



مغناطیس‌سنجی زمینی جهت پی‌جویی نهشته‌های معدنی و تعیین گسترش و عمق نسبی توده‌های نفوذی ایجاد کننده دگرسانی و کانی‌سازی در گستره شرق کبیرکوه (جنوب غرب خواف)

احسان سلاطی*، محمدحسن کریم‌پور، محمدرضا حیدریان شهری

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۱/۶/۴، نسخه نهایی: ۹۱/۱۰/۲۳)

چکیده: منطقه کبیرکوه در ۷۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان خواف در استان خراسان رضوی قرار گرفته است. منطقه‌ی مورد بررسی با وسعت ۶۰ کیلومتر مربع از شرق به روستای زوزن (قاسم‌آباد) و از غرب به کبیرکوه محدود می‌شود. واحدهای سنگی منطقه عبارتند از: ماسه‌سنگ، شیل، سنگ آهک با سن کربونيفر تا پالئوسن، اسلیت، میکاشیست مربوط به پالئوزوئیک و مجموعه توده‌های نفوذی با سن کرتاسه تا ترشیاری که به شکل دایک و استوک نفوذ کرده‌اند. ترکیب آنها از گرانیات تا دیوریت تغییر می‌کند. براساس پذیرفتاری مغناطیسی، توده‌های نفوذی به دو سری ایلمنیت (احیایی) و مگنتیت (اکسیدان) جدایش شدند. زون‌های دگرسانی پروپلیتیک با گسترش بیشتر، سرسیتیک، آرژیلیک و سیلیسی با گسترش کمتر در جنوب گستره قرار دارند. زون‌های اسکارن در چند محل شناسایی شدند. کانی‌سازی پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، گالن و باریت در جنوب منطقه مورد شناسایی قرار گرفتند. برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی به منظور دستیابی به اطلاعات عمقی و گسترش توده‌های نفوذی وابسته به کانی‌سازی انجام شد. ۵۲۶ ایستگاه با فاصله‌های ۲۵ و ۵۰ متر در ۱۰ نیمرخ با فاصله‌های ۶۰۰ تا ۷۰۰ متر و راستای شمال‌شرقی - جنوب‌غربی، پیمایش شدند. با اصلاحات و پردازش داده‌های مغناطیسی، نقشه‌های شدت کل میدان مغناطیسی، انتقال به قطب، مشتق قائم اول و فراسو تهیه شدند. با استفاده از این نقشه‌ها محل واقعی، گسترش و عمق نسبی منابع ایجاد کننده ناهنجاری‌های A, B, C, D, E و F که توده‌های نفوذی هستند، شناسایی شدند. ناهنجاری‌های مغناطیسی در نقشه‌ی RTP وابسته به توده‌های نفوذی و زون‌های دگرسانی در بخش جنوبی منطقه یک طرح مدور تا نیمه مدور، که ناشی از حضور یا عدم حضور مگنتیت در زون‌های دگرسانی و توده‌های نفوذی است، دارد. براساس شواهد کانی‌سازی، دگرسانی، سنگ‌های نفوذی، و بیهنجاری مغناطیسی بخش جنوبی گستره پتانسیل برای یک سیستم مس پورفیری را دارد. با توجه به حضور چند زون اسکارنی آهن و بالا بودن دامنه‌ی بیهنجاری مغناطیسی D، بخش مرکزی منطقه پتانسیل برای کانی‌سازی اسکارنی مگنتیت دارد.

واژه‌های کلیدی: مغناطیس‌سنجی؛ نقشه‌های مغناطیسی؛ مس پورفیری؛ کانی‌سازی مگنتیت.

مقدمه

است. منطقه مورد بررسی از شرق به روستای زوزن (قاسم‌آباد) و از غرب به کبیرکوه محدود می‌شود. این گستره با گستردگی حدود ۶۰ کیلومتر مربع در شرق کبیرکوه واقع شده است. با توجه به اینکه گستره مورد بررسی در بخش‌های شمال‌خاوری بلوک لوت قرار

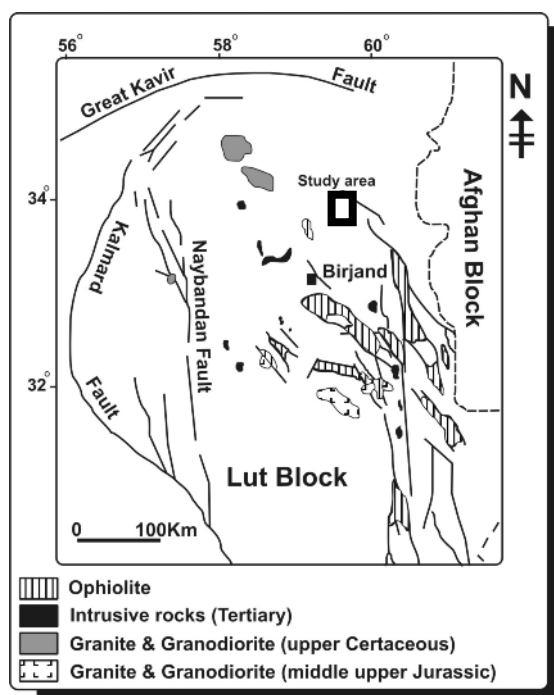
منطقه‌ی پی‌جویی کبیرکوه از نظر تقسیمات ساختاری در گوشه‌ی شمال شرقی بلوک لوت واقع شده است (شکل ۱). این منطقه در ۷۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان خواف در استان خراسان رضوی قرار گرفته

تهیه شده است.

روش مطالعه

- پردازش داده‌های ماهواره‌های Landsat ETM⁺7 و ASTER به منظور شناسایی زون‌های دگرسانی و کانی‌سازی.
- برداشت و بررسی مقاطع نازک و پولیش ۱۲۵ نمونه سنگ و کانی‌سازی.
- تهیه نقشه‌های رقومی زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در منطقه‌ای به گسترش ۶۰ کیلومتر مربع.
- برداشت مغناطیس‌سنجی زمینی در قالب ۱۰ نیم‌رخ با راستای شمال‌شرق - جنوب‌غربی. فاصله‌های نیم‌رخ‌ها ۶۰۰ تا ۷۰۰ متر و فاصله‌های ایستگاه‌ها در نیم‌رخ‌ها ۲۵ یا ۵۰ متر بوده است. در مجموع ۵۲۶ نقطه برداشت شدند.
- اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ۱۱۵ نمونه برای جدایش توده‌های نفوذی سری مگنتیت و سری ایلمنیت و اندازه‌گیری ۳۴۲ نمونه روی رخنمون‌های سنگی در طول نیم‌رخ‌های برداشت مغناطیس‌سنجی.
- ترسیم نمودارهای پذیرفتاری مغناطیسی و تعبیر و تفسیر آنها.
- تهیه نقشه‌های مغناطیس‌سنجی و تعبیر و تفسیر آنها.

می‌گیرد، در نتیجه این منطقه نیز تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌ساختی وابسته به بلوک لوت و فرورانش بلوک افغان به زیر بلوک ایران قرار گرفته است [۲،۱]. واحدهای سنگی منطقه شامل ماسه‌سنگ، شیل و سنگ آهک، اسلیت و میکاشیست، توده‌های نفوذی که به شکل دایک و استوک نفوذ کرده‌اند و ترکیب آنها از گرانیت تا دیوریت تغییر می‌کند. دگرسانی در منطقه شامل زون‌های پروپلیتیک با گسترش بیشتر، سرسیتیک، آرژیلیک و سیلیسی با گسترش کمتر در جنوب گستره مشاهده می‌شود. کانی‌سازی پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، گالن و باریت در منطقه شناسایی شد. با توجه به حضور انواع توده‌های نفوذی، زون‌های دگرسانی کانی‌سازی‌های موجود در منطقه احتمال حضور نهشته‌های معدنی در حد اقتصادی در منطقه دور از تصور نیست. بنابراین به منظور شناسایی و دستیابی به اطلاعات عمقی و گسترش توده‌های نفوذی مولد کانی‌سازی، مغناطیس‌سنجی زمینی در منطقه انجام شد. بررسی‌های قبلی که در منطقه انجام شده شامل تهیه نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زوزن [۳] و بررسی‌های ژئوشیمی رسوب‌های آبراهه‌ای برای بخش‌هایی از این ورقه بوده، که توسط سازمان زمین‌شناسی



شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی کبیرکوه در بلوک لوت.

زمین‌شناسی

برپایه بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی، واحدهای سنگی موجود در شرق منطقه کبیرکوه را می‌توان به پنج بخش تقسیم کرد (شکل ۲):

۱- سنگ‌های رسوبی که بیشتر در شمال، شمال شرقی و مرکز منطقه‌ی رخنمون دارند. این واحدها با سن نسبی کربونیفر تا پالئوسن [۳] عبارتند از ماسه‌سنگ، شیل و سنگ آهک. بیشترین رخنمون سنگ‌های رسوبی مربوط به واحد شیل و ماسه‌سنگ است، که در شمال و مرکز منطقه دیده می‌شوند. سنگ آهک رخنمون بسیار کوچکی در شمال شرقی گستره دارد (شکل ۲).

۲- سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با درجه‌ی پایین شامل اسلیت و میکاشیست که بخش بزرگی از اعظم منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. این واحدها با سن نسبی پالئوزوئیک [۳]، بیشتر در شرق و جنوب غربی گستره دیده می‌شوند و توده‌های نفوذی به شکل دایک و استوک در آنها نفوذ کرده‌اند (شکل ۲).

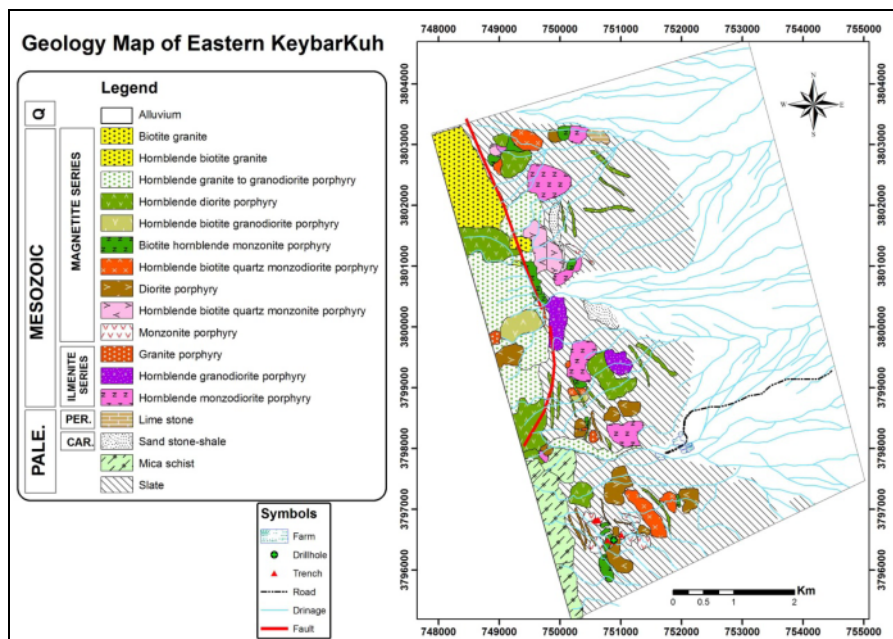
۳- توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق با سن نسبی کرتاسه - ترشیاری [۳]، که در سنگ‌های رسوبی و دگرگونی ناحیه‌ای منطقه به شکل دایک و استوک نفوذ کرده‌اند. براساس بررسی‌های انجام شده ۱۳ توده نفوذی در شرق کبیرکوه قابل جدایش است. جدایش توده‌ها برپایه‌ی بافت، ترکیب کانی‌شناسی و درصد کانی‌های فنوکریست آهن و منیزیم‌دار و کوارتز صورت گرفته است (شکل ۲). ترکیب کلی آنها از گرانیت تا دیوریت

تغییر می‌کند.

۴- واحدهای دگرگونی مجاورتی (همبری) شامل اسکارن و اپیدوت اسکارن که در اثر نفوذ توده‌های نیمه عمیق در سنگ آهک منطقه و فرایند دگرگونی همبری تشکیل شده‌اند. رخنمون این واحدها بسیار اندک بوده و در مرکز منطقه‌ی شرقی کبیرکوه دیده می‌شوند (شکل ۲).

۵- رسوب‌های کواترنری (رسوبات عهد حاضر) که در بخش مرکزی و شرقی منطقه مشاهده می‌شوند (شکل ۲).

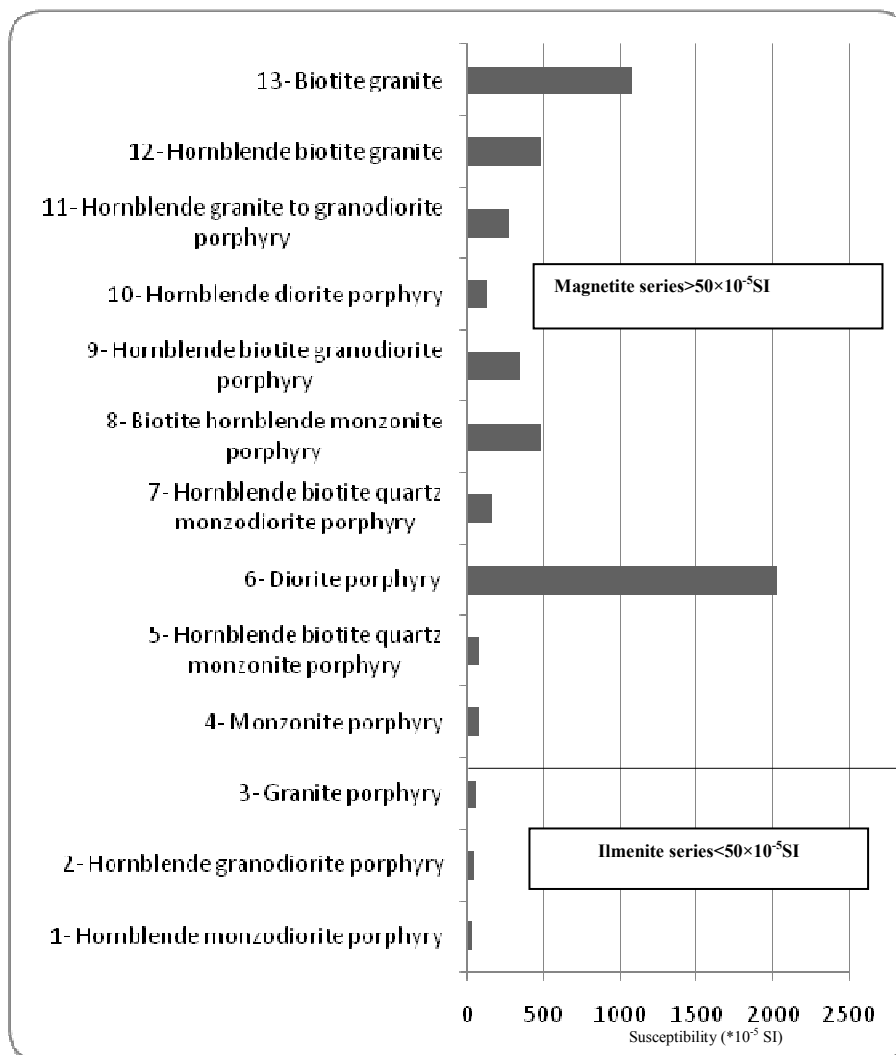
بررسی‌های سنگ‌نگاری توده‌های نفوذی منطقه با توجه به بافت و کانی‌شناسی برای ۱۳ توده صورت گرفت (جدول ۱). توده‌های نفوذی منطقه براساس اندازه‌گیری‌های پذیرفتاری مغناطیسی به دو سری مگنتیت و سری ایلمنیت جدایش شدند [۴، ۵] (شکل ۳)، (جدول ۱). با توجه به اندازه‌گیری ۱۱۵ نمونه، واحدهای هورنبلند گرانودیوریت پورفیری، هورنبلند مونزودیوریت پورفیری و گرانیت پورفیری دارای مقادیر پذیرفتاری پایین و به سری ایلمنیت (احیایی) می‌باشند (شکل ۳). واحدهای مونزونیت پورفیری، هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزونیت پورفیری، دیوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری، هورنبلند بیوتیت گرانودیوریت پورفیری، هورنبلند دیوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت گرانیت تا گرانودیوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت گرانیت و بیوتیت گرانیت، پذیرفتاری بالا داشته و به سری مگنتیت (اکسیدان) وابسته‌اند (شکل ۳).



شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی شرق کبیرکوه.

جدول ۱ توصیف سنگ‌نگاری توده‌های نفوذی منطقه .

رده‌بندی بر اساس پذیرفتاری مغناطیسی	نام سنگ	بافت	کانی شناسی
سری ایلمنیت	هورنبلند مونزودیوریت پورفیری	پورفیری دانه‌ریز- زمینه آپلیتی ریز- فنوکریست: (۱۵ تا ۲۰٪) هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	پلاژیوکلاز ۱۲ تا ۱۳٪- پتاسیم فلدسپات ۲٪- هورنبلند ۴ تا ۵٪
سری ایلمنیت	هورنبلند گرانودیوریت پورفیری	پورفیری زمینه درشت- فنوکریست: (۴۵ تا ۵۰٪) کوارتز- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۲ تا ۳٪- در زمینه ۱۵ تا ۲۰٪- هورنبلند ۱۰ تا ۱۲٪- پتاسیم فلدسپات ۴ تا ۵٪- پلاژیوکلاز ۲۵ تا ۳۰٪
سری ایلمنیت	گرانیت پورفیری	پورفیری- زمینه درشت- فنوکریست: (۱۰٪) کوارتز- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۲۵ تا ۳۰٪- پتاسیم فلدسپات ۱ تا ۲٪ درشت دانه- ۵۰٪ ریز دانه
سری مگنتیت	مونزونیت پورفیری	پورفیری درشت در زمینه بسیار ریز- فنوکریست: (۱۵ تا ۲۰٪) پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	پلاژیوکلاز ۸ تا ۱۰٪- پتاسیم فلدسپات ۸ تا ۱۰٪
سری مگنتیت	هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزونیت پورفیری	پورفیری با زمینه متوسط- فنوکریست: (۴۰ تا ۴۵٪) کوارتز- بیوتیت- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۳ تا ۴٪- پلاژیوکلاز ۲۰ تا ۲۵٪- پتاسیم فلدسپات ۶ تا ۷٪- بیوتیت ۷ تا ۸٪- هورنبلند ۱٪
سری مگنتیت	دیوریت پورفیری	پورفیری دانه ریز- فنوکریست: (۲ تا ۳٪) پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	پلاژیوکلاز به صورت فنوکریست ۲٪- در زمینه تا ۶۰٪- پتاسیم فلدسپات تا ۱٪
سری مگنتیت	هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری	پورفیری با زمینه بسیار دانه درشت- فنوکریست: (۳۰ تا ۳۵٪) بیوتیت- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۸-۱۰٪- پلاژیوکلاز ۵۰-۵۷٪- پتاسیم فلدسپات ۵-۱۰٪- بیوتیت ۱۵-۲۰٪- هورنبلند ۲-۳٪
سری مگنتیت	بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری	پورفیری- سریایت- فنوکریست: کوارتز- بیوتیت- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	پلاژیوکلاز ۳۵ تا ۴۰٪- پتاسیم فلدسپات ۳ تا ۵٪- بیوتیت ۱۰ تا ۱۵٪- هورنبلند ۸ تا ۱۰٪
سری مگنتیت	هورنبلند بیوتیت گرانودیوریت پورفیری	پورفیری- زمینه درشت بلور- فنوکریست: (۶۵ درصد) کوارتز- بیوتیت- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۱۵ تا ۲۰٪- پلاژیوکلاز ۴۵ تا ۵۰٪- پتاسیم فلدسپات ۱۰ تا ۱۵٪- بیوتیت ۷ تا ۸٪- هورنبلند ۳ تا ۴٪
سری مگنتیت	هورنبلند دیوریت پورفیری	پورفیری با زمینه تراکیتی ریز و فنوکریستها شامل: (۱۰ تا ۱۲٪) هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	پلاژیوکلاز ۴ تا ۵٪- پتاسیم فلدسپات- هورنبلند بیش از ۱٪
سری مگنتیت	هورنبلند گرانیت تا گرانودیوریت پورفیری	پورفیری- گرافیکی- فنوکریست: (۶۰٪) کوارتز- بیوتیت- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۲۰ تا ۲۵٪- بیوتیت- هورنبلند ۷ تا ۸٪- پتاسیم فلدسپات ۲۰ تا ۲۵٪- پلاژیوکلاز ۴۵ تا ۵۰٪
سری مگنتیت	هورنبلند بیوتیت گرانیت	سریایت تا گرانولار- فنوکریست: (۶۰٪) کوارتز- بیوتیت- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۱۵ تا ۲۰٪- بیوتیت ۵ تا ۶٪- هورنبلند ۳ تا ۴٪- پتاسیم فلدسپات ۲۵ تا ۳۰٪- پلاژیوکلاز ۲۵ تا ۳۰٪
سری مگنتیت	بیوتیت گرانیت	سریایت تا دانه‌ای- فنوکریست: (۶۰٪) کوارتز- هورنبلند- پتاسیم فلدسپات- پلاژیوکلاز	کوارتز ۲۵ تا ۳۰٪- هورنبلند ۳ تا ۴٪- فلدسپات قلیایی ۳۵ تا ۴۰٪- پلاژیوکلاز ۲۵ تا ۳۰٪



شکل ۳ نمودار پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی منطقه‌ی شرق کبیرکوه.

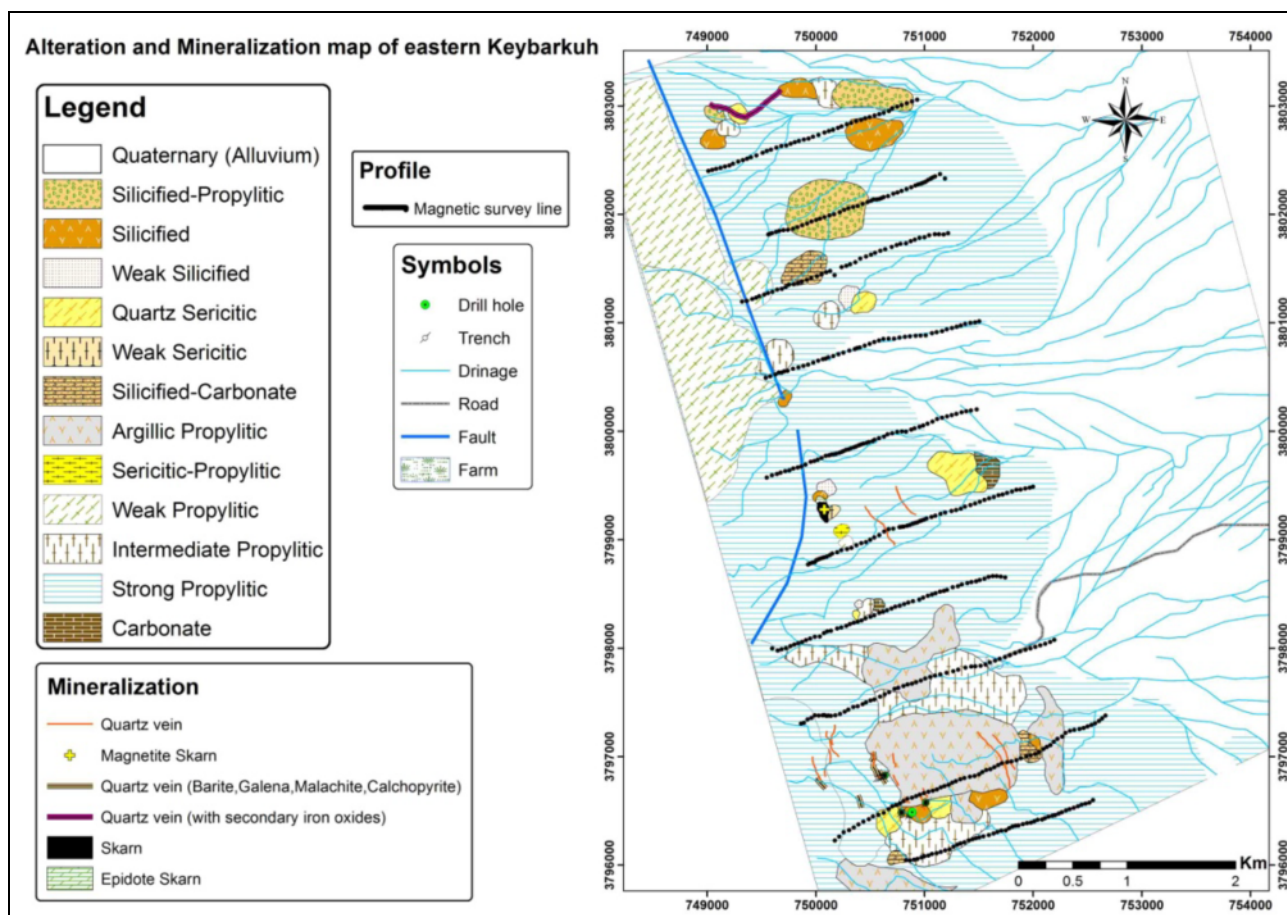
دگرسانی و کانی‌سازی

نقشه دگرسانی با توجه به پردازش تصاویر ماهواره‌ای، برداشت‌های صحرائی و بررسی‌های آزمایشگاهی تهیه گردید (شکل ۴). زون‌های پروپلیتیک با گسترش زیاد تقریباً در کل منطقه، سرسیتیک، آرژیلیک و سیلیسی با گسترش کمتر در جنوب گستره مشاهده می‌شوند. زونبندی دگرسانی‌های آرژیلیک، سیلیسی، سرسیتیک و پروپلیتیک در جنوب منطقه به صورت تقریباً متحدالمرکز بوده، بطوریکه زون آرژیلیک و سیلیسی در مرکز و سرسیتیک و پروپلیتیک در اطراف و با طرح نیمه مدور مشاهده می‌شود (شکل ۴).

اپیدوت اسکارن و مگنتیت اسکارن با رخنمون اندک در برخوردگاه توده‌های هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری و هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری با آهک در مرکز

گستره (که رخنمون بسیار کمی در سطح دارد) تشکیل شده است (شکل ۴).

کانی‌سازی پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، گالن و باریت در جنوب منطقه شناسایی شد. با توجه به حضور کانی‌سازی‌های سولفیدی مس، سرب و روی در واحدهای هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزونیت پورفیری و مونزونیت پورفیری و همچنین دگرسانی در آنها می‌توان گفت که این واحدها که مربوط به سری اکسیدان هستند، ایجاد کننده دگرسانی و کانی‌سازی می‌باشند. در سیستم‌های پورفیری دارای کانی‌سازی، زونبندی متحدالمرکز در اثر گسترش سیستم‌های دگرسانی گرمایی و گسترش یا نابودی مگنتیت ثانویه در زون‌های دگرسانی ایجاد می‌شود، که در زون پتاسیک مگنتیت ایجاد می‌گردد و در زون‌های آرژیلیک و سرسیتیک مگنتیت از بین می‌رود [۶، ۷].



شکل ۴ موقعیت نیمرخ‌های برداشت شده بر روی نقشه دگرسانی و کانی‌سازی شرق کبیرکوه.

مغناطیس‌سنجی زمینی به منظور پی‌جویی منطقه‌ای، انجام شد.

بحث و بررسی

مغناطیس‌سنجی

بررسی‌های مغناطیس‌سنجی زمینی در دو مرحله برداشت‌های صحرائی و بررسی‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. برداشت مغناطیس‌سنجی با نیمرخ‌هایی عمود بر واحدهای زمین‌شناسی منطقه (شامل سنگ‌های دگرگونی و نفوذی‌های مختلف) طراحی گردید. تعداد ۱۰ نیمرخ با راستای شمال‌شرق- جنوب- غرب و فاصله‌های ۵۰۰ تا ۶۰۰ متر با طول تقریباً ۲ تا ۳ کیلومتر و فاصله‌های ایستگاه ۲۵ و ۵۰ متر برداشت شد. محل نیمرخ‌ها بر روی نقشه دگرسانی منطقه در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در مجموع ۵۲۶ نقطه برداشت شد. شدت میدان مغناطیسی اصلی در منطقه مورد بررسی ۴۸۰۰۰ گاما در نظر گرفته شده است. جهت انجام تصحیحات روزانه میدان

بسیاری از سیستم‌های پورفیری مس یک ناهنجاری مغناطیسی همراه با زایش مگنتیت گرمابی در بخش‌های دگرسانی پتاسیک نشان می‌دهند [۸]. این زون غالباً بوسیله زون دگرسانی فیلیک که مگنتیت در آن از بین رفته است، احاطه شده است [۹]. در نتیجه بیهنجاری غالباً به صورت یک شکل مدور تا نیمه مدور مغناطیس بالا، که با بخش مغناطیس پایین، احاطه شده است، مشاهده می‌شود [۷]. این حالت به عنوان مثال در کانسار Bajo del la Reko Diq در پاکستان [۱۰]، کانسار Alumbra [۱۱] و Grasberg [۱۲] دیده می‌شود. با توجه به تشابه انواع توده‌های نفوذی، زون‌های دگرسانی و کانی-سازی‌های موجود در منطقه با سیستم‌های پورفیری شناخته شده فوق‌الذکر، احتمال حضور نهشته معدنی در حد اقتصادی در منطقه دور از تصور نیست. با توجه به اینکه زون پتاسیک در سطح دیده نمی‌شود، به منظور شناسایی و دستیابی به اطلاعات عمقی و گسترش توده‌های نفوذی مولد کانی‌سازی عملیات

مغناطیسی و پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به نیمرخ‌های برداشت، بدون کسر میدان اصلی ترسیم و مورد مقایسه قرار گرفت. از مقایسه نمودارهای پذیرفتاری مغناطیسی و شدت کل میدان مغناطیسی، به طور نسبی عمیق یا کم عمق بودن منبع بی‌هنجاری را می‌توان دریافت. بدین صورت که در محل‌هایی که میزان پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های سطحی و شدت کل میدان مغناطیسی بالا است، منبع بی‌هنجاری به سطح نزدیک و در جاهایی که پذیرفتاری پایین و شدت کل میدان مغناطیسی بالا است، عمق منبع ناهنجاری بیشتر می‌باشد [۱۴]. در نیمرخ‌های انتخاب شده در هر نمودار افزایش‌هایی مشاهده می‌شوند که به عنوان ناهنجاری شدت کل میدان مغناطیسی در روی این نیمرخ‌ها محسوب می‌شوند. با توجه به میزان شدت کل میدان مغناطیسی و فاصله‌های مشخص شده بر روی این نیمرخ‌ها می‌توان محل و گسترش ناهنجاری‌های مورد نظر را مشخص نمود. نیمرخ P5 در زیر به عنوان مثال ارائه شده است.

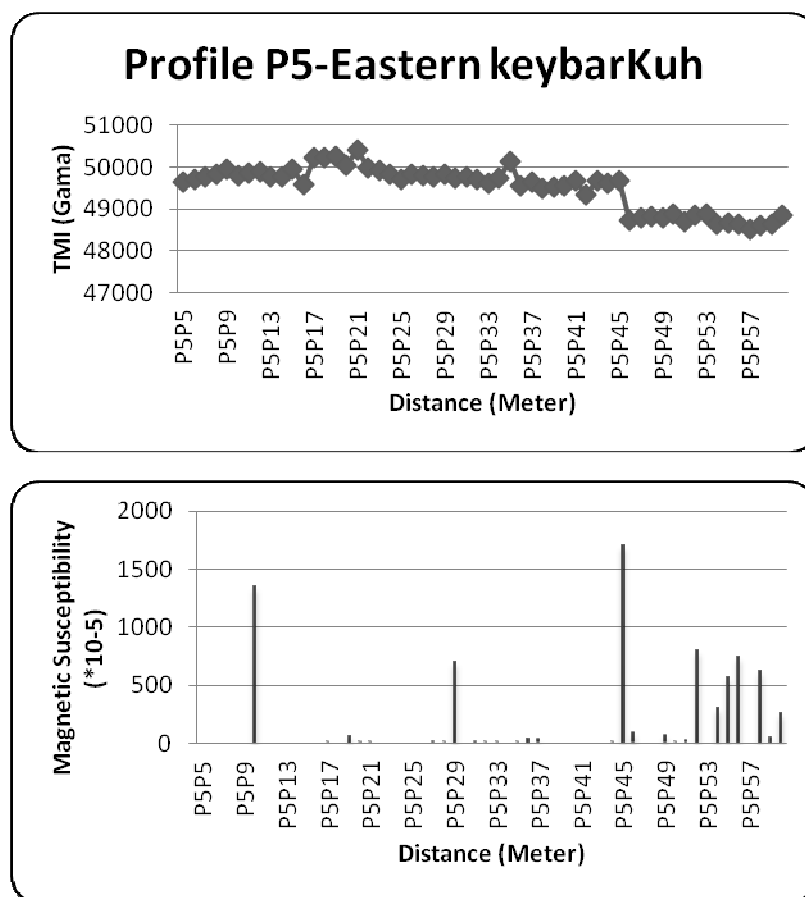
نیمرخ P5 با راستای NE-SW، به طول ۲۰۵۰ متر در ۵۶ نقطه و از شمال شرق به جنوب غرب برداشت شده است (شکل ۵). شدت کل میدان مغناطیسی در این نیمرخ بین ۴۸۵۳۰ تا ۵۰۴۲۱ گاما و پذیرفتاری مغناطیسی در ۲۵ نقطه از $1 \times 10^{-5} \text{SI}$ تا $1700 \times 10^{-5} \text{SI}$ متغیر است. شدت کل میدان مغناطیسی از نقطه P5P5 تا P5P45 به سمت جنوب غرب افزایشی از ۴۹۶۰۰ تا ۵۰۴۰۰ را نشان می‌دهد. با مقایسه نیمرخ شدت کل میدان و پذیرفتاری مغناطیسی، در نقطه P5P10، در قسمت شمال شرقی، در نقطه P5P29 در قسمت میانی و جنوب غربی، نیمرخ‌ها تقریباً با یکدیگر هماهنگی دارند. به این معنی که هم شدت میدان و هم پذیرفتاری مغناطیسی بالا است. بنا بر این منبع بی‌هنجاری نزدیک به سطح واقع شده است. ولی در بخش شمال شرقی و میانی پذیرفتاری مغناطیسی مقدار کمی را نشان می‌دهد، در حالیکه شدت میدان بالاست، که می‌تواند نشانه‌ی عمق زیاد چشمه بی‌هنجاری باشد (شکل ۵).

مغناطیسی برداشت به صورت Loop انجام گردید. مغناطیس‌سنج مورد استفاده در این تحقیق از نوع پروتون چرخشی مدل ENVI با دقت ۰/۱ گاما ساخت شرکت سینترکس کانادا و متعلق به بخش زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد بوده است. انتخاب روش ژئوفیزیکی مناسب و تعبیر و تفسیر صحیح نتایج آن مستلزم آگاهی دقیق از زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی است.

همزمان با اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی اصلی در هر نقطه پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌ها و زون‌های کانی‌سازی نیز اندازه‌گیری شدند. دستگاه پذیرفتاری سنج مورد استفاده در این تحقیق مدل GMS2 با دقت 10^{-5}SI ، ساخت شرکت سینترکس کانادا و متعلق به بخش زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد بوده است. در مجموع در ۳۴۲ نقطه پذیرفتاری اندازه‌گیری شدند. دامنه تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در منطقه، از 10^{-5}SI تا $1 \times 10^{-4} \text{SI}$ است. پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده بر روی رخنمون‌های سنگی موجود در طول نیمرخ‌ها (شکل ۵) به عنوان سنگ همراه در مقایسه با برخی نقاط اندازه‌گیری شده در همان راستا، اختلاف قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند، که منعکس کننده وجود مگنتیت بالا در آن نقاط می‌باشد.

در منطقه مورد بررسی میدان مغناطیسی اصلی زمین با استفاده از نقشه‌های مغناطیس هوایی سازمان زمین‌شناسی [۱۳]، ۴۸۰۰۰ گاما در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر بالاتر یا کمتر از این مقدار ناهنجاری محسوب می‌شوند. بر پایه گزارش پایگاه مغناطیس‌سنجی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی و اتمسفری آمریکا^۱ تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از فعالیت‌های خورشیدی، در طول زمان برداشت (روزهای ۷ تا ۲۱ مهر ماه سال ۱۳۸۸) آرام و ناچیز بوده است.

پس از انجام تصحیح روزانه بر روی داده‌های حاصل از مغناطیس‌سنجی زمینی، نیمرخ شدت کل میدان



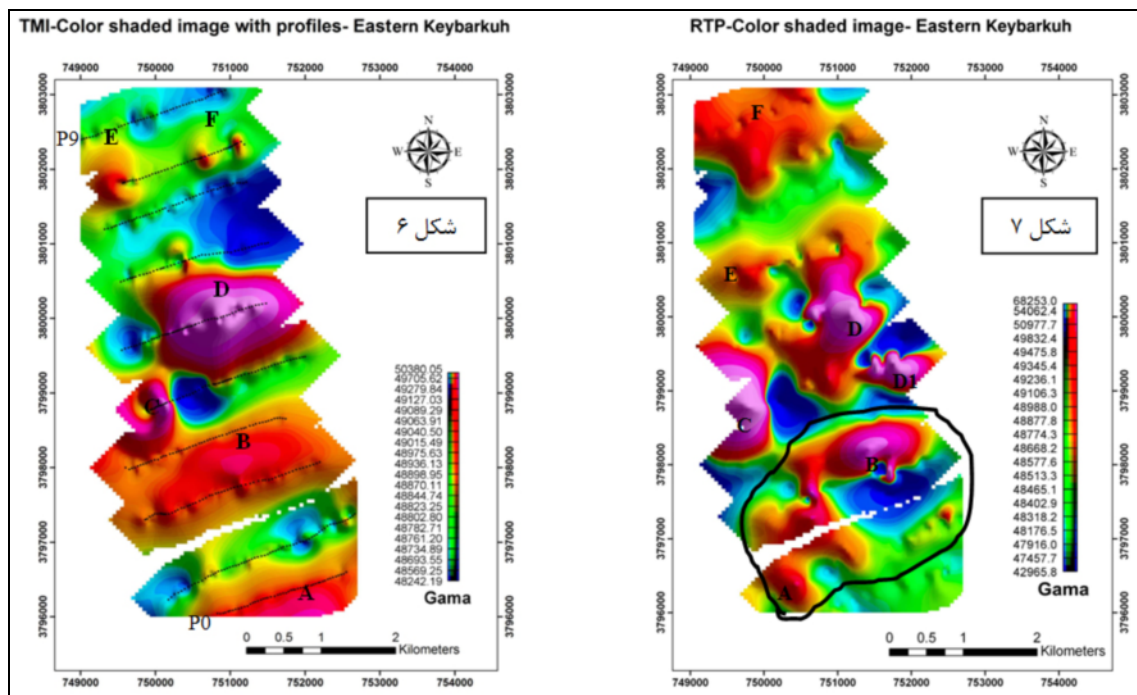
شکل ۵ نیمرخ شدت کل میدان مغناطیسی و پذیرفتاری مغناطیسی (Profile P5).

تقریباً مدور و با ابعاد 300×250 متر نمایش داده شده است (شکل ۶). ناهنجاری F در بخش شمال شرقی گستره به صورت دو بیهنجاری کوچک و مدور و با ابعاد 150×150 متر و 100×100 متر مشخص شده‌اند (شکل ۶). البته مکان واقعی این بیهنجاری‌ها پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب مشخص می‌شود، که در شکل ۷ نمایش داده شده است.

برای دستیابی به محل واقعی بیهنجاری‌ها از نقشه انتقال به قطب (RTP) (Rotation to the pole)، با اعمال زاویه‌ی میل و انحراف مربوط به منطقه‌ی مورد بررسی، استفاده شد [۱۵]. از آنجا که میل و انحراف مغناطیسی باعث می‌شود بیهنجاری‌های مغناطیسی نسبت به چشمه ایجاد کننده خود انحراف داشته باشند، فیلتر RTP روی داده‌های مغناطیسی اعمال می‌شود. تفسیر اصلی از مجموعه داده‌های مغناطیسی روی داده‌های انتقال داده شده به قطب صورت می‌گیرد [۱۶، ۱۷]. مقادیر زاویه میل و انحراف برای منطقه‌ی مورد بررسی به ترتیب 52.3 و 2.9 درجه به دست آمد. با بررسی نقشه‌ی انتقال یافته به قطب تهیه شده، و مقایسه آنها با نقشه TMI میزان جابجایی

تهیه‌ی نقشه‌های مغناطیسی و بکارگیری فیلترهای مختلف توسط نرم افزار Oasis Montaj 6.4.1 صورت گرفت. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMI) به صورت Color shaded در منطقه‌ی شرق کیبرکوه به همراه روند نیمرخ‌های برداشت و محل ناهنجاری‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. در این نقشه ناهنجاری‌ها به رنگ قرمز تا بنفش و با ابعاد مختلف آشکارسازی، و با حروف A، B، C، D، E و F مشخص شده‌اند. در جنوب منطقه بیهنجاری A با ابعاد 1000×250 متر و با روند شمال شرق- جنوب غرب مشخص شده است (شکل ۶).

بیهنجاری B نیز در جنوب با ابعاد 1000×400 متر و با روند شمال شرقی- جنوب غربی امتداد یافته است (شکل ۶). بیهنجاری C در غرب، گستره مورد بررسی و به شکل تقریباً مدور و با ابعاد 500×500 متر، واقع گردیده است (شکل ۶). بیهنجاری D در بخش مرکزی، گستره با ابعاد 1700×1200 متر و به صورت یک بیضوی مشخص شده است (شکل ۶). بیهنجاری E در شمال غرب منطقه‌ی مورد بررسی، به شکل



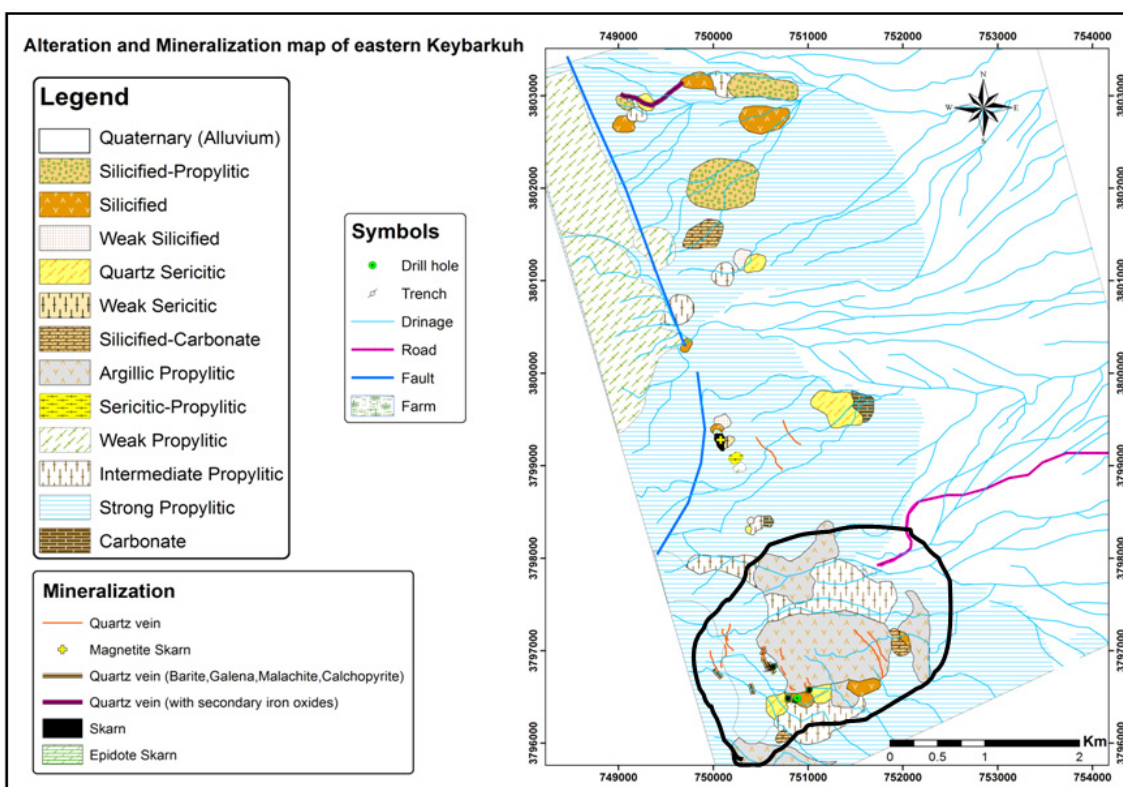
شکل ۶ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی Color shaded همراه با نیمرخ‌های برداشت مغناطیسی و بیهنجاری‌های مشخص شده در منطقه شرق کبیرکوه.

شکل ۷ نقشه‌ی انتقال یافته به قطب مربوط به منطقه‌ی شرق کبیرکوه به همراه بیهنجاری‌های مشخص شده روی آن. بخش مشخص شده در جنوب منطقه‌ی بیهنجاری-های منطبق با دگرسانی‌های مشاهده شده است.

بیهنجاری F در بخش شمال شرقی گستره که در نقشه TMI به صورت دو بیهنجاری کوچک و مدور و با ابعاد 150×150 متر و 100×100 متر آشکارسازی شده بود، در نقشه RTP گسترش زیادی یافته و ابعاد آن به 1000×800 متر رسیده است (شکل ۷). بیهنجاری D نیز با زون اسکارن در نقشه‌ی دگرسانی همخوان است (شکل ۷ و ۸).

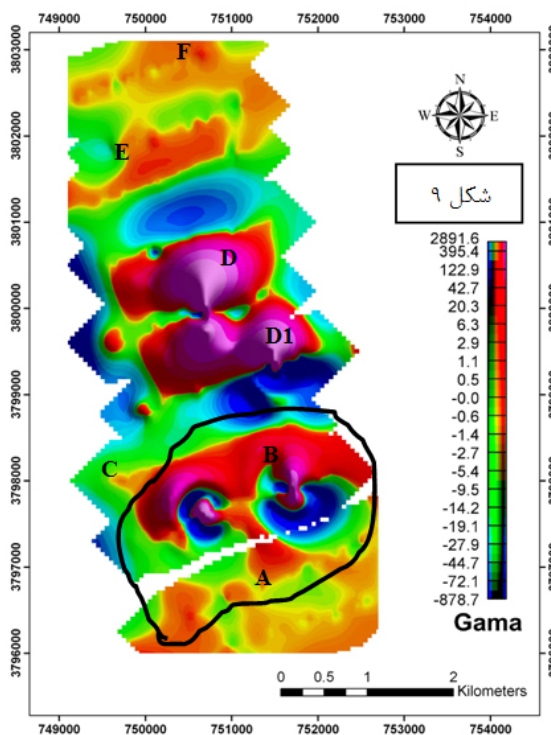
فیلتر مشتق اول قائم (گرادیان عمودی) اثر بیهنجاری‌های عمیق با بسامد پایین را حذف کرده و تأثیر منابع کم‌عمق با بسامد بالا را به نمایش درمی‌آورد [۱۸، ۱۹]. با بررسی نقشه گرادیان عمودی تهیه شده (شکل ۹) اثرهای مغناطیسی نزدیک به سطح در محل بیهنجاری‌های منطقه شرق کبیرکوه مشاهده می‌شوند. در جنوب منطقه، بیهنجاری A به سمت شرق اثر سطحی نشان می‌دهد و با توجه به این نقشه، سطحی بودن عمق بالای چشمه‌ی بیهنجاری مشاهده می‌شود (شکل ۹). بیهنجاری B به سمت غرب پاسخ سطحی دارد و نشان دهنده‌ی آن است که عمق بالای چشمه‌ی بیهنجاری نزدیک سطح است (شکل ۹). اثر بیهنجاری C

بیهنجاری‌ها در نقشه تهیه شده، مشاهده می‌شود (شکل ۷). در جنوب منطقه، بیهنجاری A به صورت نعل اسبی با ابعاد 1000×250 متر و 800×200 متر (دو سر نعل اسبی) با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و متصل به بیهنجاری B مشخص شده است (شکل ۷). بیهنجاری B نیز در جنوب با ابعاد 1000×400 متر و با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی، نسبت به نقشه‌ی TMI، مقداری به سمت شمال شرق جابجا شده است (شکل ۷). بیهنجاری C در غرب گستره مورد بررسی به سمت شمال و غرب جابجایی نشان می‌دهد و به همان شکل تقریباً مدور ولی ابعاد گسترده‌تر در حدود 1000×500 متر، دارد (شکل ۷). بیهنجاری D در بخش مرکزی گستره به دو قسمت (D, D1) جدا شده است و نسبت به نقشه‌ی TMI به سمت شمال و شرق جابجایی نشان می‌دهد. ابعاد بیهنجاری D 1500×800 متر و بیهنجاری D1 700×400 متر و به صورت اشکال نامنظم مشخص شده است (شکل ۷). ناهنجاری E در شمال غرب منطقه مورد بررسی، نسبت به نقشه TMI به سمت جنوب جابجا شده است. شکل آن تقریباً مدور و ابعادش در حدود 500×350 متر نمایش داده شده است (شکل ۷).



شکل ۸ نقشه دگرسانی منطقه شرق کبیرکوه. قسمت مشخص شده در جنوب منطقه، دگرسانی‌های منطبق با بیهنجاری‌های مشاهده شده است که الگوی مشابه با سیستم‌های مس پورفیری را نشان می‌دهد.

1VD-Color shaded image- Eastern Keybarkuh

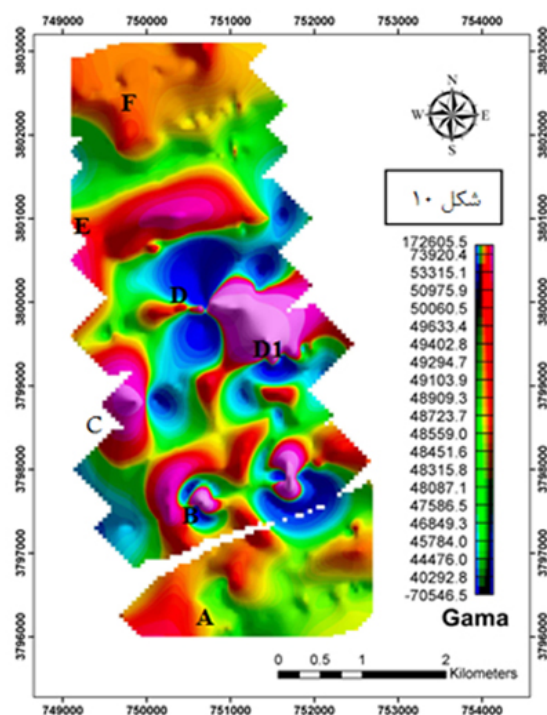


شکل ۹ نقشه‌ی مشتق اول قائم وابسته به منطقه شرق کبیرکوه به همراه بیهنجاری‌های مشخص شده روی آن.

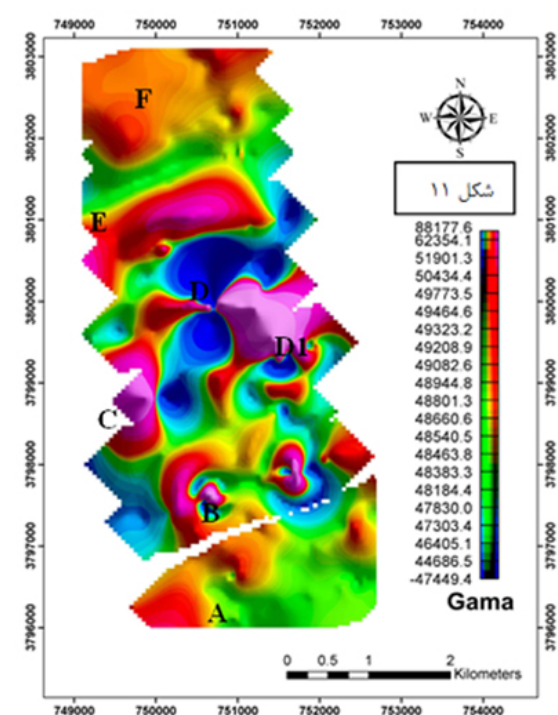
برای بررسی منابع عمیق، نقشه فراسو یا ادامه به سمت بالا (Upward continuation Map)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فیلتر اثر بیهنجاری‌های سطحی با بسامد بالا را تضعیف، و به این طریق اثر بیهنجاری‌های عمیق‌تر را بهتر آشکار می‌سازد [۱۷]. این نقشه‌ها برای ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر تهیه شدند که نقشه‌های ۱۰ و ۳۰۰ متر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده‌اند. در جنوب منطقه، بیهنجاری A در ارتفاع‌های مختلف به سمت شمال غربی کمی گسترش عمیق نشان می‌دهد و با توجه به این نقشه‌ها، عمیق بودن چشمه‌ی بیهنجاری در بخش کوچکی از شمال غربی این بیهنجاری مشاهده می‌شود (شکل ۱۰ و ۱۱). گسترش عمیق بیهنجاری B در عمق‌های مختلف به سمت غرب وجود دارد و به چند بخش تقسیم شده است. با توجه به این نقشه‌ها عمیق بودن این بیهنجاری در چند بخش دیده می‌شود (شکل ۱۰ و ۱۱). اثر بیهنجاری C در ارتفاع‌های مختلف در غرب گستره‌ی مورد بررسی نسبت به نقشه RTP کمی کوچکتر شده، و با توجه به این نقشه‌ها در عمق بودن قسمتی از چشمه

در غرب گستره مورد بررسی، نسبت به نقشه‌ی RTP بسیار کوچک شده، که نمایانگر عمیق بودن چشمه‌ی بیهنجاری است (شکل ۹). بیهنجاری D در بخش مرکزی گستره نسبت به نقشه‌ی RTP به سمت شمال و غرب پاسخ دارد و اثر بیهنجاری D1 در نقشه‌ی گرادیان عمودی از بین رفته است، که نمایانگر در عمق بودن چشمه‌ی بیهنجاری است (شکل ۹). بیهنجاری E در شمال غربی منطقه مورد بررسی، دارای اثر سطحی است، که به این ترتیب عمق بالای چشمه‌ی این بیهنجاری نیز نزدیک سطح واقع شده است (شکل ۹). بیهنجاری F در بخش شمال و شمال شرقی گستره نیز دارای اثر سطحی بود، بنابراین عمق بالای این بیهنجاری نیز نزدیک به سطح است (شکل ۹). با مقایسه‌ی نقشه‌ی گرادیان عمودی با نقشه‌های زمین‌شناسی و دگرسانی، سطحی بودن بیهنجاری‌های A و B هم مکان با توده‌های نفوذی و دگرسانی ایجاد شده آنها، همخوانی خوبی نشان می‌دهند (شکل‌های ۲، ۸ و ۹). البته به دلیل فاصله‌های زیاد (۶۰۰ تا ۷۰۰ متر) بین خطوط برداشت مغناطیس‌سنجی، بیهنجاری‌های مغناطیسی در این بخش‌ها بر چندین توده نفوذی منطبق همخوانند (شکل‌های ۲، ۷ و ۹).

Upward 10-Color shaded image- Eastern Keybarkuh



Upward 300-Color shaded image- Eastern Keybarkuh



شکل ۱۰ - ۱۱ نقشه فراسو (ادامه به سمت بالا)، برای ارتفاع ۱۰ متر و ۳۰۰ متر مربوط به منطقه شرق کبیرکوه.

بیهنجاری مشاهده می‌شود (شکل ۱۰ و ۱۱). بیهنجاری D در بخش مرکزی گستره نسبت به نقشه‌ی RTP در نقشه‌های ارتفاع‌های مختلف به سمت شرق پاسخ دارد و به بیهنجاری D1 وصل شده است. به نظر می‌رسد که چشمه‌ی بیهنجاری D و D1 در عمق بهم می‌پیوندند. در این نقشه‌ها در عمق بودن چشمه‌ی بیهنجاری مشاهده می‌شود (شکل ۱۰ و ۱۱). بیهنجاری E در شمال غربی منطقه مورد بررسی، با توجه به نقشه‌های ارتفاع‌های مختلف فراسو، دارای اثرهای عمقی گسترده‌ای است، که به سمت جنوب و شرق گسترش دارد (شکل ۱۰ و ۱۱). بیهنجاری F در بخش شمال و شمال شرقی گستره نیز دارای اثرهای عمیقی بوده و گسترش این بیهنجاری در نقشه‌های مختلف فراسو در اعماق مختلف، به سمت شمال شرق دیده می‌شود (شکل ۱۰ و ۱۱). در بررسی نقشه‌های ادامه به سمت بالای منطقه، از ارتفاع ۱۰ متر تا ۳۰۰ متر اثر بیهنجاری‌های A، B و C مقدار کمی کوچکتر و اثر بیهنجاری‌های D1، D و E تغییر چندانی نکرده ولی اثر بیهنجاری F مقداری افزایش یافته است (شکل ۱۰ و ۱۱).

برداشت

براساس پذیرفتاری مغناطیسی گرانیته‌ی‌های سری ایلمینیت (احیایی) و سری مگنتیت (اکسیدان) در منطقه شناسایی شدند. در بخش جنوبی منطقه، زون‌های دگرسان آرژیلیک، سرسیتیک، پروپلیتیک و سیلیسی به همراه کانی‌سازی پیریت، کالکوپیریت، گالن و باریت شناسایی شدند. قرارگیری زون‌های دگرسان (آرژیلیک در مرکز و پروپلیتیک در حاشیه) طرح مدور تا نیمه مدوری را تشکیل داده است، که مشابه سیستم‌های مس پورفیری است. شکل تقریباً مدور بیهنجاری‌های مغناطیسی در جنوب منطقه، منطقه‌بندی دگرسانی، حضور کانی‌سازی همراه با توده‌های نفوذی سری مگنتیت (اکسیدان) و عیارسنجی عناصر مس (بیش از یک درصد) و طلا (تا ۲/۶۷ گرم در تن) این شباهت را تقویت می‌کند.

محل واقعی بیهنجاری‌ها در نقشه‌ی RTP به دست آمد. در جنوب منطقه، بیهنجاری A به صورت نعل اسبی با روند شمال غربی - جنوب شرقی و به توده‌های نفوذی وابسته است. بیهنجاری B نیز در جنوب و با روند شمال شرقی - جنوب غربی، نسبت به نقشه‌ی TMI، مقداری به سمت شمال شرقی جابجا شده است. این بیهنجاری وابسته به توده‌های نفوذی دارای دگرسانی و کانی‌سازی است. بیهنجاری C در غرب گستره مورد بررسی به سمت شمال و غرب جابجایی نشان می‌دهد و به همان شکل تقریباً مدور است، چشمه‌ی این بیهنجاری با توده‌های نفوذی در ارتباط است و دگرسانی پروپلیتیک در توده‌های این بخش دیده می‌شود. بیهنجاری D در بخش مرکزی گستره به دو بخش جدا شده است (D, D1) و نسبت به نقشه‌ی TMI به سمت شمال و شرق جابجایی نشان می‌دهد و به صورت شکل‌های نامنظم مشخص شده است. این بیهنجاری‌ها منطبق بر بخش اسکارنی و توده‌ها و دایک‌های نیمه‌عمیق‌اند. بیهنجاری E در شمال غربی منطقه‌ی مورد بررسی، نسبت به نقشه‌ی TMI به سمت جنوب جابجا شده است. شکل آن تقریباً مدور دیده می‌شود. بیهنجاری F در بخش شمال شرقی گستره که در نقشه TMI به صورت دو بیهنجاری کوچک و مدور آشکارسازی شده بود، در نقشه RTP گسترش زیادی یافته است. خاستگاه این بیهنجاری‌ها به توده‌های نفوذی موجود در منطقه وابسته است که به شکل استوک و دایک در سنگ‌های رسوبی دگرگون شده نفوذ کرده‌اند این توده‌ها در جنوب منطقه به صورت دگرسان شده و همراه با کانی‌سازی مشاهده می‌شوند.

نقشه مشتق قائم اول نشان دهنده‌ی وجود چشمه بیهنجاری‌های A، B، D، E و F در سطح است. اثر بیهنجاری C در این نقشه بسیار کوچک شده، که نمایانگر در عمیق بودن چشمه بیهنجاری است؛ بیهنجاری D1 از بین رفته است که نمایانگر در عمیق بودن چشمه بیهنجاری است.

با توجه به نقشه‌های ادامه به سمت بالا، بیهنجاری A گسترش عمقی نشان می‌دهد. بیهنجاری B در عمق به چند بخش تفکیک تقسیم شده است. اثر بیهنجاری C در عمق بودن چشمه‌ی بیهنجاری را نشان می‌دهد. بیهنجاری D به بیهنجاری

[4] Ishihara S., "The magnetite-series and ilmenite series granitic rocks", *Mining Geology*, 27 (1977) 293-305.

[5] Ishihara S., "The granitoid series and mineralization", *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, (1981) 458-484.

[۶] کریم‌پور م.ح، ملک‌زاده آ، حیدریان م.ر، "اکتشافات ذخایر معدنی، مدل‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ماهواره‌ای و ژئوفیزیکی"، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۴) ۶۳۶ ص.

[7] Hope M., "Application of automated detection techniques in magnetic data for identification of Cu-Au porphyries", Volume 2010 number 1, ASEG 2010 21st geophysical Conference.

[8] Clark D., French D., Lackie M., Schmidt P., "Magnetic petrology: Application of integrated rock magnetic and petrological techniques to geological interpretation of magnetic surveys", *Exploration Geophysics*, 23 (1992) 65-68.

[9] Sillitoe R., "Gold-rich Porphyry Copper Deposits: Geological Model and Exploration Implications, Mineral Deposit Modelling", Geological Association of Canada, Special Paper 40 (2009) 465-478.

[10] Fletcher T., Rehmann A., Brockway H., Livesey T., Brommecker R., "The discovery and geology of the giant Reko Diq copper-gold porphyry deposit, Chagai Porphyry Copper Belt", Baluchistan, Pakistan, Proceedings of the 2009 NewGenGold Conference, Perth 23-24 November 2009.

[11] Proffett J., "Geology of the Bajo de la Alumbrera Porphyry Copper-Gold Deposit, Argentina", *Economic Geology* vol. 98 (2003) 1535-1574.

[12] Meinert L.D., Hefton K.K., Mayes D., Tasiran I., "Geology, Zonation, and Fluid Evolution of the Big Gossan Cu-Au Skarn Deposit, Ertsberg District, Irian Jaya", *Economic Geology*, vol. 92, no. 5 (1997) 509-534.

[۱۳] یوسفی امام‌قلی، "نقشه شدت کل میدان مغناطیسی ۱:۱۰۰۰۰۰"، برگه شماره ۳، سازمان زمین‌شناسی (۱۳۸۱).

[۱۴] رابینسون ای، اس.، کیت کورو، ترجمه حیدریان شهری، م.ر. ۱۳۸۴، مبانی اکتشافات ژئوفیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد ۷۵۰ ص.

D1 متصل شده است و در عمق بودن چشمه بیهنجاری مشاهده می‌شود. بیهنجاری E و F اثرهای عمقی دارند. در بررسی نقشه‌های ادامه به سمت بالای منطقه، از ارتفاع ۱۰ متر تا ۳۰۰ متر اثر بیهنجاری‌های A و B مقدار کمی کوچکتر شده و اثر بیهنجاری‌های D1، D و E تغییر چندانی نکرده است، ولی اثر بیهنجاری‌های C و F افزایش یافت.

بیهنجاری‌های مغناطیسی A و B در محلی واقع شده‌اند که توده‌های نفوذی مونزونیتی تا دیوریتی باعث ایجاد دگرسانی شدید سیلیسی، آرژیلیکی، سرسیتی و پروپلیتیک به همراه کانی‌سازی مس، سرب، روی و اکسیدهای آهن از جمله مگنتیت و هماتیت شده‌اند. با توجه به بررسی‌های کانی‌شناسی، کانی‌سازی مس سولفیدی در مراحل دما و فشار بالا و پس از کانی‌سازی سرب و روی و باریت در رگچه‌ها تشکیل شده است و منطقه‌بندی مشخصی را نمایش می‌دهد. کانی‌سازی‌ها، طرح و شکل مدور تا نیمه مدور بیهنجاری‌های A و B در نقشه‌ی RTP و همخوان بودن آنها با دگرسانی‌ها، مشابه با شکل و سیستم منطقه‌بندی کانسارهای مس پورفیری است. با توجه به حضور کانی مگنتیت در زون پتاسیک یک سیستم پورفیری، ممکن است پاسخ مغناطیسی بیهنجاری‌های A و B در بخش جنوبی منطقه که منجر به ایجاد بیهنجاری‌های A و B شده است، احتمالاً به این زون‌های پتاسیک در عمق مربوط است که نیاز به برداشت‌های تفصیلی‌تر مغناطیسی دارد. با توجه به حضور چند زون اسکارنی در مرکز گستره و بالا بودن شدت میدان در این بخش احتمال می‌رود که چشمه‌ی بیهنجاری در این بخش که منطبق بر بیهنجاری D است، به یک زون اسکارن آهن که رخنمون کمی در سطح دارد، مربوط باشد.

مراجع

[1] Berberian M., "Against the rigidity of the Lut block, Contribution to the seismotectonics of Iran (Part III)", GSI, No. 40 (1977) 203-227.

[2] Stocklin J., Nabavi M.H., "Tectonic map of Iran. Geological Survey of Iran", (1973).

[۳] بلوریان غ. ح.، صفری م.، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زوزن". استان خراسان رضوی. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۴).

- [17] Nakatsuka T., Okuma S., "Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations", *Exploration Geophysics* 37 (2006) 121-128.
- [18] Gunn P. J., "Workshop Interpretation of aeromagnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology & geophysics*", (1996).
- [19] Cooper G.R.J., Cowan D.R., "Filtering using variable order vertical derivatives", *Computers & Geosciences*, 30 (2004) 455-459.
- [15] Clark D.A., "Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys", *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2) (1997) 83-103.
- [16] Nabighian M.N., Grauch V.J.S., Hansen R.O., LaFehr T.R., Li Y., Peirce J.W., Phillips J.D., and Ruder M.E., "The historical development of the magnetic method in exploration", *GEOPHYSICS*, VOL. 70, NO. 6 (NOVEMBER-DECEMBER 2005): 33ND-61ND.