

تفسیر ناهنجاری‌های مغناطیسی معادن غربی سنگ آهن سنگان با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و گمانه‌ها

عباس گل‌محمدی^۱، محمد رضا حیدریان شهری^{۲*}، سید احمد مظاهری^۳، بهنام رحیمی^۲ و محمد حسن کریم پور^۳

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۸/۱۹، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۹)

چکیده

معدن آهن سنگان یک کانسار آهن اسکارن مگنتیتی است. بهترین روش متداول جهت اکتشاف این مدل کانسارها با توجه به وجود خاصیت مغناطیسی در آنها، روش مغناطیس‌سنجی است. بر اساس این روش می‌توان اطلاعاتی درباره عمق، شیب، شکل و امتداد منبع ایجادکننده ناهنجاری به‌دست آورد. اکتشافات زیادی از این‌گونه ذخایر در سطح دنیا با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی صورت گرفته است که نمونه آن ذخایر بزرگ گل‌گهر در ایران است. بر مبنای مغناطیس‌سنجی و زمین‌شناسی، وجود ذخیره‌ای عظیم در طی اکتشاف آهن سنگان پیش‌بینی شده است. حفر ۵۵۸ گمانه در قسمت غربی با شبکه ۵۰ در ۵۰ متر با استناد به داده‌های مغناطیس‌سنجی و زمین‌شناسی سطحی، طراحی شده و پس از حفاری، داده‌های زیرسطحی خیلی مفیدی به‌دست آمده است. بیشتر توده‌های نفوذی گرانیتی و از نوع تیپ اکسیدان هستند که به دلیل وجود کانی‌های ریز و پراکنده مگنتیت داخل آن‌ها، پذیرفتاری مغناطیسی بیشتری از سایر گرانیت‌ها دارند. این‌ها به‌عنوان سنگ منشأ ایجادکننده توده عظیم معدنی سنگان لحاظ شده‌اند. تعداد ۱۹۳۷۶ نقطه مغناطیس‌سنجی زمینی با مشخصات مختلف برداشت‌شده در چند مرحله اکتشافی در این مطالعه یکسان‌سازی و تفسیر شده است. منابع ایجادکننده اکثر ناهنجاری‌های مغناطیسی نقشه برگردان به قطب (RTP) کانی‌سازی مگنتیت است که داده‌های حفاری آن را تأیید می‌کند. با توجه به وجود مغناطیس باقیمانده در اسکارن مگنتیتی و نبود چنین اندازه‌گیری‌هایی و از طرف دیگر لازم بودن آن در تعیین صحیح عمق منابع ناهنجاری‌های مغناطیسی با مدل‌سازی معکوس یا پیشرو، از فیلترهای مشتق اول قائم و فراسو برای هدایت حفاری در این مطالعه استفاده شده است. اطلاعات عمقی مربوط به منبع ناهنجاری‌ها در نقشه‌های گرادیان عمودی و فراسو با عمق حاصل از حفاری و مدل‌سازی بلوکی هم‌خوانی خوبی دارند. مقدار ذخیره کانسار و عمق آن از ناهنجاری غربی (A^1) تا ناهنجاری مرکزی (C) در حال افزایش بوده و شیب آن به سمت شرق است. این تغییر عمق کانی‌سازی با پاسخ عمقی نقشه‌های فراسو مبنی بر معرفی ناهنجاری مرکزی (C) به‌عنوان عمیق‌ترین بخش کانسار سنگان هماهنگی دارد. پاسخ مغناطیسی در نقشه فراسوی ۱۰۰۰ متر در محل ناهنجاری مذکور می‌تواند مربوط به عمق زیاد کانی‌سازی (تا ۶۲۰ متر حفاری‌شده در حال حاضر) یا توده نفوذی عمیق‌تر در این محل باشد که تأیید آن به حفاری عمیق (بیش از ۱۰۰۰ متر) نیاز دارد.

واژه‌های کلیدی: برگردان به قطب، حفاری مغزه‌گیری، فیلترها، معدن آهن سنگان، مغناطیس‌سنجی، ناهنجاری

۱ مقدمه

مغناطیس‌سنجی متداول‌ترین روش ژئوفیزیکی برای نقشه‌برداری زمین‌شناسی، اکتشاف مواد معدنی و نفت است (پترسون و ریوس، ۱۹۸۵). پی‌جویی‌های مغناطیس‌سنجی هوایی و زمینی به‌طور متداول در اکتشاف مواد معدنی در مقیاس‌های متغیر از حداقل ۱:۲۵۰۰۰۰ تا کمتر از ۱:۵۰۰۰ به کار برده می‌شود. اکثر کاربردهای این روش غیرمستقیم است؛ به این معنا که فقط مگنتیت هدف اصلی برنامه اکتشافی نیست. کاربرد اصلی، تشخیص و جداکردن محیط‌های ساختاری یا استراتیگرافی مناسب برای نهشت تیپ‌های مختلف مواد معدنی است. اغلب پی‌جویی‌های مغناطیسی همزمان با الکترومغناطیس هوایی، فرکانس خیلی پایین یا اندازه‌گیری‌های رادیومتری انجام می‌گیرد.

پی‌جویی‌های مغناطیس‌سنجی به دو روش هوابرد و زمینی انجام می‌پذیرد. هر دو روش در منطقه سنگان و نواحی اطراف برداشت شده است. داده‌های منطقه‌ای قدیمی هوایی مغناطیسی (فاصله خطوط برداشت ۷ مایل و ارتفاع پرواز ۲ تا ۳ مایل) سازمان زمین‌شناسی (۱۳۶۷) با آنکه پاسخ مغناطیسی سنگان را نشان می‌دهد، ولی قابلیت تفکیک کافی در اکتشاف تفصیلی را ندارد. پی‌جویی‌های هوایی گرادیان گرانی به همراه مغناطیس به‌طور موفقیت‌آمیزی در سال‌های اخیر برای اکتشاف هماتیت و مگنتیت در قسمت‌های مختلف جهان از جمله شمال کانادا، غرب آفریقا و آمریکای جنوبی انجام گرفته است (ماتاگوریا و همکاران، ۲۰۱۱). پی‌جویی‌های هوایی مغناطیسی با کیفیت بالا (فاصله اندازه‌گیری زمانی چند ثانیه در ارتفاع حدود ۶۰ متر و با فاصله خطوط ۲۵۰ متر) اخیراً و بعد از این تحقیق توسط سازمان زمین‌شناسی کشور در منطقه سنگان- تربت حیدریه انجام پذیرفته است.

با توجه به وجود مگنتیت فراوان در کانسار مگنتیت اسکارنی سنگان (قاسمی پور، ۱۳۵۵ و ۱۳۶۲) و

مغناطیسی‌بودن این کانی، از روش مغناطیس‌سنجی زمینی به‌عنوان بهترین روش مستقیم برای اکتشاف مگنتیت در این مطالعه بهره گرفته شده است (دوبرین، ۱۹۹۸؛ حیدریان شهری، ۱۳۸۴؛ و دونوهو، ۲۰۱۲). به دلیل همراهی ژنتیکی هماتیت با مگنتیت پی‌جویی‌های مغناطیس و گرانی زمینی مشابه سنگان در ایران و جهان انجام گرفته است (نواچمید و همکاران، ۲۰۱۵؛ غلامی پور سی سختی و همکاران، ۱۳۹۲؛ برومندی، ۱۳۸۹، ۱۳۹۲، ۱۹۷۹). در روش زمینی شدت میدان مغناطیسی زمین به وسیله مغناطیس‌سنج‌های مختلف قدیمی روسی و جدید حساس غربی با دقت یک نانوتسلا در این مطالعه اندازه‌گیری شده‌اند. فاصله خطوط برداشت ۱۰۰ متر و فاصله نقاط بین ۵ تا ۲۰ متر بوده است. پس از برداشت داده‌ها، تصحیحات ضروری بر روی داده‌ها انجام پذیرفته و نهایتاً نقشه شدت میدان مغناطیس‌سنج کل ترسیم شده است (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۱). سپس فیلتر برگردان به قطب برای قرارگرفتن ناهنجاری‌ها بر روی منشأ ایجادکننده ناهنجاری‌ها اعمال گردیده است (بارانوف و نادى، ۱۹۶۴). بعد از آن با توجه به داشتن یا نداشتن اندازه مغناطیس باقیمانده و امکانات نرم‌افزاری مناسب تفسیرهای کیفی و کمی انجام می‌گیرد (یاکوبسن، ۱۹۸۷) و (گانویو و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه به دلیل عدم یکتایی جواب‌ها در میدان‌های پتانسیل، وجود مغناطیس باقیمانده در مگنتیت نوع اسکارنی و لزوم آگاهی از آن در تعیین صحیح عمق منبع ناهنجاری با مدل‌سازی پیشرو یا معکوس فقط از اطلاعات عمقی گرادیان عمودی داده‌های برگردان‌شده به قطب و فراسو، جهت هدایت حفاری و تطابق آن با عمق‌های حاصل از حفاری و مدل‌سازی بلوکی استفاده شده است. در ادامه اهم کارهای انجام گرفته در این مطالعه آمده است.

۲ روش مطالعه

جهت نیل به اهداف این تحقیق این فعالیتها انجام پذیرفت:

- جمع آوری کلیه نقشهها و دادههای زمین شناسی، توپوگرافی، مغناطیس سنجی، مغزه های حاصل حفاری و تعیین ذخیره که توسط شرکتها و مؤسسات مختلف در طول بیش از ۳۰ سال گذشته تهیه شده است.

- نمونه برداری از انواع واحدهای سنگی منطقه و تهیه و مطالعه بیش از ۳۰۰ مقطع نازک به منظور مطالعات سنگ شناسی و دگرسانی و ۴۰ مقطع بلوک صیقلی از ماده معدنی سنگ آهن و باطله های فلزی جهت بررسی کانی سازی.

- اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی همه واحدهای سنگی موجود در منطقه.

- تلفیق نقشه های زمین شناسی تهیه شده قبلی و یکسان سازی واحدهای سنگی و رفع نواقص موجود و تهیه نقشه نهایی زمین شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه با استفاده از نرم افزار ArcGIS.

- تهیه فایل جامع داده های مغناطیس سنجی قبلی با مشخصات مختلف و الحاق و یکسان سازی آنها از لحاظ مؤلفه های برداشت شده و پردازش مجدد همه داده ها در یک نقشه با استفاده از نرم افزار ERMAPPER.

- تهیه فایل جامع داده های حفاری مغزه گیری ۵ توده معدنی موجود در منطقه و تهیه مدل سه بعدی معدن با استفاده از نرم افزار GEMCOM.

- بحث و تفسیر داده های مغناطیس سنجی و تلفیق این داده ها با اطلاعات زمین شناسی، پذیرفتاری مغناطیسی و حفاری مغزه گیری.

داده ها در سه بخش زمین شناسی و ساختار، مغناطیس سنجی و داده های حفاری مغزه گیری (تخمین ذخیره و مدل سازی سه بعدی) مورد بررسی قرار گرفته اند. برای مشاهده ناهنجاری های مغناطیسی واقعی مربوط به

کانی های فرومغناطیس موجود در یک منطقه، تصحیحاتی بر روی داده برداشت شده باید صورت گیرد. این تصحیحات شامل تصحیح میدان اصلی و تصحیح روزانه است که در این تحقیق مطابق استاندارد انجام پذیرفته است. تصحیح میدان اصلی با استفاده از برنامه IGRF (میدان مرجع ژئومغناطیس بین المللی) و برای تصحیح روزانه نیز در هنگام اندازه گیری ها، یک مغناطیس سنج ثابت در یک ایستگاه مینا به کار گرفته شده و در زمان های مشخصی قرائت مجدد از آن ایستگاه انجام گرفته است. روش دیگر نیز که تکرار بعضی از ایستگاه های مشاهده در فواصل زمانی حدود دو ساعت است در برخی برداشت ها به کار گرفته شده است. جهت تعبیر و تفسیر صحیح داده ها، پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای سنگی مختلف منطقه کانسار، سنگ میزبان و توده های نفوذی همراه اندازه گیری شده است.

۳ زمین شناسی

۱-۳ زمین شناسی عمومی و کانی زایی

منطقه مورد مطالعه در قسمت شمال شرقی زون بلوک لوت واقع است. از نظر زمین شناسی در ناحیه ای در جنوب نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ تایباد و در جنوب گسل درونه با امتداد شرقی - غربی تا شمال غرب - جنوب شرق که از گسل های فعال کنونی ایران است، قرار می گیرد و از دو مسیر محدوده مورد مطالعه قابل دسترسی است (شکل ۱-الف و ۱-ب).

واحدهای مختلف سنگی از جمله سنگ های رسوبی شیل و سیلت استون، کنگلومرا، سنگ های آذرین خروجی و نفوذی، واحدهای سنگ آهکی و انواع اسکارن با کانی های مختلف در منطقه مشاهده می گردد. نقشه زمین شناسی توده های معدنی غربی سنگان در شکل ۲ نشان داده شده است (گل محمدی و همکاران، ۲۰۱۴). واحدهای آذرین موجود در این منطقه متعلق به زمان

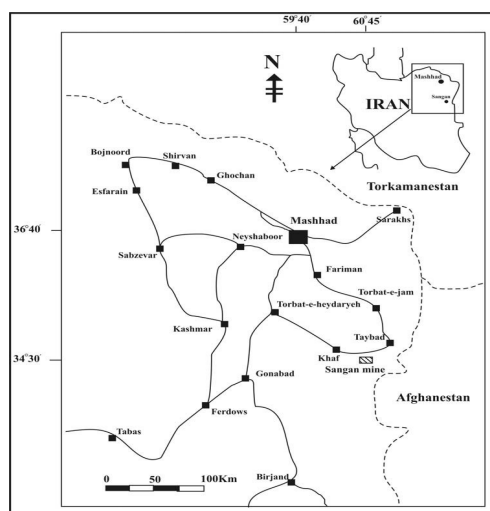
نظریات مختلفی در مورد منشأ کانی‌زایی در منطقه عنوان شده است که از آن میان می‌توان به آتشفشانی-رسوبی (برومندی، ۱۳۶۲؛ ترنت و اسکارن، ۱۹۹۰؛ قاسمی‌پور، ۱۳۵۵؛ قاسمی‌پور، ۱۳۶۲؛ کریم‌پور، ۱۳۷۳؛ کریم‌پور، ۱۳۶۹؛ قوامی ریایی، ۱۳۷۱؛ بومری، ۱۳۷۱؛ کاهنی، ۱۳۸۳؛ بومری، ۱۹۹۸) و مگنتیت نوع اکسیدهای آهن (Fe-Oxides) (کریم‌پور، ۱۳۸۲) اشاره کرد. با توجه به اینکه مطالعات دقیق‌تر و مستندات قانع‌کننده‌تری در خصوص منشأ اسکارن گزارش شده است و همچنین با مطالعات میدانی محققان این تحقیق، معدن سنگان را می‌توان در حالت کلی یک ذخیره از انواع ذخایر اکسید آهن همراه طلا و مس (Iron Oxide (IOCG) Copper Gold و نوع مگنتیت اکسیدهای آهن (Fe-Oxides) در نظر گرفت که بر اثر مکانیسم اسکارنی ایجاد شده است (گل محمدی و همکاران، ۲۰۱۴). اسکارن در بخش غربی از نوع کلسیک (همراه توده‌های معدنی A, Cs, B) و در بخش شرقی از نوع منیزومی (همراه توده معدنی Cn) است (شکل ۲).

۲-۳ زمین‌شناسی ساختاری

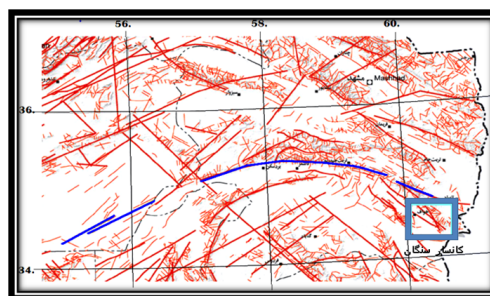
همان‌طور که عنوان شد این منطقه در منتهی الیه و جنوب (قسمت ایرانی) گسل درونه در منطقه سنگان خواف واقع است (شکل ۱-ب). گسل درونه یکی از گسل‌های امتدادلغز درون‌قاره‌ای با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر از افغانستان مرکزی تا غرب ایران مرکزی گسترش یافته است. آگاهی از وضعیت تنش زمین‌ساختی امروزی در اکتشاف و استخراج معادن مسئله بسیار ضروری است. تاکنون این منطقه تحت تأثیر چندین مرحله زمین‌ساختی قوی قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه به دلیل واقع شدن در موقعیت خاص زمین‌ساختی دارای تراکم زیادی از شکستگی‌هاست. عامل گسلش باعث جابه‌جایی و

ترشیری بوده و واحدهای رسوبی متعلق به مزوزوئیک هستند. بررسی نقشه مذکور و سایر نقشه‌های زمین‌شناسی (کانی‌سازی) ۱:۵۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰۰ موجود منطقه، روند کانی‌زایی خاص به صورت تقریباً شمال‌غربی-جنوب شرقی را نشان می‌دهد که موازی و در حاشیه توده‌های نفوذی گرانئوئیدی شمال آن است. برداشت داده‌های ساختاری و تهیه نقشه مربوطه نیز نشان می‌دهد که پستی و بلندی‌های منطقه عمدتاً از ساختارهای گسلی منطقه تبعیت می‌کند و مناطق پست عمدتاً بر کف دره‌های حاوی شیل و سیلت استون مطابقت دارد و ارتفاعات نیز بر سنگ‌های ولکانیکی، پلوتونیک، کربناتی و سنگ آهن هماتیته و مگنتیتی منطبق است.



(الف)

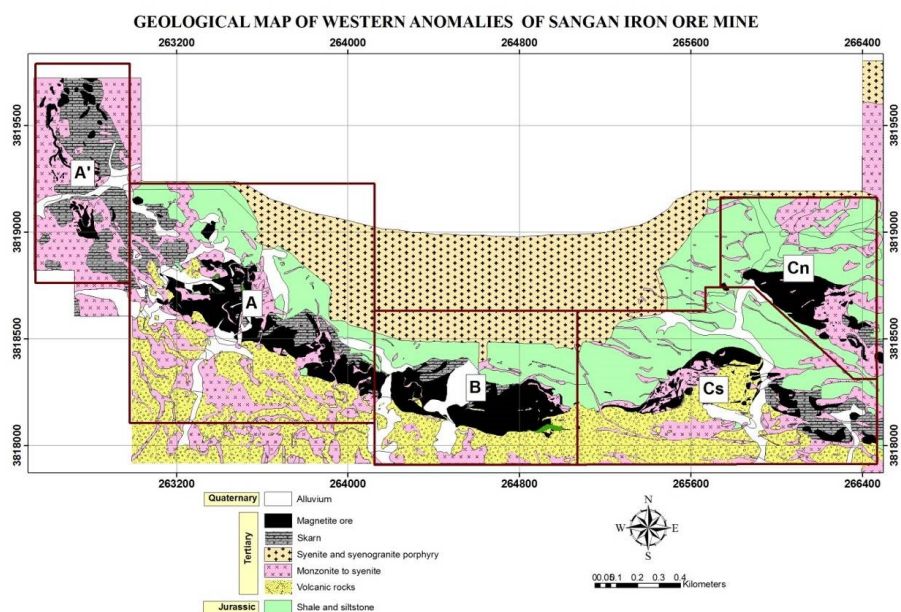


(ب)

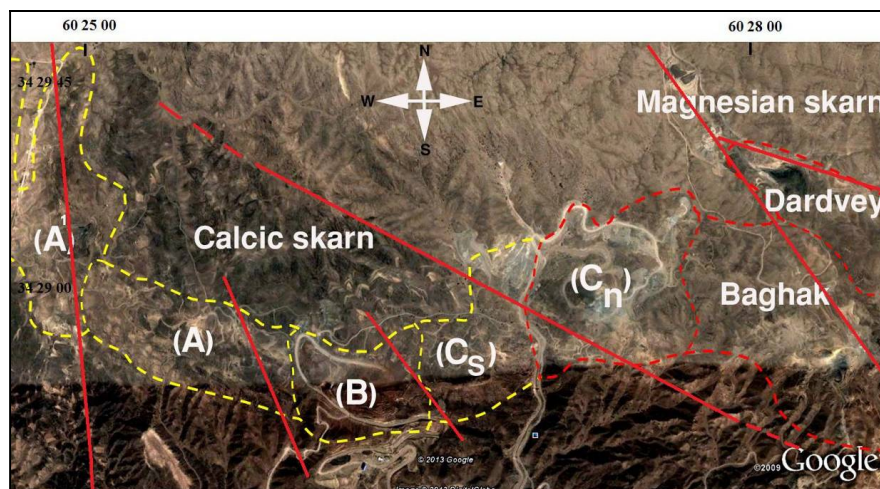
شکل ۱. (الف) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی. (ب) موقعیت گسل درونه (عارضه خطی آبی‌رنگ) و معدن سنگان.

مختلف رژیم کشتی بر منطقه حکم فرما شده است (قربانلو، ۱۳۹۲ و قربانلو و همکاران، ۱۳۹۲). رژیم تکتونیکی کشتی ایجاد شده، علاوه بر تغییر شکل شکننده سنگها، سبب ایجاد فضای مناسب برای کانی سازی در شکستگیهای با روند شرقی غربی شده است که حاکی از ارتباط داشتن تکتونیک منطقه با فرایند کانی زایی است (قربانلو، ۱۳۹۲).

گم شدن عدسی های کانه دار در عمق شده است که این موضوع کار اکتشاف تکمیلی و نتایج حاصل از گمانه زنی در منطقه را تحت تأثیر قرار داده است. این موضوع را به وضوح می توان در جدایش توده معدنی A به دو بخش شمالی و جنوبی در مدل سه بعدی و جدایش توده معدنی C جنوبی از شمالی در سطح زمین (شکل ۳) مشاهده کرد. با در نظر گرفتن حرکات گسل درونه در زمان های



شکل ۲. نقشه زمین شناسی ساده شده ۱:۵۰۰۰ محدوده توده های معدنی غربی معادن سنگان که با حروف مشخص شده اند، با اصلاحات (گل محمدی و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۳. گسل های مهم، توده های معدنی و انواع اسکارن در معادن سنگان که با حروف مشخص شده اند (گل محمدی و همکاران، ۲۰۱۴).

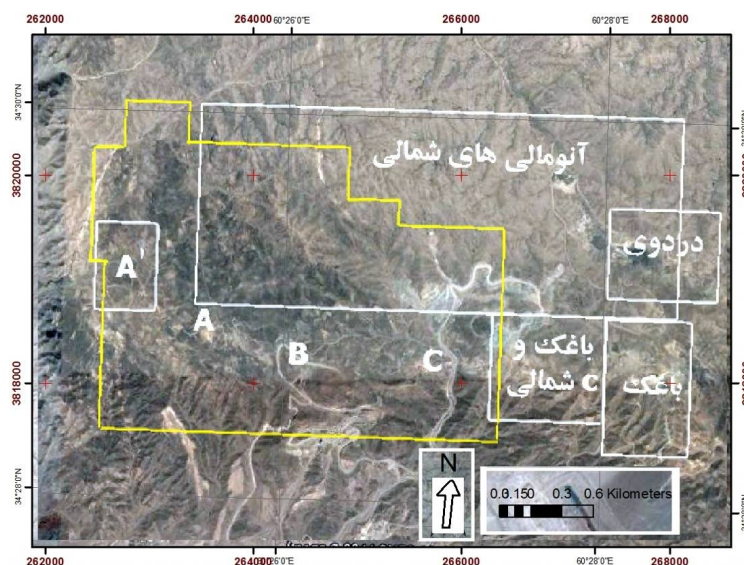
۴ مغناطیس‌سنجی

نظر به اینکه رخمون مگنتیت در سطح دارای راستای جنوب شرقی-شمال غربی است، بایستی خطوط برداشت مغناطیس‌سنجی را در جهت عمود بر آن راستا انتخاب کرد تا نتیجه بهتری به دست آید؛ ولی در عمل به دلیل آنکه معدن سنگان دارای روندهای مختلف در کانی‌زایی‌هاست، در نتیجه راستای برداشت‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی و توپوگرافی، شمالی-جنوبی انتخاب شده است تا با سهولت و در حداقل زمان، برداشت صورت پذیرد. خطوط برداشت زمین‌شناسی و حفاری مغزه‌گیری دقیقاً بر روی خطوط برداشت مغناطیس‌سنجی در نظر گرفته شده است. بنابراین فاصله این خطوط ۵۰ و ۱۰۰ متر است و معمولاً عدد صحیحی از مختصات طول جغرافیایی بر مبنای شبکه مختصاتی European ۱۹۵۰ UTM انتخاب شده است. داده‌های برداشت شده در منطقه‌ای با وسعت تقریبی حدود ۱۰ کیلومتر مربع بین طول‌های ۲۶۲۵۰۰ تا ۲۶۶۵۰۰ شرقی و عرض‌های ۳۸۱۷۵۰۰ تا ۳۸۲۰۰۰۰ شمالی در قالب سه محدوده برداشت گردیده و تعداد کل نقاط برداشت شده

۱۹۳۷۶ عدد بوده است (شکل ۴).

عملیات برداشت داده‌های مگنتومتري با استفاده از دستگاه‌های مختلف مغناطیس‌سنجی از جمله پروتون ژئومتريکس ساخت آمریکا و مگنتومتر ۱۳۲۳ مدل M-27 قدیمی ساخت روسیه (شوروی سابق) با فواصل خطوط عمدتاً ۱۰۰ متر و فاصله نقاط ۵، ۱۰ و ۲۰ متر انجام گرفته است (گروه پژوهشی اکتشافات ذخایر شرق ایران، ۱۳۹۱؛ گروه اکتشافی معدن سنگ آهن چغارت بافق، ۱۳۶۳) که در جدول ۱ مشخصات برداشت آورده شده است.

با توجه به اینکه داده‌های رقومی برداشت‌های قدیمی موجود نبود، نقشه موجود در نرم‌افزار ژئورفرنس گردید و سپس همه منحنی‌های موجود در نقشه مجدداً به صورت رقومی ترسیم گردید. نقشه رقومی به دست آمده وارد نرم‌افزار گردید و سپس با توجه به فاصله خطوط برداشت مغناطیسی اولیه و فاصله نقاط برداشت، فایل رقومی مقدار مؤلفه قائم برداشت شده و مختصات نقاط برداشت تهیه گردید. از آنجا که در برداشت گروه اکتشافی معدن سنگ آهن چغارت بافق مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی زمین اندازه‌گیری شده است؛ بنابراین جهت یکسان‌سازی



شکل ۴. محدوده‌های برداشت‌شده مغناطیس‌سنجی در مراحل مختلف در توده‌های معدنی غربی و مرکزی معدن سنگان.

جدول ۱. مشخصات محدوده‌های برداشت‌شده مغناطیس‌سنجی در توده‌های غربی معدن سنگان.

ردیف	منطقه برداشت	گروه برداشت‌کننده	طول خطوط {تعداد پروفیل * طول پروفیل}	فاصله خطوط (متر)	فاصله نقاط (متر)	تعداد نقاط	نوع دستگاه
۱	A'	گروه پژوهشی ذخایر معدنی شرق ایران	۱۵ {۲۲ پروفیل با طول بین ۹۴ تا ۶۰ متر}	۱۰۰ و ۵۰	۵	۲۹۴۶	Geometrics-G856
۲	, Cs, B, A Cn	گروه اکتشافی معدن سنگ آهن چغارت باقی	۱۴۰ {۷۰ پروفیل با طول ۲۰۰۰ متر}	۵۰	۲۰ تا ۱۰	۱۳۲۳ ۰	مدل M-27
۳	شمال معدن	گروه پژوهشی ذخایر معدنی شرق ایران	۳۸ {۴۸ پروفیل با طول بین ۱۰۰ و ۷۰۰ متر}	۱۰۰	۱۰	۳۷۸۰	Geometrics-G856

مشتق اول قائم میدان، یک روش پرکاربرد برای واضح‌تر کردن ناهنجاری‌های محلی است و اثر این روش تضعیف کردن ناهنجاری منطقه‌ای و تقویت ناهنجاری محلی است (حیدریان شهری، ۱۳۸۴).

فیلتر فراسو برعکس فیلتر مشتق اول قائم عمل می‌کند، به طوری که ناهنجاری‌های مربوط به منشأهای عمیق را تقویت و ناهنجاری‌های مربوط به سطح را تضعیف کرده (بلکلی، ۱۹۹۶) و تأثیر منابع محلی را کم می‌کند (حیدریان شهری، ۱۳۸۴). بیشترین شدت میدان بیش از ۸۵۰۰۰ نانوتسلا در ناهنجاری Cn با شدت میدان زمینه حدود ۴۸۰۰۰ نانوتسلا است که اختلافی در حدود ۳۷۰۰۰ نانوتسلا را نشان می‌دهد. این اختلاف زیاد می‌تواند نشان از زیاد بودن منشأ ناهنجاری‌ها از لحاظ تناژ، عیار، کم عمق بودن منبع ناهنجاری، نوع کانی مغناطیسی (مگنتیت) یا تلفیقی از همه عوامل باشد.

۵ پذیرفتاری مغناطیسی

اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی در واحدهای سنگی کل منطقه انجام گرفته است تا در تعبیر و تفسیر ناهنجاری‌های مغناطیسی استفاده شود. دانستن خاصیت فیزیکی سنگ‌ها (پذیرفتاری مغناطیسی، چگالی و ...) در تعیین روش

داده‌های به دست آمده با سایر برداشت‌ها، این داده‌ها بر سینوس زاویه میل زمین در معدن سنگان (تقریباً برابر ۰/۸) تقسیم شدند تا بیانگر کل میدان باشند. سپس تمام محدوده‌ها بدون الصاق به یکدیگر و یا در نظر گرفتن پردازش و تعبیر و تفسیرهای اولیه و صرفاً با توجه به فایل جامع تهیه شده مقادیر شدت میدان کل منطقه و مقادیر برداشت شده در مناطق دارای همپوشانی، رقومی سازی گردید و پس از اعمال اصلاحات، فایل عددی نهایی برای تمام نقاط تهیه گردید. این داده‌ها سپس تحت فرآیند پردازش با استفاده از نرم افزار ERMAPPER قرار گرفتند و تهیه نقشه‌های مختلف مغناطیسی در برگیرنده تمام ناهنجاری‌های مغناطیسی در این مطالعه فراهم گردید. این نقشه‌ها شامل نقشه شدت کل میدان (شکل ۵)، نقشه برگردان به قطب (RTP)، نقشه مشتق اول قائم و نقشه فراسو است. نقشه شدت کل میدان تجسمی کلی از داده‌های مغناطیسی فراهم کرده و برای تفسیر کلی استفاده می‌شود (حیدریان شهری، ۱۳۸۴؛ اورگوهارت، ۲۰۰۷). تفسیر نهایی بر روی داده‌های برگردان شده به قطب صورت می‌گیرد (ناکاتسوکا و اوکوما، ۲۰۰۶). پس از اعمال این فیلتر، ناهنجاری‌ها در بالای منبع ایجادکننده خود قرار می‌گیرند (گان و همکاران، ۱۹۹۷). محاسبات

شمال منطقه بین $SI \times 10^{-3}$ ۱۵ تا $SI \times 10^{-3}$ ۲۵ متغیر است. این در حالی است که پذیرفتاری مغناطیسی در اسکارن مگنتیت در این منطقه بیش از $SI \times 10^{-3}$ ۱۰۰۰ بوده و تا $SI \times 10^{-3}$ ۶۴۹۰ می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که اختلاف پذیرفتاری مغناطیسی کانی‌سازی مگنتیت که هدف اکتشافی مغناطیس‌سنجی در این پروژه است، بسیار بیشتر از واحدهای سنگی محدوده مورد مطالعه است.

جدول ۲. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای مختلف محدوده مورد مطالعه (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

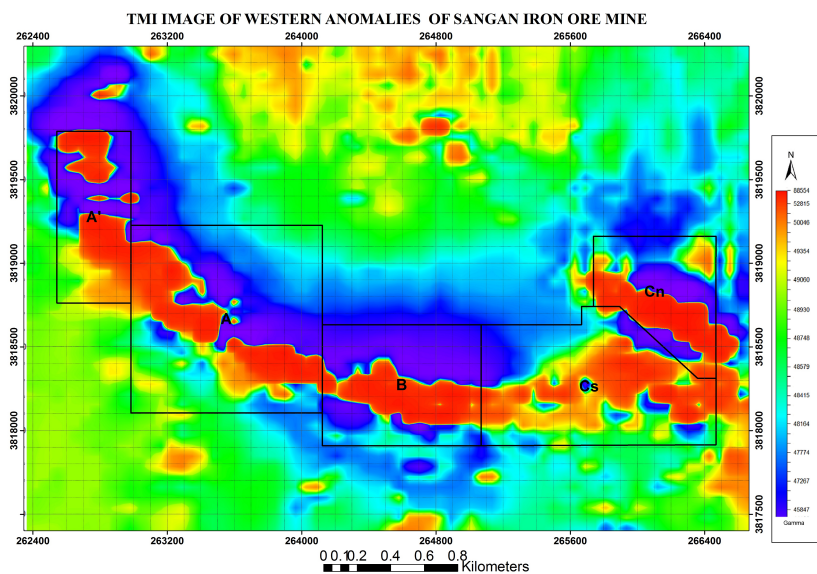
ردیف	نام سنگ	دامنه پذیرفتاری مغناطیسی $\times 10^{-3} SI$
۱	شیل سیلیسی	۰/۱۵ تا ۰/۰۱
۲	داسیت	۱۹/۸ تا ۷/۹
۳	گارنت اسکارن	۴/۷ تا ۱
۴	مگنتیت اسکارن	۶۴۹۰ تا ۲۳۰۰
۵	انواع گرانیت‌ها	۲۱ تا ۰/۰۵

۶ حفاری مغزه‌گیری (مدل‌سازی سه‌بعدی و تخمین ذخیره)

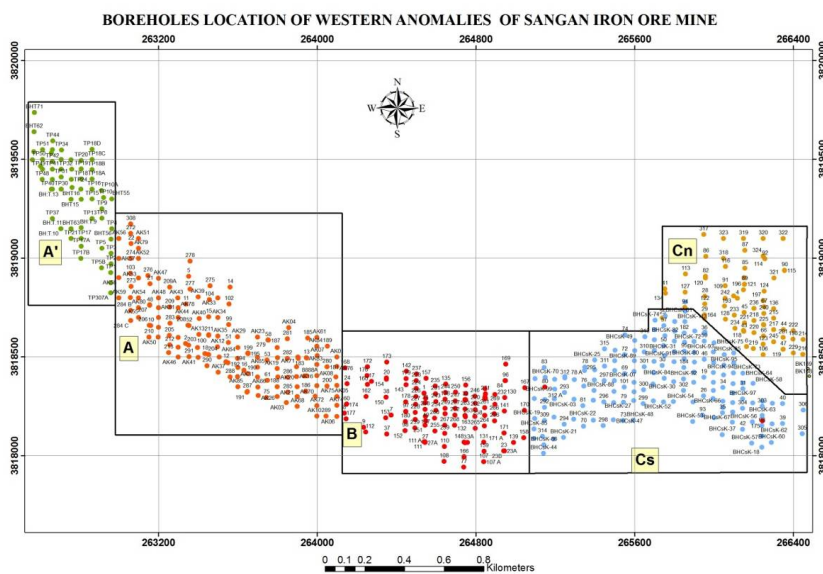
پس از اتمام عملیات مغناطیس‌سنجی و پردازش داده‌های مربوطه در هر مرحله، حفر گمانه‌های اکتشافی در شبکه طراحی شده صورت گرفته است. این عملیات در شبکه 100×100 و 50×50 با حفر ۵۵۸ گمانه انجام گرفته است (شکل ۶).

شبکه حفاری و داده‌های حاصل از آن امکان مدل‌سازی و تعیین ذخیره را با نرم‌افزار Gemcom فراهم کرد. تجزیه و تحلیل داده‌های حفاری به تهیه مدل سه‌بعدی و تعیین ذخیره کانسار سنگان منجر گردید. جهت تأیید داده‌های حفاری نیز عملیات چاه‌پیمایی در برخی مناطق انجام گرفته است و در نتیجه عملیات چاه‌پیمایی صحت عملیات حفاری و داده‌های برداشت شده را تأیید کرده است. نتایج آنالیزهای شیمیایی کانی‌زایی سنگ آهن در مغزه‌ها و سطح در جدول ۳ نمایش داده شده است.

ژئوفیزیکی استفاده‌شده و تفسیر داده‌ها بسیار مهم است (کلارک و همکاران، ۱۹۹۷). تفسیر اطلاعات مغناطیس‌سنجی زمینی می‌بایست با آگاهی از مقدار پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای سنگی آن منطقه و کانسار هدف اکتشافی انجام گیرد. به‌عنوان مثال اگر کانی‌سازی مگنتیت در داخل سنگ‌های رسوبی تشکیل شده باشد، به دلیل اختلاف زیاد در عدد پذیرفتاری مغناطیسی، هرگونه ناهنجاری مغناطیسی که در منطقه دیده شود، مربوط به کانی‌سازی مگنتیت است. اما اگر سنگ‌های دربرگیرنده کانی‌سازی مگنتیت، سنگ‌های گرانیتوئیدی اکسیدان (سری مگنتیت یا نوع I) باشند، اختلاف عدد پذیرفتاری مغناطیسی بسیار کمتر و تفسیر اطلاعات مشکل‌تر است. زیرا در برخی موارد ممکن است یک ناهنجاری مغناطیسی بزرگ در منطقه در اثر حضور توده‌های نفوذی سری مگنتیت به وجود بیاید که با کانی‌سازی مگنتیت اشتباه گرفته شود. واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه شامل شیل سیلیسی و واحدهای مختلف گرانیتی اکسیدان (سری مگنتیت)، اسکارنها و واحد داسیتی است که قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است؛ بنابراین به منظور تفسیر بهتر داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی برداشت‌شده در محدوده مورد مطالعه، پذیرفتاری مغناطیسی در این واحدهای سنگی در چندین نقطه مختلف توسط دستگاه پذیرفتاری‌سنج مدل SM-30 با دقت $SI \times 10^{-7}$ ۱، ساخت شرکت HZ-Instruments اندازه‌گیری شد (گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱؛ ملک‌زاده و همکاران، ۲۰۱۳). شیل‌های سیلیسی در شمال محدوده مورد مطالعه رخنمون دارند. پذیرفتاری مغناطیسی در شیل سیلیسی بین $SI \times 10^{-3}$ ۰/۰۱ تا $SI \times 10^{-3}$ ۰/۰۵ متغیر است (جدول ۲). این سنگ‌ها در بخش‌هایی که مقداری مگنتیت در اثر محلول کانه‌دار در آن ایجاد شده است تا $SI \times 10^{-3}$ ۲ می‌رسد. پذیرفتاری مغناطیسی در واحد سینوگرانیت در



شکل ۵. تصویر شدت میدان مغناطیسی کل منطقه توده‌های معدنی غربی معدن سنگان که با حروف مشخص شده‌اند.



شکل ۶. نقشه جانمایی گمانه‌ها در توده‌های معدنی غربی معدن سنگان که با حروف مشخص شده‌اند.

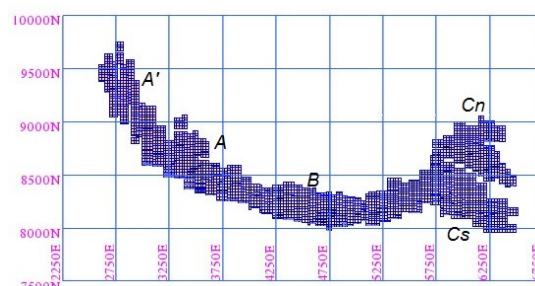
جدول ۳. عیار نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌های توده معدنی A و Cs به‌عنوان نمونه.

ردیف	ناهنجاری (گمانه)	از	تا	طول نمونه (متر)	Fe(%)	FeO(%)	S(%)
۱	A(۶۱)	۳۸۶/۳	۳۸۹/۶	۳/۳	۲۳/۱۳	۱۲/۷۲	۰/۲۲۸
۲	A(۶۱)	۳۸۹/۶	۴۰۱/۷	۱۲/۱	۳/۹۵	۳/۴۲	۰/۱۲۴
۳	A(۶۱)	۴۰۱/۷	۴۰۶/۵	۴/۸	۵۰/۳۷	۲۴/۷۱	۰/۴۳۱
۴	Cs(۷۹)	۹۰/۲	۹۳	۲/۸	۴۸/۳۸	۲۶/۴۴	۰/۲۹۷
۵	Cs(۷۹)	۹۳	۹۵	۲	۱۵/۳۸	۴/۷۹	۱/۶۱۲
۶	Cs(۷۹)	۹۵	۹۷/۴	۲/۴	۵۲/۴۳	۲۷/۴۰	۰/۰۲۷

محل‌های رخنمون ماده معدنی با نقشه برگردان به قطب‌شده مغناطیسی معدن است. کاربرد دوم در جدا کردن ناهنجاری‌های سطحی از عمقی با استفاده از نقشه‌های مشتق اول برگردان شده به قطب شدت میدان است. کاربرد سوم نیز در به دست آوردن تخمینی از عمق و روند کانی‌سازی در محل ناهنجاری‌ها با استفاده از نقشه‌های فراسو است. صحت تفسیر ناهنجاری‌های مغناطیسی نقشه برگردان به قطب و نقشه‌های فیلترشده با مقایسه با عمق حاصل از حفاری و مدل سه‌بعدی حاصل از حفاری به‌خوبی تأیید می‌شود.

بر اساس ناهنجاری‌های مغناطیسی نقشه شدت کل میدان برگردان به قطب شده (شکل ۸) و نقشه‌های مغناطیس‌سنجی اعمال فیلتر ادامه به فراسو و گرادیان عمودی اطلاعات مناسبی جهت نقاط حفاری مغزه‌گیری و عمق پیشنهادی حفاری به دست آمد. وضعیت منابع ایجادکننده ناهنجاری‌های مغناطیسی در عمق برای مناطق مختلف با پردازش و اعمال فیلترهای مشتق قائم اول و ادامه به سمت بالابرو روی نقشه برگردان به قطب مشخص شد (شکل‌های ۱۰، ۱۲، ۱۳).

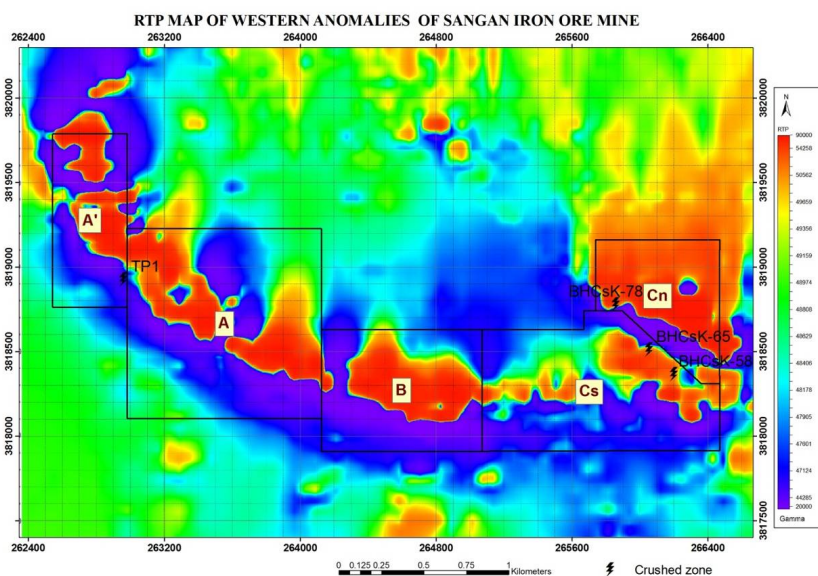
با در اختیار داشتن داده‌های آنالیز شیمیایی، عمق (ضخامت) واحدهای مختلف سنگی در طول گمانه‌ها، وزن مخصوص نمونه‌ها، فاکتورهای آماری داده‌ها محاسبه گردیده و داده‌ها تحت نرم‌افزار Gemcom مورد پردازش، تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سپس مدل بلوکی سه‌بعدی کل معدن به دست آمد (شکل ۷).



شکل ۷. بلوک سه‌بعدی توده C شمالی، C-جنوبی، B، A و A' که از دید از بالا نمایش داده شده است (مختصات محور X با عدد ۲۶۰۰۰۰ و مختصات محور Y با عدد ۳۸۱۰۰۰۰ جمع می‌گردد).

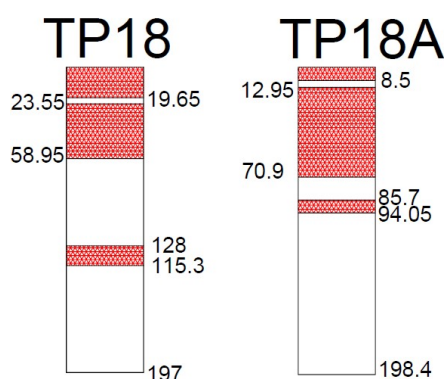
۷ بحث

داده‌های مغناطیس‌سنجی در اکتشاف کانسار سنگ آهن سنگان از سه جنبه می‌تواند بررسی شود. کاربرد اول این روش در شناسایی ناهنجاری‌های پنهان با مقایسه نقشه



شکل ۸. نقشه برگردان به قطب‌شده (RTP) توده‌های معدنی غربی معدن سنگان که با حروف مشخص شده‌اند.

تا ۱۹۸/۴ متری سنگ‌های باطله با کانی‌زایی محدود و کمتر از ۱۰ متر سنگ آهن وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، محل گمانه TP18A منطبق بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم میدان است و سطحی بودن ناهنجاری را تأیید می‌کند. موقعیت این گمانه‌ها و دیگر گمانه‌های انتخاب شده جهت اثبات کانی‌سازی در سطح و عمق سایر ناهنجاری‌های غربی در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۹. گمانه TP18 و TP18A در ناهنجاری تپه قرمز (A') با کانی‌زایی آهن در سطح (قطر گمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

همچنین با توجه به نقشه فراسوی ۳۰۰ متر منطقه و وضعیت کانی‌سازی در عمق، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌گردد. این موضوع را می‌توان با توجه به بررسی وضعیت دو گمانه TP1 و TP5 (شکل ۱۱) بر روی نقشه فراسوی ۳۰۰ متر و ۵۰۰ متر (به ترتیب شکل‌های ۱۲ و ۱۳) شاهد بود. مطابق شکل ۱۱ در گمانه TP1 که ۲۴۰/۹ متر عمق دارد از سطح زمین تا عمق ۹۱ متری می‌توان سنگ‌های باطله و از این عمق تا ۱۱۲ متری و از عمق ۲۰۲ تا ۲۳۱ متری سنگ آهن مگنتیتی را با عیارهای مختلف مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود محل این گمانه بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر

در ادامه به صورت مجزا در مورد هر یک از ناهنجاری‌ها (توده های معدنی) بحث می‌شود.

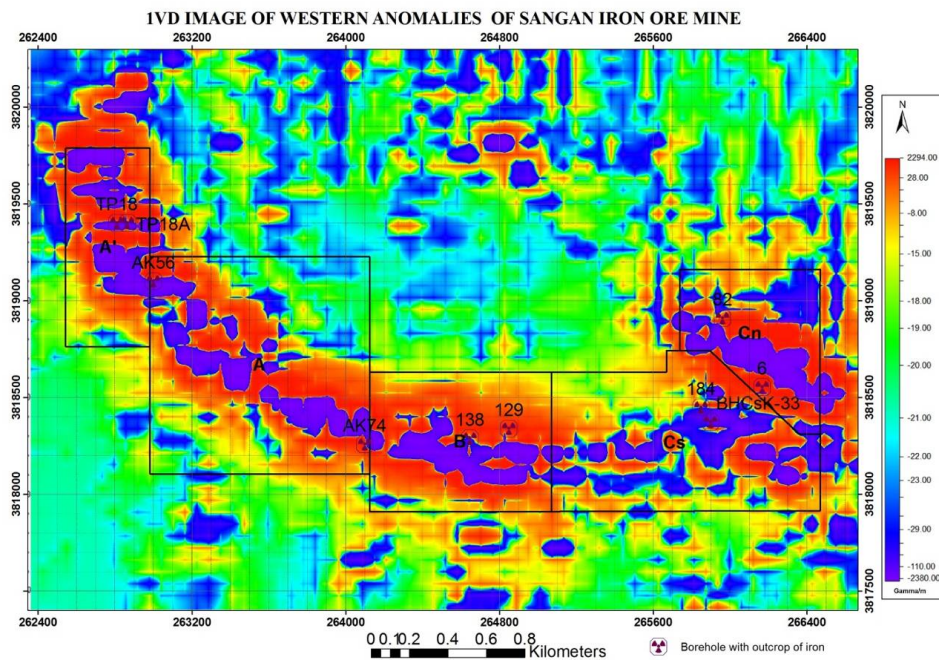
- ناهنجاری A'

در محل این ناهنجاری کمترین تطبیق را بین داده‌های مغناطیس‌سنجی و اطلاعات گمانه‌های حفاری شاهد هستیم. از عوامل آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- کمبود نقاط حفاری و کامل نبودن شبکه نقاط حفاری در محل این ناهنجاری نسبت به ناهنجاری‌های دیگر.

۲- عمق کم گمانه‌ها که از ۲۵۰ متر تجاوز نکرده است.

۳- وجود سنگ‌های آذرین و توده‌های نفوذی و سنگ‌های اسکارن بیشتر در محل این ناهنجاری در مقایسه با سایر ناهنجاری‌ها که می‌تواند به دلیل بالابودن میزان خودپذیری مغناطیسی، یک ناهنجاری دروغین ایجاد کند. با توجه به نقشه مشتق اول قائم میدان منطقه و وضعیت کانی‌سازی در سطح تطابق قابل قبولی مشاهده می‌شود. این موضوع را می‌توان با توجه به بررسی وضعیت دو گمانه TP18 و TP18A (شکل ۹) بر روی نقشه مشتق اول قائم میدان (شکل ۱۰) شاهد بود. مطابق شکل ۹ در گمانه TP18 که ۱۹۷ متر عمق دارد از سطح زمین تا عمق ۵۸/۹۵ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی را با عیارهای مختلف مشاهده کرد و از این عمق تا ۱۹۷ متری سنگ‌های باطله با کانی‌زایی محدود و در حدود کمتر از ۱۵ متر سنگ آهن وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، محل گمانه TP18 دقیقاً بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم میدان منطقه منطبق است و نشان از سطحی بودن ناهنجاری دارد. با همین استدلال و مطابق شکل ۹ در گمانه TP18A از سطح زمین تا عمق ۷۰/۹ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی را با عیارهای مختلف با میان لایه کم‌ضخامت از باطله مشاهده کرد و از این عمق



شکل ۱۰. تصویر حاصل از فیلتر مشتق قائم اول و نمایش ناهنجاری‌های سطحی در منطقه توده‌های معدنی غربی معدن سنگان که با حروف مشخص شده‌اند و چند گمانه کم‌عمق با کانی‌زایی مگنتیت.

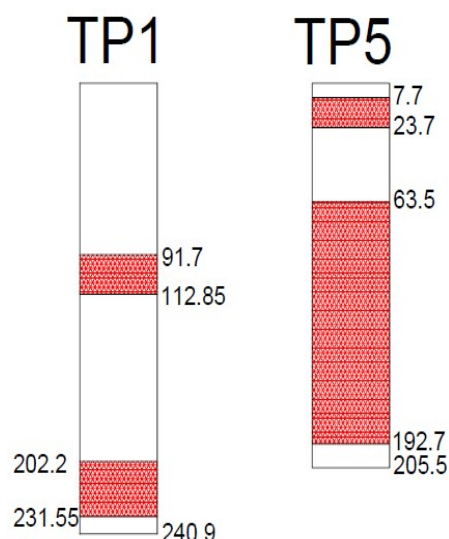
جدول ۴. مشخصات گمانه‌های با کانی‌زایی مگنتیت در سطح.

Borehole with magnetite outcrop (western anomaly)								
No.	Borehole	Anomaly	Profile	Azimuth	Dip	Depth	X	Y
1	TP18	A'	-2M	360	80	197	262810	3819400.8
2	TP18A	A'	-2	360	75	198.4	262864.9	3819400.4
3	AK56	A	1M	0	90	226	263000	3819100
4	AK74	A	1	0	90	411.55	264099.85	3818256.3
5	129	B	19	180	60	342	264848	3818339
6	138	B	17	180	60	330.05	264646.4	3818287.1
۷	184	Cs	29	180	78	235.6	265849	3818446.8
۸	CsK33	Cs	30M	0	90	480.2	265898.4	3818372.5
۹	6	Cn	32	180	80	129	266165.9	3818553.6
۱۰	43	Cn	32	180	80	185	266152.8	3818630.6

جدول ۵. مشخصات گمانه‌های با کانی‌زایی مگنتیت در عمق.

Borehole with magnetite mineralization in depth (western anomaly)								
No.	Bore Hole	Anomaly	Profile	Azimuth	Dip	Depth	X	Y
1	TP1	-1	A'	360	75	241.9	262960.2	3818926.7
2	TP5	-1M	A'	0	90	205.5	262914.5	3819050.5
3	13	10	A	245	76	488.2	263945.9	3818495.9
4	12 A	6	A	180	89	470	263540.2	3818473.8
5	17	13	B	180	80	440	264273.8	3818376.8
6	27A	16	B	360	79	544	264545.3	3818070.7
7	57	28	Cs	180	76	592	265749.2	3818659.2
8	69	26	Cs	180	81	371.8	265549.8	3818415.4
9	82	30	Cn	180	82	372.3	265959	3818908.5
10	85	32	Cn	180	81	409	266156.4	3818950.2

می‌گردد (شکل ۸). با تطابق این نقشه و شکل ۳ مشخص می‌گردد که گمانه‌های اشاره‌شده در اطراف یا بر روی گسل‌های موجود در منطقه واقع شده‌اند.



شکل ۱۱. گمانه‌های TP1 و TP5 تپه قرمز (A') با کانی‌زایی مگنتیت در عمق (قطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

- ناهنجاری A

به دلیل عدم یکتایی جواب در میدان‌های پتانسیل، وجود مغناطیس باقیمانده در مگنتیت نوع اسکارنی و نبودن چنین اندازه‌گیری‌هایی (عدم امکان اندازه‌گیری آن در حال حاضر در ایران) تعیین صحیح عمق منبع ناهنجاری با مدل‌سازی پیشرو یا معکوس با واقعیت بعد از حفاری

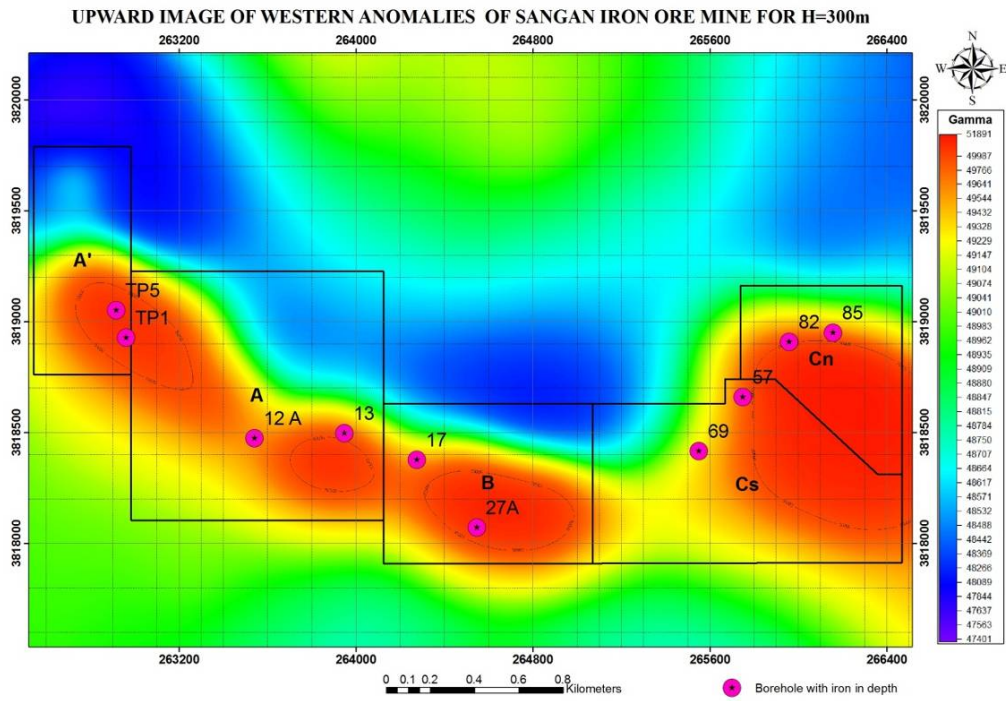
ادامه فراسوی ۳۰۰ متر و ۵۰۰ متر منطبق است که نشان از عمیق‌بودن منشأ ناهنجاری دارد و با حفاری تأیید شده است. در گمانه TP5 نیز مطابق شکل ۱۱ که ۲۰۴ متر عمق دارد، از سطح زمین تا عمق ۷ متری می‌توان سنگ‌های باطله و از این عمق تا ۲۳ متری و از عمق ۶۳ تا ۱۹۲ متری سنگ آهن مگنتیتی را با عیارهای مختلف مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، محل این گمانه منطبق بر ناهنجاری‌های نقشه فراسوی ۳۰۰ متر و ۵۰۰ متر است که نشان از عمیق بودن منشأ ناهنجاری دارد و مجدداً با حفاری تأیید شده است.

به‌طور کلی عمده‌ترین قسمت ذخیره در محل این ناهنجاری در قسمت جنوب شرقی و در مرز بین قطب منفی (رنگ آبی) و مثبت (رنگ قرمز) در محل گمانه‌های TP1 قرار گرفته است (شکل ۸). از این نقاط به طرف شمال و جنوب از مقدار ذخیره کاسته می‌شود. با این تفاسیر و اطلاعات به دست آمده از گمانه‌های حفاری می‌بایست علت ایجاد ناهنجاری دروغین وسیع مغناطیسی در شمال این نقاط، وجود توده‌های اسکارنی و آذرین (شکل ۲) با قابلیت خودپذیری مغناطیسی زیاد باشد. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از گمانه‌ها در این کانسار فرآیندهای تکنونیک مؤثری رخ داده و ماحصل آن خردشدگی در مسیر زون‌های گسلی (خردشده) است.

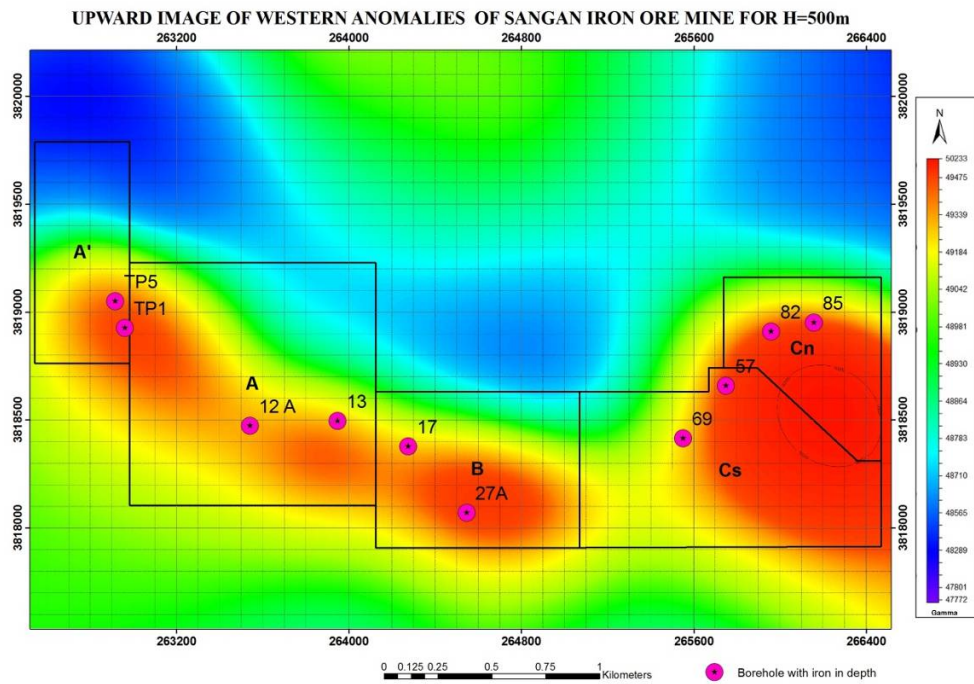
در جدول ۶ مشخصات و موقعیت زون خردشده در یک گمانه (TP1) از این ناهنجاری آورده شده است. موقعیت این گمانه بر روی نقشه RTP منطقه مشاهده

جدول ۶. عمق زون‌های خردشده (گسلی) در گمانه‌های مختلف و مشخصات آن‌ها.

Depth of crushed zones in boreholes									
No.	Borehole	Anomaly	Profile	Azimuth	Dip	Depth	X	Y	Depth of crushed zone (M)
1	TP1	A'	-1	360	75	241.90	262960	3818926	170-180
2	BHCsK-58	Cs	33M	0.00	90	304.10	266198	3818366	115-132, 290-303
3	BHCsK-65	Cs	31	0.00	90	406.50	266052	3818511	74-101, 118-128, 191-213
4	BHCsK-78	Cs	29	180	80	690.50	265857	3818778	73-105, 239-262, 324-350, 586-600

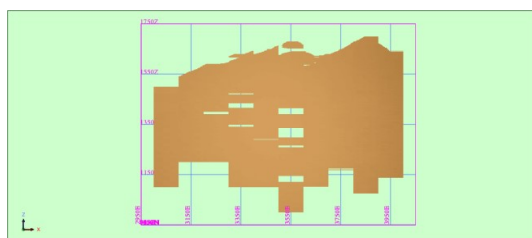


شکل ۱۲. تصویر حاصل از فیلتر فراسوی ۳۰۰ متر و نمایش ناهنجاری‌های عمیق در منطقه توده‌های معدنی غربی معدن سنگان که با حروف مشخص شده‌اند و چندگمانه عمیق باکانی‌زایی مگنتیت.

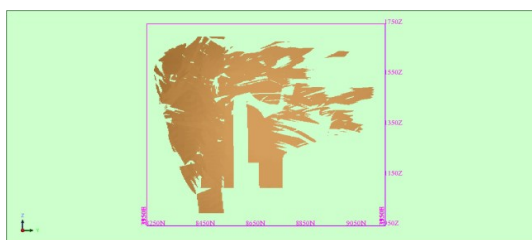


شکل ۱۳. تصویر حاصل از فیلتر فراسوی ۵۰۰ متر و نمایش ناهنجاری‌های عمیق در منطقه توده‌های معدنی غربی معدن سنگان که با حروف مشخص شده‌اند و چندگمانه عمیق باکانی‌زایی مگنتیت.

سطحی بودن ناهنجاری را نشان می‌دهد. در گمانه AK74 با عمق نهایی ۴۱۱ متر طبق شکل ۱۵ از سطح زمین تا عمق ۳۰ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی را با عیارهای مختلف مشاهده کرد و از این عمق تا ۴۱۱ متری، سنگ‌های باطله و کانی‌زایی سنگ آهن مگنتیتی به‌طور متناوب و با ضخامتی کمتر از ۱۰۰ متر دیده می‌شوند. مکان این گمانه در شکل ۱۰ بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم میدان منطبق است و نشان از سطحی بودن ناهنجاری مغناطیسی دارد.



(الف)

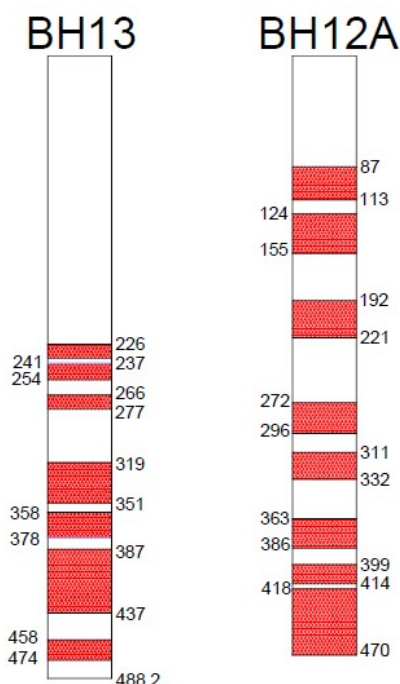


(ب)

شکل ۱۴. (الف) تصویر سه‌بعدی از توده معدنی A که مقطعی از آن در راستای محور XZ نمایش داده می‌شود، و (ب) تصویر سه‌بعدی از توده معدنی A که مقطعی در راستای محور ZY نمایش داده می‌شود و تقسیم توده معدنی به دو بخش شمالی و جنوبی را در اثر عملکرد گسل نشان می‌دهد؛ (مختصات محور X با عدد ۲۶۰۰۰۰ و مختصات محور Y با عدد ۳۸۱۰۰۰۰ جمع می‌گردد).

با توجه به نقشه فراسوی ۳۰۰ و ۵۰۰ متر (به ترتیب شکل‌های ۱۲ و ۱۳) و اطلاعات کانی‌سازی در عمق، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌گردد. این موضوع با توجه به بررسی وضعیت دو گمانه AK56 و AK74 (شکل ۱۵) بر روی نقشه فراسوی ۳۰۰ متر و ۵۰۰ متر (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) مشاهده می‌شود. شکل ۱۶ گمانه 12A با ۴۷۰ متر عمق را

تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد (لی و الدنبرگ، ۱۹۹۶؛ بث، ۱۹۶۲؛ کوردنی، ۲۰۱۳؛ الدنبرگ و همکاران، ۱۹۹۷؛ لی و الدنبرگ، ۲۰۰۰؛ کم و همکاران، ۲۰۱۵؛ سانتوس و همکاران، ۲۰۱۵). با چنین وضعیتی از اطلاعات عمقی گرادیان عمودی و گسترش به فراسوی داده‌های مغناطیسی استفاده شده است. در این قسمت تطابق عمق توده مغناطیسی حاصل از حفاری با اطلاعات عمقی منبع ایجادکننده ناهنجاری پیش‌بینی‌شده از فیلترها بررسی می‌شود. با بررسی حفاری‌ها در محل این ناهنجاری با پیشروی به سمت شرق عموماً بر وسعت و عمق ذخیره افزوده می‌شود و عمق نهایی ذخیره از حدود ۱۰۰ متر به ۴۵۰ متر می‌رسد. بر روی نقشه‌های ادامه فراسو نیز از خط واقع بر طول جغرافیایی ۲۶۳۵۵۰ (با توجه به نقشه برگردان به قطب و فراسوی ۵۰۰ متر و شکل ۱۳ سمت راست) به سمت شرق حضور ناهنجاری با گستردگی بیشتر در عمق بر روی این نقشه‌ها قابل تأیید است. ولی بر روی خطوط واقع بر طول‌های جغرافیایی کمتر از ۲۶۲۴۰۰، از عمق ۲۰۰ متری به پایین حضور ناهنجاری ضعیف شده است. این موضوع با بررسی مدل سه‌بعدی ذخیره حاصل از حفاری‌ها کاملاً تطابق دارد (شکل ۷ و ۱۴). با توجه به نقشه مشتق اول قائم میدان منطقه (شکل ۱۰) و وضعیت کانی‌سازی در سطح، تطابق قابل قبولی در این ناهنجاری مشاهده می‌گردد. این موضوع را می‌توان با توجه به بررسی وضعیت دو گمانه AK56 و AK74 (شکل ۱۵) بر روی نقشه مشتق اول قائم میدان (شکل ۱۰) مشاهده کرد. مطابق شکل ۱۵ در گمانه AK56 که ۲۲۶ متر عمق دارد از سطح زمین تا عمق ۲۹ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی را مشاهده کرد و از این عمق تا ۲۲۶ متری سنگ‌های باطله با کانی‌زایی محدود مگنتیتی و با لایه‌های کمتر از ۲۰ متر سنگ آهن وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود محل گمانه AK56 بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم میدان منطقه منطبق است و

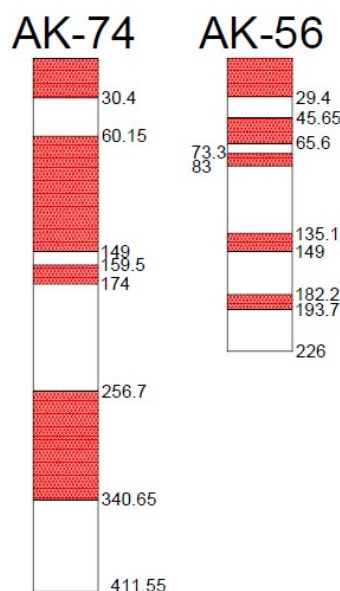


شکل ۱۶. گمانه‌های 12A و 13 از توده A با کانی‌زایی مگنتیت در عمق (قطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

- ناهنجاری B

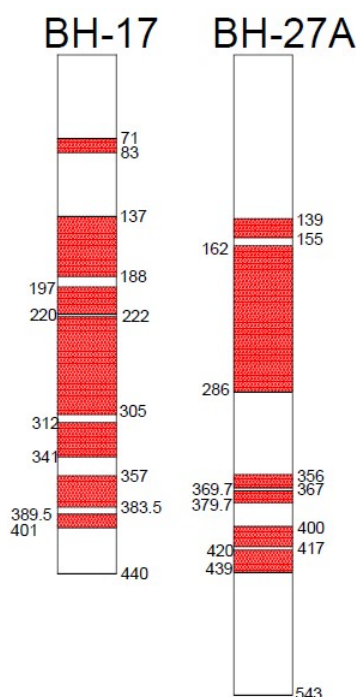
در محل این ناهنجاری با پیشروی از شمال به سمت جنوب بر عمق ذخیره افزوده می‌شود. در محل ناهنجاری B، بیشترین تغییرات به سمت جنوب بوده و شیب کانسار و افزایش عمق کانسار با توجه به نتایج حفاری‌ها به سمت جنوب است. با توجه به نقشه مشتق اول قائم میدان منطقه و وضعیت کانی‌سازی در سطح، در این منطقه تطابق قابل قبولی از داده‌ها مشاهده می‌گردد. مطابق شکل ۱۷ در گمانه BH129 که ۳۴۲ متر عمق دارد، از سطح زمین تا عمق ۱۱/۵ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی و از این عمق تا ۱۸۹ متری باطله و پس از آن تناوب دو سنگ مذکور با ضخامت کمتر از ۵۰ متر مشاهده می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود محل گمانه BH129 دقیقاً بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم منطقه منطبق است و نشان‌دهنده سطحی بودن منبع

نشان می‌دهد که کانی‌زایی گسترده‌ای را در عمق نشان می‌دهد. از سطح زمین تا عمق ۸۷ متری می‌توان سنگ‌های باطله و از این عمق تا ۳۹۹ متر تناوب سنگ آهن مگنتیتی و سنگ‌های باطله را با ضخامت‌های کمتر از ۴۰ متر مشاهده کرد. از عمق ۳۹۹ تا ۴۷۰ متر نیز مگنتیت توده‌ای با ۴ متر باطله وجود دارد. بر اساس داده‌های حاصل از حفاری و محل این گمانه بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر ادامه فراسو (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) عمیق بودن منشأ ناهنجاری در نقشه‌های فراسو تأیید می‌گردد. در گمانه ۱۳ که ۴۸۸ متر عمق دارد (شکل ۱۶) از سطح زمین تا عمق ۲۲۶ متری می‌توان سنگ‌های باطله و از این عمق تا ۴۸۸ متری سنگ آهن مگنتیتی و سنگ‌های باطله به‌طور متناوب و با ضخامت‌های کمتر از ۵۰ متر مشاهده می‌گردند. طبق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ و داده‌های حفاری، محل این گمانه منطبق بر ناهنجاری‌های نقشه فراسوی ۳۰۰ متر و ۵۰۰ متر است و عمیق بودن منشأ ناهنجاری نشان داده شده با حفاری هم‌خوانی دارد.



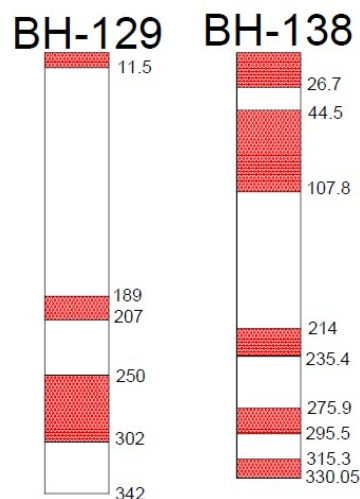
شکل ۱۵. گمانه AK56 و AK74 در ناهنجاری A با کانی‌زایی آهن در سطح (قطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

دارد از سطح زمین تا عمق ۷۱ متری و از ۸۳ تا ۱۳۷ متری می‌توان سنگ‌های باطله را با ضخامت قابل ملاحظه دید و از عمق تا ۱۳۷ متری تا ۴۰۱ متری سنگ آهن مگنتیتی را با عبارهای مختلف با میان لایه‌های کم ضخامت حداکثر ۱۶ متری از باطله مشاهده کرد و در انتهای گمانه نیز کمتر از ۴۰ متر باطله وجود دارد. در گمانه 27A نیز با عمق نهایی ۵۴۳ متر شاهد سنگ‌های باطله تا عمق ۱۳۹ متری هستیم و سپس لایه ضخیمی تا ۲۸۶ متری سنگ آهن مگنتیتی دیده می‌شود. پس از آن نیز تناوب باطله (ضخامت زیاد) و سنگ آهن (با ضخامت کم) تا پایان گمانه ملاحظه می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود محل این دو گمانه بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر ادامه فراسوی منطقه منطبق است که نشان از عمیق بودن منشأ ناهنجاری داشته و با حفاری تأیید شده است.



شکل ۱۸. گمانه‌های 17 و 27A از توده معدنی B با کانی‌زایی مگنتیت در عمق (قطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

ناهنجاری است. با همین استدلال و طبق شکل ۱۷ در گمانه BH138 از سطح زمین تا عمق ۲۶/۷ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی را مشاهده نمود و از این عمق تا ۴۴ متری سنگ‌های باطله و پس از آن تا ۱۰۷ متری سنگ آهن مگنتیتی وجود دارد و سپس تا پایان گمانه (۳۳۰ متر)، تناوب باطله و کانسنگ مگنتیتی دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد محل گمانه BH138 نیز منطبق بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم است و نشان از سطحی بودن منبع ناهنجاری دارد و نقشه فیلتر مشتق اول قائم میدان را تأیید می‌کند.

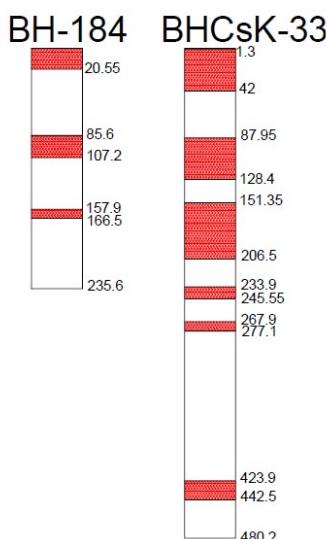


شکل ۱۷. گمانه‌های BH129 و BH138 در توده معدنی B با کانی‌زایی سنگ آهن مگنتیتی در سطح (قطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

همچنین با توجه به نقشه فراسوی ۳۰۰ و ۵۰۰ متر و وضعیت کانی‌سازی در عمق، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌گردد. این موضوع را می‌توان با توجه به بررسی وضعیت دو گمانه 27A و ۱۷ (شکل ۱۸) بر روی نقشه ادامه فراسوی ۳۰۰ متر و ۵۰۰ متر (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) شاهد بود. مطابق شکل ۱۸ در گمانه ۱۷ که ۴۴۰ متر عمق

کمتر از ۲۰ متر باطله وجود دارد. در گمانه ۶۹ نیز با عمق نهایی ۳۷۱ متر شاهد سنگ‌های باطله تا عمق ۹۲ متری هستیم و تناوب باطله (ضخامت تا ۶۰ متر) و سنگ آهن (ضخامت تا ۶۰ متر و جمعاً حدود ۱۴۰ متر) تا پایان گمانه ملاحظه می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌گردد محل این دو گمانه بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر ادامه فراسو منطبق است و عمیق بودن منشأ ناهنجاری را تأیید می‌کنند.

در نقشه فراسوی ۱۰۰۰ متری نیز می‌توان ناهنجاری را در محل این توده معدنی مشاهده کرد. با توجه به نتایج حفاری در محل گمانه BH57 و اطراف آن که تا عمق حدود ۶۰۰ متری ادامه داشته است، ذخیره معدنی را گرفته و نشان از تجمع زیاد در عمق در مقایسه با سایر مناطق دارد و تأییدی بر نقشه فراسوی ۱۰۰۰ متر است. بالا بودن مقدار شدت میدان در شرق این ناهنجاری تا فراسوی ۱۰۰۰ متر (شکل ۲۱) همچنین می‌تواند به علت حضور توده‌های نفوذی عمیق منشأ کانی‌زایی با پذیرفتاری مغناطیسی بالا باشد.



شکل ۱۹. گمانه‌های CsK33 و 184 در توده معدنی Cs با کانی‌زایی مگنتیت در سطح (فطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

- ناهنجاری Cs

در محل این ناهنجاری حجم ذخیره برای خطوط واقع در بین طول‌های جغرافیایی ۲۶۵۶۴۰ و ۲۶۵۹۴۰ هم از لحاظ تناژ و هم از لحاظ عمقی به‌طور چشمگیری افزایش نشان می‌دهد (شکل ۶).

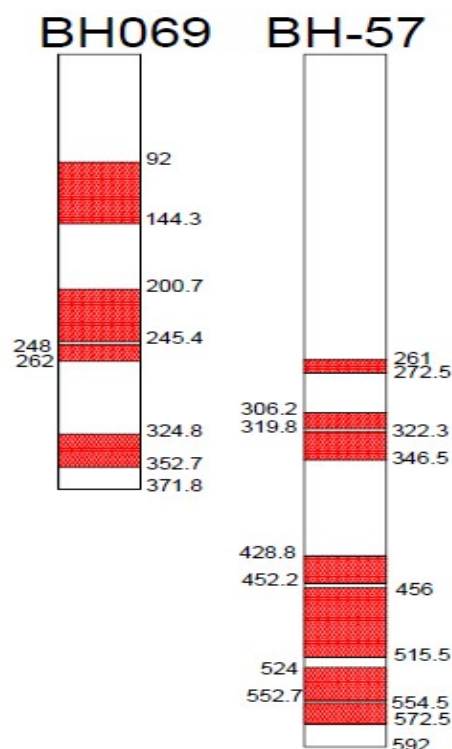
با توجه به نقشه مشتق اول قائم میدان منطقه و وضعیت کانی‌سازی در سطح، در این منطقه تطابق قابل قبولی از داده‌ها مشاهده می‌گردد. مطابق شکل ۱۹ در گمانه BH184 که ۲۳۵ متر عمق دارد از سطح زمین تا عمق ۲۰ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی و از این عمق تا ۲۳۵ متری باطله را با دو لایه کم‌ضخامت مگنتیت (ضخامت کمتر از ۲۰ متر) مشاهده کرد. در گمانه CsK33 (شکل ۱۹) از سطح زمین تا عمق ۴۲ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی را مشاهده کرد و از این عمق تا انتهای گمانه (۴۸۰ متر)، سنگ‌های باطله و سنگ آهن مگنتیتی به تناوب دیده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد محل دو گمانه BH184 و CsK33 نیز منطبق بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم میدان است و سطحی بودن منبع ناهنجاری در نقشه فیلتر مشتق اول قائم میدان را تأیید می‌کنند.

همچنین با توجه به نقشه فراسوی ۳۰۰ و ۵۰۰ متر و وضعیت کانی‌سازی در عمق، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌گردد. این موضوع را می‌توان با توجه به بررسی وضعیت دو گمانه ۵۷ و ۶۹ (شکل ۲۰) بر روی نقشه ادامه فراسوی ۳۰۰ و ۵۰۰ متر (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) شاهد بود. مطابق شکل ۲۰ در گمانه ۵۷ که ۵۹۲ متر عمق دارد از سطح زمین تا عمق ۲۶۱ متری کانی‌زایی وجود نداشته و باطله ضخیمی مشاهده می‌شود و سپس تا ۴۲۸ متری تناوب سنگ آهن مگنتیتی را با عبارهای مختلف با میان‌لایه‌های ضخیم تا حداکثر ۸۰ متری از باطله می‌توان مشاهده نمود. حجم بزرگی از کانسنگ مگنتیتی بین عمق ۴۲۸ تا ۵۷۲ متری دیده می‌شود و در انتهای گمانه نیز

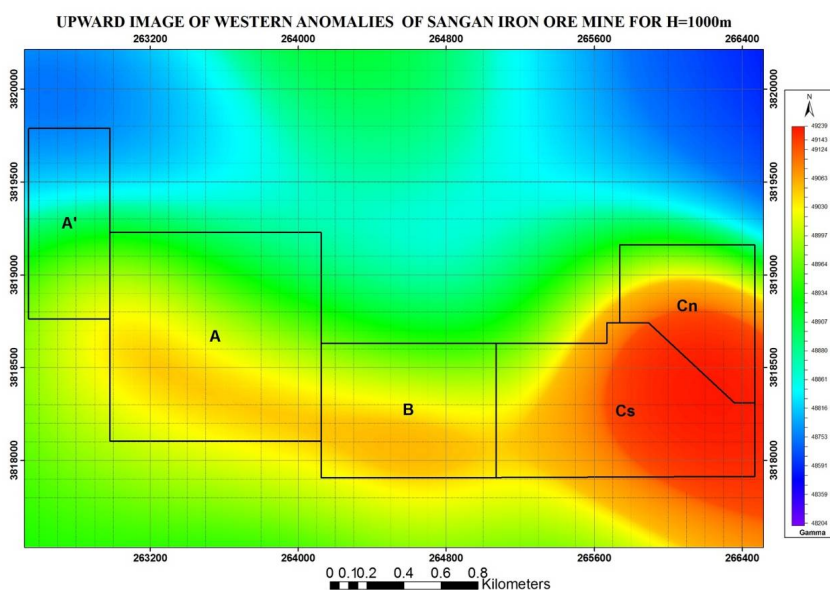
- ناهنجاری C_N

گمانه‌های حفاری در بخش میانی توده معدنی دارای ذخیره بیشتری در عمق در مقایسه با بخش‌های شرقی و غربی این توده است (شکل ۶). در این مناطق حفاری‌ها وجود ذخیره تا عمق حدود ۶۰۰ متر را اثبات کرده‌اند.

با توجه به نقشه مشتق اول قائم میدان منطقه و وضعیت کانی‌سازی در سطح، در این بخش تطابق قابل قبولی از داده‌های حفاری و مغناطیس‌سنجی مشاهده می‌گردد. مطابق شکل ۲۲ در گمانه ۶ که ۱۲۹ متر عمق دارد از سطح زمین تا عمق ۷ متری باطله مشاهده می‌شود و پس از آن می‌توان سنگ آهن مگنتیتی تا عمق ۲۰ متر را مشاهده کرد. از عمق ۴۰ متر تا انتهای گمانه باطله مشاهده می‌گردد. در گمانه ۴۳ از سطح زمین تا عمق ۲۶ متری می‌توان سنگ آهن مگنتیتی را مشاهده کرد و از این عمق تا انتهای گمانه (۱۸۵ متر)، سنگ‌های باطله و سنگ آهن مگنتیتی به تناوب دیده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد محل دو گمانه ۶ و ۴۳ نیز منطبق بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر مشتق اول قائم میدان است و سطحی بودن منبع ناهنجاری را تأیید می‌کنند.

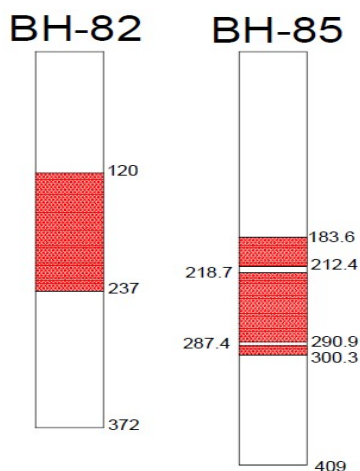


شکل ۲۰. گمانه‌های ۵۷ و ۶۹ از توده معدنی Cs با کانی‌زایی مگنتیت در عمق (قطر گمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفید رنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.



شکل ۲۱. تصویر ناهنجاری مغناطیسی با اعمال فیلتر فراسوی ۱۰۰۰ متر در توده‌های معدنی غربی سنگان که با حروف مشخص شده‌اند.

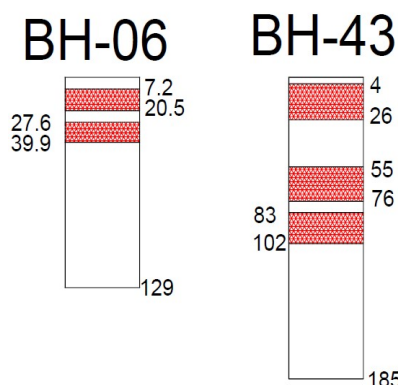
نقشه‌ها نشان می‌دهند که در اعماق پایین (حدود ۱۰۰۰ متری) ناهنجاری‌های C_N و C_S احتمالاً به یکدیگر متصل شده و منشأ واحدی را برای ایجاد ناهنجاری مغناطیسی تشکیل می‌دهند. این موضوع می‌تواند نشانه حضور ذخیره تا این عمق یا حضور توده نفوذی در این محل باشد که اثبات این امر نیازمند حفاری با عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر است.



شکل ۲۳. گمانه‌های ۸۲ و ۸۵ از توده معدنی C_N با کانی‌زایی مگنتیت در عمق (قطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

۸ نتیجه‌گیری

منابع ایجادکننده اکثر ناهنجاری‌های مغناطیسی نقشه برگردان شده به قطب کانی‌سازی مگنتیت است که نتایج حفاری آن را تأیید می‌کند. آنجایی که سنگ میزبان (رسوبی) و کانی‌سازی اختلاف قابل ملاحظه‌ای از نظر پذیرفتاری مغناطیسی دارد ناهنجاری‌ها مستقیماً ردیاب کانی‌سازی مگنتیت است. در جایی که توده‌های آذرین اکسیدان و یا سنگ میزبان (اسکارن) همراه یا بدون کانی‌سازی می‌باشند، تداخل پاسخ مغناطیسی آن‌ها با کانی‌سازی مگنتیت، تفکیک آن‌ها را مشکل ساخته و سبب پیدایش ناهنجاری‌های کاذب می‌شود. با توجه به عدم یکتایی جواب در داده‌های میدان پتانسیل، وجود



شکل ۲۲. گمانه‌های ۴۳ و ۶ در توده معدنی C_N با کانی‌زایی آهن در سطح (قطرگمانه بین ۲ تا ۴ اینچ). بخش هاشورخورده (رنگ قرمز) نشان‌دهنده کانی‌زایی سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و بخش سفیدرنگ نشان‌دهنده سنگ‌های باطله (بدون کانی‌زایی سنگ آهن) است.

همچنین با توجه به نقشه فراسوی ۳۰۰ و ۵۰۰ متر و وضعیت کانی‌سازی در عمق، تطابق قابل قبولی مشاهده می‌گردد. این موضوع را می‌توان با توجه به بررسی وضعیت دو گمانه ۸۲ و ۸۵ (شکل ۲۳) بر روی نقشه فراسوی ۳۰۰ و ۵۰۰ متر (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) شاهد بود. مطابق شکل ۲۳ در گمانه ۸۲ که ۳۷۲ متر عمق دارد، از سطح زمین تا عمق ۱۲۰ متری باطله مشاهده می‌شود و سپس تا ۲۳۷ متری سنگ آهن مگنتیتی ضخیم لایه مشاهده می‌گردد. در انتهای گمانه نیز کمتر از ۲۳۷ تا ۳۷۲ متری باطله وجود دارد. در گمانه ۸۵ نیز با عمق نهایی ۴۰۹ متر شاهد سنگ‌های باطله تا عمق ۱۸۳ متری می‌باشیم و سپس تا ۳۰۰ متری سنگ آهن مگنتیتی ضخیم لایه با میان لایه‌های کم‌ضخامتی از باطله دیده می‌شود. پس از آن تا انتهای گمانه باطله وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌گردد محل این دو گمانه بر ناهنجاری‌های حاصل از فیلتر فراسو ۳۰۰ و ۵۰۰ متر منطبق است و عمیق بودن منشأ ناهنجاری در محل دو گمانه تأیید می‌شود.

در نقشه‌های ادامه فراسو ۱۰۰۰ متر نیز مشاهده می‌شود که شدت میدان مغناطیسی تا این اعماق همچنان پایدار بوده و از شدت مناسبی برخوردار است (شکل ۲۱). این

این مطالعه نتیجه می‌دهد که اگر اکتشاف این کانسار سنگ آهن مگنتیتی عظیم با برداشت‌های مغناطیسی هوایی با کیفیت بالا (Helicopter Low level Survey) از ابتدا هدایت می‌شد، اکتشاف آن زمان زیاد (سی و پنج سال) به طول نمی‌انجامید و قطعاً هزینه‌های حفاری آن به مراتب کمتر می‌شد.

بنابراین نهایتاً با توجه به نتایج این مطالعه، پیشنهاد می‌گردد جهت تأیید ادامه ذخیره در عمق و یا وجود توده‌های آذرین منشأ، حفاری‌های عمیق تا حدود ۱۰۰۰ متر در مکان‌های مناسب در محدوده ناهنجاری‌های C انجام پذیرد. لازم است یادآوری شود براساس نتایج این پژوهش در حال حاضر مقدمات حفاری عمیق بیش از ۱۰۰۰ متر برای اولین بار در معادن ایران در معدن سنگان جهت دستیابی به ذخیره بیشتر در دست اقدام است. همچنین هم‌اکنون عملیات مغناطیس هوایی با کیفیت بالا در محدوده وسیعی در اطراف معدن سنگان انجام پذیرفته و در حال حاضر، پردازش و تفسیر داده‌ها انجام می‌گیرد.

منابع

برومندی، م.، ۱۳۶۲، گزارش کلی بررسی اولیه کانسار آهن منطقه سنگان خراسان.

برومندی، م.، ۱۹۷۹، ۱۳۸۲ و ۱۳۹۲، گزارش‌های اکتشافی سنگ آهن گل‌گهر: شرکت ملی فولاد ایران.

بومری، م.، ۱۳۷۱، بررسی ژنز کانسار آهن سنگان خراسان: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران.

حیدری، م.، ۱۳۹۲، پتروگرافی، کانی‌سازی، ژئوشیمی، مغناطیس‌سنجی محدوده تپه قرمز، معدن سنگ آهن سنگان خواف: پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۵۹ صفحه.

رابینسون، ای.، اس.، و کیت، کورو، ترجمه حیدریان

مغناطیس باقیمانده در مگنتیت نوع اسکارنی و نبودن امکان اندازه‌گیری مؤلفه باقیمانده میدان مغناطیسی جهت تعیین صحیح عمق منابع ناهنجاری با روش مدل‌سازی معکوس یا پیشرو، نقشه‌های گرادیان اول قائم و فراسو نقش مهمی در هدایت حفاری ایفا کرده است. مقایسه نقشه‌های گرادیان عمودی و فراسو که حاوی اطلاعات گسترش عمقی منابع مغناطیسی هستند با اعماق مستقیم به‌دست‌آمده از حفاری و مدل‌سازی بلوکی هم‌خوانی خوبی دارند. بررسی دقیق نقشه‌های مغناطیس‌سنجی و مقایسه آن با نتایج حفاری‌ها (مدل سه‌بعدی ذخیره‌ها) و در نظر گرفتن مکانیسم حاکم بر گسلش منطقه می‌رساند که قسمت عمده ذخیره مگنتیت در هریک از ناهنجاری‌ها در محل بیشترین تغییرات شدت میدان مغناطیسی قرار دارد. در ناهنجاری A^۱، بیشترین تغییرات در شرق اولین بخش ناهنجاری قرار داشته و شروع افزایش عمق ذخیره مگنتیت از این قسمت است. در محل ناهنجاری B، بیشترین تغییرات شدت میدان مغناطیسی به سمت جنوب و با توجه به نتایج حفاری‌ها، شیب کانسار و افزایش عمق کانسار نیز به سمت جنوب است. در محل ناهنجاری C_n بیشترین تغییرات شدت میدان مغناطیسی در جنوب ناهنجاری و عمده‌ترین بخش کانی‌سازی با توجه به نتایج حفاری‌ها در این قسمت است.

با توجه به نتایج حفاری‌ها، شیب ظاهری کانی‌سازی و عمق کانی‌سازی از ناهنجاری A^۱ تا C به سمت شرق است. این تغییر عمق کانی‌سازی با اطلاعات به دست آمده از نقشه‌های فراسو مبنی بر معرفی ناهنجاری C به‌عنوان عمیق‌ترین بخش کانسار سنگان هماهنگی دارد. پاسخ مغناطیسی در نقشه فراسوی ۱۰۰۰ متر در محل ناهنجاری C می‌تواند مربوط به عمق زیاد کانی‌سازی (تا ۶۲۰ متر حفاری‌شده در حال حاضر) یا توده نفوذی عمیق در این محل باشد که تأیید آن نیاز به حفاری عمیق (بیش از ۱۰۰۰ متر) دارد.

- شهری، م. ر.، ۱۳۸۴، مبانی اکتشافات ژئوفیزیک: دانشگاه فردوسی مشهد.
- غلامی پور سی سختی، الف.، حیدریان شهری، م. ر.، ابراهیمی نصرآبادی، خ.، و هاشمی مرند، غ. ر.، ۱۳۹۲، زمین شناسی و اکتشافات ژئوفیزیکی در کانسار آهن ساغند: مجله ژئوفیزیک ایران، (۱)۷، ۱۱۶-۱۳۲.
- قاسمی پور، ر.، ۱۳۵۵، گزارش زمین شناسی شرکت ایران باریت در ارتباط با معدن سنگ آهن سنگان خراسان.
- قاسمی پور، ر.، ۱۳۶۲، گزارش زمین شناسی مقدماتی معدن سنگ آهن سنگان.
- قربانلو، م.، قائمی، ف.، رحیمی، ب.، گل محمدی، ع.، و قائمی، ف.، ۱۳۹۲، بررسی وضعیت میدان تنش و بازسازی آن در توده C جنوبی معدن سنگ آهن سنگان خواف در شرق ایران: هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- قربانلو، م.، ۱۳۹۲، تحلیل ساختاری ناهنجاری C جنوبی معدن سنگ آهن سنگان خواف: پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی گرایش تکتونیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۶۵ صفحه.
- قوامی ریایی، ح.، ۱۳۷۱، بررسی ژئوشیمیایی و ژنتیکی سنگ های آذرین و دگرگونی و کانسار آهن منطقه سنگان خراسان: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- کاهنی، ش.، ۱۳۸۳، مطالعات ژئوشیمیایی و کانی شناسی توده های C شمالی و باغک کانسار سنگ آهن سنگان خواف: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- کریم پور، م. ح.، ۱۳۶۹، بررسی منشأ و چگونگی تشکیل کانسار آهن سنگان خراسان: مجموعه مقالات سمینار سنگ آهن، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۲۶۹-۲۸۲.
- کریم پور، م. ح.، ۱۳۷۳، ژئوشیمی و کانی شناسی کانسار سنگ آهن سنگان خراسان: مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، سال دوم، ۲، ۱۴۵-۱۵۶.
- کریم پور، م. ح.، ۱۳۷۷، دما، نحوه تشکیل و پاراژنم مگنتیت در بخشهای مختلف کانسار آهن سنگان خراسان: خلاصه مقالات هفدهمین گردهمایی علوم زمین، تهران، ۱۶۱-۱۶۷.
- کریم پور، م. ح.، ۱۳۸۲، کانی شناسی، آلتراسیون، سنگ منشأ و محیط تکتونیکی کانسارهای Iron-Oxides Cu-Au و مثالهایی از ایران: یازدهمین همایش بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دانشگاه یزد، ۱۸۴-۱۸۹.
- کریم پور، م. ح.، ملک زاده شفارودی، ا.، و گل محمدی، ع.، ۱۳۹۱، کانی سازی و اکتشاف مگنتیت به روش مغناطیس سنجی زمین در محدوده بین باغک و C شمالی، معدن سنگ آهن سنگان خواف: مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته اهواز، (۳)۱، ۳۸-۵۴.
- گروه پژوهشی اکتشافات ذخایر شرق ایران، ۱۳۹۱، اجرای عملیات مغناطیس سنجی در معدن سنگان محدوده شمال معدن.
- گزارش مغناطیس سنجی ناهنجاری های غربی معدن سنگ آهن سنگان، ۱۳۶۳، گروه اکتشافی معدن سنگ آهن چغارت بافق.
- گل محمدی، ع.، کریم پور، م. ح.، ملک زاده شفارودی، ا.، و مظاهری، س. ا.، ۱۳۹۲، پترولوژی و سن سنجی زیرکن به روش U-Pb در توده های نفوذی مناطق A و C جنوبی و دردوی، معدن سنگ آهن سنگان خواف: مجله زمین شناسی اقتصادی، (۲)۵، ۱۵۵-۱۷۴.

- Li, Y., and Oldenberg, D. W., 2000, Joint inversion of surface and three-component borehole magnetic data: *Geophysics*, **65**, 540-552.
- Li, Y., and Oldenberg, D. W., 1996, 3 D inversion of magnetic data: *Geophysics*, **61**, 394-408.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. C., 1991, *Applied Geophysics*: 2nd edition, Cambridge University Press.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H., and Golmohammadi, A., 2013, Zircon U-Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, **64**, 256-271.
- Mataragio, J., Jorgensen, G., Carlos, D. U. and Braga, M. A., 2011, State of the art techniques for Iron Oxide exploration, 12th international congress of the Brazilian Geophysical Society and EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15-18 August 2011, 1158-1162.
- Navaanchimed, A., Khuut, T., Turtogtokh, B., Sengeec, M., Purrev, D. and khosbayar, K. H., 2015, Geophysical exploration for skarn-type Iron deposits in western Mongolia, 12th SEGJ international symposium, Tokyo, Japan, 18-20 November 2015, 221-223.
- Nakatsuka, T., and Okuma, S., 2006, Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevation: *Exploration Geophysics*, **37**, 121-128.
- Paterson, N. R., and Reeves, C. V., 1985, Applications of gravity and magnetic surveys: The state of the art in 1985, *Geophysics*, **50**, 2558-2594.
- Ternet, Y., 1990, Explanatory Text of the Taybad Quadrangle Map 1:250,000, Ministry of Mines and Metals: Geological Survey of Iran, Tehran 200 P.
- Oldenberg, D. W., Li, Y., and Ellis, R. G., 1997, Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan, *Geophysics*, **62**, 1419-1431.
- Santos, M. L., Li, Y., and Moraes, R., 2015, Application of 3 D magnetic amplitude inversion to Iron Oxide-Copper-Gold deposits at low magnetic latitudes: A case study from Carajas mineral province, Brezil, *Geophysics*, **80**, B13-B22.
- Urguhart, W. E. S., 2007, Geophysical airborne survey complication and interpretation: http://www.geoexplo.com/airborn_magnetics_complication_and_interp.html.
- Blakely, R. J., 1996, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Application*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 441.
- Boomeri, M., 1998, *Petrology and Geochemistry of Sangan Iron Skarn Deposit and Related Igneous Rocks*, Ph. D. Thesis.
- Baranov, V., and Naudy, H., 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole: *Geophysics*, **29**, 67-79.
- Bath, D. G., 1962, Magnetic anomalies and magnetizations of the Biwabi Iron-Formation: Mesabi area, Minesota, *Geophysics*, **XXV11**, 627-650.
- Clark, D. A., 1997, Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys: *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, **17(2)**, 83-103.
- Cordani, R., 2013, Constrain modelling in Iron ore exploration: 13th international congress of the Brazilian geophysical society and EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26-29 August 2013, 702-704.
- Dobrin, M. B., and Savit, C. H., 1998, *Geophysical Prospecting*, Fourth edition, McGraw-Hill International Editions.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., and Mazaheri, S. A., 2014, Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran: *Ore Geology Reviews*, **S0169-1368(14)00159-0**, 49 P.
- Ganiyu, S. A., Badmus, B. S., Awoyemi, M. O., Akinyemi, O. D., and Olurin, O. T., 2013, Upward continuation and reduction to pole process on aeromagnetic data of Ibadan area, South-Western Nigeria: *Earth Science Research*, **2**, 66-73.
- Guun, P. J., Madment, D., and Miligan, P. R., 1997, Interpretation of aeromagnetic data in area of limited outcrop: *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, **17(2)**, 175-185.
- Jacobsen, B. H., 1987, a case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps: *Geophysics*, **52**, 1138-1148.
- Kamm, J., Lundin, I. A., Bastani, M., Sadeghi, M. and Pederson, L. B., 2015, Joint inversion of gravity, magnetic and petrophysical data- A case study from a gabro intrusion in Boden, Sweden, *Geophysics*, **80**, B131-B152.

Interpretation of the magnetic anomalies of the western mines of Sangan Ironstone using geology and borehole data

Abbas. Golmohammadi¹, Mohammad Reza Haidarian Shahri^{2*}, Seyed-Ahmad Mazaheri³, Behnam Rahimi², and Mohammad Hasan Karimpour³

¹Ph.D. Student of Economic Geology, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Associate Professor, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Professor, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 10 November 2015, Accepted: 07 February 2017)

Summary

Sangan iron deposit is a magnetite iron skarn. Magnetometry is the most common method for the exploration of such kinds of deposits based on the magnetic properties of these minerals. This method specifies the depth, dip, shape, and strike of the sources causing the anomaly. Many explorations of this ilk have been done of which giant Gol e Gohar in Iran is an example. Based on geology and following magnetometry, a massive iron deposit was predicted during Sangan iron exploration, where 558 boreholes in 50×50 m net were designed and drilled in the west ore body, revealing very useful subsurface information. Intrusive bodies are mainly granitic and oxidant types which, because of the presence of fine grain and disseminated magnetite, have higher magnetic susceptibility (K) in comparison to other granites. These bodies are considered as source rocks for the creation of gigantic Sangan mines. Multiphase ground magnetic survey points (19376) with different specifications were equalized and interpreted in this study. The causative sources of most magnetic anomalies in the rotation to the pole (RTP) map were magnetite mineralization, confirmed by the drilling data. In this research, filters of first vertical gradient and upward continuation were used to guide drilling owing to the presence of the remnant magnetism in the magnetite skarn and the unavailability of such measurements that are necessary for specifying the accurate depth of the magnetic anomaly sources. The information pertaining to vertical gradient and upward continued maps correlated well with the depth obtained from drilling and 3D block modelling. The amount of ore reserve and its depth increased from the western anomaly (A') to the central anomaly (C) and had a dip direction to the east. Such change in the depth of mineralization correlated with upward continued responses which represent the central magnetic anomaly (C) as the deepest anomaly in Sangan iron ore deposit. Magnetic responses of the Upward continuation to 1000 m of this magnetic anomaly can be related to either the high depth of the mineralization (620 m drilled so far) or the deeper intrusive body which needed deeper drilling (more than 1000 m) for confirmation.

Keywords: Sangan iron ore mine, magnetometry, anomaly, borehole drilling, RTP, filters