

مغناطیس‌سنگی زمینی جهت پی‌جویی نهشته‌های معدنی و تعیین گسترش و عمق نسبی توده‌های نفوذی ایجاد کننده دگرسانی و کانی‌سازی در گستره شرق کیبرکوه (جنوب غرب خوف)

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 کیبرکوه در ۷۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان خوف 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 کیبرکوه محدود می‌شود. واحدهای سنگی منطقه عبارتند از: ماسه‌سنگ، شیل، سنگ آهک با سن کربونیفر تا پالوسن، اسلیت، میکاشیست مربوط به پالیوزئیک و مجموعه توده‌های نفوذی با سن کرتاسه تا تریاسی که به شکل دایک و استوک نفوذ کرده‌اند. ترکیب آنها از گرانیت 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 مغناطیس‌سنگی 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 دامنه بیهنجاری مغناطیسی D، بخش مرکزی منطقه پتانسیل برای کانی‌سازی اسکارنی مگنتیت دارد.

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

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

مقدمه منطقه‌ی پی‌جویی کیبرکوه از نظر تقسیمات ساختاری در گوشی شمال شرقی بلوك لوت واقع شده است (شکل ۱). این منطقه در ۷۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان خوف در استان خراسان رضوی قرار گرفته

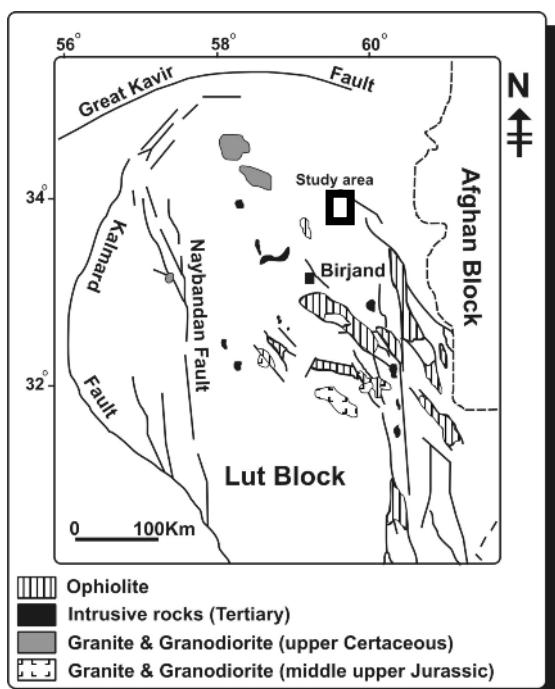
* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۶۶۷۳۶۳۴، نامبر: ۸۷۹۷۲۷۵، پست الکترونیکی: ehsan_salati56@yahoo.com

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.
- تهیی نفشه‌های رقومی زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در منطقه‌ای به گسترش ۶۰ کیلومتر مربع.
- برداشت مغناطیس‌سنگی 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 رخمنون‌های سنگی در طول نیمرخ‌های برداشت مغناطیس‌سنگی.
- ترسیم نمودارهای پذیرفتاری مغناطیسی و تعییر و تفسیر آنها.
- تهیی نفشه‌های مغناطیس‌سنگی و تعییر 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 [۲۱]. 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، آرزیلیک 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، مغناطیس‌سنگی زمینی در منطقه انجام شد. بررسی‌های قبلی که در منطقه انجام شده شامل تهیی نفشه ۱:۱۰۰۰۰ زون [۳] و بررسی‌های ژئوشیمی رسوب‌های آبراهه‌ای برای بخش‌هایی از این ورقه بوده، که توسط سازمان زمین‌شناسی



شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی کیبرکوه در بلوک لوت.

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 منطقهٔ شرقی کیبرکوه 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 ایلمینیت جدایش شدند [۵،۴] (شکل ۳)، (جدول ۱). با توجه به اندازه‌گیری ۱۱۵ نمونه، واحدهای هورنبلند گرانودیبوریت پورفیری، هورنبلند مونزودیبوریت پورفیری و گرانیت پورفیری دارای مقادیر پذیرفتاری پایین و به سری ایلمینیت (احیایی) می‌باشند (شکل ۳). واحدهای مونزونیت پورفیری، هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزونیت پورفیری، دیبوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزودیبوریت پورفیری، بیوتیت هورنبلند مونزونیت پورفیری، هورنبلند بیوتیت گرانودیبوریت پورفیری، هورنبلند پورفیری، هورنبلند گرانیت تا گرانودیبوریت پورفیری، هورنبلند بیوتیت گرانیت و بیوتیت گرانیت، پذیرفتاری بالا داشته و به سری مگنتیت (اکسیدان) وابسته‌اند (شکل ۳).

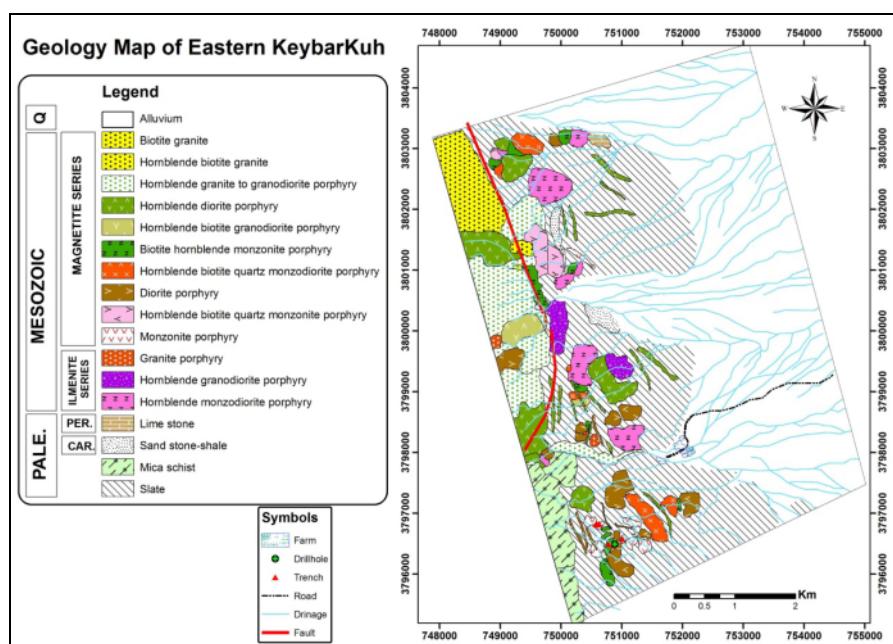
زمین‌شناسی

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

۱- سنگ‌های رسوی که بیشتر در شمال، شمال شرقی و مرکز منطقهٔ رخنمون دارند. این واحدها با سن نسبی کربونیفر تا پالئوسن [۳] عبارتند از ماسه‌سنگ، شیل و سنگ آهک. بیشترین رخنمون سنگ‌های رسوی 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).

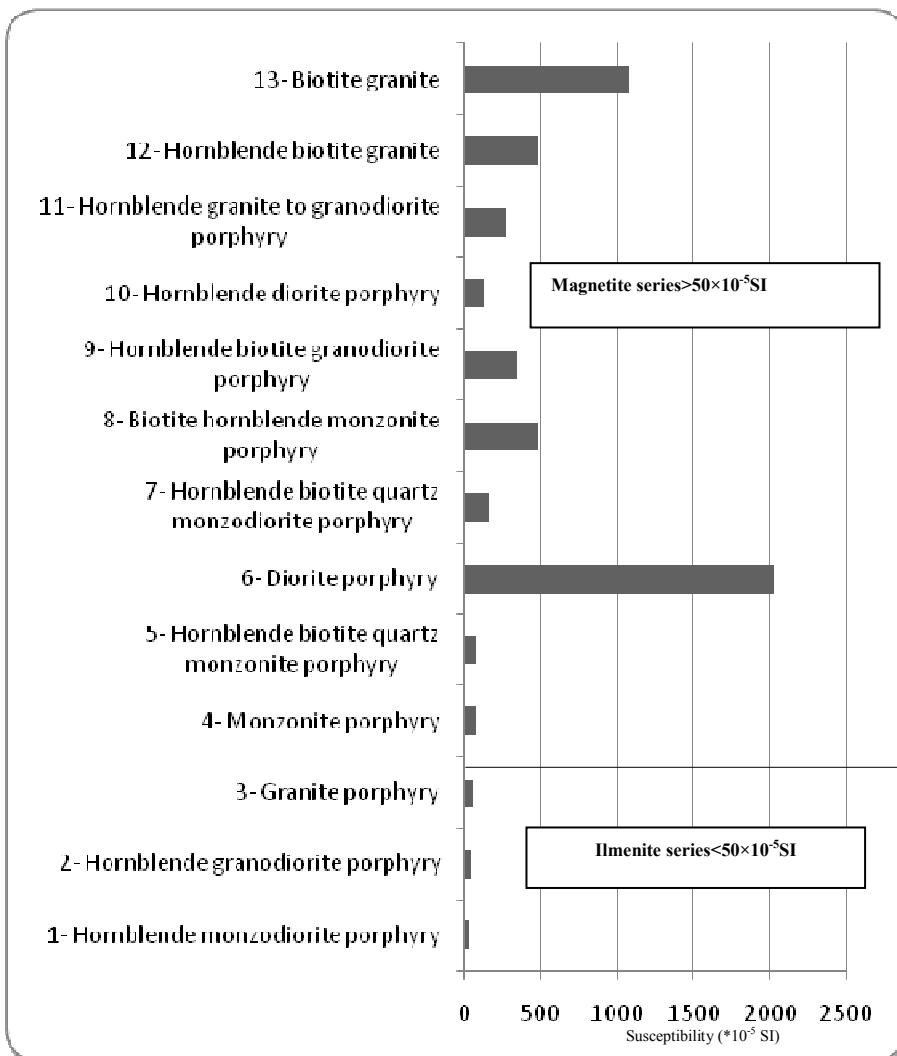
۳- توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق با سن نسبی کرتاسه-ترشیاری [۳]، که در سنگ‌های رسوی و دگرگونی ناحیه‌ای منطقه به شکل دایک و استوک نفوذ کرده‌اند. براساس بررسی‌های انجام شده ۱۳ توده نفوذی در شرق کیبرکوه قابل جدایش است. جدایش توده‌ها برپایه‌ی بافت، ترکیب کانی‌شناسی و درصد کانی‌های فنوکربیست آهن و منیزیم‌دار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



شکل ۲ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقهٔ شرق کیبرکوه.

جدول ۱ توصیف سنگنگاری توده‌های نفوذی منطقه.

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



شکل ۳ نمودار پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی منطقه‌ی شرق کیبرکوه.

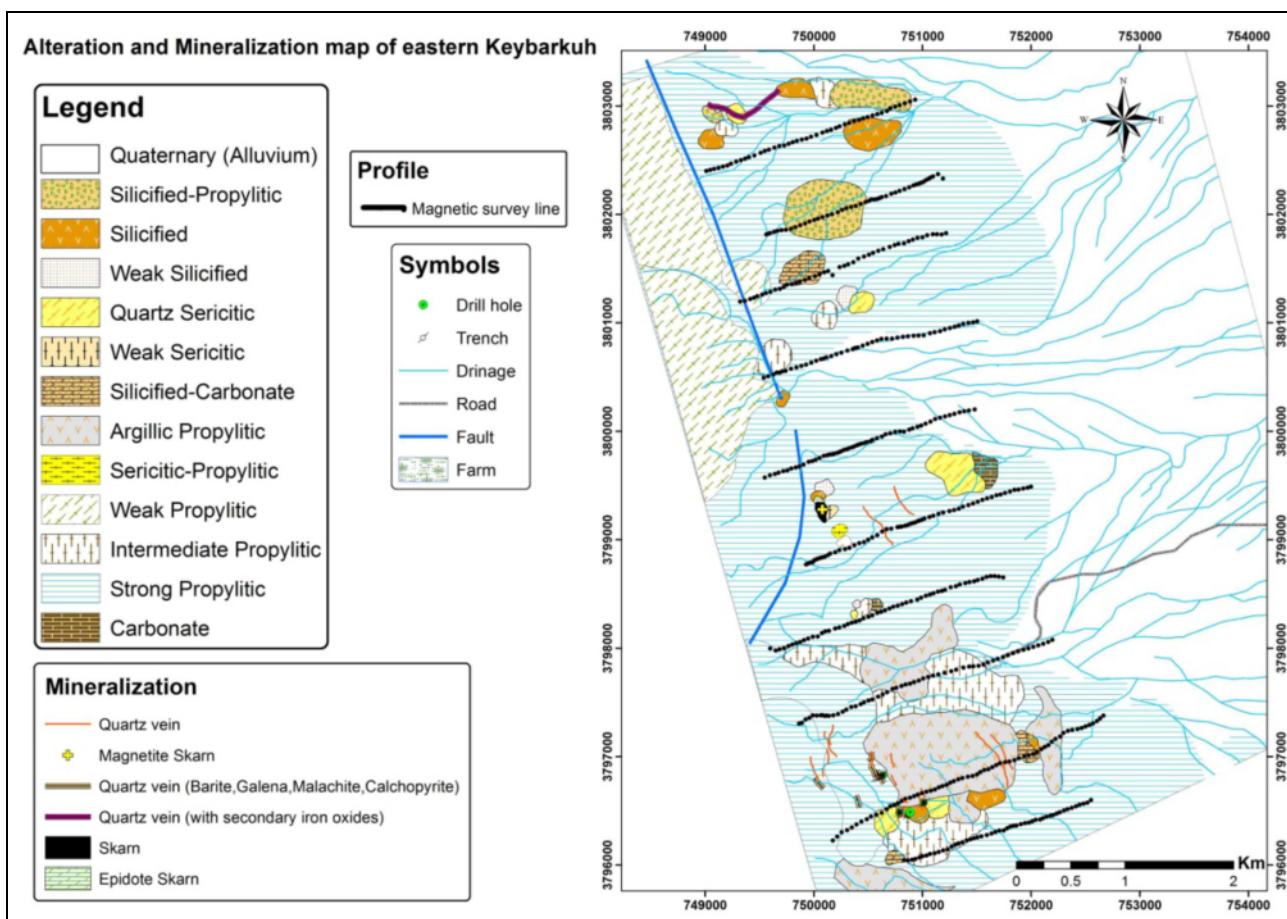
گستره (که رخمنون بسیار کمی در سطح دارد) تشکیل شده است (شکل ۴).

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 متحددالمرکز در اثر گسترش سیستم‌های دگرسانی گرمابی 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].

دگرسانی و کانی‌سازی

نقشه دگرسانی با توجه به پردازش تصاویر ماهواره‌ای، برداشت‌های صحرایی 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 متحددالمرکز بوده، بطوريکه زون آرژیلیک و سیلیسی در مرکز و سرسیتیک و پروپلیتیک در اطراف و با طرح نیمه دور مشاهده می‌شود (شکل ۴).

اپیدوت اسکارن و مگنتیت اسکارن با رخمنون اندک در برخوردگاه توده‌های هورنبلند کوارتز مونزوندیوریت پورفیری و هورنبلند بیوتیت کوارتز مونزوندیوریت پورفیری با آهک در مرکز



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

مغناطیس‌سنگی زمینی به منظور پی‌جویی منطقه‌ای، انجام شد.

بحث و بررسی مغناطیس‌سنگی

بررسی‌های مغناطیس‌سنگی زمینی در دو مرحله برداشت‌های صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. برداشت مغناطیس‌سنگی 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 ایستگاه ۲۵ و ۵۰ متر با طول تقریباً ۲ تا ۳ کیلومتر و فاصله‌های ایستگاه ۵۰۰ تا ۶۰۰ 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 ۴۸۰۰ 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 پتابسیک 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 Alumbrera [۱۱] و Grasberg [۱۲] دیده می‌شود. با توجه به تشابه انواع توده‌های نفوذی، زون‌های دگرسانی و کانی‌سازی‌های 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 پتابسیک 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 بی‌نهنجاری را می‌توان دریافت. بدین صورت که در محل‌هایی که میزان پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های سطحی و شدت کل میدان مغناطیسی بالا است، منبع بی‌نهنجاری 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 افزایش‌های 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 ۴۰۴۲۱ گاما و پذیرفتاری مغناطیسی در نقطه از ۲۵ نقطه از 10^{-5} SI تا 10^{-4} 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 چشم‌های بیهنجاری باشد (شکل ۵).

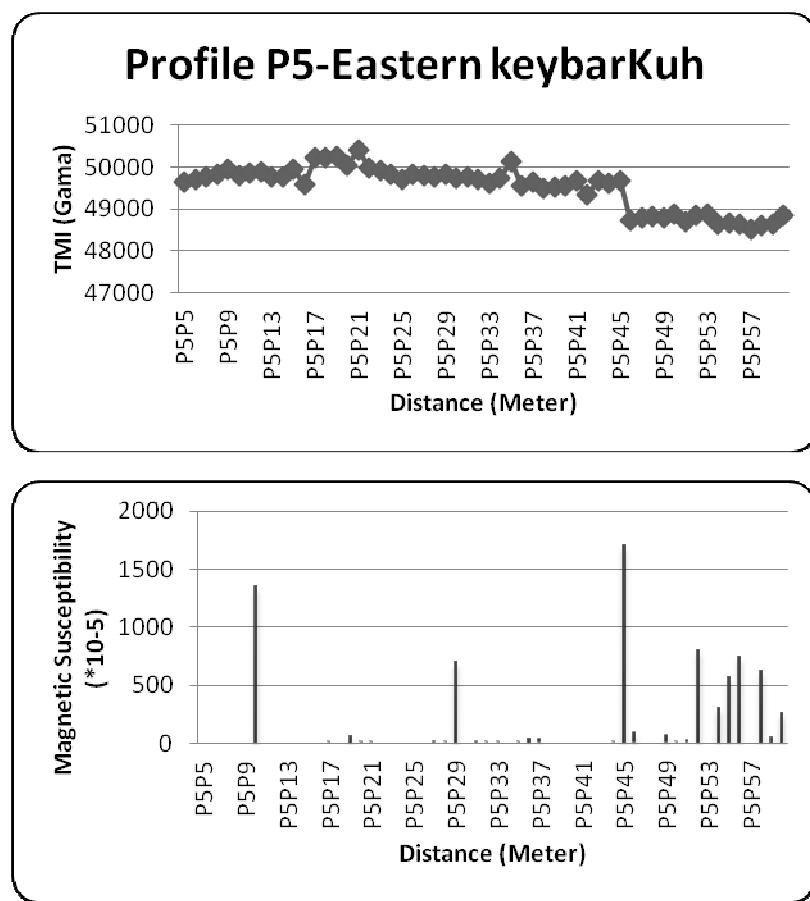
مغناطیسی برداشت به صورت Loop انجام گردید. مغناطیسی- سنج مورد استفاده در این تحقیق از نوع پروتون چرخشی مدل ENVI با دقت ۰/۱ گاما ساخت شرکت سینترکس کانادا و متعلق به بخش زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد بوده است. انتخاب روش ژئوفیزیکی مناسب و تعبیر و تفسیر صحیح نتایج آن مستلزم آگاهی دقیق از زمین‌شناسی منطقه 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^{-4} تا 10^{-3} SI 6160×10^{-4} 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 هواشنی سازمان زمین‌شناسی [۱۳]، ۴۸۰۰ گاما در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر بالاتر یا کمتر از این مقدار ناهنجاری محسوب می‌شوند. بر پایه گزارش پایگاه مغناطیس سنجی 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 مغناطیس سنجی زمینی، نیمرخ شدت کل میدان

1 - National Oceanographic & Atmospheric of America (NOAA).



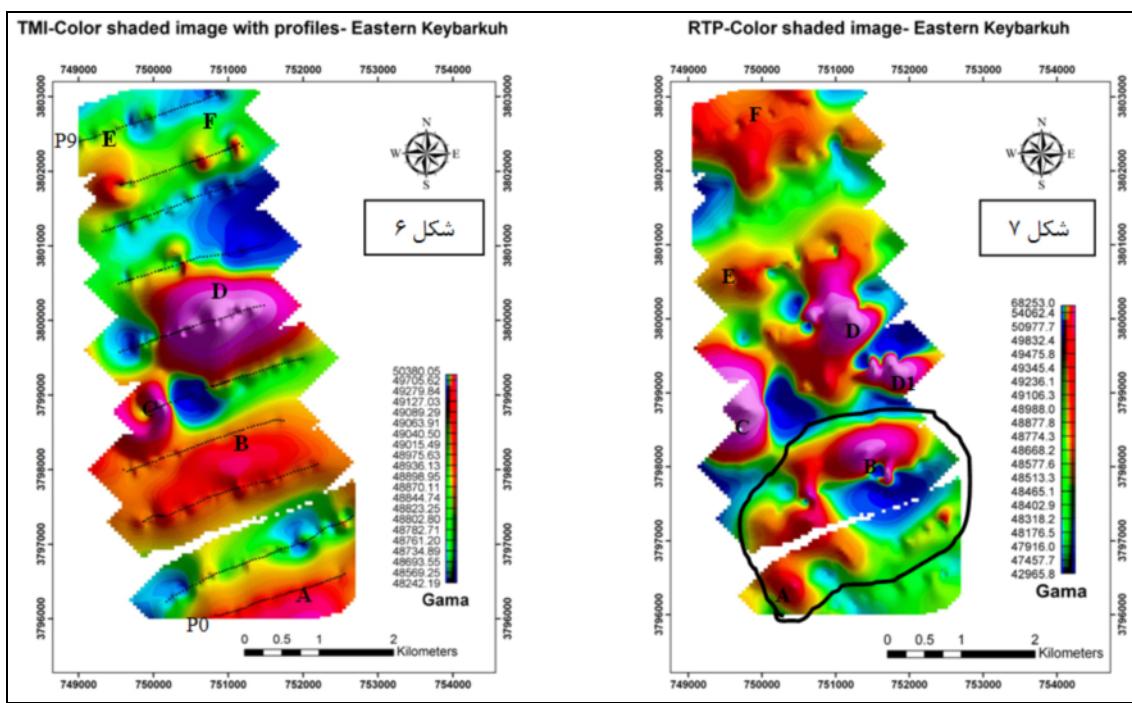
شکل ۵ نیمرخ شد کل میدان مغناطیسی و پذیرفتاری مغناطیسی (Profile P5).

تقریباً دور و با ابعاد ۳۰۰×۲۵۰ متر نمایش داده شده است (شکل ۶). ناهنجاری F در بخش شمال شرقی گستره به صورت دو بیهنجاری کوچک و دور و با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ متر و ۱۰۰×۱۰۰ 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 است.

برای دستیابی به محل واقعی بیهنجاری‌ها از نقشه انتقال به قطب (RTP) (Rotation to the pole)، با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد بررسی، استفاده شد [۱۵]. از آنجا که میل و انحراف مغناطیسی باعث می‌شود بیهنجاری‌های مغناطیسی نسبت به چشمۀ 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 منطقه مورد بررسی به ترتیب $۵۲/۳$ و $۲/۹$ 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 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 F، E، D، C، B، A و مشخص شده‌اند. در جنوب منطقه بیهنجاری A با ابعاد ۱۰۰۰×۲۵۰ متر و با روند شمال شرق-جنوب غرب مشخص شده است (شکل ۶).

بیهنجاری B نیز در جنوب با ابعاد ۱۰۰۰×۴۰۰ متر و با روند شمال شرقی-جنوب غربی امتداد یافته است (شکل ۶). بیهنجاری C در غرب، گستره مورد بررسی و به شکل تقریباً دور و با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر، واقع گردیده است (شکل ۶). بیهنجاری D در بخش مرکزی، گستره با ابعاد ۱۲۰۰×۱۷۰۰ متر و به صورت یک بیضوی مشخص شده است (شکل ۶). بیهنجاری E در شمال غرب منطقه مورد بررسی، به شکل



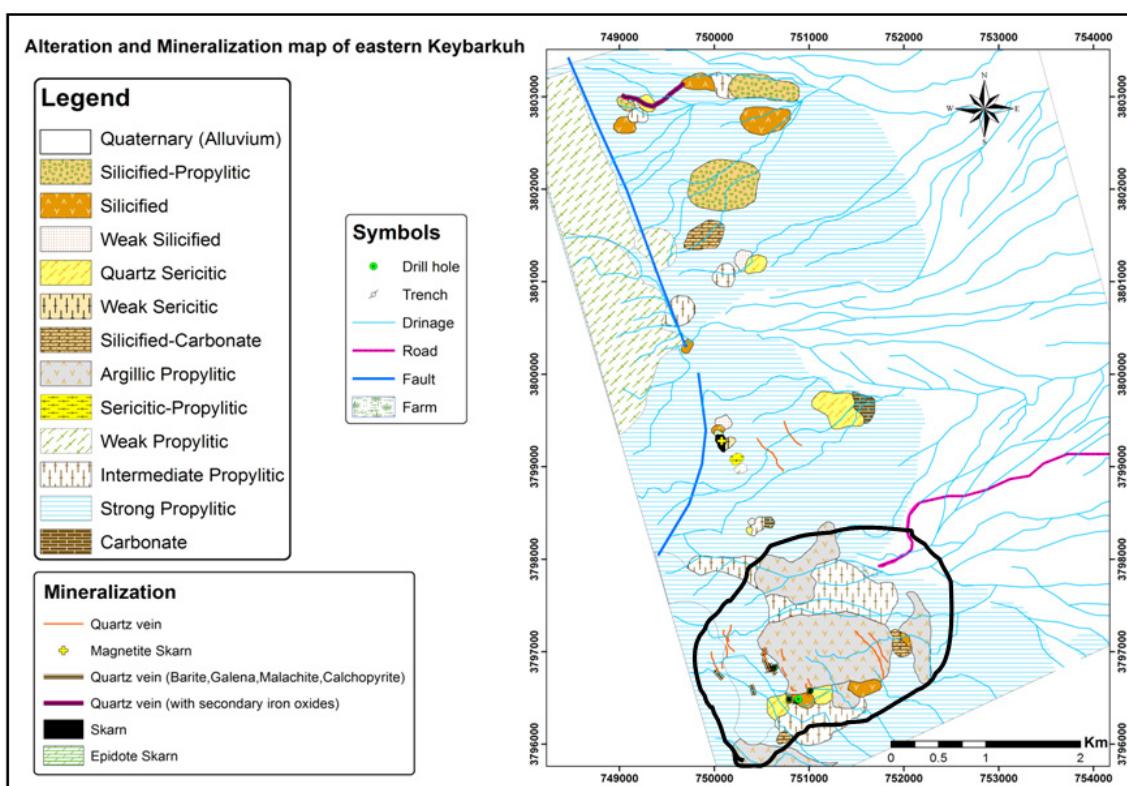
شکل ۶ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی همراه با نیمرخ‌های برداشت مغناطیسی و بیهنجاری‌های مشخص شده در منطقه شرق کیرکوه.

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

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

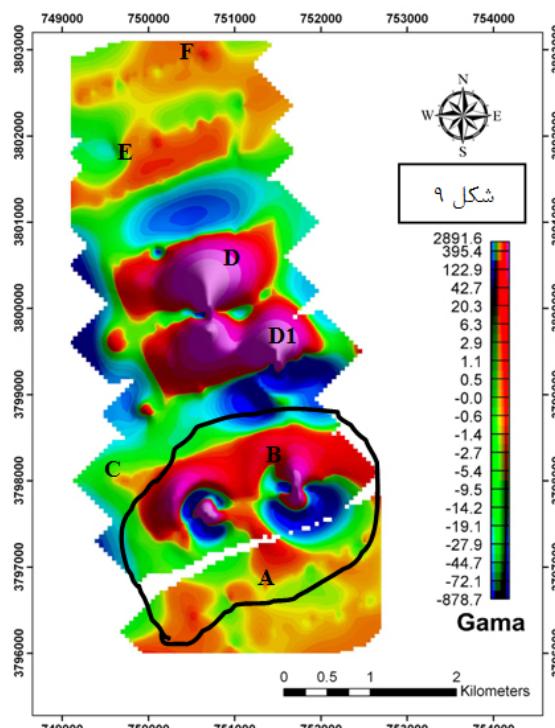
فیلتر مشتق اول قائم (گرadiان عمودی) اثر بیهنجاری‌های عمیق با بسامد پایین را حذف کرده و تأثیر منابع کم عمق با بسامد بالا را به نمایش درمی‌آورد [۱۸، ۱۹]. با بررسی نقشه گرadiان عمودی تهیه شده (شکل ۹) اثرهای مغناطیسی نزدیک به سطح در محل بیهنجاری‌های منطقه شرق کیرکوه مشاهده می‌شوند. بیهنجاری A به سمت شرق اثر در جنوب منطقه، بیهنجاری A به سمت شرق اثر سطحی نشان می‌دهد و با توجه به این نقشه، سطحی بودن عمق بالای چشمهدی بیهنجاری مشاهده می‌شود (شکل ۹). بیهنجاری B به سمت غرب پاسخ سطحی دارد و نشان دهنده‌ی آن است که عمق بالای چشمهدی 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 نقشه TMI، مقداری به سمت شمال‌شرق جابجا شده است (شکل ۷). بیهنجاری C در غرب گستره موردن بررسی به سمت شمال و غرب جابجایی نشان می‌دهد و به همان شکل تقریباً مدور ولی ابعاد گستردگر 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 نقشه TMI به سمت شمال و شرق جابجایی نشان می‌دهد. ابعاد بیهنجاری D اشکال نامنظم مشخص شده است (شکل ۷). ناهنجاری E در شمال غرب منطقه موردن 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 کیبرکوه. 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

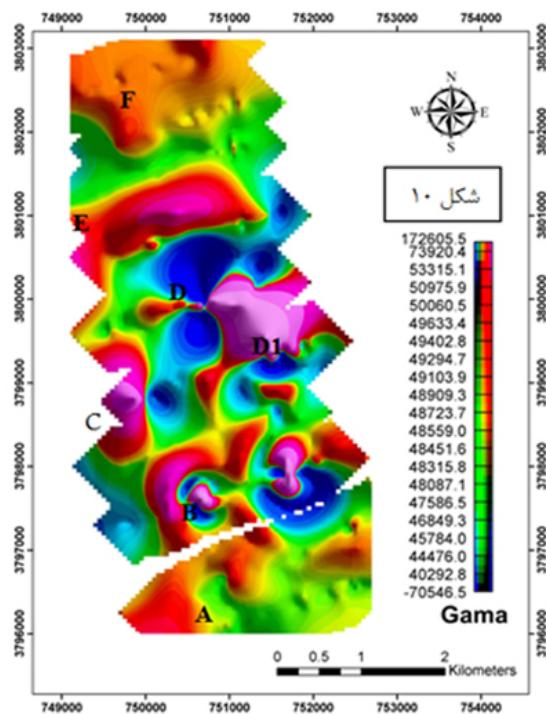


شکل ۹ نقشه‌ی مشتق اول قائم وابسته به منطقه شرق کیبرکوه به همراه بیهنجاری‌های مشخص شده روی آن.

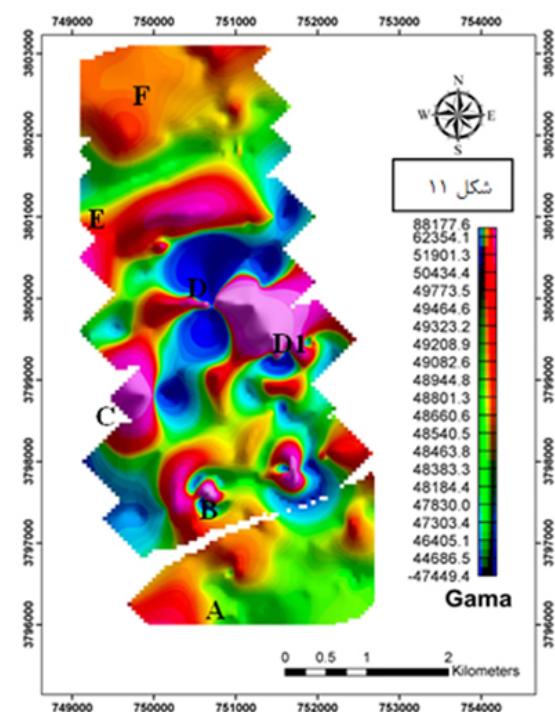
برای بررسی منابع عمیق، نقشه فراسو یا ادامه به سمت بالا (Upward continuation Map)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فیلتر اثر بیهنجاری‌های سطحی با بسامد بالا را تضعیف، و به این طریق اثر بیهنجاری‌های عمیق‌تر را بهتر آشکار می‌سازد [۱۷]. این نقشه‌ها برای ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر تهیه 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 شمال‌غربی کمی گسترش عمیق نشان می‌دهد و با توجه به این نقشه‌ها، عمیق بودن چشمی بیهنجاری در بخش کوچکی از شمال‌غربی 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 موردن بررسی نسبت به نقشه RTP کمی کوچک‌تر شده، و با توجه به این نقشه‌ها در عمق بودن قسمتی از چشمی

در غرب گستره مورد بررسی، نسبت به نقشه‌ی RTP بسیار کوچک شده، که نمایانگر عمیق بودن چشمی 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 گردایان عمودی از بین رفته است، که نمایانگر در عمق بودن چشمی بیهنجاری است (شکل ۹). بیهنجاری E در شمال غربی منطقه مورد بررسی، دارای اثر سطحی است، که به این ترتیب عمق بالای چشمی 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 گردایان 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 مغناطیس‌سنگی، بیهنجاری‌های مغناطیسی در این بخش‌ها بر چندین توده نفوذی منطبق همخوانند (شکل‌های ۲ 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 کیبرکوه.

محل واقعی بیهنجاری‌ها در نقشه‌ی RTP به دست آمد. در جنوب منطقه، بیهنجاری A به صورت نعل اسبی با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و به توده‌های نفوذی وابسته است. بیهنجاری B نیز در جنوب و با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی، نسبت به نقشه‌ی TMI، مقداری به سمت شمال‌شرقی 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 دور است، چشممه‌ی این بیهنجاری با توده‌های نفوذی در ارتباط است و دگرسانی پروپلیتیک در توده‌های این بخش دیده می‌شود. بیهنجاری D در بخش مرکزی گستره TMI به دو بخش جدا شده است (D1 و D2) 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 منطقه مورد بررسی، نسبت به نقشه‌ی TMI به سمت جنوب جابجا شده است. شکل آن تقریباً دور دیده می‌شود. بیهنجاری F در بخش شمال شرقی گستره که در نقشه TMI به صورت دو بیهنجاری کوچک و دور 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 چشممه بیهنجاری‌های A, B, C, D, E و F در سطح است. اثر بیهنجاری C در این نقشه بسیار کوچک شده، که نمایانگر در عمیق بودن چشممه بیهنجاری است؛ بیهنجاری D1 از بین رفته است که نمایانگر در عمیق بودن چشممه 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 چشممه بیهنجاری را نشان می‌دهد. بیهنجاری D به بیهنجاری

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 چشممه‌ی بیهنجاری D و D1 در عمق بهم می‌پیوندد. در این نقشه‌ها در عمق بودن چشممه‌ی بیهنجاری مشاهده می‌شود (شکل ۱۰ و ۱۱). بیهنجاری E در شمال‌غربی منطقه مورد بررسی، با توجه به نقشه‌های ارتفاع‌های مختلف فراسو، دارای اثرهای عمقی گستردگی است، که به سمت جنوب و شرق گسترش دارد (شکل ۱۰ و ۱۱).

بیهنجاری F در بخش شمال و شمال‌شرقی گستره نیز دارای اثرهای عمیقی بوده و گسترش این بیهنجاری در نقشه‌های مختلف فراسو در اعماق مختلف، به سمت شمال‌شرق 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 D, E و D1 تغییر چندانی نکرده ولی اثر بیهنجاری F مقداری افزایش یافته است (شکل ۱۰ و ۱۱).

برداشت

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

- [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 برگه شماره ۳، سازمان زمین‌شناسی (۱۳۸۱)."

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

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 یافته.

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 پتابسیک 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 پتابسیک 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 چشممه‌ی بیهنجاری در این بخش که منطبق بر بیهنجاری D است، به یک زون اسکارن آهن که رخمنون 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).

[٣] بلوریان غ. ح، صفری م.. " نقشه زمین‌شناسی ۰۰۰۰۰۱: 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.