

زمین‌شناسی و اکتشافات ژئوفیزیکی در کانسار آهن ساغند

امیر غلامی پور سی سختی^۱، محمدرضا حیدریان شهری^{۱*}، خسرو ابراهیمی نصرآبادی^۱ و غلامرضا هاشمی مرند^۲

^۱دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
^۲شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۸)

چکیده

کانسار آهن ساغند تیپ ذخایر اسکارن منیزیمی است که در اثر نفوذ توده‌های آذرین گرانیتی ژوراسیک در واحدهای کربناته شکل گرفته است. چهار واحد سنگی میکاشیست، گنیس، اسکارن و آهک در منطقه وجود دارد. عمده رخنمون توده‌های آهن‌دار در واحد اسکارنی است که تقریباً در مرکز منطقه قرار دارد. براساس نقشه RTP مغناطیس سه بی‌هنجاری مغناطیسی A، B و C در منطقه وجود دارد. نقشه گرادیان اول قائم نشان می‌دهد که بی‌هنجاری A منابع کم‌عمق و سطحی دارد همان‌گونه که قسمتی از آن بر بیرون‌زدگی‌های آهن منطبق است. بی‌هنجاری B که بر آبرفت منطبق است در قسمت غربی منابع کم‌عمق در نقشه گرادیان اول قائم نیز نشان می‌دهد. اما قسمت شرقی بی‌هنجاری B پاسخی ندارد. بی‌هنجاری C نیز که بر آبرفت منطبق است در نقشه گرادیان اول قائم پاسخی ندارد. با توجه به نقشه‌های فراسو مشخص می‌شود که فقط بی‌هنجاری A و قسمت غربی بی‌هنجاری B دارای پاسخ عمقی هستند و احتمالاً منبع آنها کانی‌سازی آهن در عمق هستند. به علت پذیرفتاری مغناطیسی بسیار زیاد مگنتیت در کانسار آهن نسبت به دیگر واحدهای سنگی، بهترین منبع ایجادکننده بخش غربی بی‌هنجاری B که بر آبرفت منطبق است می‌تواند مگنتیت در توده‌های آهن‌دار پوشیده باشد. دو بی‌هنجاری در داده‌های گرانی‌سنجی وجود دارد. با توجه به نقشه‌های گرادیان اول قائم و فراسو اولین اولویت حفاری روی بی‌هنجاری A تشخیص داده شد که بر بیرون‌زدگی‌های کانسار منطبق است. دومین اولویت حفاری روی قسمت غربی بی‌هنجاری B شناسایی شد که بر آبرفت منطبق است. این نتایج حفاری هماهنگ با پاسخ مغناطیسی نقشه‌های گرادیان اول قائم و فراسو است و آنها را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کانسار آهن ساغند، بی‌هنجاری، مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی، مگنتیت

Geological and geophysical exploration of Saghand iron deposit

Amir Gholamipour Sisakhti¹, Mohamad Reza Haidarian Shahri^{1*}, Khosrow Ebrahimi Nasrabadi¹ and Gholam Reza Hashemi Marand²

¹Ferdowsi University of Mashhad, Iran
²Iran Minerals Production & Supply Co. (IMPASCO)

(Received: 16 June 2012, accepted: 18 December 2012)

Summary

The Saghand Iron Ore is a type of magnesian skarn deposit formed by the intrusion of granitic igneous bodies of Jurassic into carbonate rocks. Four lithological units of

*Corresponding author:

hshahri@ferdowsi.um.ac.ir

*نگارنده رابط:

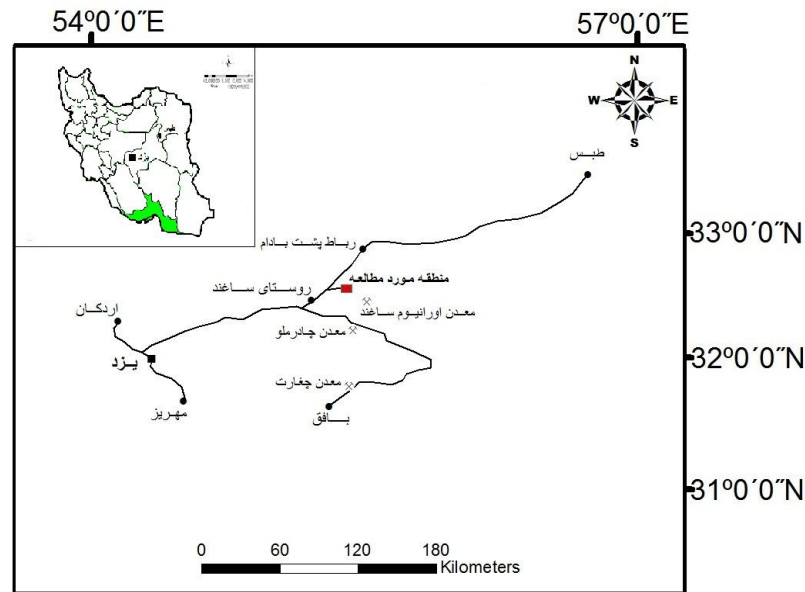
micaschist, gneiss, skarn and limestone are present in the area. On the basis of the RTP magnetic map, three magnetic anomalies A, B and C are present in the area. The first vertical gradient map shows that anomaly A has shallow and near surface sources as part of it correlates with iron outcrop. Anomaly B which correlates with the alluvium shows also shallow sources in the western portion on the first vertical gradient map but the eastern portion of anomaly B has no responses. Anomaly C which also correlates with the alluvium, has no responses on the vertical gradient map. Considering the upward continued map, it is inferred that only anomaly A and the western portion of anomaly B have deep responses and their sources are possibly iron mineralization at depth. Due to the high magnetic susceptibility of magnetite in iron ores relative to the other rock units, the best causative source of the western portion of anomaly B which correlates with the alluvium can be magnetite in the covered iron bodies. Two anomalies are present in gravity data. Considering the first vertical and continued maps, the first priority of drilling is recognized over anomaly A which correlates with an iron ore outcrop. The second priority of drilling is identified over the western portion of anomaly B which correlates with the alluvium. This drilling results are consistent with the responses of the first vertical gradient and continued maps and confirm them.

Key words: Saghand iron ore, anomaly, magnetic survey, gravity survey, magnetite

۱ مقدمه

شامل مجموعه‌ای از گنیس، آمفیولیت، مرمر و شیست‌هایی است که بخشی از آن را به مجموعه پشت‌بادام و بخش دیگر را به سری بنه‌شورو نسبت می‌دهند (لطفی و همکاران، ۱۳۷۷). کوه گل‌منده در زونی واقع شده که بین دو گسل اصلی پشت‌بادام و کلمرد قرار گرفته است و شامل مجموعه‌هایی از کهن‌ترین سنگ‌های دگرگونه ایران است که با سازندهای تاشک و بنه‌شورو شناخته می‌شوند و تعداد بسیار زیادی از اندیس‌ها و معادن مهم آهن ایران مرکزی همچون چغارت، چادرملو، سه‌چاهون، میش‌دوان، چاه‌گز، دوزخ‌دره و مانند آن در این زون قرار دارند و یکی از ایالت‌های فلززایی آهن پرکامبرین - کامبرین ایران در این منطقه واقع است (لطفی و همکاران، ۱۳۷۷). کانسار آهن ساغند در بخش جنوبی کوه گل‌منده واقع شده است. در محدوده آهن‌دار ساغند کانسار آهن در سطح زمین رخنمون دارد و ابعاد آن تا حدی است که به‌سادگی روی عکس‌های ماهواره‌ای قابل تشخیص است و در سنگ میزبان اسکارن قرار دارد.

کانسار آهن ساغند که در گزارش‌های شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران با نام کانسار آهن بی‌هنجاری ۲۳ ساغند شناخته می‌شود در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال‌شرق روستای ساغند (واقع در استان یزد) و بین طول‌های جغرافیایی $24^{\circ} 27' 55''$ و $28^{\circ} 12' 55''$ و عرض‌های جغرافیایی $40^{\circ} 40' 32''$ و $40^{\circ} 40' 32''$ قرار گرفته است. راه دسترسی به این کانسار، جاده آسفالت ساغند - رباط پشت‌بادام است (شکل ۱). به‌طور کلی بیشترین ارتفاعات محدوده را کوه گل‌منده تشکیل می‌دهد که اطراف آن را دشت‌های وسیع احاطه کرده است. این کوه دارای یکی از اندیس‌های آهن شناخته شده از سوی شرکت ملی فولاد است که همچون بسیاری از معادن و اندیس‌های آهن این ناحیه در زون ایران مرکزی واقع شده است. ناحیه ساغند به‌واسطه قدمت سازندها و فعالیت‌های متعدد ماگماتیسم و دگرگونی، پیچیدگی‌های بسیاری دارد که بررسی‌های دقیقی را با دشواری‌هایی روبه‌رو می‌کند. کوه گل‌منده



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به منطقه مورد مطالعه.

۲) تهیه نقشه زمین‌شناسی، آلتراسیون و کانی‌سازی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ در منطقه‌ای به وسعت ۱/۳ کیلومتر مربع.
 ۳) اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی از ۴۰ نمونه برداشت شده که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.
 ۴) تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، کانی‌سازی و پتروفیزیک (پذیرفتاری مغناطیسی و چگالی).

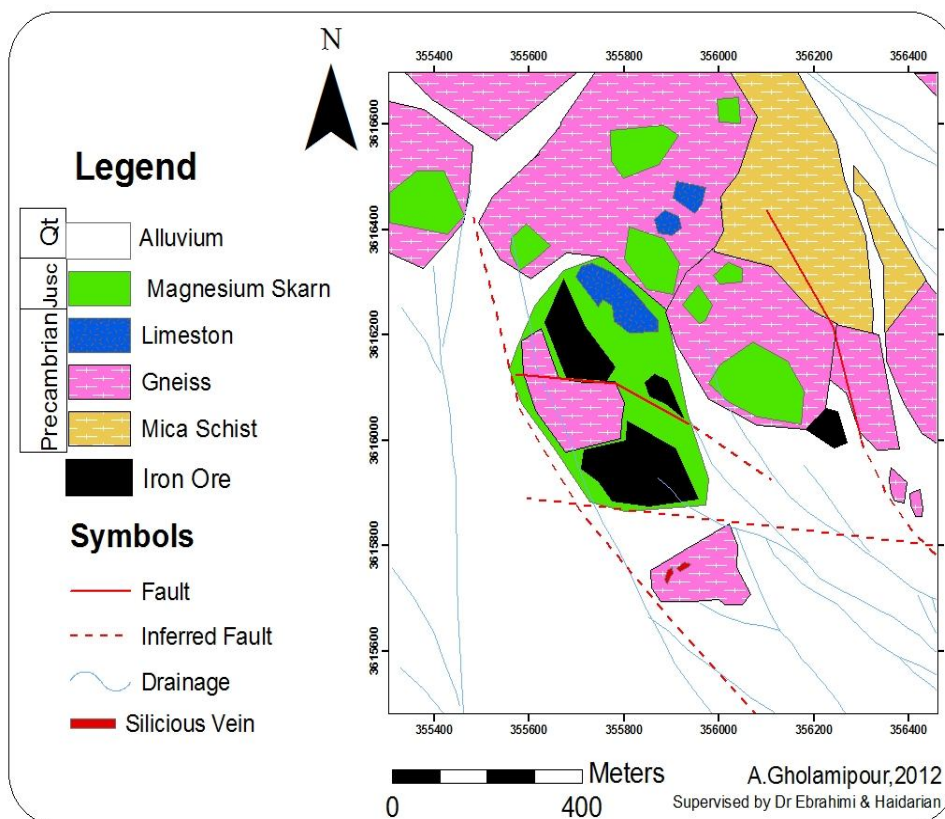
این اسکارن‌ها از نفوذ توده‌های گرانیتی ژوراسیک در واحدهای کربناته شکل گرفته‌اند. تحقیقات مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی صورت گرفته در این منطقه علاوه بر مشخص کردن گسترش بیشتر این رخنمون در زیر سطح زمین، منجر به آشکارسازی منسایهای دیگری نیز در منطقه شده است که ابعاد آنها کوچک‌تر از رخنمون اصلی است. در این پژوهش از نرم‌افزارهای Geosoft، Surfer و برنامه اینترنتی IGRF استفاده شده است.

جدول ۱. مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های سنگی و کانسار آهن.

نام سنگ	پذیرفتاری مغناطیسی $\times 10^{-5} \text{ SI}$
گنیس	۹۱
میکاشیست	۴۴۳
اسکارن	۳۶
رگه سیلیسی	۰
آهک اکسیدشده	۱۴
کانسار آهن	$993 \times 10^{-3} \text{ SI}$

۲ روش تحقیق

بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته در این پژوهش شامل موارد زیر است:
 ۱) بررسی ۳۰ مقطع نازک از انواع واحدهای سنگی منطقه (میکاشیست، گنیس، اسکارن، رگه‌های کوارتز و آهک) به منظور بررسی‌های پتروگرافی و آلتراسیون و ۱۰ مقطع بلوک صیقلی از ماده معدنی آهن به منظور بررسی‌های کانی‌سازی.



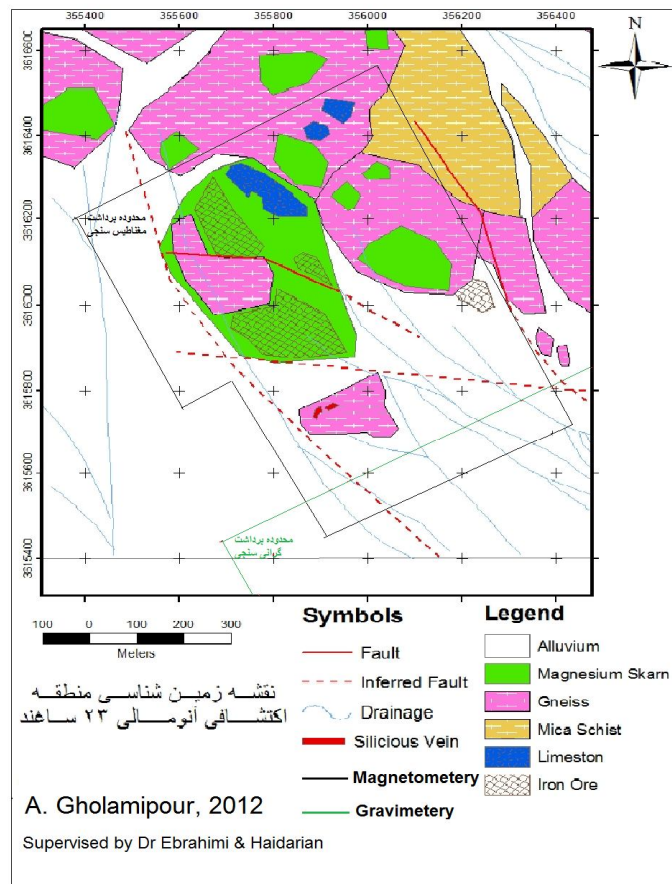
شکل ۲. نقشه زمین شناسی و کانی سازی منطقه مورد بررسی.

۳ زمین شناسی منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی از نظر زمین شناسی ناحیه ای در شرق نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ ساغند (باباخانی و مجیدی، ۱۳۷۴) و در شرق گسل پشت بادام با امتداد شمال شرق - جنوب غرب که خود از گسل های قدیمی ایران است قرار می گیرد. سنگ های دگرگونی پرکامبرین کمپلکس بنه شور و که حداقل دو فاز دگرگونی فشار متوسط و ضعیف را تحمل کرده اند قسمت اعظم تشکیلات زمین شناسی منطقه را به وجود آورده اند. نقشه زمین شناسی و کانی سازی منطقه مورد بررسی تهیه شد (شکل ۲). با توجه به شکل ۲ واحدهای سنگی که در منطقه رخنمون دارند شامل:

(۱) واحد میکاشیست که در قسمت شمال شرقی کانسار آهن ساغند برون زد دارد و دارای بلورهای جهت یافته مسکویت است. این شیست ها دارای رنگ های سبز تا خاکستری اند و به سمت غرب و شمال غرب به تدریج به سنگ های دگرگونی با دمای بالاتر بالاتر یعنی گنیس تبدیل می شوند.

(۲) واحد گنیس در قسمت اعظم محدوده مورد بررسی از شمال تا قسمت های مرکزی و همچنین در بخش شمال غرب، رخنمون دارد. این سنگ ها روی واحد میکاشیستی قرار گرفته اند و حتی در بعضی قسمت ها به طور جانبی به آن تبدیل شده اند. این سنگ ها عمدتاً از کانی های کوارتز و فلدسپات تشکیل شده است. رنگ واحد مزبور از



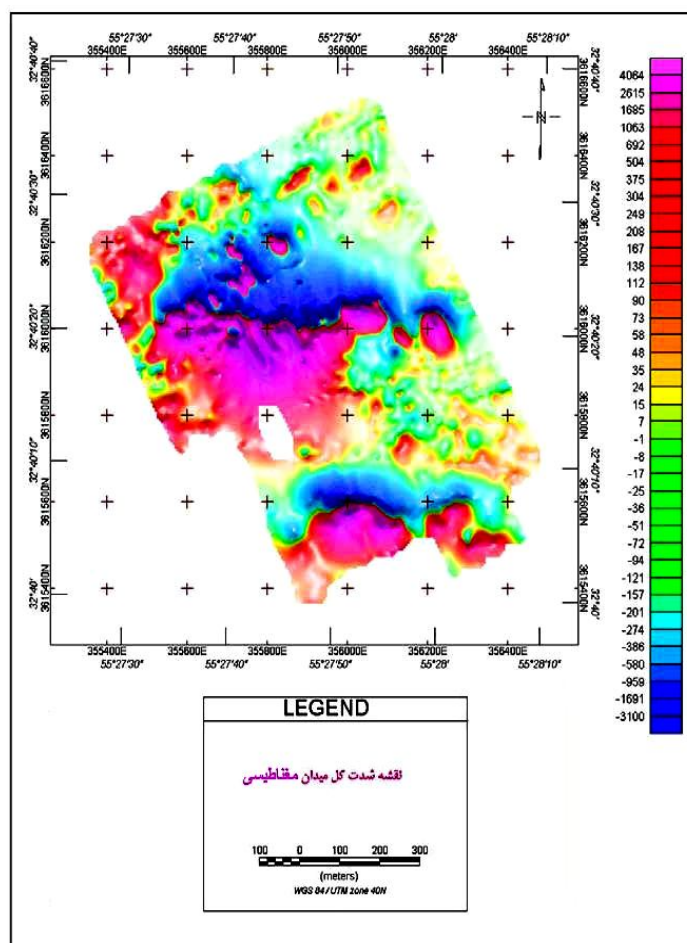
شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی و کانی‌سازی منطقه مورد بررسی و محدوده برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانش‌سنجی.

با توجه به حضور کانی‌های گارنت، اپیدوت، پیروکسن، آمفیبول و کربنات بیانگر اسکارن‌زایی در این کانسار است. به‌طور کلی تشکیل اسکارن شامل سه مرحله است که عبارت‌اند از مرحله دگرگونی مجاورتی ایزوکمیکال، مرحله تشکیل اسکارن و مرحله دگرسانی پس‌رونده (شهاب‌پور، ۱۳۸۰). مرحله دگرسانی پس‌رونده هم‌زمان با دگرسانی کانی‌های اسکارن و همچنین توده نفوذی به کانی‌های آبدار است. در واحد اسکارن موجود در منطقه پیروکسن‌ها از نوع دیوپسید هستند که در بعضی قسمت‌ها به تالک و فلوگوپیت تبدیل شده‌اند. بنابراین با توجه به حضور کانی‌های حاوی منیزیم در واحد اسکارن این

صورتی تا خاکستری‌رنگ به‌ترتیب از شرق به غرب متغیر است. در داخل این واحد رگه‌های نازک تا نسبتاً ضخیم لایه از کوارتزیت‌های سفیدرنگ برون‌زد دارد.

واحد آهک که در واقع بقایای سنگ‌های آهکی است که تحت‌تأثیر دگرگونی تغییر ماهیت داده‌اند و به اسکارن تبدیل شده‌اند. این واحد به‌صورت برون‌زدهای کوچکی در میان سنگ‌های واحد گنیس در بخش شمال شرقی و همچنین درون واحد اسکارن قرار دارد. این واحد دچار هوازدگی شدیدی شده است.

واحد اسکارن که در حاشیه رخنمون‌های آهن‌دار و در داخل سنگ‌های گنیسی قرار دارد. این واحد به‌صورت سنگ‌های سبز تا سبز تیره متمایل به سیاه رخنمون دارد که



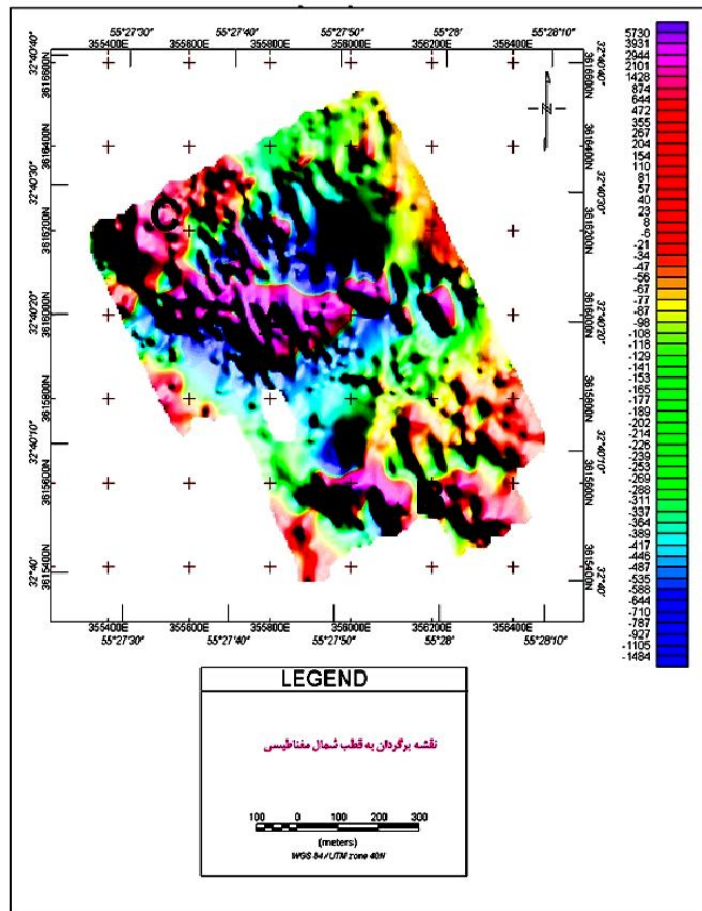
شکل ۴. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMI)
(شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷).

مستقیم کانسار آهن مگنتیتی و هماتیستی است (حیدریان شهری، ۱۳۸۴؛ زمردیان و حاجب حسینه، ۱۳۶۸؛ دوبرین، ۱۹۹۸ و دونوهو، ۲۰۱۲). از آنجا که متاسوماتیسم سنگ‌های دولومیتی، سبب تشکیل مگنتیت فراوان می‌شود بنابراین در اسکارن‌های منیزیمی علائم شدید مغناطیسی سبب تشخیص حضور کانسار و نوع پروتولیت خواهد شد (چرمینوف، ۱۹۸۸). با توجه به مشاهده کانه‌زایی آهن مگنتیتی در منطقه تعداد ۲۶ نیم‌رخ اصلی، ۱۰ نیم‌رخ میان‌لایه‌ای روی رخنمون اصلی و ۸ نیم‌رخ تکمیلی روی بی‌هنجاری‌های ناقص ثبت شده، برداشت شده است

واحد از نوع اسکارن منیزیمی است. در منطقه مورد بررسی رخنمونی از توده نفوذی وجود ندارد ولی در خارج از منطقه مورد بررسی با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساغند توده نفوذی از جنس گرانیت و با سن ژوراسیک وجود دارد.

واحد آبرفت که بخش اعظم منطقه مورد بررسی را پوشش داده و شامل آبرفت‌های سخت شده قدیمی است که عمدتاً از ماسه، رُس و قلوه‌سنگ‌های درشت تشکیل شده و بخش جنوبی و غربی منطقه را پوشش می‌دهد.

۴ برداشت‌های مغناطیس‌سنجی مغناطیس‌سنجی و
گرانی‌سنجی ایدنال‌ترین روش ژئوفیزیکی برای اکتشاف



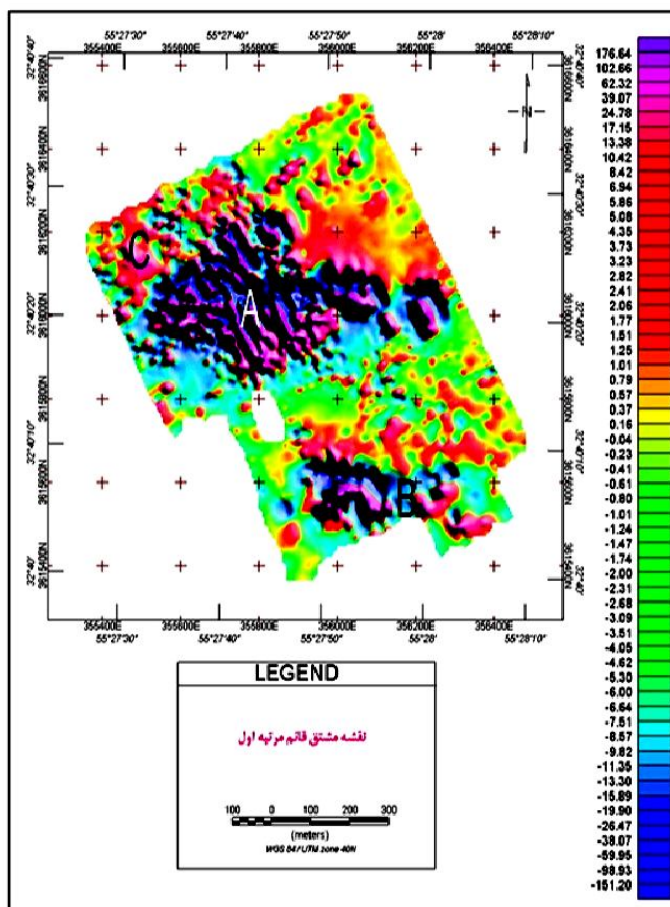
شکل ۵. نقشه انتقال به قطب (RTP) و بی‌هنجاری‌های نام‌گذاری شده روی آن (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷).

است (شکل ۳). پس از برداشت داده‌های مغناطیسی تصحیحات مربوط به اثر روزانه، اثر میدان اصلی و حذف نوفه صورت گرفت و نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMI) تهیه شد که در شکل ۴ آمده است. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی رنگی، تجسم کلی از داده‌های مغناطیسی را فراهم می‌سازد و در تفسیر کلی از آن استفاده می‌شود (حیدریان شهری، ۱۳۸۴؛ اورگوهارت، ۲۰۰۷؛ لیو و مکی، ۱۹۹۸).

۴-۱ نقشه برگردان به قطب (RTP)

استفاده از انتقال به قطب به منظور دستیابی به محل واقعی

(شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷). فواصل بین نیم‌رخ‌های پیش‌گفته ۳۰ متر و فواصل نقاط برداشت ۱۰ متر و جهت آنها شمالی - جنوبی و طول نیم‌رخ‌ها به‌طور متوسط ۴۰۰ متر انتخاب شده است. مجموع کل نقاط برداشت شده در محدوده کانسار آهن ساغند، ۳۸۷۱ نقطه است. عملیات برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از یک دستگاه مغناطیس‌سنج پروتون ژئومتریक्स صورت گرفته است. برای مقایسه و تفسیر بهتر نقشه‌های ژئوفیزیکی، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس مشابه نقشه‌های ژئوفیزیکی تهیه شد که محدوده برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی نیز در آن مشخص شده

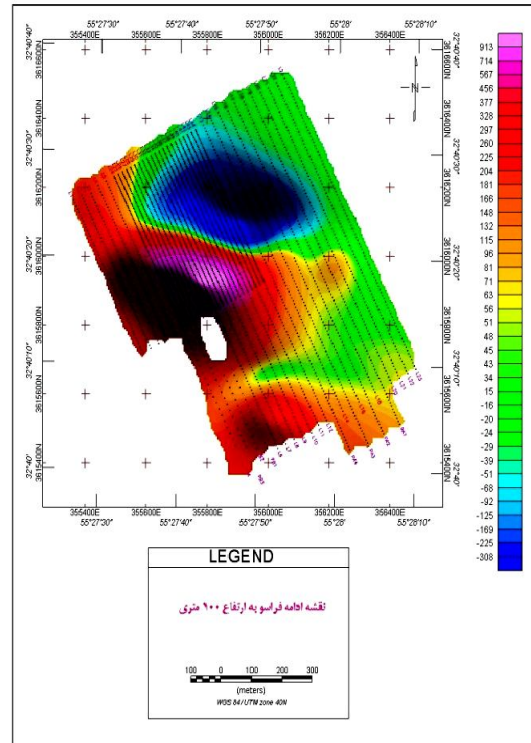
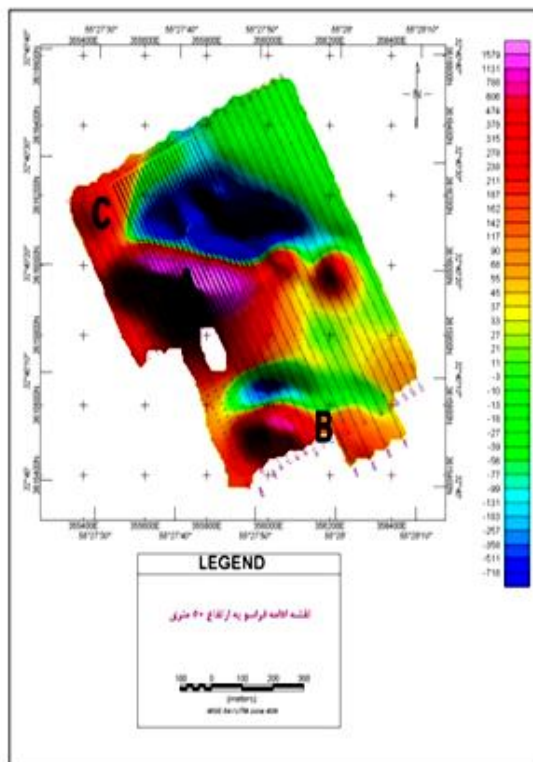
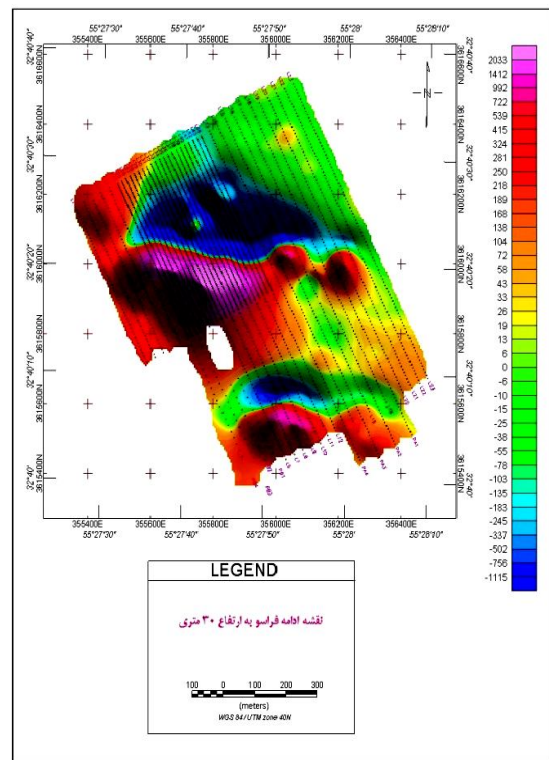
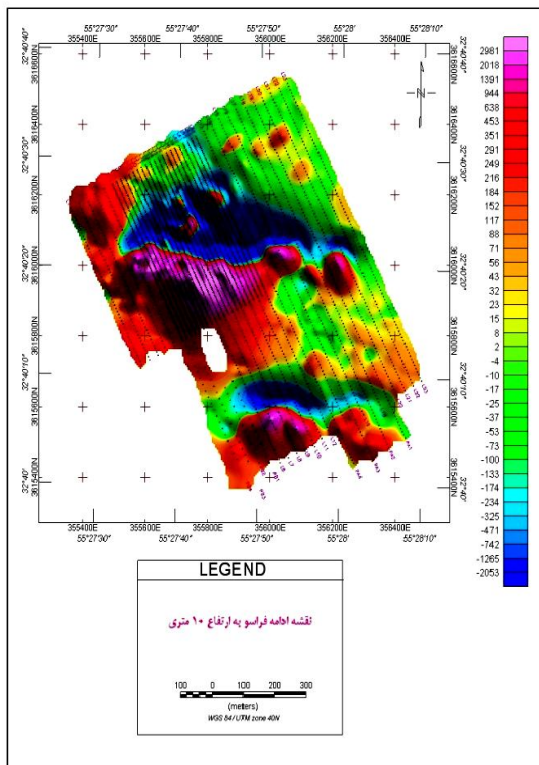


شکل ۶. نقشه مشتق قائم مرتبه اول و بی‌هنجاری‌های نام‌گذاری شده روی آن (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷).

۴-۲ نقشه مشتق اول قائم

فیلتر مشتق اول قائم (گرادیان قائم) اثر بی‌هنجاری‌های عمیق با بسامد کم را حذف می‌کند و تاثیر منابع کم‌عمق با بسامد زیاد را بهتر به نمایش در می‌آورد (گان، ۱۹۹۶). نقشه گرادیان قائم از آنجاکه نوعی فیلتر بالاگذر است تصویری فیلتر شده از میدان مغناطیسی فراهم می‌کند که ویژگی‌های منابع مغناطیسی نزدیک سطح زمین را برجسته می‌سازد (کوپر و همکاران، ۲۰۰۴؛ فورد، ۲۰۰۴). از آنجاکه مقدار گرادیان قائم در بالای تماس عمودی صفر است اغلب برای ردیابی مرز بین مناطق مغناطیسی بزرگ مقیاس از آن استفاده می‌شود (هود، ۱۹۶۵).

بی‌هنجاری‌ها بایستی با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد بررسی صورت گیرد (کلارک و همکاران، ۱۹۹۷). تفسیر اصلی از مجموعه داده‌های مغناطیسی روی داده‌های انتقال داده شده به قطب صورت می‌گیرد (نیقیان، ۲۰۰۵؛ ناکاتسوکا و اوکوما، ۲۰۰۶). با استفاده از این عمل می‌توان میدان مغناطیسی را از یک عرض مغناطیسی، جایی که میدان زمین شیب‌دار است، به میدان در قطب مغناطیسی انتقال داد. در این حالت بی‌هنجاری‌ها به‌طور عمودی در بالای منبع ایجادکننده خود قرار می‌گیرند (گان و همکاران، ۱۹۹۷؛ آرکانی، ۱۹۹۰). نقشه برگردان به قطب منطقه مورد بررسی در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۷. نقشه ادامه فراسو در ارتفاع ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷).

(بلکلی، ۱۹۹۶). با اعمال این فیلتر می توان اطلاعات کیفی از گسترش عمقی منشا (در اینجا توده مگنتیتی) به دست آورد. بنابراین نقشه فراسو در عمق های ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری تهیه شد که در شکل ۷ آمده است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود فقط دو روند موازی در راستای شمال غربی - جنوب شرقی در فراسوی ارتفاع بالا باقی مانده است. این دو روند به خوبی کانون های کانه زایی را در منطقه نشان می دهد.

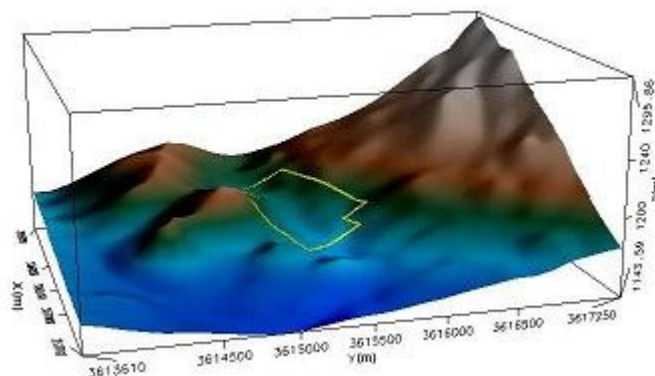
۴-۴ تفسیر داده های مغناطیس سنجی

اطلاع از خاصیت فیزیکی سنگ ها (چگالی، پذیرفتاری مغناطیسی، رسانایی الکتریکی و مانند آن) در تعیین روش ژئوفیزیکی مورد استفاده و تفسیر داده ها الزامی است (کلارک و همکاران، ۱۹۹۷). از نمونه های گوناگون سنگ میزبان و کانسار، پذیرفتاری مغناطیسی اندازه گیری شد (جدول ۱). دستگاه پذیرفتاری سنج به کار برده شده مدل GMS2 با دقت $SI^{-5} \times 10^{-1}$ ، ساخت شرکت سینترکس کانادا و متعلق به بخش زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد است. دستگاه پذیرفتاری سنج، از بدنه ای سرامیکی در ابعاد حدود $20 \times 10 \text{ cm}^2$ تشکیل شده است

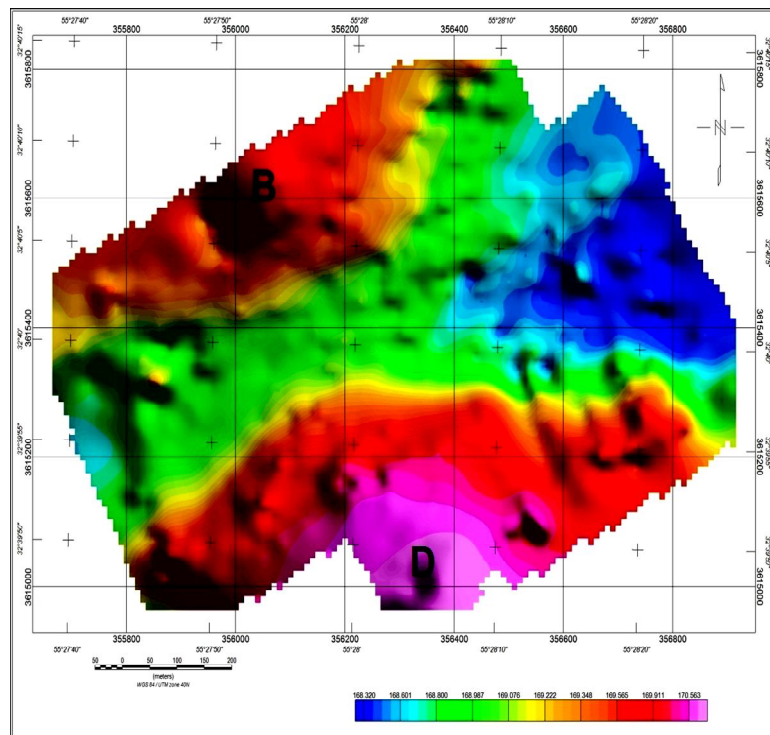
محاسبات مشتق میدان روشی پُر کاربرد برای واضح تر کردن بی هنجاری های محلی است. اثر این روش تضعیف کردن بی هنجاری منطقه ای و تقویت بی هنجاری محلی است (حیدریان شهری، ۱۳۸۴). بنابراین برای تشخیص بی هنجاری های محلی نقشه مشتق قائم مرتبه اول تهیه شد (شکل ۶). بر اثر تولید نوفه در نقشه گرادیان قائم مشخص می شود قسمت های سطحی توده کانسار به شدت ناهمگن و هوازده شده است.

۳-۴ نقشه فراسو

فیلتر ادامه به سمت بالا، اثر بی هنجاری های سطحی با بسامد زیاد را حذف می کند و به این طریق اثر بی-هنجاری های عمیق تر را بهتر آشکار می سازد (گان، ۱۹۹۶). این فیلتر تاثیر منابع محلی و کم عمق را که در نقشه های گرادیان قائم آشکار بود کم می کند (حیدریان شهری، ۱۳۸۴). در واقع این عمل بی هنجاری های با طول موج کوتاه را حذف می کند و دامنه بی هنجاری را تضعیف و اختلالات را کاهش می دهد. بنابراین مانند یک روش پایین گذر عمل می کند. فیلتر ادامه فراسو برعکس فیلتر مشتق قائم طوری طراحی شده است که بی هنجاری های مربوط به منشا های عمیق را تقویت و بی هنجاری های سطحی را تضعیف می کند.



شکل ۸. محدوده برداشت گرانی سنجی و توپوگرافی اطراف آن (محور Y در جهت شمال است).

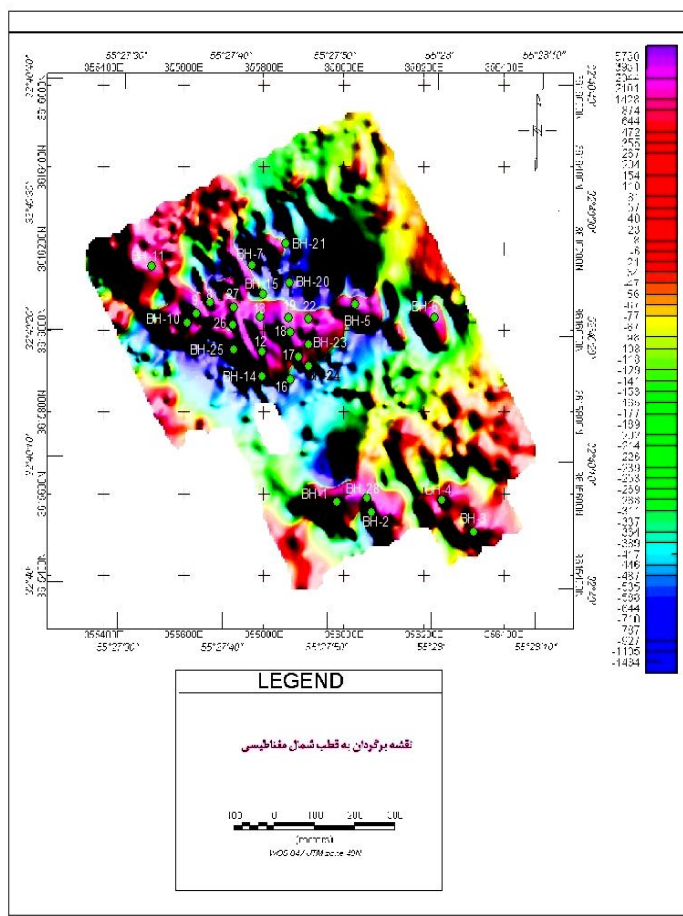


شکل ۹. نقشه بی‌هنجاری کامل بوگه (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷).

پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌های میزبان $SI \times 10^{-5}$ است ولی بیشترین پذیرفتاری مغناطیسی در سنگ‌های میزبان مربوط به واحد سنگی میکاشیست و مقدار آن $SI \times 10^{-5}$ است. پذیرفتاری مغناطیسی کانسار آهن $SI \times 10^{-3}$ یعنی صد برابر بزرگ‌تر از سنگ میزبان است. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که هر بی‌هنجاری مغناطیسی پوشیده ممکن است ناشی از کانسار در عمق باشد.

با توجه به نقشه RTP (شکل ۵) سه بی‌هنجاری مغناطیسی A، B و C در منطقه وجود دارد. بی‌هنجاری A در مرکز نقشه RTP منطبق بر رخنمون‌های اصلی آهن در واحد اسکاران است. بی‌هنجاری A وسعتی بیشتر از رخنمون توده‌های آهن‌دار نشان می‌دهد و بزرگی ۵۷۳۰ گاما دارد. بی‌هنجاری B با انطباق با نقشه زمین‌شناسی (شکل ۳) بر آبرفت منطبق است. این بی‌هنجاری به دو

که در سطح فوقانی دارای صفحه کلید و نمایشگر است و تنظیمات دستگاه با آنها صورت می‌گیرد. در بخش زیرین دستگاه، قطعه‌ای فلزی کروی شکل به قطر تقریبی ۲cm وجود دارد که ناحیه حس‌گر دستگاه را تشکیل می‌دهد. به منظور اندازه‌گیری پذیرفتاری، بخش فلزی پیش‌گفته در تماس با نمونه قرار می‌گیرد و سپس عدد اندازه‌گیری شده خوانده می‌شود. بهتر است که از یک سطح صاف اندازه‌گیری به عمل آید تا سطح بیشتری از نمونه در تماس با مرکز حس‌گر دستگاه قرار گیرد و نتیجه صحیح‌تری به دست آید. محدوده حساسیت دستگاه به مواد فرومغناطیس، بسیار کوچک و در حد همان بخش فلزی است و عمق تشخیص ناچیزی در حد ۱cm دارد. پذیرفتاری مغناطیسی در دو یکای SI و CGS قابل اندازه‌گیری است. در برداشت‌های صورت گرفته در تحقیق حاضر از دستگاه SI استفاده شده است. متوسط



شکل ۱۰. موقعیت نقاط حفاری روی نقشه RTP.

پوشیده شده است مانند قسمت شرقی بی‌هنجاری B در نقشه گرادیان قائم پاسخی ندارد. با توجه به نقشه گرادیان قائم (شکل ۶) اولین اولویت حفاری روی بی‌هنجاری A تشخیص داده می‌شود که بر بیرون‌زدگی‌های کانسار منطبق است. دومین اولویت حفاری روی قسمت غربی بی‌هنجاری B شناسایی شد که پوشیده است. با توجه به نقشه فراسوی ۵۰ متر (شکل ۷) مشخص می‌شود که فقط بی‌هنجاری A و قسمت غربی بی‌هنجاری B دارای پاسخ عمقی و احتمالاً دارای کانی‌سازی در عمق هستند. به علت پذیرفتاری مغناطیسی بسیار زیاد مگنتیت در کانسار آهن نسبت به دیگر واحدهای سنگی (جدول ۱) تنها منبع ایجادکننده بخش غربی بی‌هنجاری B که بر

بخش شرقی و غربی تقسیم می‌شود که بخش غربی آن بزرگی ۳۹۳۱ گاما و بخش شرقی بزرگی ۸۷۴ گاما دارد. بی‌هنجاری C نیز با انطباق با نقشه زمین‌شناسی (شکل ۳) بر آبرفت منطبق است و بزرگی ۱۴۲۸ گاما دارد. نقشه گرادیان قائم (شکل ۶) نشان می‌دهد که بی‌هنجاری A منابع کم‌عمق و سطحی دارد، به نحوی که قسمتی از آن بر بیرون‌زدگی‌های آهن منطبق است. بی‌هنجاری B که با آبرفت پوشیده شده است در قسمت غربی (شکل ۶) منابع کم‌عمق را نیز نشان می‌دهد. قسمت شرقی بی‌هنجاری B در نقشه گرادیان قائم (شکل ۶) پاسخی ندارد. بی‌هنجاری C (شکل ۵) نیز که با آبرفت

محدوده‌های برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی به‌طور کامل با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند. محدوده برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ تهیه شده (شکل ۳) قرار دارد در حالی که قسمت اعظم محدوده برداشت گرانی‌سنجی در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ تهیه شده قرار ندارد و با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساغند در آبرفت قرار دارد و هیچ رخنمونی از واحد سنگی در آن وجود ندارد. در نقشه بی‌هنجاری کامل بوگه (شکل ۹) دو بی‌هنجاری گرانی B و D وجود دارد که هر دو بی‌هنجاری براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساغند منطبق بر آبرفت است. بی‌هنجاری B این نقشه همان بخش غربی بی‌هنجاری B موجود در نقشه RTP است. به‌عبارت‌دیگر، هم داده‌های مغناطیس‌سنجی و هم داده‌های گرانی‌سنجی قسمت غربی بی‌هنجاری B را تایید می‌کند. بی‌هنجاری دیگر (D) در نقشه بی‌هنجاری بوگه نیز بر طبق نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساغند منطبق بر آبرفت است. با توجه به دو برابر بودن چگالی کانسار آهن (مگنتیت) نسبت به واحدهای سنگی دیگر (جدول ۲) منشا ایجادکننده این بی‌هنجاری احتمالاً کانسار آهن مگنتیت یا لیتولوژی با چگالی زیاد است.

جدول ۲. چگالی سنگ‌ها و کانسار منطقه مورد بررسی (زمردیان و حاجب حسینی، ۱۳۶۸).

نام واحد سنگی	میانگین چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
گنیس	۲/۸
آهک	۲/۵۵
شیست	۲/۶۴
کانسار آهن (مگنتیت)	۵/۱۲

آبرفت منطبق است ممکن است کانی مگنتیت در توده‌های آهن‌دار پوشیده باشد. از طرفی با استفاده از نقشه‌های فراسو (شکل ۷) اعتماد بیشتری نسبت به گسترش کانسار در عمق در محل بی‌هنجاری A که بر رخنمون اصلی کانسار منطبق است به‌دست آمد. از طرف دیگر قسمت غربی بی‌هنجاری B که در آبرفت قرار دارد و در نقشه گرادیان قائم (شکل ۶) پاسخ سطحی داشت در نقشه‌های فراسو (شکل ۷) نیز گسترش عمقی نشان می‌دهد و اطمینان بیشتری برای حفاری فراهم می‌کند.

۵ برداشت‌های گرانی‌سنجی

معمولاً برداشت هم‌مکان مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی برای اکتشاف کانسار آهن که ممکن است مگنتیت و هماتیت باشند متداول است. مگنتیت به‌خاطر پذیرفتاری مغناطیسی زیاد و هماتیت به‌خاطر چگالی زیاد نسبت به سنگ میزبان روش‌های ژئوفیزیکی را موثر می‌کند (بلکلی، ۱۹۹۶؛ بلت و فلیس، ۱۹۹۷).

محدوده برداشت در ناحیه به‌نسبت مسطح در میان دامنه دو کوه واقع شده است (شکل ۸) و مساحت آن برابر با ۷۲۶۴۰۰ متر مربع و گسترش آن تقریباً ۸۰۰ × ۱۰۰۰ متر است. در این محدوده در ۶۵۷ نقطه گرانی‌سنجی با آزمون تقریبی N30W برداشت شده‌است (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷). فاصله ایستگاه‌ها در امتداد خط برداشت ۲۰ متر و فاصله بین دو خط متوالی ۵۰ متر است. عملیات برداشت داده‌های گرانی‌سنجی با استفاده از دستگاه گرانی‌سنج مدل Sodin 410 صورت گرفته است. پس از آنکه تصحیحات مربوط به عرض جغرافیایی، ارتفاع و جرم اضافه صورت گرفت نقشه بی‌هنجاری کامل بوگه تهیه شد که مبنای تحلیل و تفسیر قرار گرفت (شکل ۹).

۱-۵ تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی

۶ نتایج حفاری

دامنه بی‌هنجاری‌ها، پاسخ سطحی نقشه گرادیان اول قائم و پاسخ عمقی فراسو در تعیین اولویت نقاط حفاری نقش مهمی دارند. با توجه به داده‌های ژئوفیزیکی ۲۸ نقطه برای حفاری اولویت‌بندی و انتخاب شد که این نقاط روی بی‌هنجاری‌های حاصل از ژئوفیزیک قرار دارند. در شکل ۱۰ موقعیت نقاط حفاری روی نقشه RTP مشخص شده است. با توجه به نقشه RTP (شکل ۵) بیشترین دامنه بی‌هنجاری مربوط به بی‌هنجاری A با ۵۷۳۰ گاما و پس از آن بخش غربی بی‌هنجاری B با ۳۹۳۱ گاما است. با توجه به شکل ۱۰ در ۱۶ نقطه از بی‌هنجاری A حفاری صورت

گرفته است که نتایج حفاری حضور کانی‌سازی آهن را در عمق تایید می‌کند. در جدول ۳ اطلاعات چاه‌های حفاری از نظر برخورد به کانسار آهن در بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیک آمده است. بیشترین عمق کانی‌سازی در بی‌هنجاری A مربوط به چاه BH-18 است که نشان می‌دهد کانی‌سازی آهن تا عمق ۷۴ متری ادامه دارد. بی‌هنجاری A بزرگ‌ترین دامنه را دارد و در نقشه گرادیان قائم و فراسو نیز دارای پاسخ است، زیرا کانی‌سازی در سطح رخنمون دارد. همچنین این بی‌هنجاری تا عمق ۷۴ متری در چاه BH-18 دارای کانی‌سازی آهن است که تاییدکننده نقشه فراسو است.

جدول ۳. اطلاعات چاه‌های حفاری از نظر برخورد به کانسار آهن در بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیک (شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷).

فاصله دارای کانی‌سازی آهن (متر)		شماره چاه	نام بی‌هنجاری	
تا عمق	از عمق			
۳۶	۶	BH-5	بی‌هنجاری A	
	فاقد کانی‌سازی	BH-6		
۳۴	۶	BH-8		
۵۴	۳۳	BH-9		
۵۰	۱۰	BH-10		
۵۴	۴/۵	BH-12		
۴۹	۲۴	BH-13		
۶۲	۳۲	BH-14		
۵۹	۴۰	BH-17		
۷۴	۴	BH-18		
۷۴	۳۶	BH-19		
۷۵	۲۳	BH-22		
۵۳	۳۸	BH-23		
	فاقد کانی‌سازی	BH-25		
۲۲	۹	BH-26		
۳۹	۱۳	BH-27		
۵۸	۱۶	BH-1		بخش غربی
۳۷	۱۶	BH-2		
	فاقد کانی‌سازی	BH-28		
	فاقد کانی‌سازی	BH-3		
	فاقد کانی‌سازی	BH-4	بخش شرقی	
	فاقد کانی‌سازی	BH-11	بی‌هنجاری C	

چاه‌های BH-1، BH-2 و BH-28 روی بخش غربی بی‌هنجاری B حفر شده‌اند و نشان‌دهنده وجود کانی‌سازی آهن در عمق هستند (جدول ۳). بخش غربی بی‌هنجاری B در نقشه گرادیان قائم و فراسو دارای پاسخ است و چاه BH-1 حفر شده روی آن دارای بیشترین کانی‌سازی و از عمق ۱۶ تا ۵۸ متری دارای کانسار آهن است که به ترتیب تایید کننده پاسخ نقشه‌های گرادیان قائم و فراسو است. بی‌هنجاری‌های با دامنه کم، مانند بخش شرقی بی‌هنجاری B و C که حفاری روی آنها کانی‌سازی نشان نداده است در نقشه‌های گرادیان قائم و فراسو نیز دارای پاسخ مغناطیسی نیستند. چاه‌های BH-3 و BH-4 روی بخش شرقی بی‌هنجاری B حفر شده‌اند که حضور کانی‌سازی آهن را در عمق تایید نمی‌کنند. چاه BH-11 نیز روی بی‌هنجاری C حفر شده است که حضور کانی‌سازی آهن را در عمق تایید نمی‌کند. بی‌هنجاری B موجود در نقشه گرانی که منطبق با بخش غربی بی‌هنجاری مغناطیسی B است بزرگی ۱۶۹/۹۱۱ میلی‌گال دارد و نتایج حفاری حضور کانی‌سازی آهن را تایید کرده است. بی‌هنجاری D موجود در نقشه گرانی بزرگی ۱۷۰/۵۶۳ میلی‌گال دارد. روی این بی‌هنجاری، حفاری صورت نگرفته است.

۷ نتیجه‌گیری

قسمت عمده رخنمون اصلی توده آهن‌دار در واحد اسکارن قرار دارد. با توجه به حضور کانی‌هایی مانند دیوپسید، تالک، فلوگوپیت و دولومیت در واحد اسکارن مشخص می‌شود که تیپ کانسار از نوع اسکارن منیزیم‌دار است و از نفوذ توده‌های آذرین گرانیتی در مجاورت سنگ‌های کربناتی تشکیل شده است. در محدوده مورد بررسی رخنمون توده نفوذی درحکم منشا کانی‌سازی دیده نمی‌شود ولی در قسمت‌های دیگر کوه گل‌منده توده نفوذی با جنس گرانیت و سن ژوراسیک بالایی وجود دارد (برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ساغد). مغناطیس‌سنجی و

گرانی‌سنجی به منظور اکتشاف کانسار آهن پوشیده و تعیین گسترش توده‌های آهن بیرون‌زده صورت گرفته است. سه بی‌هنجاری مغناطیسی در نقشه RTP (شکل ۵) وجود دارد. بی‌هنجاری A بر رخنمون اصلی کانسار و دو رخنمون کوچک‌تر جدا از رخنمون اصلی آهن منطبق است ولی وسعتی بیش از رخنمون‌ها نشان می‌دهد. همچنین به دلیل پیوسته بودن بی‌هنجاری مغناطیسی نتیجه می‌شود که منشا ایجادکننده بی‌هنجاری (توده کانسار آهن) در زیر سطح زمین پیوسته و ممتد است درحالی‌که رخنمون‌های مربوط، جدا از هم هستند. دو بی‌هنجاری دیگر B و C در نقشه RTP وجود دارد که در مقایسه با نقشه زمین‌شناسی (شکل ۳) بر آبرفت منطبق هستند و منبع ایجادکننده آنها پنهان است. بی‌هنجاری B تفکیک‌پذیر به دو بخش شرقی و غربی است. بیشترین دامنه بی‌هنجاری مربوط به بی‌هنجاری A با ۵۷۳۰ گاما و پس از آن بخش غربی بی‌هنجاری B با ۳۹۳۱ گاما است. در نقشه‌های مشتق قائم مرتبه اول (شکل ۶) و فراسو (شکل ۷) مشخص می‌شود که بی‌هنجاری A و قسمت غربی بی‌هنجاری B دارای پاسخ مغناطیسی هستند و احتمالاً منبع بی‌هنجاری‌ها ناشی از کانی‌سازی آهن از عمق کم تا عمیق است. به‌علت پذیرفتاری مغناطیسی بسیار زیاد مگنتیت در کانسار آهن نسبت به دیگر واحدهای سنگی (جدول ۱) تنها منبع ایجادکننده بخش غربی بی‌هنجاری B که بر آبرفت منطبق است کانی مگنتیت در توده‌های آهن‌دار پیش‌بینی شد که حفاری‌ها آن را تایید کرد. در نقشه بی‌هنجاری کامل بوگه (شکل ۹) دو بی‌هنجاری گرانی B و D وجود دارد. بی‌هنجاری B این نقشه بر بخش غربی بی‌هنجاری B در نقشه مغناطیسی منطبق است و بی‌هنجاری دیگر (D) با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساغد منطبق بر آبرفت است. با توجه به چگالی تقریباً دو برابر کانی مگنتیت نسبت به دیگر واحدهای سنگی (جدول ۲)، منشا ایجادکننده بی‌هنجاری D نقشه گرانی نیز کانی مگنتیت

- Arkani, H., J., and Urquhart, W. E. S., 1990, Reduction to pole of North American magnetic anomalies: *Geophysics*, **55**, 218-225.
- Bult, A., and Flis, M. F., 1997, The application of Geophysics to iron ore mining in the Hamersley Basin, Western Australia: *Exploration Geophysics*, **28**, 195-198.
- Blakely, R. J., 1996, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Application*: Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 441.
- Chermeninov, V. B., 1988, Mapping of hydrothermally altered rocks according to a borehole section: *Soviet Geology and Geophysics*, **29**, 88-97.
- 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., and Cowan, D. R., 2004, Filtering using variable order vertical derivative: *Computers & Geosciences*, **30**, 455-459.
- Dobrin, M. B., and Savit, C. H., 1998, *Geophysical Prospecting*: Fourth edition, McGraw-Hill International Editions.
- Donohve, J., Hil, Q., and Brewster, D., 2012, Geophysics at the Howsons Iron Project, NSW, eastern Australia's new magnetite resource, Preview, February, Australian Society of Exploration Geophysics.
- Ford, K., Keating, P., and Thomas, M. D., 2004, Overview of geophysical signature associated with Canadian ore deposits: *Geological Survey of Canada*, 601 Booth street, Ottawa, Ontario, K1A0E8.
- Gunn, P. J., Madment, D., and Miligan, P.R., 1997, Interpretation of aeromagnetic data in area of limited outcrop: *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, **17**(2), 175-185.
- Hood, P. J., 1965, Gradient measurements in aeromagnetic surveying: *Geophysics*, **30**, 891-902.
- Liu, S., and Mackey, T., 1998, Using image in a geological interpretation of magnetic data: *AGSO Research Newsletter* 28.
- 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., 2005, The historical development of the magnetic method in exploration: *Geophysics*, **70**(6) (November-December 2005), 33ND-61ND
- Nakatsuka, T., and Okuma, S., 2006, Reduction of magnetic anomaly observations from موجود در توده‌های آهن دار پوشیده یا احتمالاً لیتولوژی با چگالی زیاد است که نیاز به تایید حفاری دارد. نتایج داده‌های حفاری مشخص کرد که بی‌هنجاری A و بخش غربی بی‌هنجاری B دارای کانی‌سازی آهن از سطح یا نزدیک سطح تا عمق هستند (جدول ۳). حفاری روی بی‌هنجاری A تا عمق ۷۴ متری کانی‌سازی آهن نشان داد. همچنین حفاری روی بخش غربی بی‌هنجاری B نیز از عمق ۱۶ متری تا عمق ۵۸ متری کانی‌سازی نشان داد. این نتایج حفاری بر روی بی‌هنجاری A و بخش غربی بی‌هنجاری B با پاسخ مغناطیسی نقشه‌های گرادیان قائم و فراسو هماهنگ است و آنها را تایید می‌کند. نتایج حفاری نشان می‌دهد که بخش شرقی بی‌هنجاری B و بی‌هنجاری C فاقد کانی‌سازی هستند و در نقشه‌های گرادیان قائم و فراسو پاسخی نداشته‌اند.
- منابع**
- باباخانی، الف. ر. و مجیدی، ج، ۱۳۷۴، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، ساغند، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- رایسنسون، ای. اس.، و کیت، کورو، ترجمه حیدریان شهری، م. ر. ۱۳۸۴، مبانی اکتشافات ژئوفیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد.
- زمردیان، ح. و حاجب حسینی، ح.، ۱۳۶۸، ژئوفیزیک کاربردی، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- لطفی، م.، حربری، ع.، و فرخندی، ف.، ۱۳۷۷، نگرشی بر کانه‌زایی آهن در ناحیه گل‌منده (شمال شرق ساغند)، دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۱۳۸۷، گزارش مرحله اول مطالعات زمین‌شناسی - اکتشافی کانسار سنگ آهن بی‌هنجاری ۲۳ ساغند.
- شهاب‌پور، ج.، ۱۳۸۰، زمین‌شناسی اقتصادی، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.

survey complication and interpretation:
http: // www.geoexplo.com/ airborn
_magnetics_complication_and_interp.html

helicopter surveys at varying elevation:
Exploration Geophysics, **37**, 121-128.
Urguhart, W. E. S., 2007, Geophysical airborne