

کانی‌سازی و اکتشاف مگنتیت به روش مغناطیس‌سنجی زمینی در محدوده بین باغک و C- شمالی، معدن سنگ آهن سنگان خواف

محمد حسن کریم‌پور، آزاده ملکزاده شفارودی

گروه پژوهشی اکتشافات ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

عباس گل‌محمدی

شرکت سنگ آهن شرق ایران

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۲۰

mhkarimpour@yahoo.com

چکیده

محدوده مورد مطالعه در فواصل توده‌های مرکزی باغک و C- شمالی در معدن سنگ آهن سنگان خواف در استان خراسان رضوی قرار دارد. معدن سنگان یکی از بزرگترین معادن آهن ایران و از نوع اسکارن و یا ذخایر Iron-Oxide نوع مگنتیت است. واحدهای سنگی منطقه شامل شیل‌های سیلیسی شده، سنگ‌های کربناته (ژوراسیک- کرتاسه) که به انواع اسکارن تبدیل شده‌اند، توف و توده‌های نفوذی نیمه عمیق جوانتر حدواسط به شکل دایک و استوک است. رخنمون‌های کوچکی از اسکارن مگنتیت در مرکز و جنوب غربی منطقه با روند تقریباً شرقی- غربی تا شمال غربی- جنوب شرقی در سطح زمین دیده می‌شود. کانی‌سازی عمدتاً به موازات لایه‌بندی واحد اسکارنی و با شیب حدود ۴۰ تا ۶۰ درجه به سمت شمال است. پذیرفتاری مغناطیسی همه واحدهای سنگی منطقه بین $SI \ 3-10 \times 0.1$ تا $SI \ 3-10 \times 15$ است و در کانی‌سازی مگنتیت بیش از $SI \ 3-10 \times 1000$ می‌باشد. این اختلاف زیاد باعث می‌شود تا روش مغناطیس‌سنجی زمینی بهترین روش اکتشاف کانی‌سازی در منطقه باشد. مقدار شدت کل میدان مغناطیسی از ۴۴۱۲۳ تا ۶۸۲۲۴ گاما متغیر است که بیشترین مقدار آن در شمال غرب منطقه دیده می‌شود. در نقشه TMI، در مرکز و جنوب غربی منطقه دو ناهنجاری با روند تقریبی شمال غربی- جنوب شرقی دیده می‌شود. در نقشه RTP، ناهنجاریها نسبت به سمت شمال جابجایی نشان می‌دهند. این مساله با شیب تقریبی کانی‌سازی مگنتیت در سطح به سمت شمال هماهنگی دارد. نقشه مشتق اول قائم نشان می‌دهد که بخش عمده ناهنجاریها مربوط به عمق است. ناهنجاری شمال غرب منطقه مهمترین ناهنجاری مغناطیسی در کل محدوده است. تعداد ۱۰ نقطه حفاری جدید در کمر بالای کانی‌سازی مگنتیت با زاویه حفاری ۸۰ تا ۸۵ درجه و آزیموت ۱۸۰ درجه به سمت جنوب پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مگنتیت، معدن سنگان، مغناطیس‌سنجی زمینی، پذیرفتاری مغناطیسی

مقدمه

شمالی و باغک قرار گرفته است (شکل ۱). معدن سنگ آهن سنگان خواف ۷۰۰ سال پیش مورد شناسایی قرار گرفت (آراسته، ۱۳۷۰). تاریخچه مطالعاتی و اکتشافی معدن بسیار گسترده بوده که از آنجمله می‌توان به کریم‌پور (۱۳۶۹)، ۱۳۷۳، ۱۳۷۷، ۱۳۷۸ و ۱۳۸۲)، بومری (۱۳۷۷ و ۱۳۸۲)، بومری و همکاران (۱۳۸۱)، مظاهری (۱۳۷۷ الف و ب و ۱۳۷۹)، کاهنی (۱۳۸۳)، کریم‌پور و ملکزاده شفارودی (۱۳۸۵ و ۱۳۸۶) اشاره نمود. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مناسب در اکتشاف ذخایر معدنی، می‌تواند در کاهش هزینه‌های اکتشاف و بدست آوردن اطلاعات مهمی در مورد موقعیت کانی‌سازی در عمق و تعیین

معدن سنگ آهن سنگان خواف در حدود ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف در استان خراسان رضوی قرار دارد. توده‌های مگنتیتی معدن سنگان به طور عمده روند شرقی- غربی داشته و از غرب به شرق به ترتیب شامل A، B، C- جنوبی، C- شمالی، باغک و دردی است (شکل ۱). چند آنومالی کوچک نیز در شرق معدن به نامهای رهنه و فرزنه وجود دارد. منطقه مورد مطالعه در حدفاصل توده‌های مگنتیتی C-

سنج مورد استفاده در این تحقیق از نوع پروتون چرخشی-Geometrics-G856 با دقت ۰/۱ گاما ساخت آمریکا بوده است.

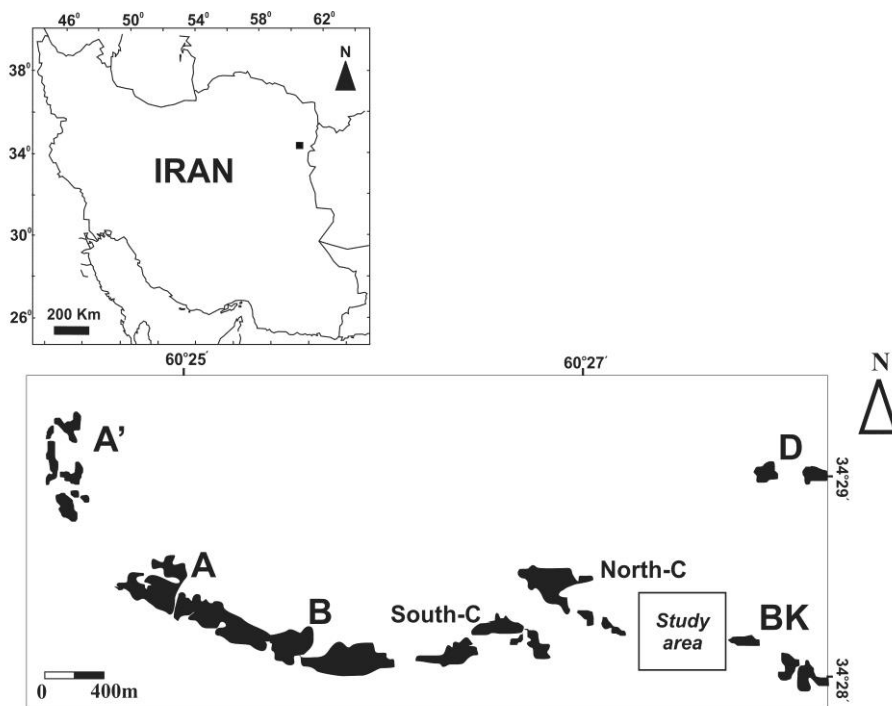
جهت انجام عملیات برداشت مغناطیس‌سنجی، پروفیل‌هایی با امتداد شمالی- جنوبی، عمود بر روند کانی‌سازی مگنتیت در معدن سنگان و رخنمونهای این کانی در محدوده مورد مطالعه (شرقی- غربی) طراحی گردید. طول هر پروفیل، فواصل بین پروفیل‌ها و فواصل بین نقاط با توجه به افزایش میزان شدت میدان مغناطیسی در پروفیل‌ها در نظر گرفته شد. طول هر پروفیل تقریباً ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ متر، فواصل بین هر پروفیل در ۴ پروفیل اول و ۲ پروفیل آخر ۵۰ متر و در بین به علت بارزسازی بهتر بخشهای کانی‌سازی ۳۰ متر و فواصل بین نقاط ۵ متر بوده است. برای طراحی شبکه از تصاویر با کیفیت مناسب Google Earth که عملیات رقومی‌سازی روی آن انجام گرفته و همچنین دستگاه GPS استفاده می‌شود. در کلیه نقاط اندازه‌گیری، راستای پروفیل‌ها با کمپاس تعیین شده و موقعیت گیرنده (سنسور) دستگاه مغناطیس-سنج نسبت به شمال مغناطیسی توجیه گردید. جهت انجام تصحیحات روزانه میدان مغناطیسی، برداشت به روش Loop انجام شد. به این صورت که جهت انجام تصحیحات روزانه هر ۲ ساعت یکبار برای هر پروفیل به نقطه مبنا برگشته و قرائت تکراری انجام می‌شود. میزان تغییرات شدت میدان (تغییرات روزانه) محاسبه و در تصحیح روزانه اعمال گردید. پس از اعمال تصحیحات لازم، نقشه-های مناسب مانند نقشه (Total Magnetic Intensity) TMI، (RTP) Rotate to Pole، مشتق اول، فراسو و غیره توسط نرم افزارهای Er Mapper 7.01، Surfer-8، Arc-Map 9.3 و Excel استخراج شد.

نقاط مناسب حفاری بسیار سودمند باشد. از آنجاییکه کانی‌سازی اصلی معدن سنگان خواف، مگنتیت است؛ عملیات مغناطیس‌سنجی زمینی و تلفیق آن با اطلاعات زمین‌شناسی- کانی‌سازی سطحی منطقه، مفیدترین روش برای کشف بخشهای پنهان توده مگنتیتی به حساب می‌آید. رخنمونهای کوچکی از مگنتیت در منطقه مورد مطالعه با روند تقریباً شرقی- غربی یا شمال غربی- جنوب شرقی دیده می‌شود. هدف از این پژوهش، انجام عملیات مغناطیس-سنجی زمینی و تلفیق آن با اطلاعات زمین‌شناسی- کانی‌سازی برای اکتشاف هر چه بیشتر توده مگنتیتی در محدوده بین C- شمالی و باغک و در نهایت تعیین نقاط حفاری مناسب بوده است.

روش مطالعه

به منظور رسیدن به اهداف مورد نظر عملیات اکتشافی زیر صورت گرفت:

۱. بررسی انواع واحدهای زمین‌شناسی منطقه و نمونه‌برداری و مطالعه ۱۴ مقطع نازک از توده‌های نفوذی به منظور تصحیح نقشه زمین-شناسی در مقیاس ۱:۵۰۰۰
۲. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های مختلف منطقه و کانی‌سازی مگنتیت توسط دستگاه پذیرفتاری سنج مدل SM-30 با دقت $10^{-7} \times 1$ ، ساخت شرکت HZ-instruments آمریکا.
۳. اندازه‌گیری مغناطیس‌سنجی زمینی بر روی یک شبکه برداشت طراحی شده در محدوده‌ای با وسعت تقریبی یک کیلومتر مربع. تعداد نقاط اندازه‌گیری شده ۵۹۰۶ نقطه بر روی ۳۰ پروفیل است. مغناطیس-



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی معدن سنگان در شمال شرق ایران و نمایش موقعیت توده‌های مگنتیتی از غرب به شرق همراه با موقعیت منطقه مورد مطالعه

زمین شناسی

معدن سنگ آهن سنگان خواف جزئی از کمربند ولکانیکی - پلوتونیک خواف - کاشمر - بردسکن است. این کمربند ماگمایی با گسترش شرقی - غربی و خمیدگی به سوی شمال، در شمال گسل درونه قرار دارد و عمدتاً از سنگهای آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و بعضاً مافیک با سن ترشیاری تشکیل شده که توده‌های گرانیتوئیدی با ترکیبی از گرانیت تا مونزونیت در آنها نفوذ نموده‌اند. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی معدن شامل چرت، شیل‌های سیلیسی، سیلت - استون و آهک کریستالین است. رخنمونهای این واحدها در بخش شمالی توده‌های مگنتیت مشاهده می‌شود. مجموعه عظیمی از سنگهای آتشفشانی شامل داسیت، ریوداسیت، تراکیت، پیروکلاست‌های آندزیتی و سنگهای ولکانوکلاستیک در منطقه مشاهده می‌شوند که بیشتر آنها مربوط به کرتاسه تا اوایل ائوسن هستند. سنگهای کربناته اکثراً به اسکارن و مرمر دگرگون شده‌اند و به طرف شرق به صورت آهک کریستالین یافت می‌شوند. سن سنگهای کربناته به ژوراسیک فوقانی و کرتاسه زیرین نسبت داده می‌شود. کانی‌سازی در این سنگها به صورت انواع اسکارن تشکیل شده است (کریم‌پور، ۱۳۶۹). در قسمت شمالی معدن، گرانیت سرنوسر با سن احتمالی ائوسن بالایی - الیگوسن پایینی نفوذ کرده است. بومری (۱۹۹۸) گرانیت سرنوسر را به عنوان منشا اسکارن معرفی نموده است؛ اما کریم‌پور و ملکزاده شفارودی (۱۳۸۶) مشخص نمودند که وجود کانیهای غنی از پتاسیم همانند آمفیبول خاص موجود در توده A' و یا وجود کانیهای پتاسیم‌داری مثل فلوگوپیت در توده‌های باغک و C، حکایت از یک محلول ماگمایی آهن‌دار غنی از پتاسیم دارد که با نفوذ در سنگهای کربناته به طریق جانیشینی متاسوماتیزم، اسکارن مگنتیت غنی از کانی‌های پتاسیم‌دار را موجب شده است. رخنمونهایی از سنگ منشا سینیتی التراپتاسیک با K₂O بیش از ۹ درصد در منطقه A' و در مجاورت اسکارن گارنت‌دار وجود دارد (کریم‌پور و ملکزاده شفارودی، ۱۳۸۶). پس از تشکیل کانی‌سازی، توده‌های نیمه عمیق جوانتر با ترکیب حدواسط و عمدتاً مونزونیتی به شکلهای دایک و استوک، در واحدهای قدیمتر نفوذ نموده و مگنتیت و اسکارن را قطع نموده‌اند. واحدهای سنگی در محدوده مورد مطالعه از قدیم به جدید شامل شیل، ماسه‌سنگ و سیلت‌استون سیلیسی شده، اسکارن حرارت پایین، توف سبز، گارنت اسکارن، کانی‌سازی مگنتیت و توده‌های نفوذی جوانتر از کانی‌سازی است (شکل ۲). واحدهای رسوبی ژوراسیک بخشهای وسیعی از شمال و شرق محدوده را می‌پوشانند و در برخی قسمت‌ها به سبب جانیشینی متاسوماتیزم در اثر محلول کانه‌دار، کانی مگنتیت در آنها تشکیل شده است. اسکارن حرارت پایین با رنگ روشن بخش بزرگی از غرب منطقه را به خود اختصاص داده است. لایه‌بندی آن عمدتاً شرقی - غربی و شیب لایه‌ها بین ۵۰ تا ۶۰ درجه به سمت شمال است. این اسکارن از نظر ترکیب کانی‌شناسی از نوع حرارت پایین و عمدتاً اپیدوت اسکارن است. گارنت اسکارن با یک روند تقریبی شمال غربی - جنوب شرقی در گوشه جنوب غربی و نیز مرکز منطقه رخنمون دارد. شیب لایه‌بندی عمدتاً در حد ۵۰ درجه به سمت شمال است. رخنمونهایی از توده

مگنتیت متوسط تا پر عیار (بیش از ۴۵ درصد) و کم عیار (کمتر از ۳۵ درصد) با روند تقریباً شرقی - غربی و با شیب به سمت شمال عمدتاً در امتداد لایه‌بندی گارنت اسکارن و کمتر همراه با اسکارن حرارت پایین در جنوب غربی و مرکز محدوده دیده می‌شود. توده‌های نفوذی اسیدی - حدواسط، نیمه عمیق با بافت پورفیری به شکل دایک و استوک در قسمت‌های مختلف نفوذ نموده‌اند که همگی جوانتر از کانی‌سازی مگنتیت هستند. این توده‌ها اغلب آلتره هستند و شامل سینیت پورفیری، بیوتیت مونزونیت پورفیری، هورنبلند مونزونیت پورفیری، هورنبلند سینیت پورفیری، مونزویدوریت پورفیری و مونزونیت پورفیری است (شکل ۲).

کانی‌سازی

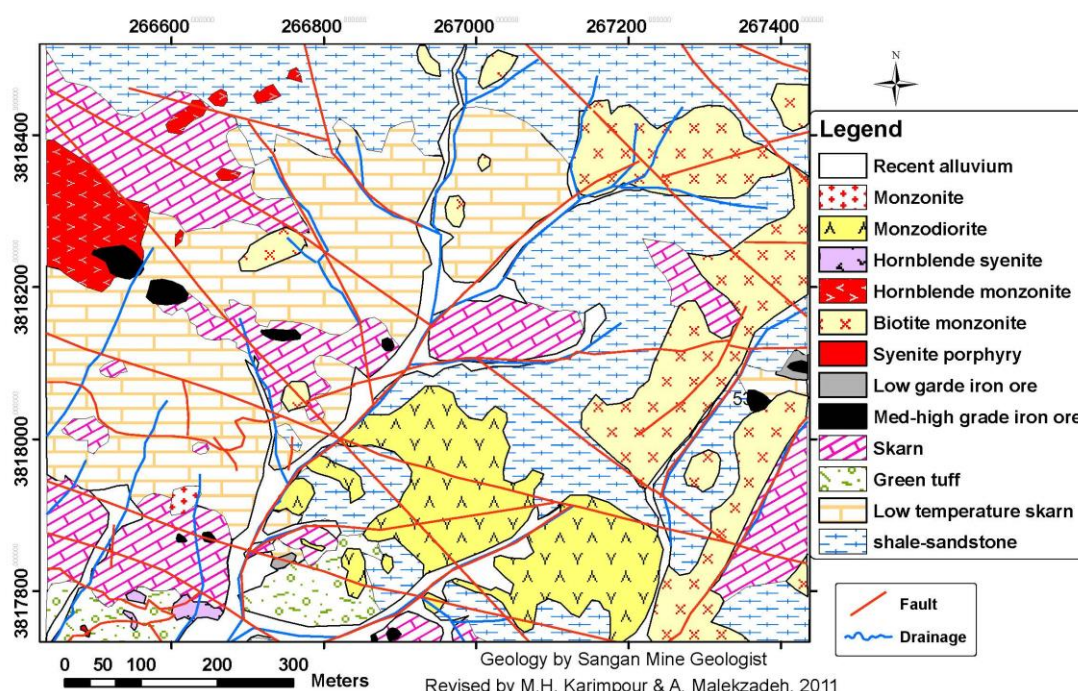
کریم‌پور و همکاران (۱۳۸۱) و کریم‌پور (۱۳۸۲) کمربند خواف - کاشمر - بردسکن را به عنوان کمربند کانی‌سازی تیپ Iron-Oxide در ایران معرفی نمودند. Hitzman (۲۰۰۱) اولین بار کانسارهای Iron-Oxide را معرفی و آنها را به دو گروه مگنتیت - آپاتیت و آپاتیت و Iron - Oxide Cu-Au (IOCG) تقسیم نمود. کریم‌پور (۱۳۸۲) تقسیم بندی جدیدی برای این ذخایر ارائه نمود. وی گروه مگنتیت را به سه گروه (۱) مگنتیت - آپاتیت، (۲) مگنتیت - عناصر کمیاب و (۳) مگنتیت و گروه IOCG را به چهار گروه (۱) Cu-Au-REE-U همراه با مگنتیت، (۲) Cu-Au همراه با مگنتیت، (۳) Cu-Au همراه با اسپکیولاریت و (۴) Au-Cu همراه با اسپکیولاریت تقسیم بندی کرد. محیط‌های تکنونیک که این کانسارها کشف شده‌اند شامل حوضه‌های تکنونیک پشت کمربند زون فرورانش، ریفت درون قاره و نقاط داغ پوسته قاره‌ای است. گروه مگنتیت - آپاتیت عمدتاً با دیوریت و گروه IOCG با مجموعه‌ای از سنگهای آذرین درونی حدواسط تا اسیدی گزارش شده‌اند (Hitzman, 2001). کانسارهای مگنتیت که حاوی آپاتیت هستند، عمدتاً در ریفت‌های درون قاره با توده‌های مافیک آلکان گزارش شده‌اند، در صورتیکه کانسارهای مگنتیت بدون آپاتیت با توده‌های کالک آلکان حدواسط تا اسیدی یافت می‌شوند. آلتراسیون در گروه IOCG عمدتاً به صورت آلتراسیون سدیک در اعماق، آلتراسیون پتاسیک در عمق متوسط و در نهایت آلتراسیون سرسیتی و سیلیسی در قسمت‌های بسیار کم عمق می‌باشد. ذخایر گروه مگنتیت - آپاتیت عمدتاً با زون‌های آلتراسیون سدیک یا سدیک - کلسیک همراه هستند. مورفولوژی این کانسارها بسیار متنوع بوده و از صفحه‌های استراتی باند تا زون‌های استوک و رک برشی تغییر می‌کند. تعداد زیادی از کانسارهای نوع Iron-oxide در حاشیه اقیانوس آرام در کشورهای شیلی و پرو شناسایی شده‌اند (Hitzman, 2001). کریم‌پور (۱۳۸۲) معدن سنگان را Iron-oxide نوع مگنتیت معرفی می‌کند. کانسار مگنتیت سنگان از نوع اسکارن است و زون بندی اسکارن به خوبی دیده می‌شود. به طور کلی از سمت غرب به شرق اسکارن حرارت بالا به اسکارن حرارت پایین تبدیل می‌شود که از روی کانی - شناسی اسکارن و پاراژن‌های مگنتیت کاملاً مشخص است. کانیهای فلزی منطقه شامل مگنتیت + هماتیت ± گوتیت ± (پیریت ± پیروتیت ± کالکوپیریت

$10^{-3} \times 0.1$ تا $10^{-3} \times 0.5$ SI متغیر است. در قسمتهایی که شیل سیلیسی تحت تاثیر متاسوماتیسم قرار گرفته و کانی سازی مگنتیت به صورت پراکنده در آن تشکیل گردیده است، پذیرفتاری مغناطیسی این واحد به 2×10^{-3} SI می رسد. پذیرفتاری مغناطیسی در اسکارن حرارت پایین نیز بین 0.3×10^{-3} تا $10^{-3} \times 0.5$ SI متغیر است و در مواردی که کانی سازی مگنتیت به صورت فرعی در آن تشکیل شده است، پذیرفتاری مغناطیسی تا 10×10^{-3} SI افزایش یافته است (شکل ۳). پذیرفتاری مغناطیسی در واحد توف بین 10^{-3} تا 10×10^{-3} SI متغیر است. همچنین این قابلیت در توده های نفوذی (به طور کلی مونزونیتی) جوانتر با آلتراسیون کمتر بین 10^{-3} تا 8×10^{-3} SI تا 15×10^{-3} SI و در توده هایی که عمدتاً آلتره هستند بین 10^{-3} تا 0.1×10^{-3} SI تا 0.2×10^{-3} SI متغیر است. این در حالیست که پذیرفتاری مغناطیسی در اسکارن مگنتیت نیز بیش از $10^{-3} \times 1000$ بوده و تا 1700×10^{-3} SI می رسد (شکل ۳). این امر نشان می دهد که اختلاف پذیرفتاری مغناطیسی کانی سازی مگنتیت که هدف اکتشافی مغناطیس سنجی در این تحقیق است، بسیار بیشتر از واحدهای سنگی محدوده مورد مطالعه می باشد. بنابراین هرگونه ناهنجاری مغناطیسی بالا در منطقه که در مغناطیس سنجی زمینی آشکار شود، مربوط به کانی سازی مگنتیت است. براساس تغییرات در میزان پذیرفتاری مغناطیسی، حرکت محلول گرمابی و افزایش میزان مگنتیت را بطور دقیق در هر واحد سنگی می توان مشخص نمود.

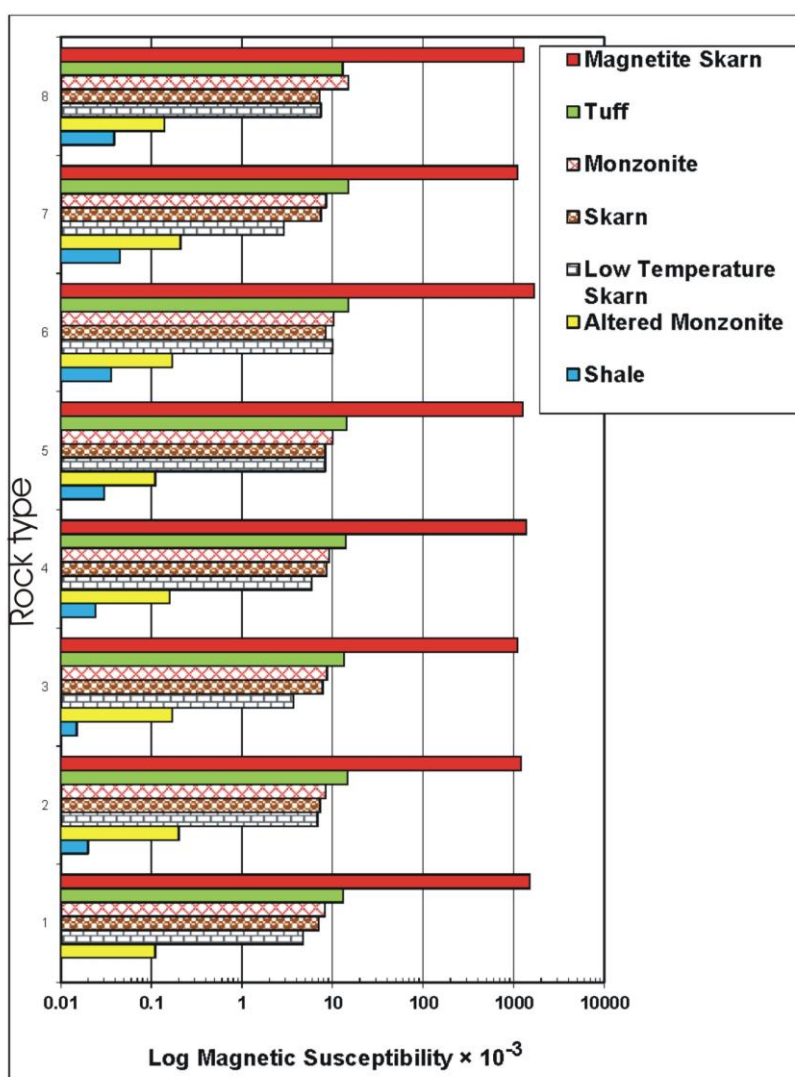
عمدتاً در مناطق باغک و C- شمالی) می باشد. مگنتیت مهمترین کانه آهن در معدن سنگان است. مقدار آن در نمونه های مختلف از ۳۰ تا ۹۵ درصد متغیر است. مگنتیت به صورت جانشینی با بافت متراکم و توده ای، پراکنده در متن سنگ، گاهی تکتونیک و در برخی قسمتها مانند توده C - شمالی به موازات لایه بندی اسکارن است (کاهنی، ۱۳۸۳). شرکت تهیه و تولید مواد اولیه فولاد خراسان (۱۳۸۷) میزان کل ذخیره زمین شناسی سنگان را ۱/۲ میلیارد تن برآورد نموده است. در محدوده مورد مطالعه، رخنمونهای کوچکی از توده مگنتیت متوسط تا پر عیار (بیش از ۴۵ درصد) و کم عیار (کمتر از ۳۵ درصد) با روند تقریباً شرقی - غربی (روند عمومی مگنتیت در معدن سنگان) و با شیب به سمت شمال عمدتاً در امتداد لایه بندی گارنت اسکارن و کمتر همراه با اسکارن حرارت پایین در جنوب غربی و مرکز محدوده دیده می شود (شکل ۲). براساس مشاهدات صحرایی، محلول کانه دار در امتداد گسل با روند شرقی - غربی در سنگ کربناته موجب متاسوماتیزم و در نتیجه اسکارن آهن تشکیل شده است. گسلهای جوانتر موجب جابجایی و قطع امتداد کانی سازی شده اند.

مغناطیس سنجی زمینی

تفسیر اطلاعات مغناطیس سنجی زمینی با در نظر گرفتن مقدار پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای سنگی و زمین شناسی منطقه انجام شد. به منظور تفسیر بهتر داده های مغناطیس سنجی زمینی برداشت شده در محدوده مورد مطالعه، ابتدا پذیرفتاری مغناطیسی در این واحدهای سنگی در چندین نقطه مختلف اندازه گیری شد. پذیرفتاری مغناطیسی در شیل سیلیسی بین SI



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (با تصحیحات توسط نویسندگان بعد از شرکت معدن کاو (۱۳۸۸))



شکل ۳. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای مختلف سنگی و اسکارن مگنتیت در منطقه مورد مطالعه

معمولاً یک نقشه به تنهایی همه اطلاعات را در مورد مجموعه داده‌های مغناطیسی نمی‌دهد، بلکه هر یک از آنها در تشخیص طرح‌های ناهنجاری مغناطیسی مزایای خاص خود را دارند و تفسیر آنها نیز متفاوت است (Gunn, 1996).

نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMI) (Total Magnetic Intensity)

این نقشه رنگی یک تجسم کلی از داده‌های مغناطیسی فراهم کرده و برای تفسیر کلی استفاده می‌شود (Liu and Mackey, 1998). در نقشه TMI منطقه، مقدار شدت میدان مغناطیسی در منطقه از ۴۴۱۲۳ تا ۶۸۲۲۴ گاما متغیر است. دو ناهنجاری با روند تقریباً شمال غربی - جنوب شرقی به ترتیب در مرکز منطقه و نیز در جنوب غربی آن

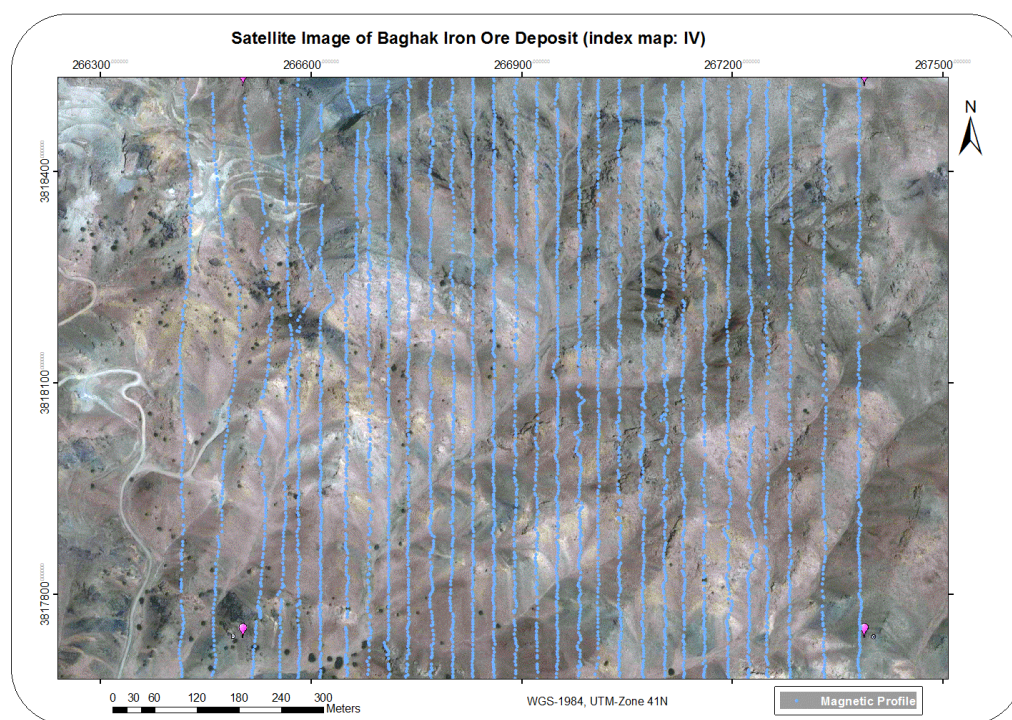
عملیات اندازه‌گیری مغناطیس‌سنجی زمینی در مهر ماه سال ۱۳۹۰ در قالب ۳۰ پروفیل به انجام رسید (شکل ۴). در منطقه مورد مطالعه میدان مغناطیسی اصلی زمین با استفاده از برنامه IGRF (International Geomagnetic Reference) مقدار ۴۸۶۳۱ گاما در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر بالاتر از این مقدار ناهنجاری محسوب می‌شوند. همچنین مقدار زاویه میل و انحراف براساس سایت مرکز اطلاعات ژئوفیزیکی NOAA مقدار ۵۲/۵ و ۳/۲ با در نظر گرفتن زمان برداشت و طول و عرض جغرافیایی منطقه بدست آمد (شکل ۵). اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنجی برای تغییرات وابسته زمانی نیز تصحیح شده و مقادیر شدت میدان محاسبه شد. محصول نهایی پردازش داده‌ها، نقشه‌های مغناطیسی مختلف بوده که تغییرات شدت کل میدان ناهنجاری مغناطیسی را نشان می‌دهند. نقشه‌های مغناطیسی برای نمایش بعضی پدیده‌های ناهنجاری استفاده شده و

می‌شود. تفسیر اصلی از مجموعه داده‌های مغناطیسی بر روی داده‌های انتقال داده شده به قطب صورت می‌گیرد (Nabighian et al., 2005; Nakatsuka and Okuma, 2006). با استفاده از این فیلتر می‌توان میدان مغناطیسی را از یک عرض مغناطیسی، جایی که میدان زمین، شیب‌دار است، به میدان در قطب مغناطیسی انتقال داد، در این حالت ناهنجاریها بطور عمودی در بالای منبع ایجاد کننده خود قرار می‌گیرند (Arkani-Hamed and Urquhart, 1990; Gunn et al., 1997). نقشه RTP منطقه، دو ناهنجاری با روند تقریباً شمال غربی- جنوب شرقی به ترتیب در مرکز منطقه و نیز در جنوب غربی آن و یک ناهنجاری کوچک در شمال ناحیه دیده می‌شود که نسبت به نقشه TMI، به سمت شمال جابجایی نشان می‌دهند (شکل ۸). دامنه تغییرات ناهنجاری مرکزی بین ۵۰۰۰ تا ۱۷۹۰۰ گاما است (شکل ۸). در این روند، بیشترین ناهنجاری در محدوده غربی با ۱۷۹۰۰ گاما است که منطبق با توده نفوذی در نقشه زمین‌شناسی است. اما برپایه پذیرفتاری مغناطیسی، در این محدوده می‌بایست کانی‌سازی اسکارن آهن در ابعاد قابل توجه در عمق حضور داشته باشد (شکل ۸). در ادامه این روند به سمت شرق، ناهنجاریهای مغناطیسی بسیار خوبی مشاهده می‌شود و دامنه تغییرات میزان RTP بین ۵۰۰۰ تا ۱۴۰۰۰ گاما است (شکل ۸). گسل‌ها موجب جابجایی و قطع پیوستگی کانی‌سازی مگنتیت شده‌اند.

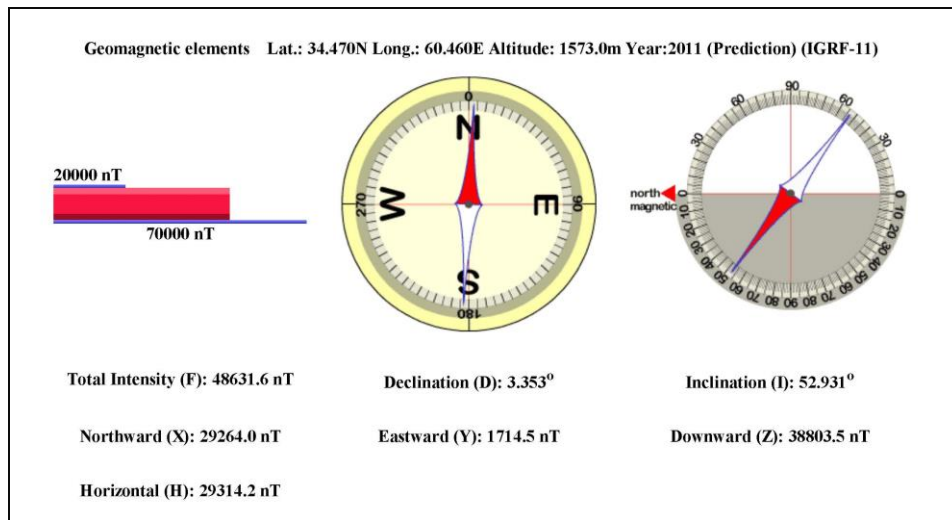
و نیز ناهنجاری کوچکی در شمال منطقه دیده می‌شود (شکل ۶). ناهنجاری مرکزی دارای بیشترین شدت (شدت میدان تا ۶۱۰۰۰ گاما) بوده و از شرق به غرب گسترده است. ناهنجاری جنوب غربی دارای شدت کمتر (میزان شدت میدان حداکثر ۵۴۰۰۰ گاما) است و کمترین میزان شدت میدان مغناطیسی (کمتر از ۴۸۰۰۰ گاما) در نیمه شمالی منطبق بر شیل‌های سیلیسی دیده می‌شود (شکل ۶). نقشه زمین-شناسی با نقشه TMI نشان می‌دهد که این ناهنجاریها (به غیر از ناهنجاری شمالی) در اکثر موارد انطباق خوبی با روند موقعیت اسکارن آهن‌دار، رخنمونهای کانی‌سازی مگنتیت و اسکارن‌های حرارت پایین دارند (شکل ۷). ناهنجاری بسیار زیاد در محدوده شمال غربی منطقه منطبق بر توده نفوذی برخی ناهنجاریها با شیل سیلیسی مطابقت دارد. با توجه به میزان پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های آذرین و شیل سیلیسی منطقه، این ناهنجاریها مربوط به کانی‌سازی مگنتیت در عمق است.

نقشه انتقال به قطب (RTP) (Rotate to Pole)

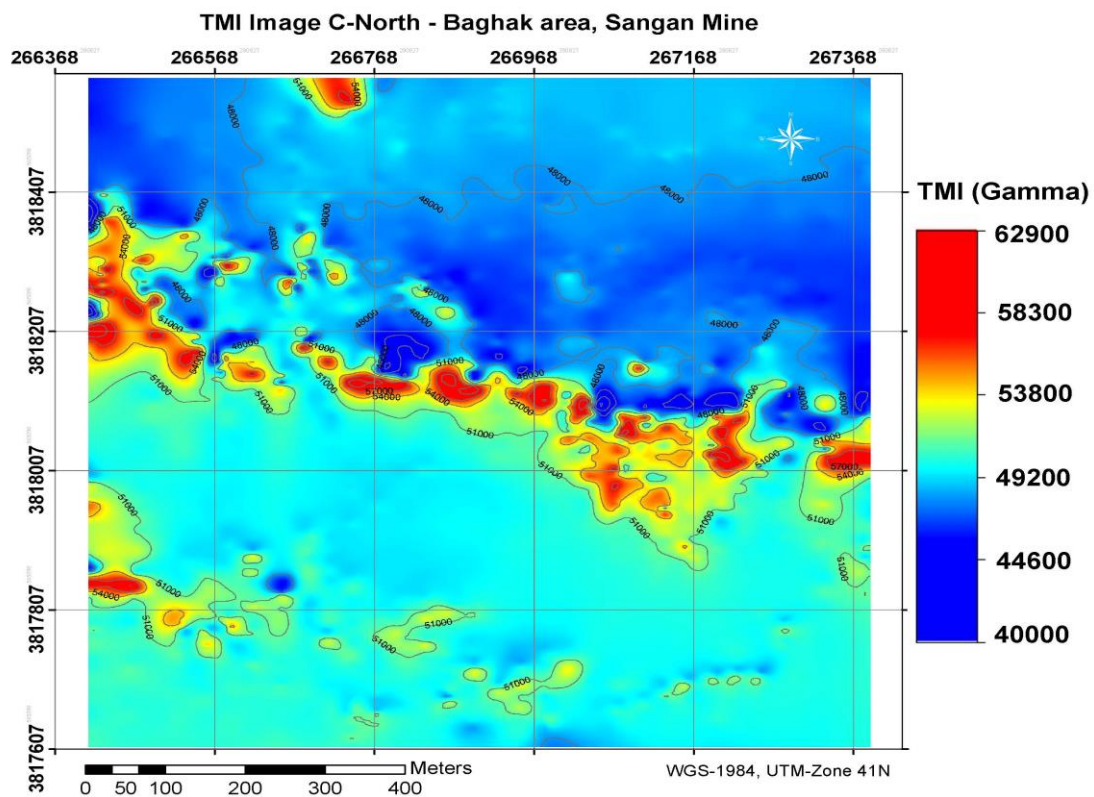
استفاده از فیلتر انتقال به قطب جهت دستیابی به محل واقعی ناهنجاریها با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد مطالعه، انجام می‌شود (Clark, 1997). از آنجا که میل و انحراف مغناطیسی باعث می‌شود ناهنجاریهای مغناطیسی نسبت به منبع ایجاد کننده خود انحراف داشته باشند، فیلتر RTP بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال



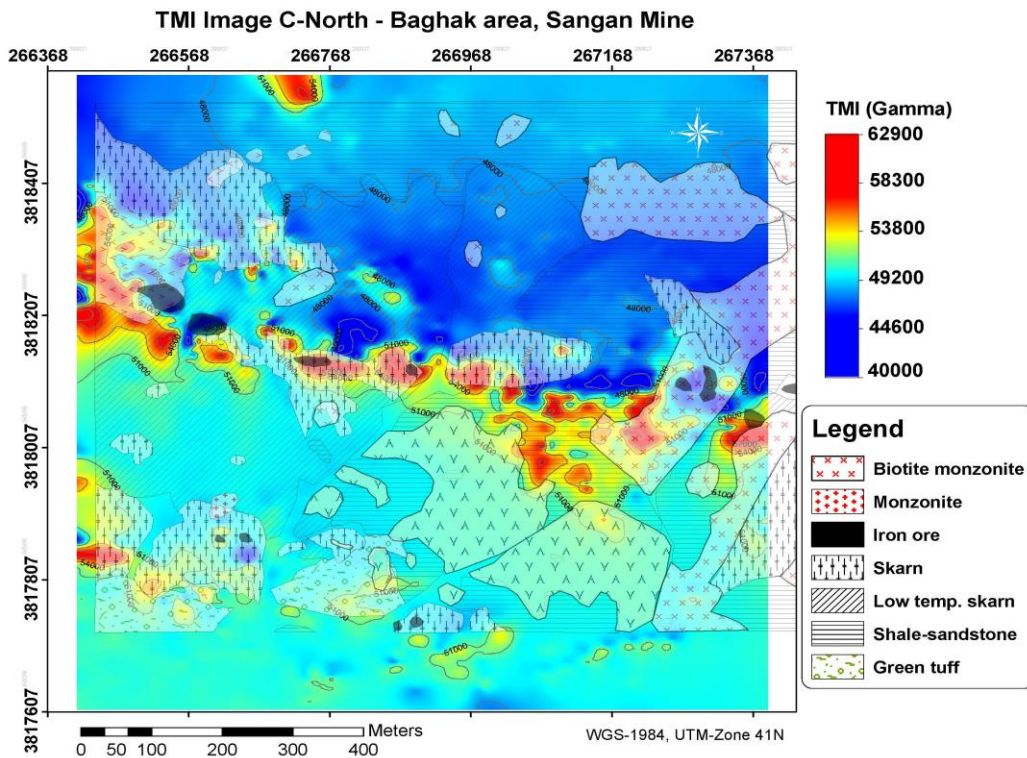
شکل ۴. موقعیت پروفیل‌های برداشت مغناطیس‌سنجی بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه



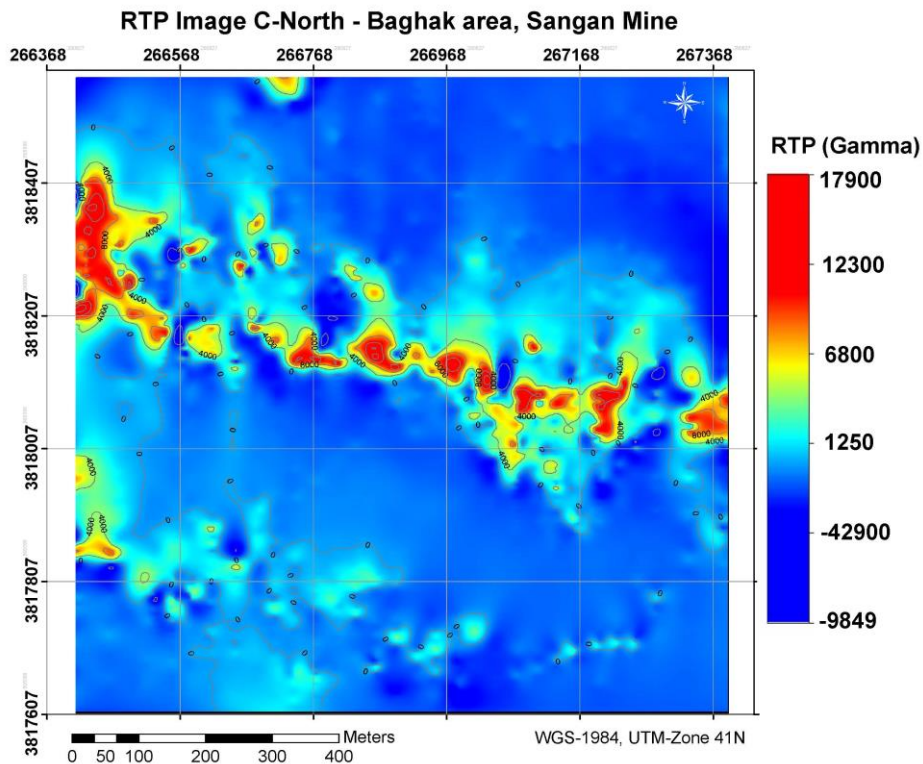
شکل ۵. محاسبه میدان اصلی در منطقه در مکان و زمان برداشت عملیات با برنامه IGRF



شکل ۶. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی منطقه اکتشافی بین باغک و C- شمالی همراه با کانتوربندی



شکل ۷. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی منطقه اکتشافی بین باغک و C- شمالی همراه با نقشه زمین شناسی



شکل ۸. نقشه انتقال به قطب منطقه اکتشافی بین باغک و C- شمالی

نقشه مشتق اول قائم (1VD) First Vertical (Derivative)

فیلتر مشتق اول قائم (گرادیان عمودی) اثر ناهنجاریهای عمیق با فرکانس پایین را حذف کرده و تأثیر منابع کم عمق با فرکانس بالا را به نمایش درمی آورد (Gunn, 1996). نقشه گرادیان عمودی از آنجا که نوعی فیلتر بالاگذر می باشد، تصویری فیلتر شده از میدان مغناطیسی فراهم می کند که ویژگی های زمین شناسی نزدیک سطح زمین را برجسته تر می کند (Cooper and Cowan, 2004; Ford et al., 2004). اکثر ناهنجاریهای مشخص شده در نقشه RTP در نقشه 1VD نیز مشاهده می شوند، لذا می توان نتیجه گرفت که ناهنجاریهای RTP در سطح زمین نیز رخنمون دارند (شکل های ۸ و ۹). اگر بخشی از ناهنجاریهای RTP را به عمق نسبت دهیم، می توان نتیجه گرفت که ناهنجاریهای بخش میانی که دارای امتداد شرقی - غربی هستند، در سطح رخنمون داشته و با شیب کمتر از ۵۰ درجه به سمت شمال تا اعماق ادامه دارند.

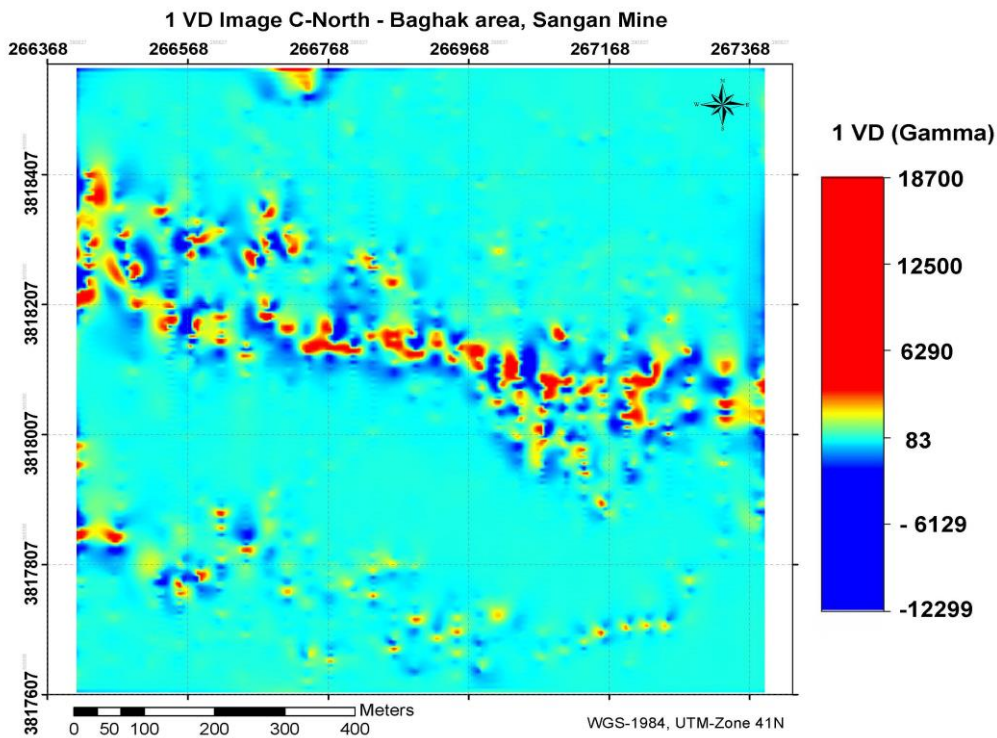
نقشه های فراسو یا ادامه به سمت بالا

فیلتر ادامه به سمت بالا، اثر ناهنجاریهای سطحی با فرکانس بالا را حذف و به این طریق اثر ناهنجاریهای عمیق تر را بهتر آشکار می سازد (Gunn, 1996). این فیلتر تأثیر منابع محلی و کم عمق را که در نقشه های گرادیان عمودی آشکار بود، حذف می کند و بدین وسیله اثر ناهنجاریهای عمیق، بهتر آشکار می شود. در واقع این روش، ناهنجاریهای با طول موج کوتاه را حذف کرده و دامنه ناهنجاری را تضعیف و اختلالات را کاهش می دهد. بنابراین مانند یک روش پایین گذر عمل می کند. هرچه منبع مغناطیسی به سطح زمین نزدیکتر و منبع کوچکتر باشد، طول موجها، کوتاهتر و فرکانسها در واحد طول بیشتر خواهد بود و بالعکس (Tarlowski et al., 1997). نقشه های فراسو یا ادامه به سمت بالای منطقه برای ارتفاعهای ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر تهیه شدند. اثر ناهنجاری جنوب غربی و شمال منطقه با ادامه فراسو از ارتفاع ۵ متری به ارتفاع ۲۰

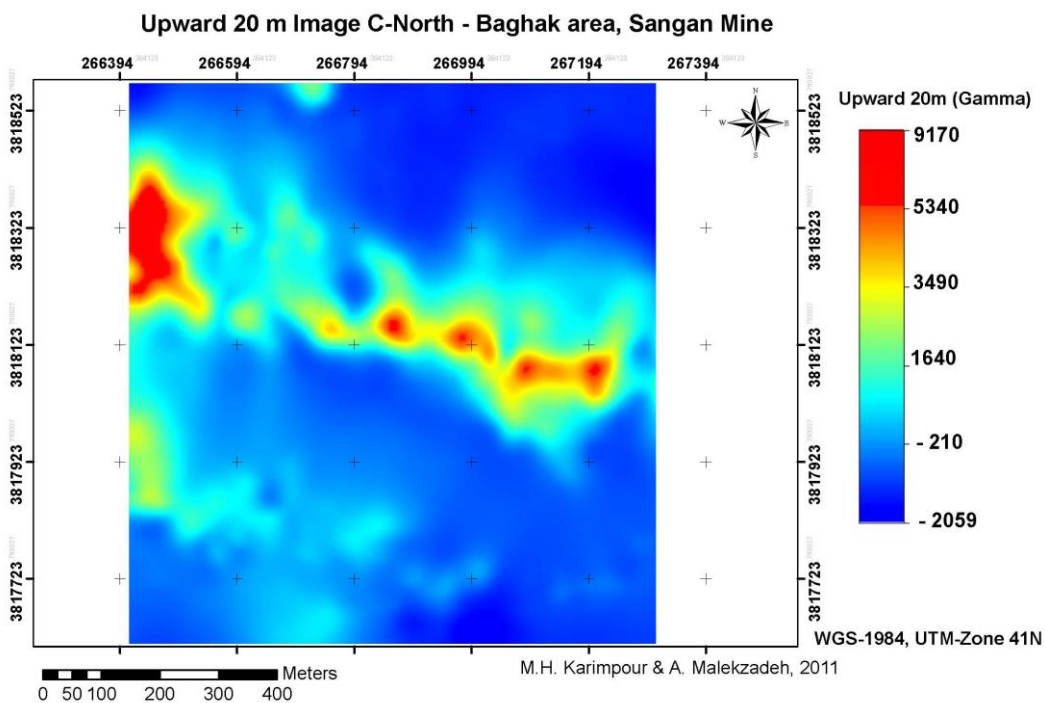
متری ضعیف شده و از بین می رود که نشاندهنده عمق نسبی کم کانی سازی در این بخش از منطقه است (شکل ۱۰). ناهنجاری اصلی محدوده که با روند شمال غربی - جنوب شرقی در مرکز ناحیه دیده می شود، با ادامه فراسو از ارتفاع ۵ متری به ۵۰ متری، بتدریج از شدت آن در برخی نقاط کاسته می شود. این مساله نشان می دهد که ناهنجاریهای مرکز منطقه به طرف غرب نیز کم عمق اند. دامنه تغییرات شدت در ۵ متری بین ۵۰۰ تا ۱۱۹۰۰ گاما بوده و در ۵۰ متری به ۲۰۰ تا ۴۱۰۰ گاما کاهش یافته است. در ارتفاع ۷۰ متری ناهنجاریها در بخش غربی و در نیمه شرقی متمرکز شده و در سایر مناطق حذف شده است. دامنه شدت در ارتفاع ۷۰ متر بین ۱۳۰۰ تا ۲۰۳۰ گاما، در ارتفاع ۱۰۰ متری بین ۱۳۰۰ تا ۲۰۳۰ و در ۱۵۰ متری بین ۸۰۰ تا ۱۱۷۰ گاما است (شکل ۱۱). ناهنجاری محدوده غربی بیشترین شدت مغناطیسی در ارتفاعهای مختلف را نشان می دهد (شکل های ۱۰ و ۱۱). با ادامه فراسو تا ارتفاع ۳۰۰ متری هنوز ناهنجاری در شرق و غرب محدوده دیده می شود، با این تفاوت که از وسعت آنها تقریباً کاسته شده و مقدار شدت مغناطیسی از ۱۱۹۰۰ گاما در ارتفاع ۵ متری به ۳۶۷ گاما در ارتفاع ۳۰۰ متری کاهش یافته است. ناهنجاری غرب منطقه مهمترین ناهنجاری مغناطیسی در کل محدوده است (شکل های ۱۰ و ۱۱). شدت نسبتاً زیاد ناهنجاری غربی در نزدیکی سطح زمین مرتبط با کانی سازی مگنتیت است که اختلاف زیاد پذیرفتاری مغناطیسی توده نفوذی با مگنتیت این موضوع را اثبات می کند. اما همین ناهنجاری در ارتفاع بیش از ۲۰۰ متر، که کاهش واضحی در شدت میدان مغناطیسی اتفاق افتاده را می توان به توده نفوذی نسبت داد.

نقشه سیگنال تحلیلی

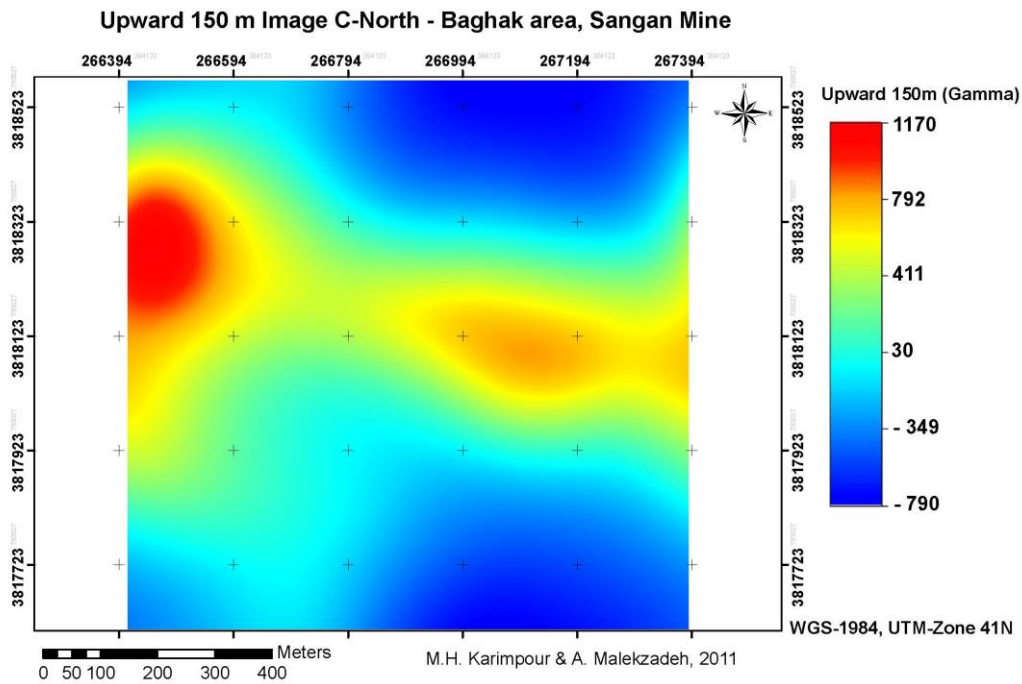
فیلتر سیگنال تحلیلی، حاشیه و لبه های ناهنجاریهای مغناطیسی را بهتر آشکار می سازد و در نتیجه در تعیین نقطه حفاری و مشخص نمودن مرزها و تفسیر دقیقتر به ما کمک می کند (Gunn, 1996). در نقشه سیگنال تحلیلی ناهنجاری مرکزی محدودتر شده و محدوده ناهنجاریهای اصلی و مرز آنها بیشتر آشکار شده است (شکل ۱۲).



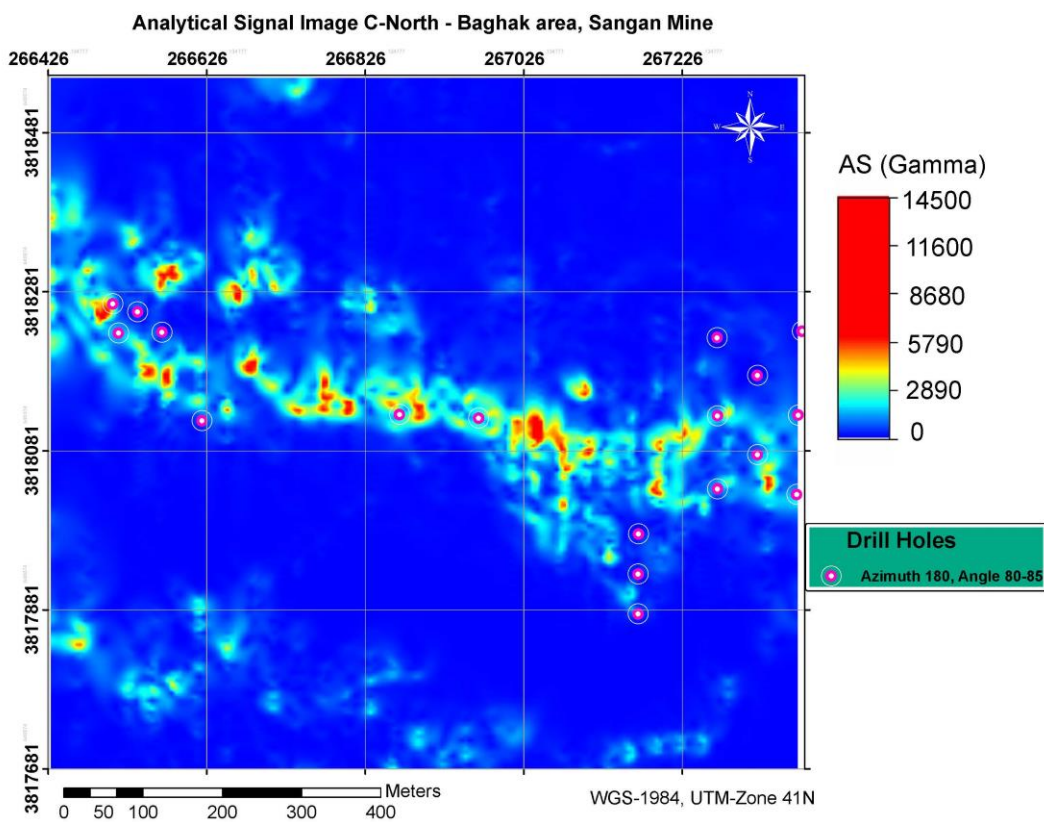
شکل ۹. نقشه مشتق اول قائم منطقه اکتشافی بین باغک و C- شمالی



شکل ۱۰. نقشه فراسو برای ارتفاع ۲۰ متر، منطقه اکتشافی بین باغک و C- شمالی



شکل ۱۱. نقشه فراسو برای ارتفاع ۱۵۰ متر، منطقه اکتشافی بین باغک و C- شمالی



شکل ۱۲. نقشه سیگنال تحلیلی و موقعیت و زاویه نقاط حفاری پیشنهادی

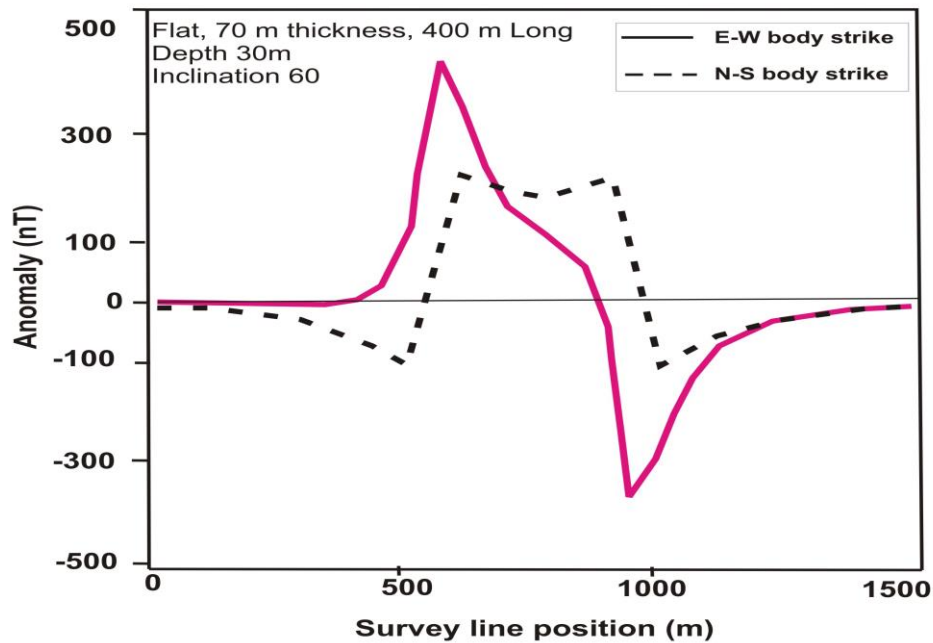
نتیجه گیری

تحلیلی لبه ناهنجاریها را واضح تر می کند. ناهنجاری شمال غرب منطقه مهمترین ناهنجاری مغناطیسی در کل محدوده است. همچنین با توجه به شکل و حالت پروفیل های مغناطیسی، می توان تحلیلی درباره شیب، عمق، جهت کانی سازی و غیره به عمل آورد. به عنوان مثال پروفیل ناهنجاری مغناطیسی در دو حالت شرقی- غربی و شمالی- جنوبی با در نظر گرفتن زاویه میل ۶۰ درجه (که نزدیک به زاویه میل منطقه مورد مطالعه است)، شکل صفحه ای، ضخامت ۷۰ متر و طول ۴۰۰ متر به دو حالت در شکل (۱۳) می تواند باشد. کانی سازی با شکل صفحه ای، امتداد شرقی- غربی، ضخامت ۵ متر و شیب ۴۵ درجه به سمت شمال با در نظر گرفتن زاویه میل ۶۰ درجه، پروفیلی همانند شکل (۱۴) ایجاد می کند. این حالت بسیار شبیه به شکل و حالت کانی سازی مگنتیت در منطقه بین باغک و C شمالی است. همچنین با تغییر عمق کانی سازی از ۲۰ متر به ۱۰۰ متر در یک کانی سازی صفحه ای با امتداد شرقی- غربی، شیب ۹۰ درجه و ضخامت ۵ متر، تغییراتی همانند شکل (۱۵) در پروفیل ها اتفاق می افتد. دو نمونه از پروفیل های ناهنجاری مغناطیسی منطقه (پروفیل های شماره ۱۰ و ۱۵) به صورت انتخابی در شکل های (۱۶ و ۱۷) نشان داده شده است. پروفیل ناهنجاری مغناطیسی شماره (۱۰) منطقه نشان دهنده یک کانی سازی با جهت شرقی- غربی و مقدار شیب بین ۵۰ تا ۶۰ درجه به سمت شمال است. کانی سازی عمده تاً در عمق کم قرار دارد. قله های کوچک تر سمت شمال پروفیل حکایت از عمیق شدن کانی سازی به سمت شمال دارد (شکل ۱۶). همچنین پروفیل ناهنجاری مغناطیسی شماره (۱۵) منطقه نشان دهنده یک کانی سازی کم عمق با شیبی حدوداً بیش از ۸۰ درجه به سمت شمال است (شکل ۱۷). با توجه اینکه شیب کانی سازی به سمت شمال است و یک روند تقریباً شمال غربی- جنوب شرقی دارد، لذا حفاری باید در کمر بالا (شمال ناهنجاریهای مغناطیسی) انجام شده و جهت آن به سمت جنوب منطقه باشد تا بتواند ضخامت لایه مگنتیت را در عمقهای مختلف بدست آورد. براساس نتایج مغناطیس سنجی زمینی، تعداد ۱۰ نقطه حفاری در کمر بالای کانی سازی مگنتیت (سمت شمال) با زاویه حفاری ۸۰ تا ۸۵ درجه و آزیموت ۱۸۰ درجه به سمت جنوب پیشنهاد می شود (شکل ۱۲ و جدول ۱).

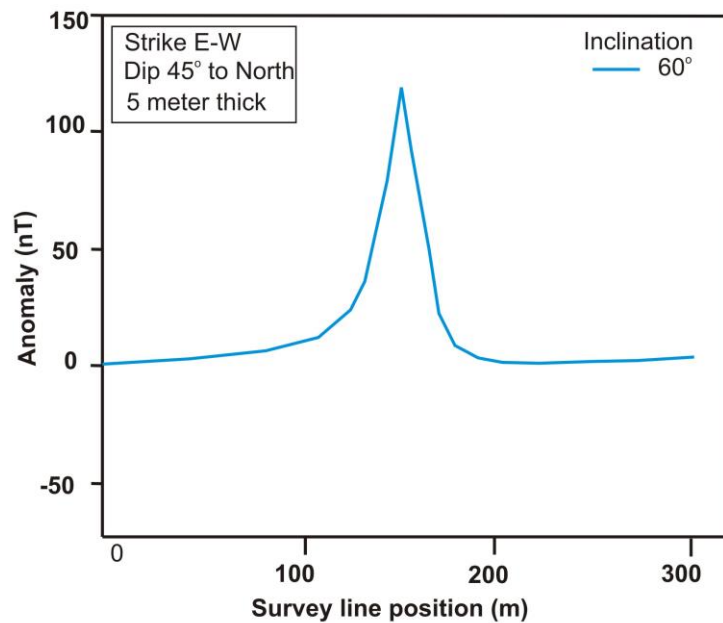
تشکر و قدردانی

از شرکت سنگ آهن شرق ایران و پرسنل محترم معدن سنگان برای در اختیار قرار دادن امکانات اسکان، غذا و حمل و نقل صمیمانه متشکریم. همچنین از همکاری جمعی از دانشجویان کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد که در عملیات برداشت مغناطیس سنجی کمک فراوانی نمودند، سپاسگزاریم.

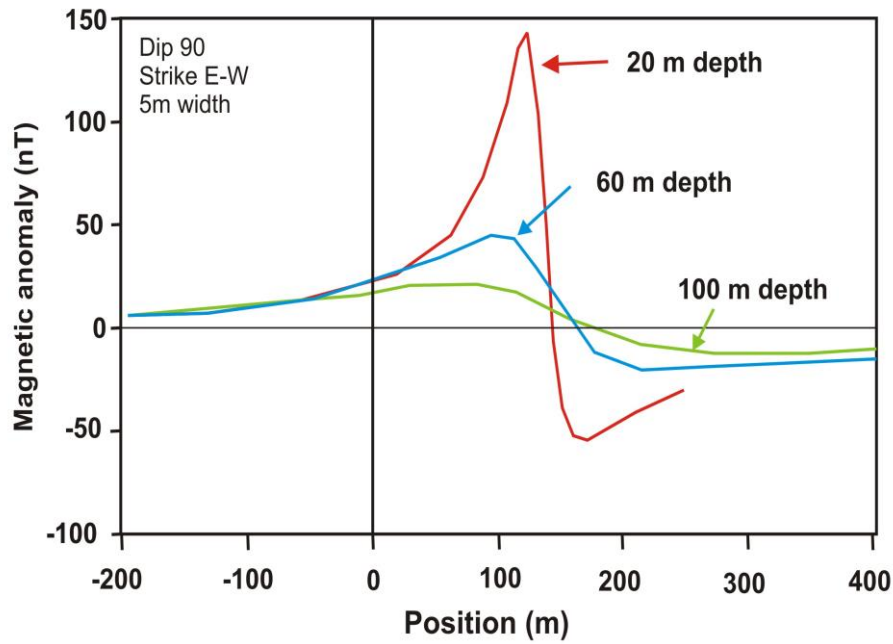
اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای مختلف زمین- شناسی و نیز کانی سازی مگنتیت نشان می دهد که پذیرفتاری مغناطیسی همه واحدهای سنگی منطقه بین SI ۳-۱۰۰ × ۰/۰۱ تا SI ۳-۱۰ × ۱۵ متغیر است؛ در حالیکه پذیرفتاری مغناطیسی در اسکارن مگنتیت دار نیز بیش از SI ۳-۱۰۰ × ۱۰۰۰ بوده و تا SI ۳-۱۰ × ۱۷۰۰ می رسد. بنابراین اختلاف پذیرفتاری مغناطیسی کانی سازی مگنتیت بسیار بیشتر از واحدهای سنگی محدوده مورد مطالعه می باشد و به راحتی با روش مغناطیس سنجی زمینی قابل اکتشاف است. اکتشافات ژئوفیزیکی به روش مغناطیس سنجی زمینی، ناهنجاری مغناطیسی بالای در مرکز، جنوب غربی و شمال محدوده برداشت و عمدتاً منطبق بر رخنمونهای سطحی گارنت اسکارن، مگنتیت و اسکارن حرارت پائین است. در نقشه TMI، در مرکز و جنوب غربی منطقه دو ناهنجاری با روند تقریبی شمال غربی- جنوب شرقی و یک ناهنجاری کوچک در شمال مشخص شده است که ناهنجاری مرکز ناحیه بسیار گسترده تر و مهم تر است. همچنین عرض ناهنجاری در مرکز منطقه در غرب و شرق آن بیشتر بوده و در وسط باریکتر می باشد. مقدار شدت میدان مغناطیسی در منطقه از ۴۴۱۲۳ تا ۶۸۲۲۴ گاما متغیر است که بیشترین مقدار آن در شمال غرب منطقه دیده می شود. در نقشه RTP، هر دو ناهنجاری با همان روند مشاهده می شوند با این تفاوت که این ناهنجاریها نسبت به نقشه TMI، به سمت شمال جابجایی نشان می دهند. این مساله با شیب تقریبی کانی سازی مگنتیت در سطح به سمت شمال هماهنگی دارد. در نقشه مشتق اول قائم، گسترش سطحی ناهنجاری نشان داده شده است و با توجه به این نقشه، بخش عمده ناهنجاریها مربوط به عمق است. در نقشه های فراسو برای اعماق مختلف، اثر ناهنجاری جنوب غربی و شمال منطقه با ادامه فراسو از ارتفاع ۵ متری به ارتفاع ۲۰ متری ضعیف شده و از بین می رود که نشان دهنده عمق کم کانی سازی در این بخش از منطقه است. ناهنجاری اصلی محدوده که با روند شمال غربی- جنوب شرقی در مرکز ناحیه دیده می شود، با ادامه فراسو از ارتفاع ۵ متری به ارتفاع ۷۰ متری، بخش مرکزی آن از بین می رود و ناهنجاری به دو قسمت شرق و غرب منطقه محدود می شود. این مساله نشان می دهد که ناهنجاری مرکز منطقه نیز کم عمق است، اما در شرق و غرب هنوز کانی سازی در عمق ادامه دارد. با ادامه فراسو تا ارتفاع ۱۵۰ متری هنوز ناهنجاری در شرق و غرب محدوده دیده می شود، با این تفاوت که از وسعت آنها تقریباً کاسته شده و مقدار شدت مغناطیسی از ۱۱۹۰۰ گاما در ارتفاع ۵ متری به ۳۶۷ گاما در ارتفاع ۳۰۰ متری کاهش یافته است. نقشه سیگنال



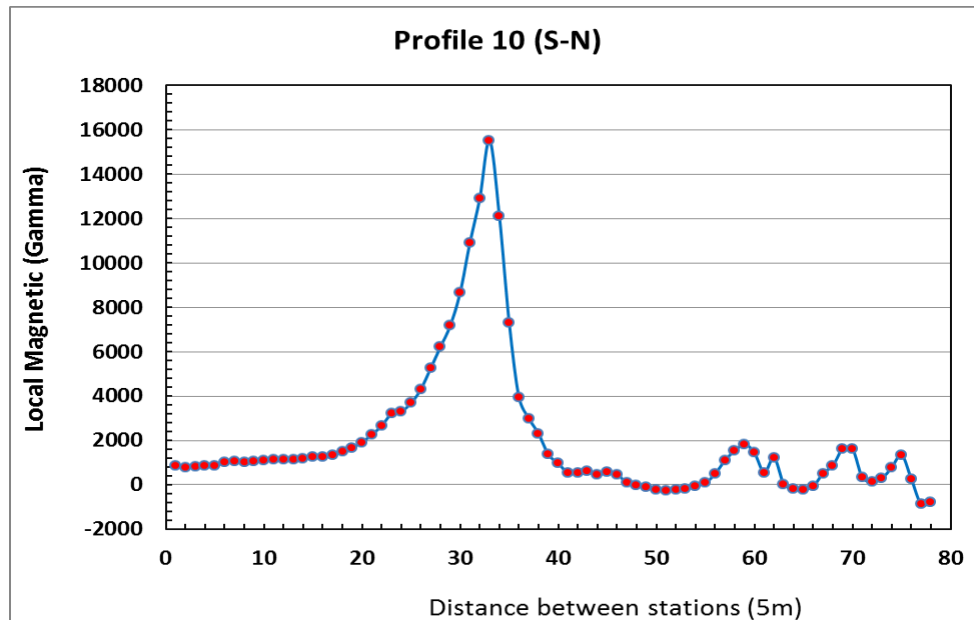
شکل ۱۳. پروفیل ناهنجاری مغناطیسی در دو حالت شرقی- غربی و شمالی- جنوبی با در نظر گرفتن فرضیات کانی‌سازی که در کنار شکل نوشته شده است (Michael, 2008, Magnetism Surveying 2011).



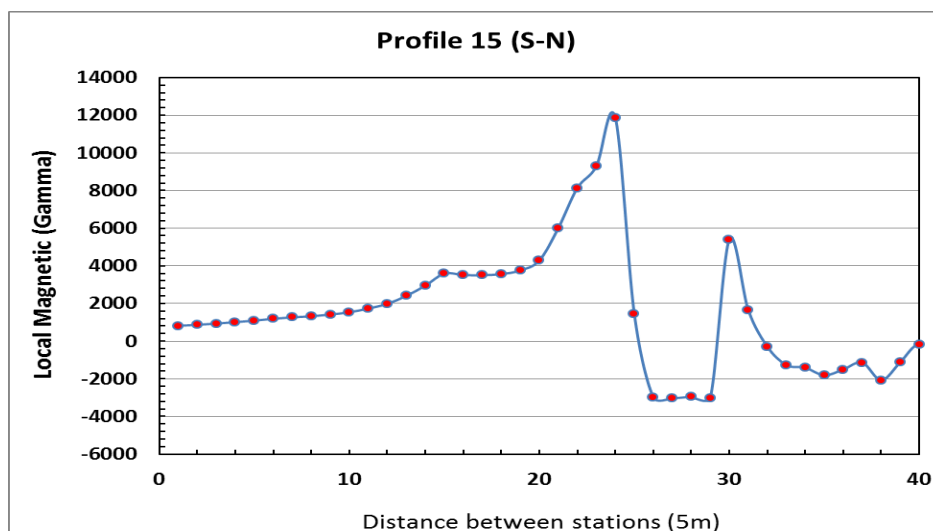
شکل ۱۴. پروفیل ناهنجاری مغناطیسی در زاویه میل ۶۰ درجه با در نظر گرفتن فرضیات کانی‌سازی که در کنار شکل نوشته شده است (Michael, 2008, Magnetism Surveying 2011).



شکل ۱۵. پروفیل ناهنجاری مغناطیسی با تغییرات در عمق کانی‌سازی با در نظر گرفتن فرضیات کانی‌سازی که در کنار شکل نوشته شده است (Michael, 2008, Magnetics Surveying 2011)



شکل ۱۶. نمودار تغییرات شدت مغناطیس محلی پروفیل (۱۰)



شکل ۱۷. نمودار تغییرات شدت مغناطیس محلی پروفیل (۱۵)

جدول ۱. موقعیت، آزیموت و زاویه حفاری گمانه‌های پیشنهادی

UTM, WGS1984 (Zone 41 N)				
DDH	X	Y	آزیموت	زاویه حفاری
DDH-1	۲۶۶۴۵۶	۳۸۱۸۲۰۴	۱۸۰	۸۰
DDH-2	۲۶۶۸۶۱	۳۸۱۸۲۱۰	۱۸۰	۸۰
DDH-3	۲۶۷۲۰۴	۳۸۱۸۱۱۲	۱۸۰	۷۵
DDH-4	۲۶۷۳۶۵	۳۸۱۸۱۰۵	۱۸۰	۸۰
DDH-5	۲۶۷۰۳۹	۳۸۱۸۱۴۲	۱۸۰	۸۰
DDH-6	۲۶۶۶۸۱	۳۸۱۸۲۱۲	۱۸۰	۸۰
DDH-7	۲۶۶۶۷۴	۳۸۱۸۱۸۷	۱۸۰	۸۰
DDH-8	۲۶۷۱۰۶	۳۸۱۸۱۰۵	۱۸۰	۸۰
DDH-9	۲۶۷۰۹۹	۳۸۱۸۱۷۶	۱۸۰	۸۰

منابع

- آراسته. الف.، ۱۳۷۰، گزارش اکتشافات مقدماتی سنگ آهن سنگان خراسان، ۱۷۲ صفحه.
- بومری. م.، ۱۳۷۷، مطالعه ژئوشیمی CI و F در بیوتیت‌های گرانیت سرنوسر در شمال شرقی ایران و استفاده از آن در تعیین منشأ کانسار آهن سنگان خراسان، خلاصه مقالات هفدهمین گردهمایی علوم زمین، ص ۱۸۱-۱۸۳.
- بومری. م.، ۱۳۸۲، ترکیب شیمیایی اسفن از سنگهای گرانیتی سرنوسر خواف، شمال شرقی ایران، خلاصه مقالات هفدهمین گردهمایی علوم زمین، ص ۱۴۲-۱۴۵.
- بومری. م.، لشکری پور. غ.، گرگیج. م.، ۱۳۸۱، شرایط تشکیل کانسار آهن سنگان بر مبنای مجموعه کانیها در شمال شرق ایران، دهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ص ۵۷-۶۳.
- شرکت تهیه و تولید مواد اولیه فولاد خراسان، ۱۳۸۷، گزارش روابط عمومی، ۱۰ صفحه.
- شرکت معدن کاو. (۱۳۸۸) نقشه زمین‌شناسی باغک (قسمت چهارم) با مقیاس ۱:۱۰۰۰.
- کاهنی. ش.، ۱۳۸۳، مطالعات ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی توده‌های C- شمالی و باغک کانسار سنگ آهن سنگان خواف، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۴۸ صفحه.
- کریم‌پور. م.ح.، ۱۳۶۹، بررسی منشأ و چگونگی تشکیل کانسار آهن سنگان خراسان، مجموعه مقالات سمینار سنگ آهن، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ص ۲۶۹-۲۸۲.
- کریم‌پور. م.ح.، ۱۳۷۳، ژئوشیمی و کانی‌شناسی کانسار سنگ آهن سنگان خراسان، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره دوم، ص ۱۴۵-۱۵۶.
- کریم‌پور. م.ح.، ۱۳۷۷، دما، نحوه تشکیل و پارائز مگنتیت در بخشهای مختلف کانسار آهن سنگان خراسان، خلاصه مقالات هفدهمین گردهمایی علوم زمین، ص ۱۶۱-۱۶۷.
- کریم‌پور. م.ح.، ۱۳۷۸، پتانسیل کانی‌سازی مس نوع پورفیری و طلا در محدوده تربت حیدریه تا کاشمر، مجموعه مقالات همایش توانمندیهای معدنی شرق کشور، ص ۱۵-۲۶.
- کریم‌پور. م.ح.، ۱۳۸۲، کانی‌شناسی، آلتراسیون، سنگ منشأ و محیط تکتونیکی کانسارهای Iron-Oxides Cu-Au و مثالهایی از ایران، یازدهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه یزد، ص ۱۸۴-۱۸۹.
- کریم‌پور. م.ح.، ملکزاده شفارودی. الف.، ۱۳۸۵، مقایسه ژئوشیمی سنگ منشأ توده مگنتیت طلا دار تنورچه و مگنتیت بدون طلای معدن سنگان، استان خراسان رضوی، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۱۳، ص ۴۳۲-۴۴۲.
- کریم‌پور. م.ح.، ملکزاده شفارودی. الف.، ۱۳۸۶، ژئوشیمی و کانی‌شناسی زون‌های اسکارنی و سنگ شناسی سنگ منشأ کانسار آهن سنگان خراسان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۶۵، ص ۱۰۸-۱۲۵.
- کریم‌پور. م.ح.، سعادت. س.، ملکزاده شفارودی. الف.، ۱۳۸۱، شناسایی و معرفی کانی‌سازی نوع Fe-Oxides Cu- Au و مگنتیت مرتبط با کمر بند ولکانیکی- پلوتونیک خواف- کاشمر- بردسکن، بسیت و یکمین گردهمایی علوم زمین.
- کریم‌پور. م.ح.، مظاهری. س.الف.، بوتریل. ر.، ۱۳۷۹، آمفیبول جدید غنی از کلر پارائز مگنتیت و آندرادیت در اسکارن سنگان خراسان، هشتمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۲۶-۱۳۰.
- مظاهری. س.الف.، ۱۳۷۷، الف.، مطالعه شیمی کانیها در اسکارنهای آهن دار سنگان خراسان، خلاصه مقالات هفدهمین گردهمایی علوم زمین، ص ۱۸۹-۱۹۶.
- مظاهری. س.الف.، ۱۳۷۷، ب. شرایط فشار، درجه حرارت و ترکیب سیال اسکارنهای مگنتیت سنگان خواف، خراسان، فشرده مقالات دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۴۵۱-۴۵۴.
- مظاهری. س.الف.، ۱۳۷۹، معرفی آمفیبولهای ناحیه سنگان خواف، هشتمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۶۴-۱۶۸.
- Arkani-Hamed. J., Urquhart. W.E.S., 1990, Reduction to pole of the North American magnetic anomalies, *Geophysics*, 55 (2), 218-225.
- Boomery. M., 1998, Petrography and geochemistry of the Sangan iron skarn deposit and related igneous rocks, northeastern Iran, P.h.D thesis, Akita University, Japan, 226 p.
- Clark. D.A., 1997, Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys, *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2). 83-103.
- Cooper. G.R.J., Cowan. D.R., 2004, Filtering using variable order vertical derivatives, *Computers & Geosciences*, 30, 455-459.
- Gunn. P.J., 1996, Workshop Interpretation of aeromagnetic data, *AGSO Journal of Australian Geology & geophysics*.

- Gunn. P.J., Madment. D., Milligan. P.R., 1997, Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop, AGSO Journal of Australia Geology & Geophysics, 17(2), 175-185.
- Ford. K., Keating. P., Thomas. M.D., 2004, Overview of Geophysical Signatuers Associated with Canadian Ore Deposits, Geological Survey of Canada, 601 Booth Street, Ottawa, Ontario K1A 0E8.
- Hitzman. M.W., 2001, Iron oxides Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why, in Porter, T. M. (Ed.), Hydrothermal Iron oxide copper-gold and related deposits: A Global perspective, Australian mineral foundation, Adelaide, 9-25.
- Liu. S., Mackey. T., 1998, Using images in a geological interpretation of magnetic data, AGSO Research Newsletter, 28.
- Magnetics Surveying, 2011, <http://pkukmweb.ukm.my/~rahim/magnetic%20lecture.htm>.
- Michael. R., 2008, Geophysical Applications Potential field methods –Geomagnetic, http://eps.mcgill.ca/~courses/c435/EPS435_07_2008-magnetics.pdf.
- Nabighian. M.N., Grauch. V.J.S., Hansen. R.O., LaFehr. T.R., Li. Y., Peirce. J.W., Phillips. J.D., Ruder. M.E., 2005, The historical development of the magnetic method in exploration, Geophysics, 70 (6), 33ND–61ND.
- Nakatsuka. T., Okuma. S., 2006, Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations, Exploration Geophysics, 37, 121-128.
- Tarlowski. C., Gunn. P.J, Mackey. T., 1997, Enhancements of the magnetic map of Australia, AGSO Journal of Australia Geology & Geophysics, 17(2), 77-82.
- <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point/>
- <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/IGRFWMM.jsp>