مطلوبی این آنومالی‌ها با روند شمال غرب- جنوب شرق در محدوده مورد مطالعه گسترش پیدا کرده اند که ناشی از منابع کم عمق زیر سطحی می‌باشند (شکل ۶).

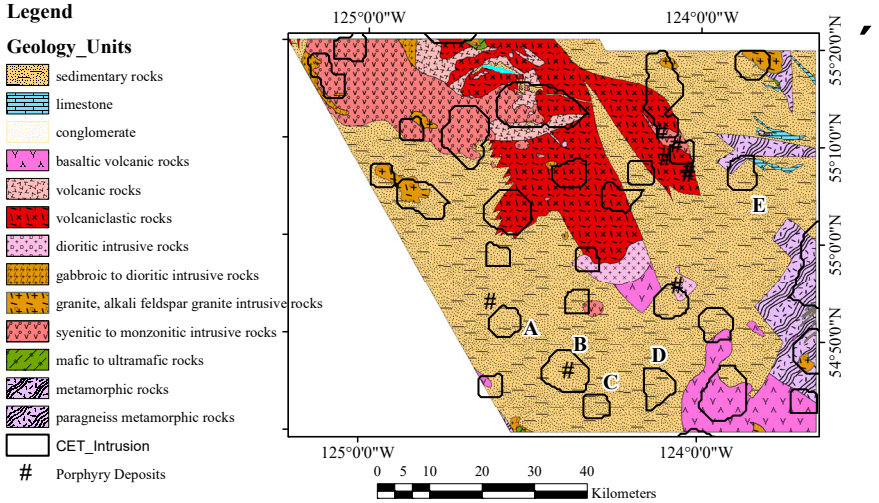


شکل ۶. نقشه مشتق قایم مرتبه اول و استخراج ساختارهای سطحی.





شکل ۷. انطباق کانسارهای مس پورفیری با آنومالی های مغناطیسی (الف) نقشه برگردان به قطب (ب) نقشه مشتق قایم مرتبه اول (ج) نقشه خطواره های مغناطیسی



شکل ۸. انطباق آنومالی مغناطیسی با واحدهای آذرین موجود در محدوده مطالعاتی و اندیس‌های مس پورفیری (در بخش شمالی محدوده).

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است آنومالی‌های مغناطیسی استخراج شده از نقشه برگردان به‌قطب، نقشه مشتق قائم مرتبه اول و نقشه ساختارهای خطی استخراج شده از روش اتوماتیک انطباق مناسبی با اندیس‌های مس پورفیری موجود در محدوده مطالعاتی بریتیش کلمبیا را دارد که نقش موثر کاربرد داده‌های مغناطیس هوایی را در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۸ انطباق مناسب آنومالی‌های مغناطیسی با واحدهای آذرین و اندیس‌های مس پورفیری به‌خوبی مشخص گردیده است. در قسمت

A, B, C, D و E آنومالی‌های مغناطیسی روی پوشش رسوبی مخفی گردیده است که نشان از مخفی بودن واحد آذرین در زیر این پوشش می باشد. که می‌تواند مستعد نواحی مناسب برای کانی‌زایی مس پورفیری باشد.

۷ نتیجه گیری

داده‌های مغناطیس هوایی در محدوده مورد مطالعه به‌طور موفقیت آمیزی در استخراج ساختارهای زمین‌شناسی در تعیین مکان کانی‌سازی مس پورفیری استفاده شده است. با استفاده از مرکز هدف‌گزاری اکتشافی (CET) مشخص گردید که عمده آنومالی مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه روند شمال غرب- جنوب شرق دارند. همچنین ساختارهای مغناطیسی استخراج شده در منطقه نیز روند شمال غرب- جنوب شرق دارند. همچنین موقعیت اندیس‌های مس پورفیری انطباق مناسبی با ساختارهای خطی و آنومالی‌های مغناطیسی دارند. با توجه به اینکه جنس گرانیتوییدهای منطقه از نوع تیپ I می‌باشد استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی به‌طور موفقیت‌آمیزی در اکتشاف کانسارهای پورفیری قابل استفاده است.

Refferences

Abedi F., Gholami A., Norouzi Gh. 2013. A stable downward continuation of airborne magnetic data: A case study for mineral prospectivity mapping in Central Iran. Comput. Geosci. 52, 269-280.

ANANABA S.E., AJAKAIYE D.E. 1987. Evidence of tectonic control of mineralization in Nigeria from lineament density analysis A Landsat-study. Int J Remote Sens. 8, 1445–1453.

Anderson E.D., Hitzman M.W., Monecke T., Bedrosian P.A., Shah A.K., Kelley K.D. 2013. Geological Analysis of Aeromagnetic Data from Southwestern Alaska: Implications for Exploration in the Area of the Pebble Porphyry Cu-Au-Mo Deposit. Economic Geology. 108, 421–436.

Arogundade A.B., Awoyemi M.O., Ajama O.D., Falade S.C., Hammed O.S., Dasho O.A., Adenika C.A. 2022. Integrated Aeromagnetic and Airborne Radiometric Data for Mapping Potential Areas of Mineralisation Deposits in Parts of Zamfara, North West Nigeria. Pure Appl Geophys. 179, 351–369.

Baranov V., Naudy H. 1964. NUMERICAL CALCULATION OF THE FORMULA OF REDUCTION TO THE MAGNETIC POLE. GEOPHYSICS. 29, 67–79.

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos. 46, 605–626.

Eldosouky A., Alkhateeb S. 2016. Detection of Porphyry Intrusions Using Analytic Signal (AS), Euler Deconvolution, and Center for Exploration Targeting (CET) Technique at Wadi Allaqi Area, South Eastern Desert, Egypt. Int. j. sci. eng. Res. 7, 471-477.

Holden E., Dentith M., Kovesi, P. 2008. Towards the automatic analysis of regional aeromagnetic data to identify regions prospective for gold deposits. Comput. Geosci.34, 1505–1513.

Holden E.-J., Fu S.C., Kovesi P., Dentith M., Bourne B., Hope M. 2011. Automatic identification of responses from porphyry intrusive systems within magnetic data using image analysis. J Appl Geophy. 74, 255–262.

Loy G., and Zelinsky A. 2003. Fast Radial Symmetry for Detecting Points of Interest. IEEE PAMI. 25, 8, 959–973.

Mohamed A., Abdelrady M., Alshehri F., Mohammed M.A., Abdelrady A. 2022. Detection of Mineralization Zones Using Aeromagnetic Data. Applied Sciences. 12, 9078.

Montsion R.M., Saumur B.M., Acosta-Gongora P., Gadd M.G., Tschirhart P., Tschirhart V. 2019. Knowledge-driven mineral prospectivity modelling in areas with glacial overburden: porphyry Cu exploration in Quesnellia, British Columbia, Canada. Applied Earth Science. 128, 181–196.

Osinowo O.O., Alumona K., Olayinka A.I. 2020. Analyses of high resolution aeromagnetic data for structural and porphyry mineral deposit mapping of the nigerian younger granite ring complexes, North - Central Nigeria. Journal of African Earth Sciences. 162, 103705.

Riahi S., Bahroudi A., Abedi M., Aslani S., Lentz D.R. 2022. Evidential data integration to produce porphyry Cu prospectivity map, using a combination of knowledge and data-driven methods. Geophys Prospect. 70, 421–

437
Riahi S., Bahroudi A., Abedi M., Aslani S., Lentz D.R. 2022. Evidential data integration to produce porphyry Cu prospectivity map, using a combination of knowledge and data-driven methods. Geophys Prospect. 70, 421–437.
Sanusi S.O., Amigun J.O. 2020. Logistic-Based Translation of Orogenic Gold Forming Processes into Mappable Exploration Criteria for Fuzzy Logic Mineral Exploration Targeting in the Kushaka Schist Belt, North-Central Nigeria. Natural Resources Research. 29, 3505–3526.
Sun T., Li H., Wu K., Chen F., Zhu Z., Hu Z. 2020. Data-Driven Predictive Modelling of Mineral Prospectivity Using Machine Learning and Deep Learning Methods: A Case Study from Southern Jiangxi Province, China. Minerals. 10, 102.
Xiao F., Wang Z. 2017. Geological interpretation of Bouguer gravity and aeromagnetic data from the Gobi-desert covered area, Eastern Tianshan, China: Implications for porphyry Cu-Mo polymetallic deposits exploration. Ore Geol Rev. 80, 1042–1055.
Vallée M., Byrne K., King J., Lee R, Lesage G., Farquharson C., Chouteau M., Enkin R., 2020. Imaging porphyry copper alteration using aeromagnetic data at Highland Valley Copper, British Columbia, Canada, Explor. Geophys. 51:3, 388-400.
Williams D., and Shah M. 1990. A Fast Algorithm for Active Contours. Third International Conference on Computer Vision. 592–595.

Iranian Journal of Geophysics, Vol 20, No 2, 2026, P. 5 (Research article)
DOI: 10.30499/ijg.2026.425940.1553

Identification of copper-gold porphyry mineralization zones using airborne magnetic data, a case study of the British Columbia study area, Canada

Moslem Jahantigh[1*] and HamidReza Ramazi[2]

[1] *Ph.D. Student in Mineral Exploration, Amir Kabir University, Tehran, Iran*
[2] *Professor, Mineral Exploration Group, Amir Kabir University, Tehran, Iran*

(Received: 26 April 2025, Accepted: 23 February 2026)

Summary
The study area are located in British Coloumbia in Canada. This area consist of numerous cu- Au porphyry indication. Most of studied area is covered with sedimentary rocks. Igneous rocks caused caused metamorphosis in sedimentary rocks. Igneous rocks were intruded along faults. The most of volcanic rocks include of basalt and volcano sediments. The ignous rocks in the study area include of gabbro, diorite, volcanic rocks, ultramafic roks and…Airborne magnetic data have been used in British Columbia in Canada to interpret and extract lineaments and geological structures. Aeromagnetic method is a well known method to extract geological formation and structures. Different filter can be applied on aeromagnetic data to extract geological information. For example tilt angle method can be used to extract linear structures. First vertical derivative can be used to extract near surface structures and bodies. CET grid analysis is useful tool to extract lineaments automatically. This method distinguishes alteration zone in porphyry mineralization very well. The high alteration zones can be related to potassic alteration and igneous rocks and low ateration can be relate to phyllic alteration. In this article, the automatic method is used to extract the structures. Then reduction to pole transformation was done on total magnetic intensity map. Reduction to the pole (RTP) is a standard part of magnetic data processing method, especially for large-scale mapping. RTP operation can transform a magnetic anomaly caused by an arbitrary source into the anomaly that the same source would produce if it is located at the pole and magnetized by induction only. The study area is located in Canada and it is important in terms of copper-gold mineralization of Haer porphyry. Geosoft software was used to extract porphyry structures and intrusions from the Ecntre of Exploration Targeting(CET). High magnetic anomalies were extracted as porphyry intrusion from reduction to pole map and with automatic method. High magnetic anomalies in first vertical derivative were extracted as near surface structure. Lineament structures were extracted with automat method and with CET grid analysis menu in Geosoft software. The results show that the structures in the studied area mainly have a northwest-southeast trend, but sometimes structures with a north-south, east-west and northeast-southwest trend are also observed in the area. The areas with high density of magnetic lines are consistent with porphyry copper indices in the study area. The matching of porphyry copper indices with magnetic structures confirms the effective role of faults in the formation of porphyry copper deposits.

Keywords: Porphyry, centre of exploration targeting, British Collumbia, aermagnetic data

[*] Corresponding author: moslemmine@gmail.com