

مطالعه ساختارهای مغناطیسی با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی و بررسی ارتباط آنها با کانی‌زایی مس پورفیری در محدوده مطالعاتی شهر بابک، استان کرمان

مسلم جهان‌تبیغ^{۱*}، حمیدرضا رمزی^۲، حسین فردوسی^۳ و زهرا جعفری^۴

^۱ دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ استاد گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ شرکت مهندسی مشاور خاوران کاوش زاهد، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷)

چکیده

برای تخمین ساختارهای مغناطیسی با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی روش‌های مختلفی به کار می‌رود. در این پژوهش با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی در محدوده مطالعاتی شهر بابک واقع در غرب استان کرمان، ساختارهای مغناطیسی استخراج و با موقعیت اندیس‌های مس پورفیری در محدوده مورد مطالعه مقایسه شده است. در این پژوهش از داده‌هایی استفاده می‌شود که سازمان انرژی اتمی ایران در سال ۱۹۷۷ برداشت کرده است. این داده‌ها با فاصله خطوط ۵۰۰ متر و ارتفاع ۱۲۰ متر برداشت شده‌اند. جهت استخراج ساختارهای مغناطیسی از فیلترهای برگردان به قطب و زاویه تیلت استفاده و برای اعتبارسنجی نتایج، نقشه‌های ژئوفیزیکی تهیه شده با موقعیت اندیس‌های مس موجود، تصاویر ماهواره‌ای استر و نقشه زمین‌شناسی شهر بابک مقایسه شده است. طبق نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر بابک، عمده واحدهای پوشاننده محدوده مورد مطالعه از جنس آذرین مافیک هستند و خاصیت مغناطیسی آنها متوسط تا زیاد است، اما بر اساس تفسیر نتایج مغناطیس هوایی، در بخش‌های عمده‌ای از این واحدهای آذرین مافیک، اثر مغناطیس‌زدایی را می‌توان مشاهده کرد که ناشی از گسترش دگرسانی در محدوده مطالعاتی است. همچنین موقعیت اندیس‌های مس شناخته شده در محدوده مورد مطالعه سازگاری مناسبی با خطوط و توده‌های مغناطیسی استخراج شده از داده‌های مغناطیس هوایی دارد. ساختارها و توده‌های نفوذی موجود در محدوده مطالعاتی شهر بابک دو عامل بسیار مهم در کانی‌سازی مس محسوب می‌شوند و بر اساس نتایج این پژوهش، استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی نقش مؤثری در مشخص کردن آنها دارد.

کلمه‌های کلیدی: شهر بابک، زاویه تیلت، مس پورفیری، مغناطیس هوایی، برگردان به قطب

۱ مقدمه

تعیین مرز ساختارهای زمین‌شناسی و محل برخورد آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و از مسائل مهم در مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی محسوب می‌شود. مرزها در بیشتر موارد و نه همیشه، گسلی هستند. گسل‌ها، شکستگی‌هایی در پوسته زمین هستند که تغییر شکل‌های چشمگیری دارند. وجود گسل در یک منطقه نشان‌دهنده جابه‌جایی‌هایی است که به صورت آرام یا ناگهانی در طول آن رخ داده است. گسل‌ها نشان‌دهنده فعالیت‌های زمین‌ساختی نیز هستند؛ بنابراین مطالعه آنها در مواردی مانند بررسی پتانسیل‌های معدنی (کانی‌زایی‌های مرتبط با شکستگی‌ها و نواحی گسل‌خورده)، شناخت دقیق روندهای زمین‌ساختی و... حائز اهمیت است (عبداللهی و همکاران، ۱۳۹۸).

داده‌های مغناطیس‌هوایی به‌طور گسترده در مطالعه کانسارهای پورفیری استفاده شده‌اند (رنجبر و همکاران، ۲۰۰۱؛ مارک و همکاران، ۲۰۱۹ و ریاحی و همکاران، ۲۰۲۱). در ادامه به چند نمونه از این مطالعات و نتایج آنها اشاره می‌شود.

بهن و همکاران (۲۰۰۱) آثار سامانه کانی‌زایی مس پورفیری و شواهد زمین‌شناسی آن را در شمال شیلی بررسی و راهبردی را برای آینده اکتشافی این محدوده ارائه کردند. بر اساس نتایج آن مطالعه، کانی‌زایی مس پورفیری در آن محدوده به‌صورت خوشه‌ای است و در محل تزریق چندین توده نفوذی در مقیاس باتولیت صورت گرفته است.

اندرسون و همکاران (۲۰۱۳) از داده‌های مغناطیس‌هوایی برای بررسی کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده پیل واقع در جنوب غربی آلاسکا استفاده کردند. ایشان چندین بی‌هنجاری مغناطیسی مربوط به واحدهای مختلف زمین‌شناسی را در این محدوده مشاهده و با به‌کارگیری فیلتر کاهش به قطب و ادامه فراسو، روند ساختارهای مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری را نیز مشخص کردند. ریاحی و همکاران (۲۰۲۲) با تلفیق اطلاعات مختلف زمین‌شناسی،

مکان‌های پرتانسیل را جهت کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده مطالعاتی چهارگنبد تعیین و از داده‌های مغناطیس‌هوایی جهت استخراج خطواره‌های مغناطیسی استفاده کردند. ایشان نتیجه گرفتند روند خطواره‌های مغناطیسی در آن محدوده، شمال غربی - جنوب شرقی است.

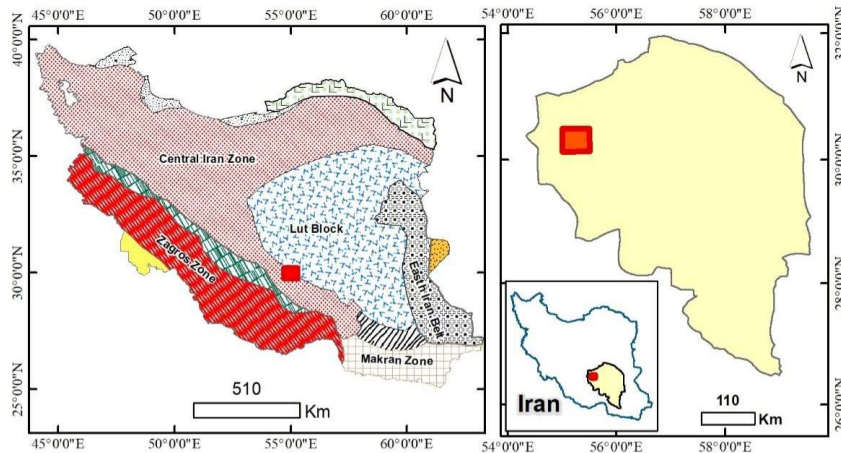
در مطالعه حاضر، از داده‌های مغناطیس‌هوایی جهت استخراج ساختارهای مغناطیسی در محدوده مطالعاتی شهر بابک استفاده و به بررسی ارتباط آن با کانی‌سازی مس پورفیری پرداخته شده است. بسیاری از ساختارها از جمله گسل‌های پی‌سنگی مجرای مناسبی برای انتقال محلول‌های کانه‌زا هستند، اما ممکن است پنهان باشند؛ بنابراین استفاده از داده‌های مغناطیس‌هوایی روش مناسبی جهت تعیین این ساختارها است. از داده‌های مغناطیس‌هوایی می‌توان جهت آشکارسازی توده‌های نفوذی نیز استفاده کرد. این توده‌ها موتور حرارتی کانی‌سازی مس پورفیری هستند (محمد و همکاران، ۲۰۲۲).

۲ زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

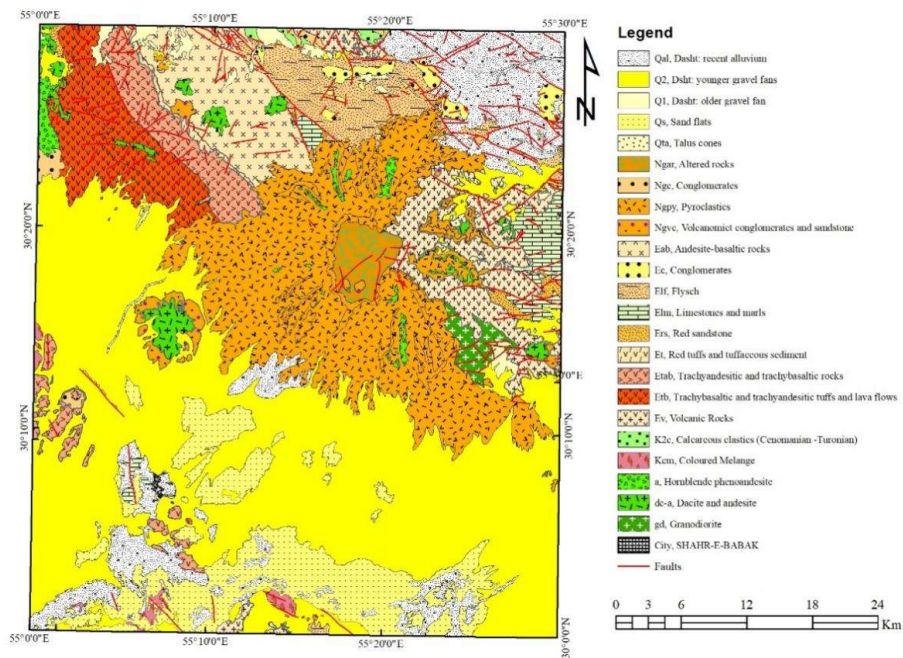
منطقه مورد مطالعه بین طول‌های جغرافیایی $55^{\circ}30'$ و $55^{\circ}00'$ و عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ}00'$ و $30^{\circ}30'$ در استان کرمان قرار دارد (شکل ۱). در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی شهر بابک در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ نشان داده شده است. قسمت اعظم گستره مورد مطالعه را واحدهای آندزیتی ائوسن به همراه واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن پوشانده است. البته در نواحی مرکزی، شرق و شمال غرب منطقه توده‌های کوچکی از متاولکانیک‌های منتسب به کرتاسه نیز به چشم می‌خورد (زراسوندی و همکاران، ۲۰۰۵). از ویژگی‌های بارز این منطقه، وجود حجم عظیمی از سنگ‌های ولکانیکی ائوسن (اغلب آندزیت) است که میزبان اصلی بیشتر کانه‌زایی‌ها و دگرسانی‌های منطقه مدنظر محسوب می‌شود. در الیگوسن میانی تا میوسن، تزریق توده‌های دیوریتی تا گرانودیوریتی موجب تشکیل ذخایر

از مناطق عمده با پتانسیل مس پورفیری در کمربند متالورژی مس کرمان است. این کمربند بخش جنوبی ایالت فلززایی ارومیه-دختر را تشکیل می‌دهد و غنی‌ترین کمربند مس‌دار ایران به‌شمار می‌رود. در این کمربند بیش از دو‌یست کانسار و نشانه معدنی مس شناخته شده است که تعدادی از آنها از نوع پورفیری است. همان‌گونه که گفته

مس پورفیری در منطقه و بیشتر رخدادهای مس مرتبط شده است. در بسیاری از نواحی نیز هاله‌های دگرسانی وسیعی در اطراف این توده‌های نفوذی، اغلب به‌صورت باتولیت‌های کوچک و استوک تشکیل شده است که تکمیل‌کننده چرخه پلوتونیزم در منطقه در میوسن بالایی بوده‌اند (اصفهان‌نژاد و رحیمی، ۱۳۷۹). منطقه مذکور یکی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه با اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی شهر بابک.

تنگه، جنوب رگه سیلیسی میدوک، کوه گلاب، هرناشک، جنوب میدوک، دریدویه ۱، دریدویه ۲، شرق ایستگاه میدوک، غرب ایستگاه میدوک، شمال غرب بندوان، شمال کمکوییه، جنوب شرق میدوک و جنوب میدوک است. شکل ۳ موقعیت اندیس‌های مس پورفیری شناخته‌شده در محدوده مطالعاتی شهربابک را به همراه دگرسانی‌های آرژیلیک، فلیک و اکسید آهن (زون گوسان) استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای استر نشان می‌دهد.

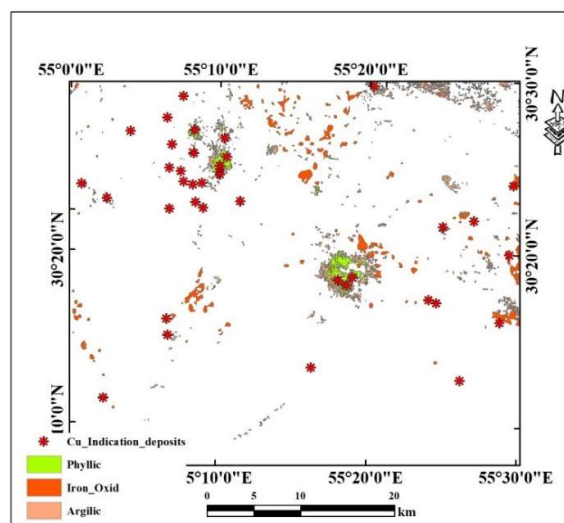
۴ داده‌های مغناطیس‌هوایی

داده‌های مغناطیس‌هوایی این پژوهش را سازمان انرژی اتمی در سال ۱۹۷۹ با فاصله خطوط ۵۰۰ متر و ارتفاع ۱۲۰ متر برداشت کرده است. ابعاد محدوده مورد مطالعه ۴۸ کیلومتر در ۴۱ کیلومتر است. در این تحقیق از نرم‌افزار ژئوسافت برای به‌نقشه‌درآوردن داده‌های مغناطیس‌هوایی شهربابک استفاده شده است. شکل ۴ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی باقیمانده محدوده را نشان می‌دهد که تصحیح IGRF در آن اعمال شده است. تغییرات میدان مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه برابر ۱۰۳۴ نانوتسلا است که نشان‌دهنده وجود کانی‌های فری مغناطیس در سنگ‌های

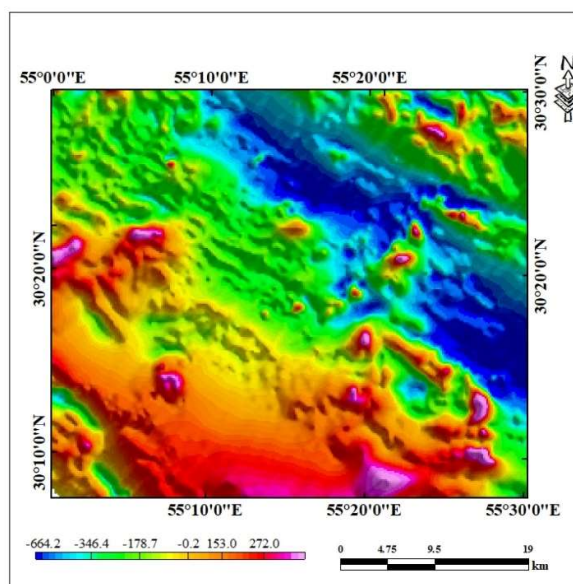
شد، این کمربند ادامه جنوبی کمربند آتشفشانی ارومیه-دختر با طولی حدود ۴۵۰ کیلومتر و پهنای حدود ۸۰ کیلومتر است. در این کمربند، کانی‌زایی مس در پیوند با سنگ‌های ماگمایی ترشیری است و رخداد و کانسارهای بسیار مس با زایش‌های متفاوت گزارش شده که اغلب در ارتباط با جای‌گیری توده‌های گرانیتوئیدی در میوسن است (قربانی، ۱۳۸۶). مطالعات ساختاری متفاوت نشان می‌دهد بیشتر ذخایر و به‌خصوص پورفیری‌ها ارتباط ژنتیکی بسیار نزدیکی با سامانه‌های گسلی امتدادلغز این بخش از کمربند ارومیه-دختر دارند (فورستر، ۱۹۷۸ و زراسوندی و همکاران، ۲۰۰۵).

۳ کانسارهای مس شناخته‌شده در محدوده

کانسارهای مس محدوده مطالعاتی شهربابک شامل جنوب غرب گلاب ۱، حسین‌آباد، جنوب غرب گلاب ۲، دارخونی، گلاب، کوه مدوار، شمال شرق گوری، بادامستان، آبدار، چاه مسی، آبدر، لاجه، کالدرای آبدر، شمال غرب میدوک، گود کلگوری، رشکان، رگه سیلیسی آبدر، لاتلا، بیدو، گلگوری، کوه مزاحم، میدوک، سارا، شرق مدوار، کهنوکارا، غرب شهربابک، کنگ، دره



شکل ۳. موقعیت اندیس‌های مس شناخته‌شده در محدوده مطالعاتی به همراه دگرسانی‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای استر.



شکل ۴. نقشه شدت میدان مغناطیسی کل در محدوده شهربابک.

کلوز، ۲۰۰۰؛ دی‌الیویرا و همکاران، ۲۰۰۸؛ سیلیتو، ۲۰۱۰؛ شاه و همکاران، ۲۰۱۳ و اندرسون و همکاران، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴). بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در اثر دو خاصیت اتفاق می‌افتند: مغناطیس بازماند (ناشی از میدان مغناطیسی دیرینه) و مغناطیس القایی (ناشی از میدان مغناطیسی زمین). نوع القایی به خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها بستگی دارد و سهولت مغناطیسی شدن سنگ‌ها را اندازه‌گیری می‌کند (گوان، ۲۰۰۵ و هینز و همکاران، ۲۰۱۳). مؤلفه مغناطیس بازماند، گذشته مغناطیسی سنگ‌ها را انعکاس می‌دهد. سنگ‌هایی با خودپذیری مغناطیسی زیاد نسبت به سنگ‌هایی که خودپذیری مغناطیسی ضعیفی دارند، تغییرات مغناطیسی زیادی تولید می‌کنند (گان، ۲۰۰۵ و هینز و همکاران، ۲۰۱۳). برای بهتر مشخص شدن اثر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از واحدهای زمین‌شناسی، فیلتر برگردان به قطب بر داده‌های مغناطیسی محدوده مورد مطالعه اعمال شد (بارانوف و ناودی، ۱۹۶۴؛ گوان، ۲۰۰۵ و هینز و همکاران، ۲۰۱۳). این فیلتر روشی متداول است که داده‌های میدان مغناطیسی را با زاویه میل ۹۰ درجه دوباره

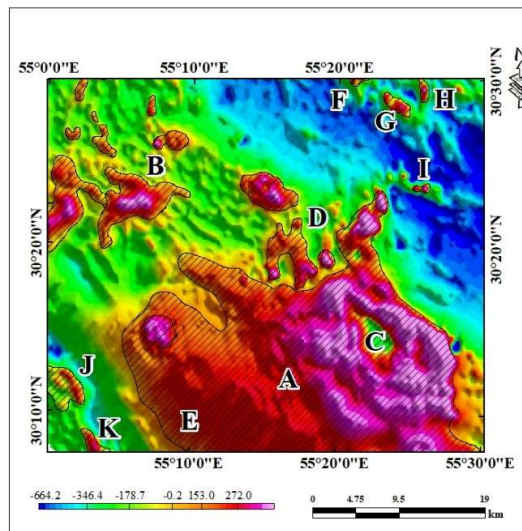
آزین این منطقه است. در نقشه‌های میدان مغناطیسی منطقه، بافت نامنظم و سیگنال‌هایی با دامنه قوی و بسامد زیاد وجود دارد که از ویژگی‌های محیط آتشفشانی است (مقدم و همکاران، ۱۳۹۸). عمده‌ترین واحد سنگی موجود در محدوده همین واحد ولکانیکی است. بر اساس نقشه شدت کل میدان مغناطیسی محدوده، چندین بی‌هنجاری مغناطیسی در سراسر محدوده مطالعاتی شهربابک مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری‌ها در نقشه شکل ۵ با هاشور مشخص شده‌اند.

۵ تفسیر زمین‌شناسی داده‌های مغناطیس هوایی محدوده شهربابک

داده‌های مغناطیس هوایی برای اکتشاف ذخایر مس پورفیری بسیار سودمند هستند؛ زیرا این داده‌ها منطقه وسیعی را پوشش می‌دهند و به کمک آنها می‌توان واحدهای نفوذی و خطواره‌هایی را مشخص کرد که با کانی‌سازی مس پورفیری ارتباط دارند (گرات، ۱۹۸۵؛ وودز و بوستر، ۱۹۸۵؛ فیچلر و همکاران، ۱۹۹۹؛ روی و

می‌کند که با توجه به زاویه میل ۴۴/۹۶ درجه و انحراف ۰/۷۱ درجه میدان مغناطیسی، امری بدیهی است. شکل ۵ نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیس هوایی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. زاویه میل و انحراف استخراج شده از سایت IGRF مربوط به سال ۲۰۱۰ است.

محاسبه و به داده‌های مغناطیسی واقع در قطب شمال تبدیل می‌کند. این عمل تأثیر زاویه میل مغناطیسی را حذف می‌کند یا به حداقل می‌رساند و میدان مغناطیسی را درست در بالای توده مولد قرار می‌دهد. فیلتر برگردان به قطب تغییرات زیادی در شکل توده‌های مغناطیسی منطقه تولید



شکل ۵. نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی در محدوده شهرباک

دیوریت، گابرو و سنگ‌های اولترابازیکی متوسط تا زیاد است. سنگ‌های دگرگونی شامل گنیس، شیست، ماسه‌سنگ‌های دگرگونی، ماربل و هورنفلس خودپذیری مغناطیسی و مغناطیس باقیمانده بسیار ضعیفی دارند (ژیائو و وانگ، ۲۰۱۴). بزرگ‌ترین بی‌هنجاری محدوده که مربوط به سنگ‌های ولکانیک آندزیتی است، در قسمت مرکزی آن قرار دارد. این سنگ‌ها خاصیت مافیک دارند و بی‌هنجاری مغناطیسی متوسط تا زیادی نشان می‌دهند. این بی‌هنجاری با حرف A در شکل ۵ نشان داده شده است. در قسمت مرکزی و شمالی این واحد زمین‌شناسی، اثر مغناطیس‌زدایی مشاهده می‌شود که با دگرسانی‌های استخراج شده از محدوده مطالعاتی مربوط به اثر دگرسانی در این واحد ولکانیک همخوانی دارد. این موضوع

سنگ‌های رسوبی موجود در محدوده مورد مطالعه شامل ماسه‌سنگ، کنگلومرا و آهک است. این سنگ‌ها خودپذیری مغناطیسی و مغناطیس باقیمانده ضعیفی دارند؛ بنابراین بی‌هنجاری مغناطیسی آنها هم ضعیف است. تغییرات خودپذیری در سنگ‌های ولکانیکی و آذرین درونی بسیار زیاد است و به نسبت کانی‌های سازنده آنها بستگی دارد. به‌طور کلی سنگ‌های ولکانیک و نفوذی که کانی‌های مافیک بیشتر و فلسیک کمتری دارند، خودپذیری مغناطیسی بیشتری از خود نشان می‌دهند و سنگ‌های ولکانیک و درونی شامل توف، پورفیری‌ها، برش‌های ولکانیکی، گرانیت و گرانودیوریت خودپذیری مغناطیسی ضعیفی دارند. خودپذیری مغناطیسی سنگ‌های ولکانیک و نفوذی مافیک و اولترامافیک شامل آندزیت،

تراکی بازالت سنگ مافیک هستند و خاصیت مغناطیسی متوسط تا شدیدی دارند و با توجه به اینکه اثر مغناطیس-زدایی در بخش‌هایی از آن مشاهده می‌شود، می‌توان این اثر را به دگرسان شدن این واحد نسبت داد؛ از این رو مناطق مذکور، مستعد کانی‌سازی مس هستند.

۶ استخراج خطواره‌ها و ساختارهای مغناطیسی

شناسایی ساختارهای خطی به‌خصوص سامانه‌های گسل و درزه به دلیل ارتباط با سیالات گرمایی، از نظر اکتشافات معدنی حائز اهمیت است. گسل‌ها فعالیت زمین‌ساختی زیادی دارند و نواحی خردشده مناسبی را برای کانی‌سازی مس پورفیری فراهم می‌کنند. این محل‌ها می‌توانند معابر مناسبی برای نفوذ سیالات کانه‌دار و کانه‌زایی باشند؛ پس کلیدهای مناسبی جهت شناخت و اکتشاف ذخایر معدنی محسوب می‌شوند.

برای مکان‌یابی مرکز و لبه بی‌هنجاری‌ها از مفهوم زاویه تیلت (tilt derivative) (TDR) استفاده می‌شود. مقدار بیشینه دامنه زاویه تیلت، روی ساختار و مقدار صفر دامنه، روی مرز بی‌هنجاری قرار می‌گیرد. در محاسبات عددی، تانژانت زاویه تیلت برابر است با نسبت گرادیان قائم (VDR) به قدر مطلق دامنه گرادیان افقی (THDR) (میلر و سینگ، ۱۹۹۴):

$$TDR = \arctan\left(\frac{VDR}{THDR}\right)$$

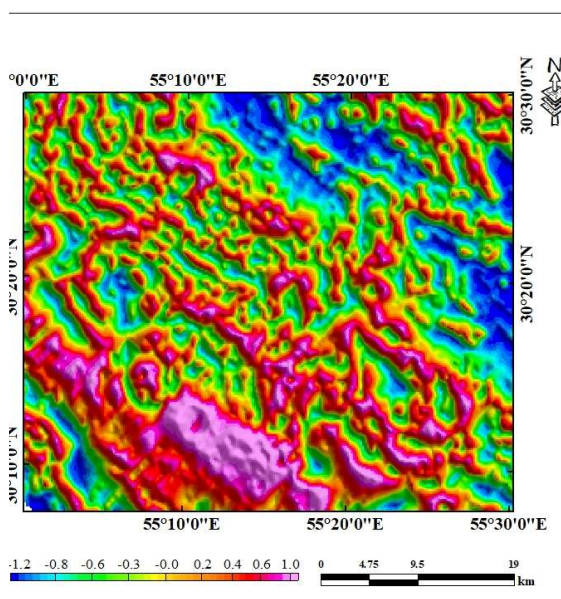
از آنجایی که زاویه تیلت از نسبت مشتق قائم به افقی محاسبه می‌شود، نتایج برحسب رادیان یا درجه است؛ بنابراین با تکیه بر این نتایج نمی‌توان اطلاعاتی درباره شدت میدان ژئومغناطیسی یا خودپذیری بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به‌دست آورد. نتایج زاویه تیلت به بازه $\frac{\pi}{2}$ تا $\frac{\pi}{2}$ محدود می‌شود و این فیلتر وابستگی شدیدی به زاویه میل دارد؛ لذا بهتر است بر میدان منتقل شده به قطب اعمال و بررسی شود. به همین جهت داده‌های مغناطیس هوایی شهر بابک با اعمال

همپوشانی مطلوبی با نقشه دگرسانی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای دارد (شکل ۳). این نواحی با حروف B و D مشخص شده‌اند. قسمت جنوبی این بی‌هنجاری (حرف E در شکل ۵) بر رسوبات عهد حاضر منطبق است و به‌نظر می‌رسد این بی‌هنجاری ناشی از واحدهای آتشفشانی مخفی در زیر رسوبات باشد. قسمت شمالی آتشفشان بیدخوان خاصیت مغناطیسی ضعیفی نشان می‌دهد که با تکیه بر تصاویر ماهواره‌ای استر، این اثر مغناطیسی‌زدایی به دلیل گسترش دگرسانی در این قسمت است (ناحیه C). همچنین چندین بی‌هنجاری مغناطیسی در شمال غرب محدود شده مشاهده می‌شود که مربوط به واحدهای تراکی بازالت و تراکی آندزیت است. البته به‌نظر می‌رسد به دلیل گسترش دگرسانی در واحد مذکور، در بیشتر قسمت‌های آن اثر مغناطیس‌زدایی وجود دارد. همان‌طور که اشاره شد، گسترش دگرسانی در این نواحی اثر مغناطیسی این سنگ‌ها را از بین برده است. در مرز شرقی واحد تراکی آندزیت، واحد آندزیت بازالت وجود دارد که با توجه به ماهیت مافیک این واحد، باید خاصیت مغناطیسی شدیدی از خود نشان دهد، اما عکس این پدیده و اثر مغناطیس‌زدایی در این واحد مشاهده می‌شود که دگرسانی‌های استخراج شده از تصاویر استر مؤید این موضوع است. در قسمت شمال محدود شده چند بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده می‌شود که در زمینه میدان مغناطیسی ضعیف قرار دارند. با توجه به اینکه سنگ بستر محدود فلیش است، به‌نظر می‌رسد این بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مربوط به واحدهای آذرینی باشند که زیر رسوبات مخفی شده‌اند (بی‌هنجاری‌های I، H، G و F). در جنوب غرب محدوده مطالعاتی چند بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده می‌شود که با واحد تراکی آندزیت همپوشانی دارند. قسمت‌هایی از این بی‌هنجاری‌ها را واحد رسوبات کواترنری پوشانده است و به‌نظر می‌رسد واحد تراکی آندزیت در زیر این رسوبات گسترش دارد (بی‌هنجاری‌های J و K). واحدهای تراکی آندزیت و

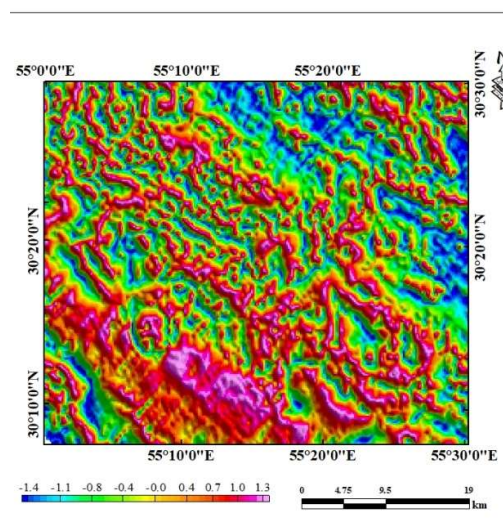
به‌طور کلی برای شناسایی گسل‌های مغناطیسی باید به مرز بین دو بی‌هنجاری منفی و مثبت در نقشه زاویه تیلت (مقادیر صفر) توجه شود. علاوه‌براین در نقشه زاویه تیلت باید به هرگونه نواحی خطی و باریک، قطع ناگهانی، پله‌ها و ناپیوستگی‌ها و همچنین جابه‌جایی‌های تند توجه کرد (کروهون و همکاران، ۲۰۰۴). در شکل ۷ نقشه ساختارهای خطی و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی حاصل از داده‌های مغناطیس هوایی آورده شده است. طبق این نقشه عمده اندیس‌های کانی‌سازی مس شناخته‌شده در محدوده مورد مطالعه در امتداد خطواره‌های مغناطیسی حاصل از فیلتر زاویه تیلت و همچنین در مجاورت بی‌هنجاری مغناطیسی استخراج‌شده از فیلتر برگردان به قطب قرار دارد. همان‌گونه‌که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مناطقی که خطواره‌های متراکمی دارند، بر دگرسانی‌های استخراج‌شده از تصاویر استر منطبقند. گفتنی است در نقشه مغناطیس هوایی محدوده شهر بابک، در این مناطق اثر مغناطیس‌زدایی دیده می‌شود.

فیلتر برگردان قطب، به قطب منتقل شدند تا اثر زاویه میل مغناطیسی حذف شود. سپس فیلتر زاویه تیلت بر داده‌های منتقل‌شده به قطب اجرا شد. در شکل‌های ۶- الف تا ۶- د به ترتیب نقشه زاویه تیلت محدوده مورد مطالعه، نقشه زاویه تیلت داده‌های مغناطیسی محدوده با فیلتر ادامه فراسو به میزان ۲۰۰ متر، نقشه زاویه تیلت داده‌های مغناطیسی محدوده با فیلتر ادامه فراسو به میزان ۵۰۰ متر و نقشه زاویه تیلت داده‌های مغناطیسی محدوده با فیلتر ادامه فراسو به میزان ۱۰۰۰ متر نشان داده شده است. همان‌طور که در این نقشه‌ها مشاهده می‌شود، روند بیشتر ساختارها شمال غربی- جنوب شرقی است.

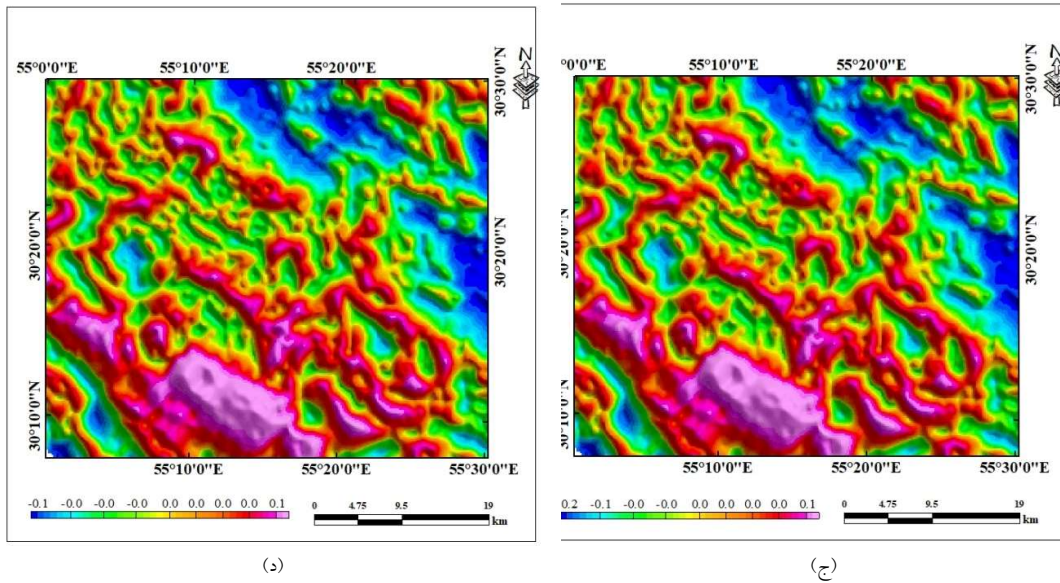
فیلتر زاویه تیلت ابزاری مناسب و کاربردی برای شناسایی گسل‌ها و ساختارها با استفاده از داده‌های مغناطیسی است؛ بنابراین جهت استخراج خطواره‌ها و ساختارهای مغناطیسی و بررسی ارتباط آنها با کانی‌زایی مس پورفیری در محدوده مطالعاتی شهر بابک، از فیلتر مزبور برای داده‌های مغناطیس هوایی استفاده شد.



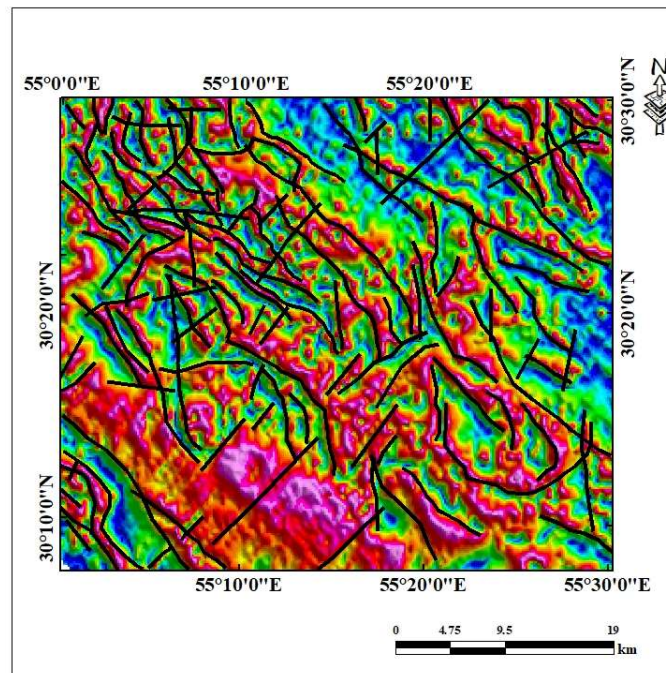
(ب)



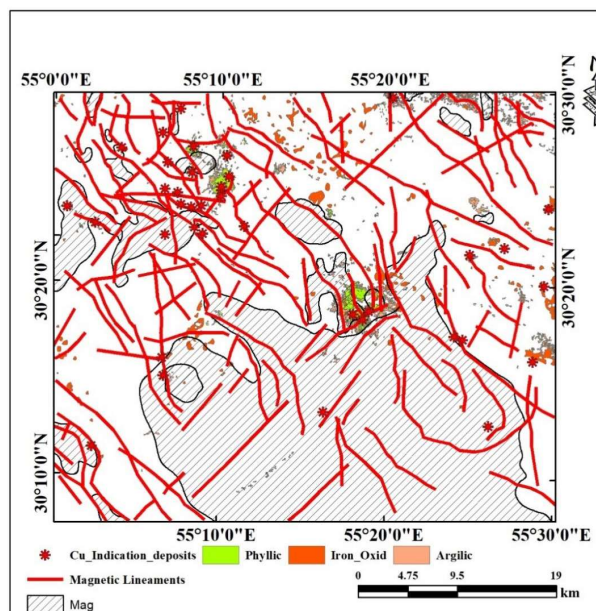
(الف)



شکل ۶. الف) نقشه مشتق زاویه تیلت داده‌های محدوده شهرباک (ب) نقشه مشتق زاویه تیلت با ارتفاع ادامه فراسو ۲۰۰ متر (ج) نقشه مشتق زاویه تیلت با ارتفاع ادامه فراسو ۵۰۰ متر (د) نقشه مشتق زاویه تیلت با ارتفاع ادامه فراسو ۱۰۰۰ متر.



شکل ۷. نقشه خطواره‌های مغناطیسی استخراج‌شده از محدوده شهرباک.



شکل ۸. نقشه ساختارهای مغناطیسی استخراج شده از محدوده شهر بابک.

۷ نتیجه‌گیری

بی‌هنجاری‌ها یا در مجاورت آنها قرار دارد. همچنین در واحدهای آذرین محدوده مورد مطالعه اثر مغناطیس‌زدایی مشاهده می‌شود که با توجه به ماهیت مافیک این واحدها، شدت میدان مغناطیسی آنها اغلب متوسط تا زیاد است. وجود پدیده مغناطیس‌زدایی در این واحدها نشانه گسترده‌گی دگرسانی در این واحدها و مستعد بودنشان برای میزبانی کانی‌سازی مس پورفیری است. از مقایسه نتایج این مطالعه با دگرسانی‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای استر می‌توان دریافت همخوانی مناسبی بین مناطق مغناطیس‌زدا و دگرسانی‌ها وجود دارد. همچنین با استفاده از فیلتر زاویه تیلت و اعمال فیلتر ادامه فراسو به میزان ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر بر این فیلتر، خطواره‌های مغناطیسی موجود در محدوده مورد مطالعه و گسل‌های عمیق استخراج شدند. بر اساس نتایج استفاده از فیلتر زاویه تیلت، عمده ساختارهای مغناطیسی موجود در محدوده مورد مطالعه روند شمال غربی- جنوب شرقی دارند و بیشتر اندیس‌های مس شناخته‌شده، در امتداد خطواره‌های مغناطیسی موجود در محدوده یا در محل تراکم این

در این مطالعه از داده‌های مغناطیس هوایی سازمان انرژی اتمی ایران که در سال ۱۹۷۷ و با فاصله خطوط ۵۰۰ متر و ارتفاع ۱۲۰ متر برداشت شده است، برای استخراج ساختارهای مغناطیسی در محدوده مطالعاتی شهر بابک استفاده شده است. جهت نیل به این هدف ابتدا نقشه شدت میدان باقیمانده داده‌های مغناطیسی محدوده مورد مطالعه ترسیم شد. بر اساس این نقشه، چندین بی‌هنجاری مغناطیسی در محدوده مطالعاتی مشاهده شد. در ادامه، برای حذف زاویه میل میدان مغناطیسی، فیلتر برگردان به قطب بر داده‌های شدت میدان کل اجرا شد. چون زاویه میل ۴۴/۹۶ درجه است، جابه‌جایی زیادی در این بی‌هنجاری‌ها بر اثر اعمال فیلتر برگردان به قطب مشاهده می‌شود. از نقشه برگردان به قطب جهت استخراج بی‌هنجاری‌های مغناطیسی موجود در محدوده مطالعاتی شهر بابک استفاده شد. با مقایسه محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و موقعیت اندیس‌های مس شناخته‌شده در محدوده مطالعاتی این نتیجه حاصل می‌شود که عمده کانی‌سازی روی این

- Baranov, V., and Naudy, H., 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole: *Geophysics*, **29**, 67-79.
- Behn, G., Camus, F., Carrasco, P., and Ware, H., 2001, Aeromagnetic signature of porphyry copper systems in Northern Chile and its geologic implications: *Economic Geology*, **96**(2), 239-248.
- De Oliveira, D. C., Dall'Agnol, R., Corrêa da Silva, J. B., and Costa de Almeida, J. A., 2008, Gravimetric, radiometric, and magnetic susceptibility study of the Paleoproterozoic Redenção and Bannach plutons, eastern Amazonian Craton, Brazil: Implications for architecture and zoning of A-type granites: *Journal of South American Earth Sciences*, **25**, 100-115.
- Forster, H., 1978, Mesozoic-Cenozoic metallogenesis in Iran: *Journal of the Geological Society of London*, **135**, 443-455.
- Guan, Z. N., 2005, *Geomagnetic Field and Magnetic Exploration*: Geological Publishing House, Beijing.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R. B., and Saad, A. H., 2013, *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices and Applications*: Cambridge University Press, New York.
- Miller, H. G., and Singh, V., 1994, Potential field tilt - A new concept for location of potential field sources: *Journal of Applied Geophysics*, **32**, 213-217.
- Mohamed, A., Abdelrady, M., Alshehri, F., Mohammed, M. A., and Abdelrady, A., 2022, Detection of mineralization zones using aeromagnetic data: *Applied Sciences*, **12**, 9078.
- Ranjbar, H., Hassanzadeh, H., Torabi, M., and Ilaghi, O., 2001, Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehzar area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis: *Journal of Applied Geophysics*, **48**(1), 33-41, ISSN 0926-9851.
- Riahi, S., Abedi, M., and Bahroudi, A., 2021, Integration of airborne geophysics and satellite imagery data for exploration targeting in porphyry Cu systems: *Chahargonbad district, Iran: Geophysical Prospecting Journal*, **99**(5), 1116-1137.
- Riahi, S., Bahroudi, A., Abedi, M., and Aslani, S., 2022, Hybrid outranking of geospatial data: Multi attributive ideal-real comparative analysis and combined compromise solution: *Geochemistry*, **82**(3), 125898.
- Roy, B., and Clowes, R. M., 2000, Seismic and خط‌واره‌ها قرار دارند؛ بنابراین اغلب نواحی امیدبخش در قسمت شمال غرب محدوده واقع هستند و با توجه به وجود واحد مافیک آندزیتی (ناحیه B) در این قسمت، اثر مغناطیس‌زدایی مشاهده می‌شود. همچنین در قسمت شمال محدوده، در بستر فلیشی چند بی‌هنجاری مغناطیسی (بی‌هنجاری‌های I_H و G و F) مشاهده می‌شود که مربوط به واحد نفوذی هستند. در قسمت C و D در واحد ولکانیک آندزیتی، اثر مغناطیس‌زدایی دیده می‌شود که مربوط به پدیده دگرسانی است و مستعد کانی‌سازی مس است. نواحی J و K با توجه به نقشه زمین‌شناسی و وجود واحد آندزیتی و همچنین اثر مغناطیس‌زدایی در نقشه میدان مغناطیسی، نواحی مستعدی برای بررسی کانی‌سازی مس هستند.
- ### منابع
- اصفهان‌نی‌نژاد، م.، رحیمی، م.، ۱۳۷۹، تهیه نقشه پتانسیل مواد معدنی در گستره برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر بابک با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS): گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور.
- مقدم، م.، فنای خیرآباد، غ.، میرزایی، س.، عابدی، م.، ۱۳۹۸، تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی به منظور تخمین عمق پی‌سنگ مغناطیسی و گسل‌های پنهان در منطقه بصیران، خراسان جنوبی: فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، **۵۱**، ۱۱۱-۱۲۸.
- Anderson, E. D., Hitzman, M. W., Monecke, T., Bedrosian, P. A., Shah, A. K., and 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.
- Anderson, E. D., Zhou, W., Li, Y. G., Hitzman, M. W., Monecke, T., Lang, J. R., and Kelley, K. D., 2014, Three-dimensional distribution of igneous rocks near the Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit in southwestern Alaska: Constraints from regional-scale aeromagnetic data: *Geophysics*, **79**, B63-B79.

- deposits exploration: *Ore Geology Reviews*, **80**, 1042-1055, ISSN 0169-1368.
- Yousefi, M., and Carranza, E. J. M., 2015, Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping: *Computers & Geosciences*, **74**, 97-109.
- Zarasvandi, A., Liaght, S., and Zentilli, M., 2005, Porphyry copper deposits of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Iran, super porphyry copper and gold deposits, A global perspective: PGC publishing Adelaide, **2**, 441-452.
- potential-field imaging of the Guichon Creek batholith, British Columbia, Canada, to delineate structures hosting porphyry copper deposits: *Geophysics*, **65**, 1418-1434.
- Sillitoe, R. H., 2010, Porphyry copper systems: *Economic Geology*, **105**, 3-41.
- Woods, K. T., and Webster, S. S., 1985, Geophysical signature of gold and porphyry copper mineral deposits in the Lachlan Fold Belt, NSW: 4th ASEG Conference, 325-331.
- Xiao, F., and 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

The study of magnetic structures using aeromagnetic data and investigating their relationship with porphyry copper mineralization in the Shahr-e Babak, Kerman province, Iran

Moslem Jahantigh^{1*}, Hamid Reza Ramazi², Hosein Ferdusi³ and Zahra Jafari⁴

¹ Ph.D. Student in Mineral Exploration, Amirkabir University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Mineral Exploration, Faculty of Mine, Amirkabir University, Tehran, Iran

³ Ph.D. Student in Mineral Exploration, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Khavaran Kavosh Zahid Consulting Engineers Co.

(Received: 04 January 2023, Accepted: 29 October 2023)

Summary

Studied area is located in Kerman province, Iran. This area belongs to the Urumia-Dokhtar magmatic arc (UDMA) zone. Several porphyry copper deposits were known in this magmatic arc. UDMA is marked by voluminous Tertiary volcanic sequences of up to 3000 m thickness. It seemed that these Cu occurrences are related to structures, especially major and main faults.

In this study, magnetic structures were extracted by using the aeromagnetic data. This data was extracted by Atomic Energy Organization of Iran (AEOI) during 1977 and 1978. The flight lines distance and the sensor altitude were about 500 and 120 m, respectively. Airborne magnetic method is among the most efficient geophysical techniques for the detection of buried anomalies.

In the first step, total magnetic intensity map was prepared and reduction to pole transformation was done on it. 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. Interpretation of magnetic data can further be helped by RTP in order to remove the influence of magnetic latitude on the anomalies, which is significant for anomalies caused by crust. Most of the studied areas are covered by mafic volcanic rocks. These rocks produce moderate to high magnetic anomalies. In some parts, the effect of demagnetization can be observed in these rocks because of the spread of alteration in this area. A low magnetic anomaly is observed in the northern part of the studied area related to sedimentary rocks in this area. In the next step, body magnetic anomalies were extracted from reduction to pole map. A tilt angle filter used to extract magnetic lineaments was applied to the reduction to pole data. Upward continuation filter was implemented at 200 m, 500 m and 1000 m on the tilt angle map and magnetic lineaments were extracted from tilt angle maps. Several magnetic lineaments and magnetic bodies were extracted from magnetic maps (tilt angle maps and reduction to pole maps). There is good correspondence between magnetic structures and copper occurrences. The P-A curve confirms this result.

Keywords: Tilt, aeromagnetic, Shahr-e Babak, lineaments, structure