

شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و دگرسانی مرتبط با مس پورفیری با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوایی، مطالعه موردی: برکه یکصد هزارم چهارگنبد، استان کرمان

زهرا یزدی^{۱*}، علی‌رضا جعفری راد^۲ و حسن خیرالهی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکترا، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۳۰

چکیده

در این پژوهش با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوایی (مغناطیس‌سنجی و رادیومتری) مناطق دارای پتانسیل مس پورفیری در منطقه چهارگنبد معرفی شده‌است. در واقع به وسیله داده‌های مغناطیسی و پردازش آنها از طریق فیلترهای برگردان به قطب، ادامه فراسو (با ارتفاع‌های مختلف)، مشتق افقی کل و مشتق زاویه انحراف، مرزهای بی‌هنجاری مغناطیسی در منطقه تعیین مکان و نیز شیب تقریبی آنها محاسبه شده‌است. همچنین با استفاده از داده‌های رادیومتری و تصویر سه‌گانه حاصل از آنها، توده‌های نفوذی فلسیک و نواحی دگرسانی پتاسیک مشخص گردیده‌است. در نهایت با توجه به مدل زایشی مس پورفیری و عوامل مؤثر بر کانی‌زایی و تطبیق نتایج حاصل از داده‌های مغناطیسی و رادیومتری، منطقه چهارگنبد بر اساس میزان پتانسیل کانی‌زایی به‌دست آمده اولویت‌بندی شده‌اند. بیشترین پراکندگی اولویت‌های مشخص شده در بخش‌های شمالی، مرکزی و خاوری برکه مطالعاتی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: مس پورفیری، چهارگنبد، مغناطیس‌سنجی، رادیومتری هوایی، توده نفوذی فلسیک، دگرسانی.

* نویسنده مسئول: زهرا یزدی

E-mail: yazdisudeh@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

نتایج مغناطیسی توسط برانت در سال ۱۹۶۶ ارائه شده‌است. در این مدل با توجه به زون‌بندی دگرسانی در سامانه پورفیری، یک بی‌هنجاری شدت بالا در مرکز بی‌هنجاری ضعیف قرارداد (Brant, 1966).

مدل کانی‌سازی با استفاده از اطلاعات ژئوفیزیکی و ژئوشیمی برای کانسار مس-طلا پورفیری مت میلیگان توسط Oldenburg et al. (1993) ارائه شده‌است. نتایج آنها مرتبط با مدل‌های زمین‌شناسی و کانی‌سازی برای کانسار پورفیری مس-طلا است که در این صورت عدم وابستگی بین تمرکز طلا و ضریب القای مغناطیسی، شرایط خاصی را به‌وجود می‌آورد و به تعریف، توزیع و کنترل ژئوشیمی توده معدنی کمک می‌کند (Douglas et al., 1997).

با استفاده از روش رادیومتری دگرسانی پتاسیک مرتبط با کانی‌زایی، در مناطقی همچون یوکن، تریتوری، کازینو، جزیره پیلی و... توسط شایوز و همکاران در سال ۱۹۹۵ مدل‌سازی شده‌است. در دگرسانی کانی‌های پتاسیم‌دار مرتبط با کانی‌سازی، بی‌هنجاری پتاسیم به‌وسیله نسبت توریم به پتاسیم کمتر تشخیص داده می‌شود. ادغام تفاسیر اطلاعات ژئوفیزیک هوایی با داده‌های ژئوشیمی و سنگ‌شناسی الگوهای رادیومتری مفیدی را برای تشخیص کانی‌سازی ارائه می‌دهد (Shives et al., 1995). همچنین رابرتو و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از بررسی داده‌های ژئوفیزیک هوایی (مغناطیس‌سنجی و رادیومتری)، نقشه مناطق امیدبخش کانی‌سازی را در ناحیه سرالست در برزیل تولید کرده‌اند (Roberto et al., 2008).

در این نوشتار سعی شده‌است به‌وسیله پردازش و تحلیل داده‌های مغناطیس‌سنجی و رادیومتری در جهت شناسایی توده‌های نفوذی مستعد و ساختارهای زمین‌شناسی پنهان و آشکار که مرتبط با کانه‌زایی مس پورفیری می‌باشند، استفاده بهینه گردد. براین اساس افزون بر استفاده از داده‌های رادیومتری برای تشخیص واحدهای نفوذی و دگرسانی، با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی تحلیل ساختاری برای عوامل کنترل‌کننده کانی‌زایی نیز صورت می‌گیرد. این ساختارها ارتباط نسبتاً نزدیکی با پراکندگی مکانی کانی‌زایی‌ها داشته و می‌توانند در مکان‌یابی نواحی جدید برای کانی‌زایی مس پورفیری در مقیاس پی‌جویی مورد استفاده قرار گیرند.

داده‌های ژئوفیزیک هوایی شامل مغناطیس‌سنجی و رادیومتری از جمله منابع اطلاعاتی با ارزش به‌شمار می‌روند که نقش اساسی در اکتشاف کانسارهای پنهان دارند. چنانکه نتایج حاصل از آنها کاهش چشمگیری در هزینه‌های اکتشافی و زمان را سبب می‌شود.

مبنای روش مغناطیس‌سنجی تغییر میزان خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها است که این اطلاعات برای تعیین پراکندگی کانی‌های مغناطیسی و در نتیجه تغییرات سنگ‌شناسی و ساختاری استفاده می‌شود.

از داده‌های رادیومتری هوایی برای تفکیک بهتر همبندی‌های واحدهای زمین‌شناسی و نیز بررسی تغییرات ژئوشیمیایی رخ‌داده در آنها استفاده می‌شود. در این روش پرتو گامای ساطع شده از عناصر اورانیم، پتاسیم و توریم به‌وسیله طیف‌سنج (اسپکترومتر) گاما ثبت می‌شود و از آنجا که هر واحد زمین‌شناسی ویژگی‌های پرتوزایی خاص خود را دارد، بر این اساس واحدهای زمین‌شناسی و مناطق دارای دگرسانی قابل تشخیص می‌شوند (Armstrong & Rodegheiro, 2006; Keary, 2002).

در سیستم‌های پورفیری معمولاً توده‌های نفوذی فلسیک مرتبط با کانی‌زایی مس، در سنگ‌های آتشفشانی قرار گرفته‌اند یا به‌وسیله سنگ‌های آتشفشانی وابسته به توده‌های نفوذی احاطه شده‌اند. تخریب مگنتیت در این سنگ‌ها توسط دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک می‌تواند عامل یک مغناطیس ضعیف و گسترده در پیرامون توده نفوذی باشد. از طرفی نواحی کانی‌زایی پورفیری (پتاسیک) معمولاً به دلیل تشکیل کانی مگنتیت ثانویه به‌صورت فرومغناطیس هستند. بنابراین یک بی‌هنجاری مغناطیسی شدت بالای محلی مشخص می‌تواند در مرکز بی‌هنجاری مغناطیسی شدت پایین حاصل از دگرسانی ایجاد شود (Gunn & Dentith, 1997).

داده‌های رادیومتری معمولاً به همراه داده‌های مغناطیسی طی برداشت‌های هوایی جمع‌آوری می‌شوند. در محل سیستم‌های پورفیری یک بررسی رادیومتری می‌تواند توده‌های نفوذی پتاسیم‌دار و همچنین دگرسانی پتاسیک را که رخنمون داشته و یا در ژرفای کم باشند، مشخص کند (Gunn & Dentith, 1997).

نتایج حاصل از بررسی ژئوفیزیک هوایی مربوط به کانسار مس پورفیری بغداد در آریزونا، با توجه به مدل ارائه‌شده به‌وسیله کلارک و همکاران و تطبیق آن با

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی عمومی منطقه

برگه یکصد هزارم چهارگنبد در محدوده ۵۶° تا ۳۰'، ۵۶° طول خاوری و ۳۰'، ۲۹° تا ۳۰° عرض شمالی، در شمال‌خاوری شهرستان سیرجان در استان کرمان قرار دارد (شکل ۱). اصلی‌ترین راه ارتباطی در ورقه مورد مطالعه، راه ترانزیت کرمان- سیرجان- بندرعباس می‌باشد. بیشترین رخمون واحدهای سنگی موجود در برگه چهارگنبد شامل سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن است. در جنوب‌باختری برگه مورد مطالعه، قدیمی‌ترین واحد زمین‌شناسی موجود در برگه به صورت برونزد بسیار کوچکی از نهشته‌های دگرگونی رخمون دارد. آبرفت‌های دوران چهارم با پراکندگی بیشتر در بخش شمال‌خاوری جوان‌ترین واحدهای زمین‌شناسی در برگه چهارگنبد می‌باشد. زمین‌شناسی ساختاری، ماگماتیسیم و زمین‌شناسی اقتصادی برگه مورد مطالعه در ادامه ارائه شده‌است (خان‌ناظر، ۱۳۷۴).

۲-۱. زمین‌شناسی ساختاری

از جمله مهم‌ترین پدیده‌های ساختاری در منطقه چهارگنبد گسلش و چین‌خوردگی هستند. چین‌خوردگی در منطقه به صورت مجموعه‌ای از تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها با روند شمال‌باختر- جنوب‌خاوری وجود دارند. مهم‌ترین چین‌های منطقه ناودیس گهدیچ، ناودیس ماه خاتونی، ناودیس چهارگنبد، تاقدیس چهل تن هستند. از مهم‌ترین گسل‌های منطقه، علیمردی و چهارگنبد با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و دارای شیب زیاد به سوی شمال هستند. این دو گسل جداکننده دو بخش شمالی و جنوبی زمین‌شناختی در محدوده مورد بررسی می‌باشند. بخش شمالی، شامل سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن- پلیوسن بوده و از نظر ساختاری بخشی از کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر به‌شمار می‌رود (کمربند دهج- ساردوئیه). در بخش جنوبی نیز ساختاری فرازمین (هورست) مانند وجود دارد که این ساختار از سنگ‌های مافیک و اولترامافیک به‌همراه نهشته‌های رادیولاریتی و آهک‌های پلاژییک ساخته شده و بیانگر رخساره پوسته اقیانوسی است.

۲-۲. ماگماتیسیم

در منطقه مورد مطالعه سه فاز ماگمایی قابل‌شناسایی است:

الف) سنگ‌های گرانیتی- گرانودیوریتی به سن ائوسن- الیگوسن که همگی در بخش‌های مرکزی برگه برونزد دارند. دو برونزد مهم این توده، یکی در خاور روستای سلوئیه و دیگری که بزرگ‌ترین برونزد در منطقه است، از جنوب خاوری معدن تنگ‌ئوئیه تا روستای کرپوئیه- چنار کف می‌باشد. ب) توده‌های نفوذی کوارتز دیوریتی- گرانودیوریتی با سن میوسن پایینی که ماگمای تشکیل‌دهنده آنها افزون بر سنگ‌های ائوسن، توده گرانیتی تخت و نیز نهشته‌های سازند چهارگنبد (میوسن پایینی) را در جنوب روستای علیمردی (امامزاده شاه صالح) تحت تأثیر قرار داده‌است. سنگ‌های یاد شده با توجه به اینکه عاملی مهم در پیدایش کانه‌های مس در منطقه هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. ج) سنگ‌های نیمه‌ژرف تراکی‌بازالتی به سن پلیوسن که به صورت جوان‌ترین فاز ماگمایی نیمه‌ژرف در ورقه چهارگنبد، سنگ‌های آتشفشانی بیدخوان را قطع کرده و به صورت کلاهک بر روی آنها قرار گرفته‌است. دایک‌ها و سیل‌های فراوان با روندی نامنظم، سنگ‌های قدیمی‌تر را قطع کرده‌اند. ترکیب شیمیایی این سنگ‌ها از داسیت تا دیوریت متغیر است.

۲-۳. زمین‌شناسی اقتصادی عمومی

در بیشتر نقاط برگه چهارگنبد کانی‌سازی مس صورت پذیرفته‌است. این کانی‌سازی به‌طور عمومی شامل رگه‌های مس می‌باشد. مناطق مهم کانی‌سازی شامل چهارگنبد، کوه‌پنج، تخت‌بنه، بلبلی، تخت و رودخانه‌پلنگی می‌باشد. افزون بر مس شاخص‌های معدنی همچون تراورتن و زئولیت در این ورقه وجود دارد. با توجه به مدل کانی‌زایی مس پورفیری و جنس و سن سنگ‌های میزبان، واحدهایی همچون واحدهای نفوذی و آتشفشانی با سن ائوسن، الیگوسن، میوسن و پلیوسن منطقه چهارگنبد به عنوان واحدهای مستعد کانی‌زایی مس پورفیری مشخص شده‌است (شکل ۱).

۳- داده‌های ژئوفیزیک هوایی

۳-۱. جمع‌آوری و پردازش اولیه اطلاعات

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در سال ۱۹۷۶-۷۷ میلادی توسط شرکت پراکلا با همکاری سازمان انرژی اتمی برداشت شده و شامل داده‌های مغناطیس‌سنجی و رادیومتری با ارتفاع پرواز ۱۲۰ متر از سطح زمین و فاصله خطوط پرواز ۵۰۰ متر و جهت خطوط پرواز آزیموت ۴۵° و ۲۲۵° می‌باشد. داده‌های مغناطیسی پس از انجام تصحیحات لازم مانند تصحیح روزانه، حذف اثر میدان زمین مرجع (IGRF) مدل سال ۱۹۷۵ و همتراز سازی، آماده‌سازی شده‌اند (شکل ۲). داده‌های رادیومتری نیز پس از تصحیحات مورد نیاز مانند اثر ارتفاع، اثر کامپتون، اثر کیهانی و اثر گاز رادون، آماده‌سازی و تبدیل به غلظت عناصر پتاسیم، توریم و اورانیم شده‌اند.

۳-۲. تفسیر داده‌های مغناطیسی و رادیومتری

برای تفسیر داده‌های مغناطیسی، ابتدا سطح روند مرتبه ۲ (Trend) به‌منظور حذف اثر پی‌سنگ از داده‌ها محاسبه شده‌است. همانطوریکه در این شکل مشاهده می‌شود در محل بی‌هنجاری‌های شدت بالا پی‌سنگ ژرف مغناطیسی قرار دارند. در واقع با اعمال این فیلتر روندهای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مربوط به پی‌سنگ‌های ناحیه‌ای ژرف از داده‌ها حذف شده و زمینه بی‌هنجاری‌های سطحی‌تر نمود بهتری پیدا کرده‌است (شکل ۳).

سپس فیلتر برگردان به قطب (RTP) به‌منظور اصلاح نامتقارن بودن بی‌هنجاری نسبت به پیکره اعمال گردیده‌است (شکل ۴). فیلتر برگردان به قطب، میدان مغناطیسی یک مجموعه داده را چنانکه در قطب مغناطیسی بوده، بازسازی می‌کند. به عبارت دیگر، داده‌ها در نقشه به‌وسیله یک میدان مغناطیسی با زاویه میل قائم و زاویه انحراف صفر نشان داده می‌شود. در این حالت توده‌های قائم، بی‌هنجاری متقارن و متمرکز بر روی مرکز توده نشان می‌دهند (Baranov, 1957). همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده‌است، بی‌هنجاری‌ها بر روی منبع خود قرار گرفته‌اند. بر این اساس بیشترین بی‌هنجاری‌ها در نوار مرکزی برگه برونزد دارند و کمترین شدت بی‌هنجاری در بخش جنوب‌باختری برگه می‌باشد. در واقع با تطبیق واحدهای زمین‌شناسی و نقشه برگردان به قطب و میزان خودپذیری مغناطیسی واحدهای زمین‌شناسی (Clark, 1997) می‌توان ملاحظه نمود که بیشترین شدت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مربوط به واحدهای آندزیتی ائوسن و واحدهای بازالتی پلیوسن و دایک‌های دیابازی است. همانطور که مشخص‌است در بخش‌های مرکزی توده‌های نفوذی گرانیتی وجود دارد که اطراف برخی از آنها واحدهای بازیک پلیوسن و اطراف برخی دیگر واحدهای آندزیتی ائوسن وجود دارد. در این مناطق، در مرکز (مناطق منطبق با توده گرانیتی) بی‌هنجاری با شدت ضعیف و اطراف آن توده‌ها (منطبق با واحدهای بازیک و آندزیتی)، بی‌هنجاری بسیار بالا مشاهده می‌شود. در بخش جنوب‌باختری برگه بی‌هنجاری بسیار ضعیف مشاهده می‌شود که مرتبط با واحدهای سرپانتینی، اسپیلیتی و آمیزه‌های رنگین کرتاسه و آبرفت‌های کواترن است. همچنین در بخش شمال‌خاوری برگه مورد مطالعه بی‌هنجاری ضعیف مشاهده می‌شود که این بی‌هنجاری ضعیف مرتبط با واحدهای آبرفتی کواترن می‌باشد. البته در بخش شمال‌باختری در ناحیه کوه نطع بی‌هنجاری بالا مشخص‌است که این بی‌هنجاری مرتبط با واحدهای آندزیتی ائوسن می‌باشد. در خاور برگه مورد مطالعه بی‌هنجاری ضعیفی مشاهده می‌شود که مرتبط با واحدهای آبرفتی کواترن و توده گرانودیوریتی و سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن می‌باشد که در شمال آن بی‌هنجاری بالا مرتبط با دایک‌های دیابازی و در جنوب آن بی‌هنجاری بالا در ارتباط با واحدهای بازیک پلیوسن وجود دارد. در بخش شمال‌باختری برگه بی‌هنجاری بسیار بالایی مشاهده می‌شود که در ارتباط با واحد گدازه زیردریایی آندزیتی با سن ائوسن است که در اطراف آن بی‌هنجاری ضعیف مرتبط با آبرفت‌های کواترن مشاهده می‌شود. بنابراین بی‌هنجاری‌های با شدت زیاد با واحدهای آذرین بازیک پلیوسن و آندزیت‌های ائوسن در ارتباط می‌باشد و

مورد استفاده در اعمال فیلتر بر روی داده‌های مغناطیسی در نمودار ۱ ارائه شده است. از طرفی با استفاده از اختلاف ژرفا و اختلاف فاصله به دست آمده در مرزهای مغناطیسی حاصله، می‌توان با استفاده از رابطه (۱) مقدار شیب تقریبی آنها را محاسبه کرد:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (1)$$

که در آن Δh اختلاف ژرفای مرزهای بارز شده مغناطیسی، Δx فاصله افقی مرزهای بارز شده مغناطیسی، α شیب مرزهای مغناطیسی است.

داده‌های رادیومتری به صورت تصویر سه گانه (Ternary) با استفاده از فایل‌های شبکه‌بندی عناصر پتاسیم، توریم و اورانیم تولید شده‌اند (شکل ۱۰). این تصویر تشخیص توده‌های نفوذی مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری و همچنین دگرسانی‌های منطقه را امکان‌پذیر می‌سازد. در این تصویر نواحی سفید رنگ نشان‌دهنده واحدهای دارای پرتوژیایی بالا از سه عنصر یاد شده می‌باشد که مربوط به توده‌های فلسیک در نواحی مرکزی و نواحی شمال‌باختری مرتبط با توده‌های نفوذی گرانیتی و گرانودیوریتی است که حاوی کانی‌سازی هستند. نواحی تیره رنگ نشان‌دهنده نواحی دارای پرتوژیایی پایینی از این عناصر می‌باشند که بیشتر از واحدهای مافییک پوشیده شده‌اند و نواحی قرمز رنگ نشان‌دهنده غنی‌شدگی نسبی از پتاسیم واحدها هستند. از طرفی نسبت توریم به پتاسیم کمتر از ۲/۵ نشانگر زون‌های غنی از کانی‌های دگرسانی سرشار از پتاسیم می‌باشد (Shives et al, 1995). به علاوه نواحی دارای پتاسیم بالاتر از ۳ درصد به عنوان نواحی دارای کانی‌های غنی از پتاسیم مشخص شده‌اند. در نهایت با اشتراک‌گیری از تصاویر به دست آمده، نواحی دارای بیشترین احتمال وجود کانی‌های دگرسانی غنی از پتاسیم به دست آمده است (شکل ۱۱).

۳-۳. تفسیر ساختاری منطقه

با توجه به نتایج حاصله و مطابق شکل ۸، مرزهایی که در ژرفاهای مختلف با هم تطابق دارند، نشان‌دهنده شیب نسبتاً قائم ساختارهای موجود هستند. این ساختارها معمولاً نشان‌دهنده گسل‌های امتدادلغز هستند که می‌توانند نقش مهمی در جایگیری توده‌های نفوذی و شکل‌گیری کانسارهای مس پورفیری داشته باشند. اما در مورد بعضی از مرزهای مغناطیسی به نظر می‌رسد که شیب ساختارها کمتر است. ناپیوستگی مغناطیسی ST1 از ژرفای ۲۵۰ متر تا ۲۵۰ متر به خوبی بارز شده است که به نظر می‌رسد تا ژرفاهای بیشتر نیز ادامه می‌یابد. این ناپیوستگی مغناطیسی در قسمت شمال‌باختر دارای شیب به سمت جنوب می‌باشد و مقدار شیب آن حدود ۴۹ درجه است. این ناپیوستگی مغناطیسی در قسمت مرکزی تغییر جهت داده و با مقدار شیب حدوداً ۴۴ درجه به سمت شمال متمایل می‌گردد که در جنوب‌خاور شیب این ناپیوستگی مغناطیسی به صورت قائم می‌شود. ناپیوستگی مغناطیسی ST2 از ژرفای ۲۵۰ متر تا ژرفای ۱۵۰۰ متر وجود دارد. شیب این ناپیوستگی در قسمت شمال‌باختر به صورت قائم است و سپس در محدوده مرکزی تغییر شیب به سمت شمال داده است که مقدار شیب آن حدود ۲۹ درجه می‌باشد. این ناپیوستگی مغناطیسی در قسمت جنوب‌خاور مجدد به حالت قائم درمی‌آید. ناپیوستگی مغناطیسی ST3 در بخش شمال‌باختری شیب به سمت شمال دارد اما در قسمت مرکزی و جنوب‌خاوری تغییر جهت داده و شیب آن به سمت جنوب می‌شود که مقدار این شیب حدود ۵۲ درجه است. ناپیوستگی مغناطیسی ST4 که مرز یک توده مغناطیسی را نشان می‌دهد در قسمت شمال‌خاوری دارای شیب به سمت شمال می‌باشد اما در قسمت مرکزی به سمت خاور تغییر جهت داده و مجدداً در قسمت جنوبی به سمت جنوب‌باختر با مقدار شیب تقریباً ۴۶ درجه متمایل می‌شود. به نظر می‌رسد گسترش ژرفی این توده مغناطیسی قابل توجه است. ناپیوستگی مغناطیسی ST5 در ژرفاهای ۲۵۰ و ۵۰۰ متر دارای بیشترین طول می‌باشد اما از ژرفای بیش از ۵۰۰ متر طول کمتری دارد و تا ژرفای ۲۰۰۰ متر ادامه می‌یابد. این ناپیوستگی مغناطیسی تا ژرفای ۵۰۰ متر دارای شیب قائم می‌باشد اما از آن ژرفا به

کمترین بی‌هنجاری‌ها با واحدهای کرتاسه در ارتباط هستند. آبرفت‌ها به علت داشتن منشأهای مختلف می‌توانند پاسخ‌های مغناطیسی متفاوتی از خود نشان دهند که بسته به نوع سنگ منشأ آنها، این پاسخ می‌تواند کم یا زیاد باشد که آبرفت‌های کوتاه‌تر در منطقه مورد مطالعه بی‌هنجاری بسیار ضعیفی از خود نشان می‌دهند.

فیلتر ادامه‌فرا سو بر روی نقشه مغناطیسی برگردان به قطب، به منظور حذف بی‌هنجاری‌های سطحی و بارز شدن بی‌هنجاری‌های ژرف‌تر که تحت اثر نوفه‌های سطحی در داده نباشند به ارتفاع ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۵۰۰، ۴۰۰۰، ۴۵۰۰ متر اعمال شده است. مدل سه‌بعدی نقشه‌های حاصل از ادامه‌فرا سو در شکل ۵ نشان داده شده است. با اعمال فیلتر ادامه‌فرا سو به مقدار Z بی‌هنجاری‌های سطحی تا ژرفای Z/۲ رقیق‌شدگی پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان برآورد ژرفا از نقشه بی‌هنجاری‌های ادامه‌فرا سو را به دست آورد که در این بخش کمترین ژرفای بی‌هنجاری‌ها در نظر گرفته شده است (Jacobson, 1987). همانطور که در شکل مشخص است با افزایش ارتفاع، بی‌هنجاری‌های سطحی کاهش یافته است و بی‌هنجاری‌های ژرفی بیشتر بروز می‌نماید. در باختر برکه یکصد هزارم چهارگنبد یک بی‌هنجاری بزرگ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع فیلتر فرا سو میزان بروز بی‌هنجاری بیشتر شده است. با تطبیق این بی‌هنجاری و واحد زمین‌شناسی موجود مشاهده می‌شود که این بی‌هنجاری بر روی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و پلیوسن قرار دارد. به طور کلی این بی‌هنجاری مرتبط با واحدهای آندزیتی می‌باشد و از آنجا که منشأ آندزیت‌ها ماگمای بازالتی است (معین‌وزیری و احمدی، ۱۳۸۰)، بنابراین باید انتظار بی‌هنجاری شدت بالا داشته باشیم که این نتیجه صحت پردازش را نیز می‌رساند. همچنین در جنوب‌خاوری برکه واحدهای آندزیتی داریم که در نقشه‌های فرا سو نیز بی‌هنجاری شدت بالا نشان داده است که نشانگر گسترش ژرفی این واحدها می‌باشد.

پس از آن فیلتر مشتق افقی (HD) بر روی نقشه‌های ادامه‌فرا سو به منظور بارز شدن مرزهای بی‌هنجاری‌ها اعمال شده است. با اعمال مشتق افقی کل مرز بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بارز می‌شود که دامنه و طول موج بی‌هنجاری‌های حاصل در نقشه مشتق افقی کل تابعی از ژرفای لبه بی‌هنجاری و اختلاف خودپذیری مغناطیسی آن نسبت به محیط اطراف می‌باشد. بنابراین با استفاده از این فیلتر (فیلتر مشتق افقی کل) بر روی نقشه‌های ادامه‌فرا سو برکه یکصد هزارم چهارگنبد در افق‌های مختلف، مرزهای بی‌هنجاری بارزسازی گشته است. مدل سه‌بعدی مرز بی‌هنجاری‌ها در ژرفاهای مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. همانطوریکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در بخش‌های جنوب‌خاوری و باختر برکه مطالعاتی دامنه مشتق افقی بر روی مرز بسیاری از بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تضعیف می‌شوند که نشان‌دهنده ژرف بودن بسیاری از این بی‌هنجاری‌ها در این نواحی است. در واقع در مناطق جنوب کوه بیدخوان در جنوب‌خاوری برکه و در منطقه سیلوتیه در باختر برکه مورد مطالعه این حالت قابل مشاهده می‌باشد.

پس از آن بر روی نقشه‌های مشتق افقی، فیلتر زاویه انحراف (Tilt) به منظور بارزسازی یکسان بی‌هنجاری‌های سطحی و ژرفی اعمال می‌شود. این فیلتر با نرمال کردن دامنه‌های مختلف بی‌هنجاری‌ها و بارز کردن آنها در محدوده عددی ۹۰+ تا ۹۰- بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را به صورت یکسان بارز می‌کند. بنابراین می‌توان مرز بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را در ژرفاهای مختلف رسم نمود (Ferreira et al., 2013). همچنین با استفاده از نقشه مرز بی‌هنجاری، ژرفای تقریبی و شیب بی‌هنجاری را می‌توان به دست آورد. مدل سه‌بعدی نقشه‌های حاصل از فیلتر مشتق تیلت که بر روی مشتق افقی اعمال شده است، در شکل ۷ ارائه شده است. بدین ترتیب ناپیوستگی‌های مغناطیسی در ژرفاهای مختلف رسم گردیده (شکل ۸) و مدل سه‌بعدی برخی از آنها با استفاده از نرم‌افزار RockWorks تولید شده است (شکل ۹) که تفسیر هریک از آنها در ادامه مطالب ارائه شده است. همچنین روند

مغناطیسی تقریباً ارتباط مکانی نزدیکی را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ نواحی دارای پتاسیم بیش از ۳ درصد (به‌رنگ نارنجی) و نواحی دارای نسبت توریم به پتاسیم کمتر از ۲/۵ به رنگ سبز نشان داده شده‌است. همانطوریکه در شکل مشخص است، این نواحی در دو منطقه ارتباط و تطابق نزدیکی با همدیگر دارند. در محدوده A این دو بی‌هنجاری رادیومتری با هم کاملاً تطابق داشته و نشان‌دهنده رخداد دگرسانی غنی از کانی‌های پتاسیم‌دار در این بخش می‌باشد که در نزدیک دو اندیس معدنی قرار داشته و با ناپوستگی مغناطیسی ST10 ارتباط دارند. محدوده B در قسمت شمال کوه پنج دیده می‌شود که نواحی دارای پتاسیم بالا در مجاورت نواحی دارای نسبت توریم به پتاسیم پایین قرار گرفته‌است که با ناپوستگی‌های مغناطیسی ST14 و ST13 ارتباط دارند. در اطراف این نواحی نیز اندیس‌های معدنی مس همچون معدن کوه پنج قرار دارد. بنابراین براساس نتایج به‌دست آمده در این روش و عوامل مؤثر بر کانی‌زایی مس‌پورفیری برای پتانسیل‌یابی این ماده معدنی، برگه چهارگنبد اولویت‌بندی شده‌است (شکل ۱۲).

بیشترین پراکندگی این اولویت‌ها در شمال، مرکز و خاور برگه است. اولویت اول در نواحی کوه پنج، کوه صالحی، کوه نفع در شمال برگه و همچنین در نواحی چنارکف و کوه چهل تن در خاور و جنوب‌خاور برگه وجود دارد. اولویت دوم در مناطق شمالی برگه در نواحی خاور عباس‌آباد و شمال گسل چهل تن و در بخش مرکزی برگه در نواحی شمال تکیه چهارگنبد و جنوب حمیدآباد پراکندگی دارد. اولویت سوم در شمال دیشگان در خاور برگه، خاور مبارکه در نیمه شمالی برگه مطالعاتی و نیز جنوب تنگو در نیمه جنوبی برگه مورد مطالعه مشخص شده‌است.

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از داده‌های مغناطیسی و پردازش آنها ناپوستگی‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه، رسم شده‌است. این ناپوستگی‌های مغناطیسی گسترش سطحی بیشتری داشته و اکثراً دارای شیب قائم هستند که نشانگر حرکت امتداد لغز بیشتر ساختارهای موجود در منطقه می‌باشد که این ساختارها و محل تقاطع آنها می‌تواند محل‌های مناسبی برای تشکیل سیستم‌های پورفیری باشند. همچنین این ناپوستگی‌های مغناطیسی ارتباط نزدیکی با مناطق دگرسانی پتاسیک دارند که این مناطق به‌وسیله داده‌های رادیومتری و تصویر سه‌گانه حاصله تعیین شده‌اند. این نواحی دارای پتاسیم بیشتر از ۳ درصد و نسبت توریم به پتاسیم کمتر از ۲/۵ هستند. از طرفی با استفاده از تصویر سه‌گانه حاصل از داده‌های رادیومتری مناطق دارای واحدهای نفوذی فلیسیک مشخص شده‌اند. این توده‌ها از طریق بالا بودن مقادیر سه عنصر توریم، پتاسیم و اورانیم تعیین مکان گردیده‌اند. همانطوریکه مشاهده شده‌است، توده‌های فلیسیک ارتباط نزدیکی با مناطق دارای دگرسانی پتاسیک دارند همچنین تراکم گسل‌های منطقه نیز تاحدی منطبق با مناطق دارای توده‌های فلیسیک و دگرسانی پتاسیک هستند. با توجه به مدل کانی‌زایی مس‌پورفیری و تاثیر مهم عوامل مذکور در این تیپ کانی‌زایی، مناطق مهم دارای پتانسیل مس‌پورفیری اولویت‌بندی شده‌است که در شمال، مرکز و خاور برگه مطالعاتی بیشتری پراکندگی را دارد. دلیل مستند برای اثبات صحت اولویت‌بندی، تراکم معادن و اندیس‌های معدنی مس در مناطق انتخاب شده می‌باشد.

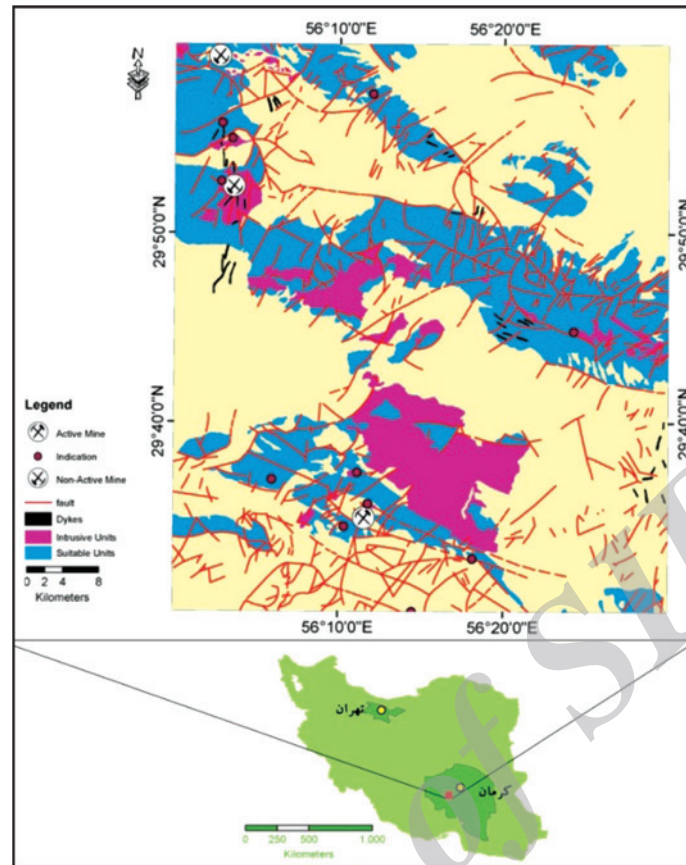
سپاسگزاری

بدینوسیله از مدیریت ژئومتیکس، گروه ژئوفیزیک‌هوایی سازمان زمین‌شناسی کشور به دلیل همکاری‌های صمیمانه آنها، سپاسگزاری می‌نمایم.

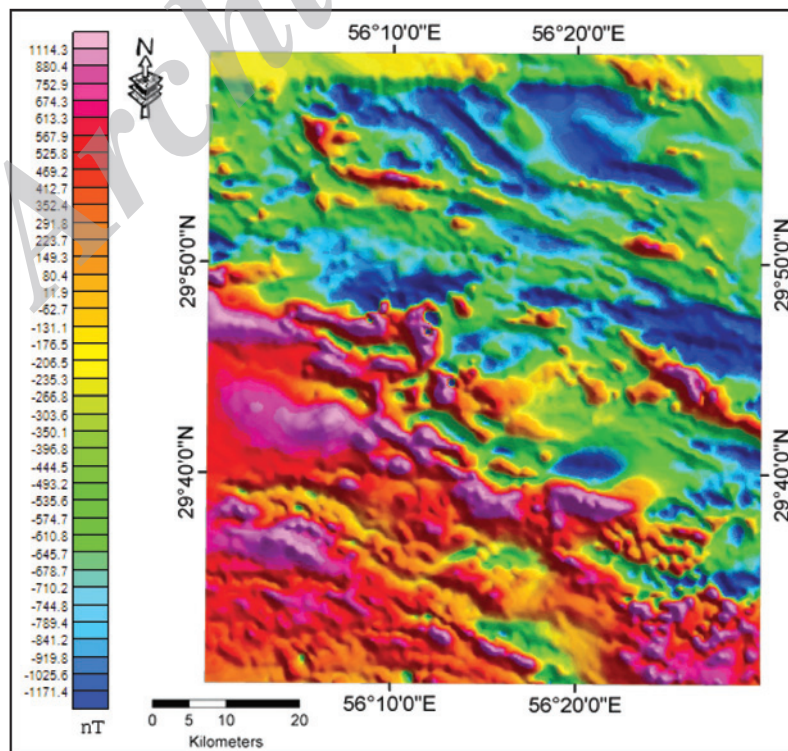
بعد تغییر شیب با مقدار حدوداً ۶۵ درجه به سمت شمال داده‌است. ناپوستگی ST6 در ژرفاهای زیاد گسترش کمتری دارد و دارای شیب به سمت جنوب با مقدار تقریبی ۴۶ درجه می‌باشد. البته در انتهای آن، که تنها در ژرفاهای ۲۵۰ و ۵۰۰ متر آشکار است، شیب به صورت قائم می‌باشد. ناپوستگی مغناطیسی ST7 تا ژرفای ۷۵۰ متر ادامه دارد و دارای شیب قائم می‌باشد. ناپوستگی مغناطیسی ST8 تا ژرفای ۱۲۵۰ متر امتداد دارد و با افزایش ژرفا، طول آن کاهش می‌یابد. این ناپوستگی مغناطیسی تا ژرفای ۷۵۰ متر دارای شیب قائم و از آن به بعد با مقدار شیب تقریباً ۳۷ درجه متمایل به جنوب می‌شود. ناپوستگی مغناطیسی ST9 از ژرفای ۵۰۰ متر ظاهر شده و تا ژرفای ۲۵۰۰ متر ادامه داشته و شیب به سمت شمال دارد. مقدار شیب این ناپوستگی مغناطیسی حدود ۳۳ درجه می‌باشد. این ناپوستگی مغناطیسی در ژرفاهای ۵۰۰ و ۷۵۰ متر دارای طول بیشتری نسبت به ژرفاهای بالاتر دارد اما در ژرفاهای بالاتر تقریباً طول یکسانی دارند. ناپوستگی‌های مغناطیسی ST10 و ST11 از ژرفای ۲۵۰ تا ۷۵۰ متر ظهور دارند که دارای شیب قائم است. ناپوستگی مغناطیسی ST12 از ژرفای ۲۵۰ متر تا ۲۵۰۰ متر بارز است و به نظر می‌رسد که در ژرفاهای بیشتر، گسترش قابل توجه‌تری دارد. این ناپوستگی مغناطیسی به صورت منحنی است که در بخش شمالی دارای شیب به سمت شمال است که در قسمت مرکزی تغییر جهت به سمت جنوب داده و در بخش جنوب‌باختری مجدداً به صورت قائم در می‌آید. ناپوستگی مغناطیسی ST13 از ژرفای ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر وجود دارد که انحنایی به سمت شمال داشته و در قسمت مرکزی با ناپوستگی مغناطیسی ST14 تقاطع دارد که این ناپوستگی مغناطیسی (ST14) از ژرفای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر امتداد دارد و شیب آن با مقدار تقریبی ۳۴ درجه به سمت جنوب است. ناپوستگی مغناطیسی ST15 از ژرفای ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر امتداد داشته و در قسمت شمال‌باختری دارای شیب به سمت شمال با مقدار تقریبی ۳۹ درجه می‌باشد و پس از آن تغییر جهت داده و به صورت قائم در می‌آید. ناپوستگی مغناطیسی ST16 از ژرفای ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ متر ظهور دارد که در قسمت‌های شمال‌باختری و جنوب‌خاوری دارای شیب قائم و در قسمت مرکزی دارای شیب به سمت شمال‌خاور با مقدار شیب حدوداً ۴۵ درجه است. این ناپوستگی مغناطیسی در محدوده مرکزی گسترش ژرفی بیشتری دارد. ناپوستگی مغناطیسی ST17 از ژرفای ۲۵۰ تا ۱۵۰۰ متر ادامه داشته و دارای شیب به سمت جنوب با مقدار تقریبی ۳۸ درجه می‌باشد، البته در قسمت جنوب‌خاوری این ناپوستگی مغناطیسی به صورت قائم در می‌آید. در قسمت شمال‌باختری با ناپوستگی مغناطیسی ST16 تقاطع دارد. ناپوستگی مغناطیسی ST18 در ژرفای ۲۵۰ و ۵۰۰ متر ظهور دارد و به نظر می‌رسد که تا ژرفای بیشتر گسترش نداشته‌باشد. شیب این ناپوستگی مغناطیسی به صورت قائم است. ناپوستگی مغناطیسی ST19 از ژرفای ۲۵۰ متر تا ۱۵۰۰ متر ادامه دارد که گسترش ژرفی آن کم می‌باشد. در قسمت شمالی شیب آن با مقدار تقریبی ۶۰ درجه به سمت خاور بوده و در قسمت جنوبی به سمت باختر تغییر جهت داده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشتر ساختارهای منطقه شیب قائم دارند که این می‌تواند دلیل مهمی بر امتداد لغز بودن ساختاری منطقه باشد. این ساختارها نواحی سستی را ایجاد می‌کنند که توده‌های آذرین توانایی نفوذ از طریق آنها را به سطوح بالایی زمین پیدا نموده و می‌توانند کانی‌زایی تشکیل دهند.

۳-۴. بررسی تطبیق نتایج داده‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی

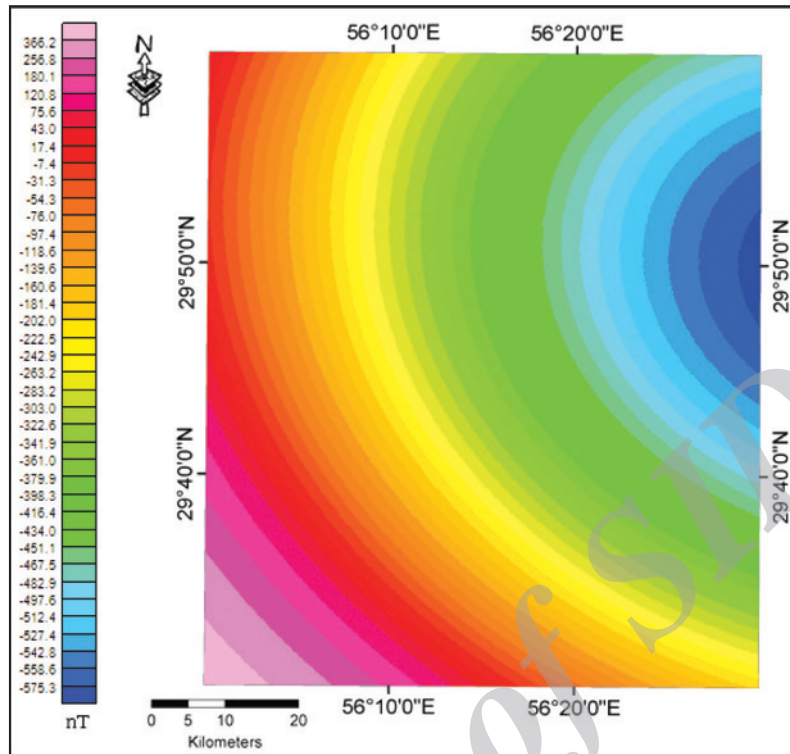
برای بررسی ارتباط نتایج روش‌های مغناطیس‌سنجی و رادیومتری با یکدیگر و نحوه ارتباط آنها با شرایط زمین‌شناسی، لایه‌های اطلاعاتی حاصل در شکل ۱۲ ارائه شده‌است. با توجه به داده‌های رادیومتری و مشخص کردن محدوده توده‌های نفوذی فلیسیک، مشاهده می‌شود که رخنمون توده‌های آذرین فلیسیک با ساختارهای



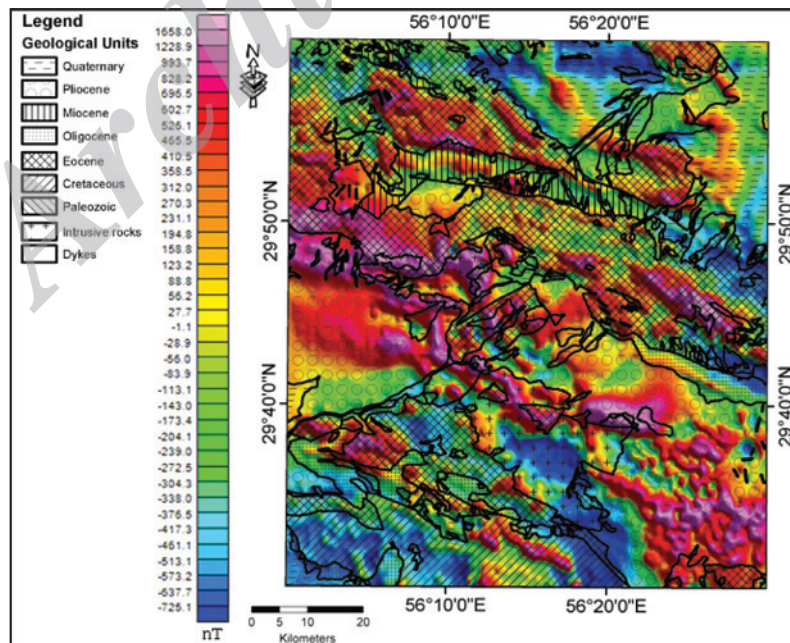
شکل ۱- واحدهای نفوذی، واحدهای مستعد برای کانی‌زایی مس پورفیری به همراه معادن و اندیس‌های مس پورفیری منطقه چهارگنبد (خان ناظر، ۱۳۷۴).



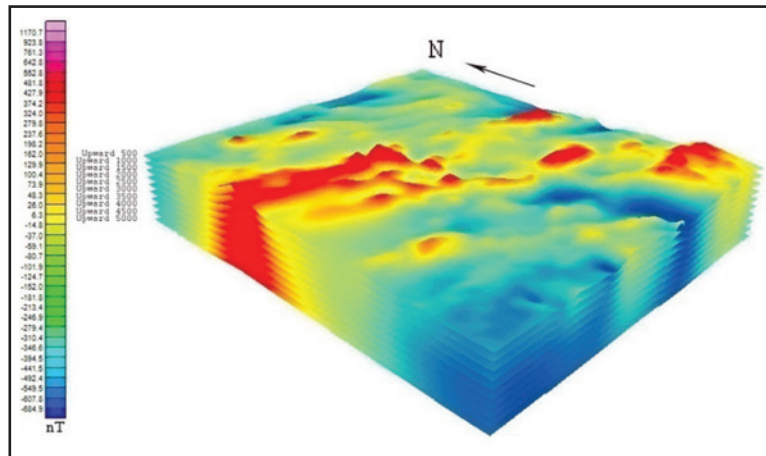
شکل ۲- نقشه میدان مغناطیسی کل بر گره یکصد هزارم چهارگنبد (سازمان انرژی اتمی، ۱۹۷۷).



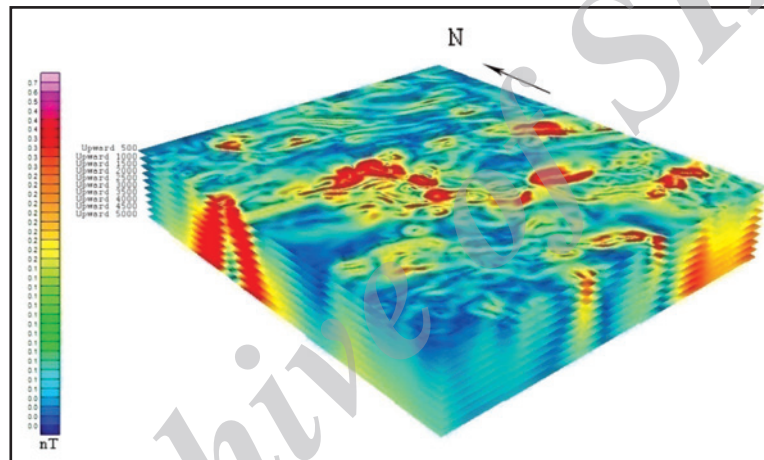
شکل ۳- نقشه سطح روند مرتبه ۲ برای حذف اثر پی سنگ.



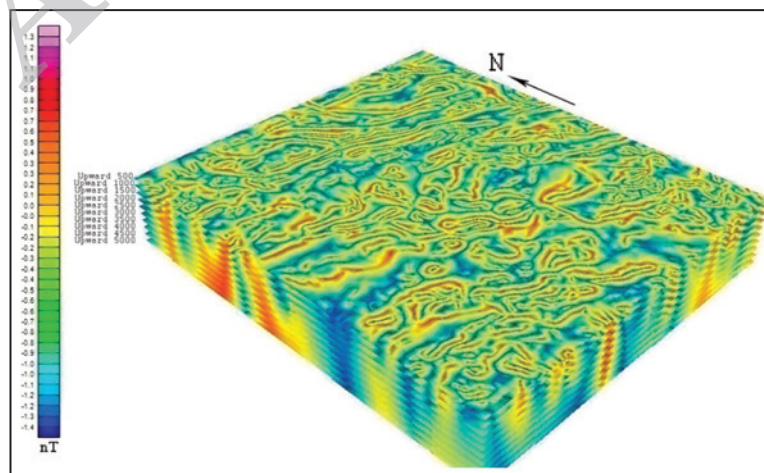
شکل ۴- نقشه برگردان به قطب بر گه یکصد هزارم چهار گنبد.



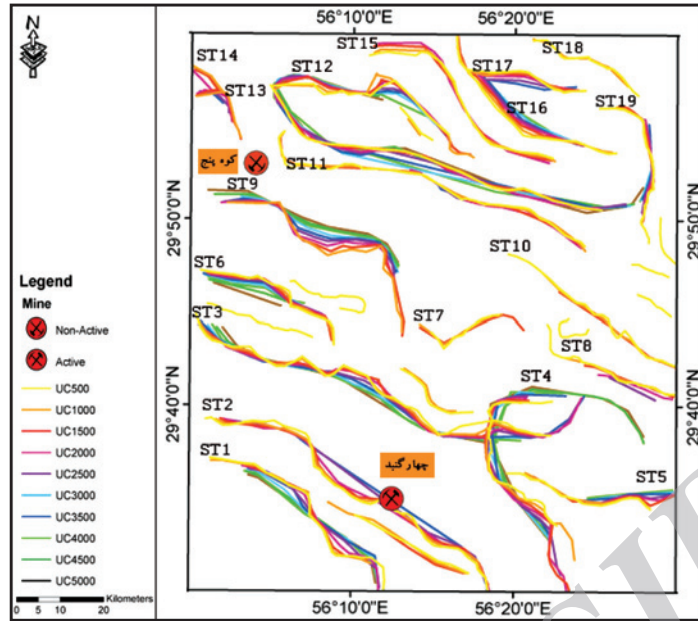
شکل ۵- مدل سه بعدی نقشه‌های فراسو با ارتفاع‌های یاد شده در بر گه یکصد هزارم چهار گنبد.



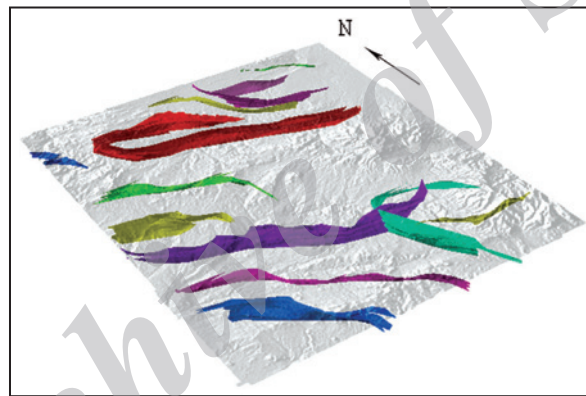
شکل ۶- مدل سه بعدی نقشه‌های حاصل از فیلتر مشتق افقی کل در ارتفاع‌های یاد شده مربوط به بر گه یکصد هزارم چهار گنبد.



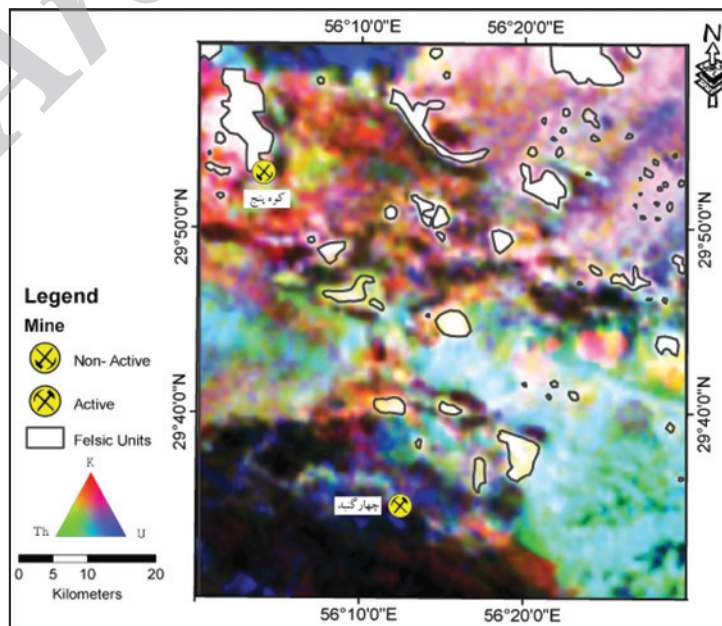
شکل ۷- مدل سه بعدی نقشه‌های حاصل از فیلتر زاویه انحراف در ارتفاع‌های یاد شده مربوط به بر گه یکصد هزارم چهار گنبد.



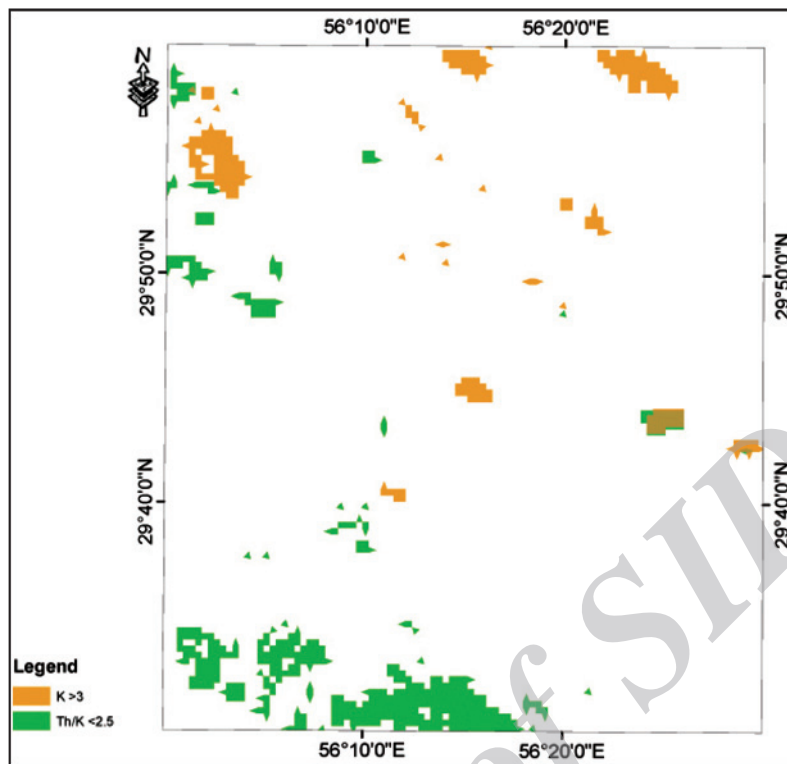
شکل ۸- ناپوستگی‌های مغناطیسی رسم شده در برکه یکصد هزارم چهارگنبد.



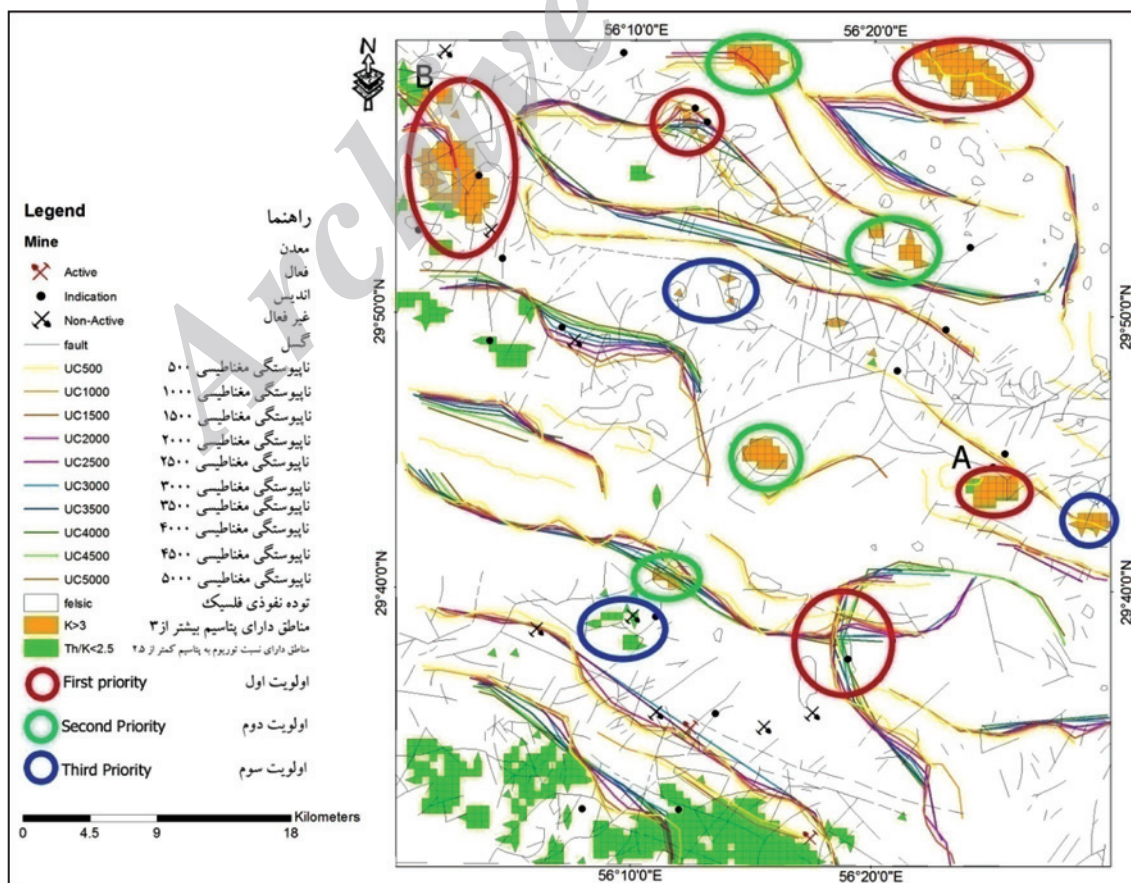
شکل ۹- مدل سه بعدی ناپوستگی‌های رسم شده در برکه یکصد هزارم چهارگنبد.



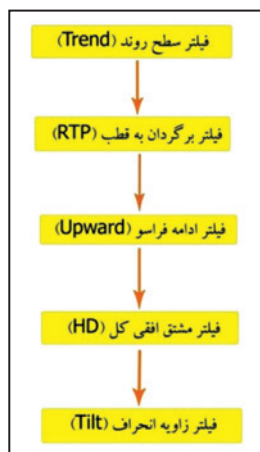
شکل ۱۰- تصویر سه گانه عناصر پتاسیم، توریم و اورانیم در برکه یکصد هزارم چهارگنبد.



شکل ۱۱- مناطق با پتاسیم بیشتر از ۳ و نسبت توریم به پتاسیم کمتر از ۲/۵.



شکل ۱۲- نقشه نهایی نتایج حاصل از بررسی ژئوفیزیک هوایی در برکه یکصد هزارم چهار گنبد.



نمودار ۱- روند اعمال فیلتر بر روی داده‌های مغناطیسی برگه مورد مطالعه.

کتابنگاری

خان‌ناظر، ن.ح.، ۱۳۷۴- نقشه زمین‌شناسی ورقه یکصد هزارم چهارگنبد. سازمان زمین‌شناسی ایران.
معین‌وزیری، ح.، احمدی، غ.، ۱۳۸۰- پتروگرافی و پترولوژی سنگ‌های آذرین. دانشگاه تربیت‌معلم، ۳۶۵ صفحه.

References

- Armstrong, M., Rodegheiro, A., 2006- Airborne Geophysical Techniques. Coal Operators Conference. University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy 2006: 113-131.
- Baranov, V., 1957- A new method for interpretation of aeromagnetic maps. Pseudo-gravimetric anomalies. Geophysics 22: 359-383.
- Brant, A.A., 1966- Geophysics in the exploration for Arizona porphyry copper. University of Arizona Press. Tucson 87-110.
- Clark, D.A., 1997- Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys, AGSO 17(2): 83-103.
- Douglas, W., Yaoguo, L. & Roberto, G., 1997- Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit, a case history for Mt. Milligan. Geophysics, VOL62. 5: 1419-1431.
- Ferreira, F., Souza, J., Bongiolo, A. & Castra, L., 2013- Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle, Geophysics, V.78: J33-J41.
- Gunn, P.J. & Dentith, M.C., 1997- Magnetic responses associated with mineral deposits. AGSO. 17(2): 145-158.
- Jacobson, B.H., 1987- A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field maps. Geophysics 52: 1138-1148.
- Keary, Ph., 2002- An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Ltd. pp: 231-235.
- Oldenburg, D. W., McGillivray, P. R. & Ellis, R. G., 1993- Generalized subspace methods for large scale inverse problems: Geophys. J. Int., 114:12-20
- Roberto, C., Filho, S., RossettoNunes, A., Pereira Leite, E. & Perez Xavier, R., 2008- Spatial Analysis of Airborne Geophysical Data Applied to Geological Mapping and Mineral Prospecting in Serra Leste Region, Brazil, SurvGeophys. 28:377-405.
- Shives, R.B.K., Charbonneau, B.W. & Ford, K.L., 1995- Applications of gamma ray spectrometric. Geological Survey of Canada 3061:82.