



Magnetometric geophysical studies in Khosrow Abad iron deposit, northeast of Sonqor (Kermanshah Province)

Behzad Mehrabi ^{1*} , Majid Ghasemi Siani ² , Hamed Ebrahimi Fard ³, Elnaz Geravandi ⁴, Ebrahim Shahin ⁵

¹ Professor, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran

³ Ph.D. student, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Ph.D. student, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran

⁵ Geophysics expert, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 05 December 2023
Revised: 08 March 2024
Accepted: 10 March 2024

Keywords

Magnetometry
depth estimation
modeling of magnetic anomalies
Khosrow Abad

*Corresponding author

Behzad Mehrabi
✉ mehrabi@khu.ac.ir

ABSTRACT

Khosro Abad iron ore deposit is located 130 km of Kermanshah, 30 km northeast of Sonqor city close to Khosro Abad village, in the Sanandaj-Sirjan zone. Based on the field observation, exposed units in the area include; basaltic-andesite volcanic rocks and limestone of the Sonqor Volcanic-Sedimentary Complex. The quartz-monzonite body intruded the sequence and caused a contact metamorphism of up to greenschist facies, and development of hydrothermal alteration halos. Discharged iron bearing hydrothermal fluid destabilized due to physicochemical changes and deposited the iron ore in the contact of limestone, basaltic-andesite and quartz-monzonite intrusion. Control of iron ore mineralization by the contact of quartz-monzonite and volcano-sedimentary sequence and presence of skarn mineralogy is evidence of skarn mineralization in Khosrow Abad. Geophysical survey was carried out using magnetometry technique (1305 stations), covering an area of 3.6 Km² for defining the high potential areas of iron mineralization and depth estimation. In this research, total magnetic, reduction to pole, analytical signal, and upward continuation maps were prepared, and based on the obtained results four anomaly blocks of; An(A)-An(A')-An(B)-An(C) were identified. An(C) anomaly is shallower than the others and extend approximately down to 50 meters, while other anomalies are much deeper. The maximum magnetic anomaly in total field intensity and RTP maps is 46426.1 and 49474.6 nanotesla, respectively, along a northeast-southwest trend, aligned with the contact of meta-andesite-basalt and crystallized limestone units.

How to cite this article

Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Ebrahimi Fard, H., Geravandi, E. and Shahin, Sh., 2024. Magnetometric geophysical studies in Khosrow Abad iron deposit, northeast of Sonqor (Kermanshah Province). *Journal of Economic Geology*, 16(1): 79–112. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.85641.1096>



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The magnetometric exploration technique is one of the low-cost, widely used, and indirect methods for mineral exploration and tracking of oxidizing intrusive bodies containing Fe-Ti oxides, such as magnetite, titanomagnetite, and titanohematite, as well as some iron sulfides such as pyrrhotite (Donohue et al., 2012). The Khosrow Abad iron ore deposit is located in west Iran's iron metallogenic zone of the Sonqor series. It is located northwest of the Sanandaj-Sirjan zone; northeast of the Sonqor town (Kermanshah province) (Ghorbani, 2007) in Sonqor-Baneh volcanic belt (Azizi and Moinevaziri, 2009). In the northeast of Sonqor, hypabyssal acidic intrusive bodies penetrated the Upper Jurassic rock units, including basaltic meta-andesite volcanic rocks and limy slates (calc-shale), causing skarn development and iron ore mineralization. Mineralization is mainly hosted in the meta basaltic andesite unit's skarn zone, differentiating it from other common carbonate-hosted skarn deposits (e.g., Ebrahimi Fard et al., 2022a; Ebrahimi Fard et al., 2022b). The main purpose of current research is to examine the magnetometric geophysical explorations' accuracy in detecting possible ore zones as well as the depth of oxidized (magnetic) intrusive bodies and current emplacement depth and possible associated mineralization. The main challenges were locating the magnetite ore zone covered by recent alluvium and ore zone has limited exposure, and skarn ore facies without classic carbonates as a host rock.

Calc-silicate minerals in association with oxide and sulfide minerals formed the skarn zones in the Khosrow Abad deposit. Magnetite, pyrite, chalcopyrite, garnet, clinopyroxene, sodic plagioclase (albite), actinolite, epidote, chlorite, calcite, quartz, and iron hydroxides such as hematite, goethite, and limonite are the main constitute of the skarn zones. The main fracture system in the Khosrow Abad is a large strike-slip fault with an approximately north-south (NNW-SSE) trend and more than 80 degrees dip towards the east. Iron ore mineralization is mainly located in the eastern edge of this fault which formed a shear zone in the metamorphosed volcanic unit.

Material and methods

Based on the geological map, field observations, geological structures, mineralization limited exposure, and geophysical exploration were carried out perpendicular to apparent structures (probable veins and faults trend) along the northwest-southeast direction. The exploration pattern of the survey was, 25×10 m (profile distance of 25 m and 10 m reading intervals) in the ore zone and a 20×25 m pattern in surrounding rocks (1350 stations). Measurements were carried out by a Proton magnetometer model G856 manufactured by Geometrics. Magnetic surveys were mainly focused on meta basaltic andesite and quartz monzonite units. Qualitative and quantitative data processing and interpretations of data were carried out by using Geosoft Oasis Montaj and Magmap software. The highest field intensity recorded in the area is 52049 nT and the lowest recorded is 43619 nT, which according to the IGRF of 47515nT, is possibly due to the changes caused by the presence of medium-grade magnetite mineralization.

Discussion

In the total magnetic intensity map, magnetic anomalies were detected with the northwest-southeast trend which is related to discontinuous lenses along the main fault. In the IGRF-REM map, the maximum intensity value of anomalies is equal to 4534 nanotesla. All 4 detected anomalies; (A), (A'), (B), and (C) are high-intensity anomalies in this range. Anomaly (C) is marked on the map with moderate to relatively weak intensity. The upward continuation map indicates that the ore zone continues at least to a depth of more than 70 meters. The Euler's deconvolution method shows an estimate of the anomaly depth, An(C) anomaly is shallower than the others and has a depth of about 50 meters. Based on Spector and Grant's method, the estimated depth of Khosrow Abad iron ore mineralization is about 0.03 km, which is a reasonable estimate. The minimum depth of anomalies in most areas is about 30 meters. The model prepared by Encom Quickmag software shows that linear anomalies are located in line with the regional faults and parallel to each other with medium depth. For validation of the modeling results, based on the data interpretation (analytical signal map, pole-to-pole map, and transversal

continuation), several drilling points were proposed for borehole drilling.

Conclusion

Based on the geophysical data processing and interpretation (analytical signal map, reduction to pole map, and upward continuation) as well as modeling results, several locations were proposed for borehole drilling. The BH-1 borehole is located in the An (A) block anomaly central point, and according to the core logging data, this anomaly is

introduced as an anomaly with good intensity, and according to the continuation map with a depth of more than 30 meters is almost match the geophysical interpretation and model. After the drilling campaign, it was discovered that geophysical prediction shows a good agreement with the drilling data, which confirms the effectiveness of the proper design and implemented geophysical survey for iron ore exploration in the Khosrow Abad deposit, which could be used for other skarn iron ore deposits of the region.



بررسی های مغناطیس‌سنجی در کانسار آهن خسروآباد، شمال شرقی سنقر (استان کرمانشاه)

بهزاد مهربانی^{۱*}، مجید قاسمی سیانی^۲، حامد ابراهیمی فرد^۳، الناز گراوندی^۴، ابراهیم شاهین^۵

^۱ استادیار، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکتری، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۴ دانشجوی دکتری، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۵ کارشناس ژئوفیزیک، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

کانسار آهن خسروآباد در ۱۳۰ کیلومتری کرمانشاه و ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان سنقر در روستای خسروآباد و در پهنه زمین‌ساختی سنندج-سیرجان واقع شده است. بر اساس مشاهدات صحرایی، واحدهای رخنمون‌یافته در منطقه شامل مجموعه آتشفشانی-رسوبی سنقر بوده که متشکل از سنگ‌های آتشفشانی آندزیت بازالتی و سنگ‌های آهکی است. توده کوارتزموزنویتی در مجموعه یادشده نفوذ کرده است و ضمن ایجاد دگرگونی همبری در حد رخساره شیبست سبز، با ایجاد هاله‌های دگرسانی گرمابی، محلول‌های آهن‌دار را با تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی ناپایدار کرده و در مرز بین واحد آهکی با واحد آندزیت‌بازالتی و در همبری این واحدها با توده کوارتزموزنویتی، متمرکز کرده است. محدود بودن رخداد آهن به محل همبری این واحدها با توده کوارتزموزنویتی و وجود کانی‌شناسی اسکارن، گواه بر تشکیل اسکارن آهن است. بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی در ۱۳۰۵ ایستگاه در وسعت ۳/۶ کیلومترمربع برای تعیین نواحی پرتانسیل کانی‌سازی آهن و همچنین بررسی گسترش عمقی کانی‌سازی انجام شد. در این پژوهش نقشه‌های مغناطیس کل، برگردان به قطب، سیگنال تحلیلی و ادامه فراسو تهیه شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این بررسی‌ها، چهار بلوک بی‌هنجاری $An(A)-An(A')-An(B)-An(C)$ در محدوده مورد بررسی شناسایی شدند که بی‌هنجاری $An(C)$ سطحی‌تر است و گسترش عمقی حدود ۵۰ متر دارد و دیگر بی‌هنجاری‌ها گسترش عمقی بیشتری دارند. بیشینه بی‌هنجاری مغناطیسی در نقشه‌های شدت میدان کل و RTP به ترتیب حدود ۴۶۴۲۶/۱ و ۴۹۴۷۴/۶ نانوتسلا در یک روند شمال شرقی-جنوب غربی و منطبق با محل برخورد واحدهای متاآندزیت‌بازالتی و سنگ‌آهک متبلور است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

واژه‌های کلیدی

مغناطیس‌سنجی

تخمین عمق

مدل‌سازی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی

خسروآباد

نویسنده مسئول

بهزاد مهربانی

mehrabani@khu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

مهربانی، بهزاد؛ قاسمی سیانی، مجید؛ ابراهیمی فرد، حامد؛ گراوندی، الناز و شاهین، ابراهیم، ۱۴۰۳. بررسی‌های مغناطیس‌سنجی در کانسار آهن خسروآباد، شمال شرقی

سنقر (استان کرمانشاه). زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۱): ۷۹-۱۱۲. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.85641.1096>

مقدمه

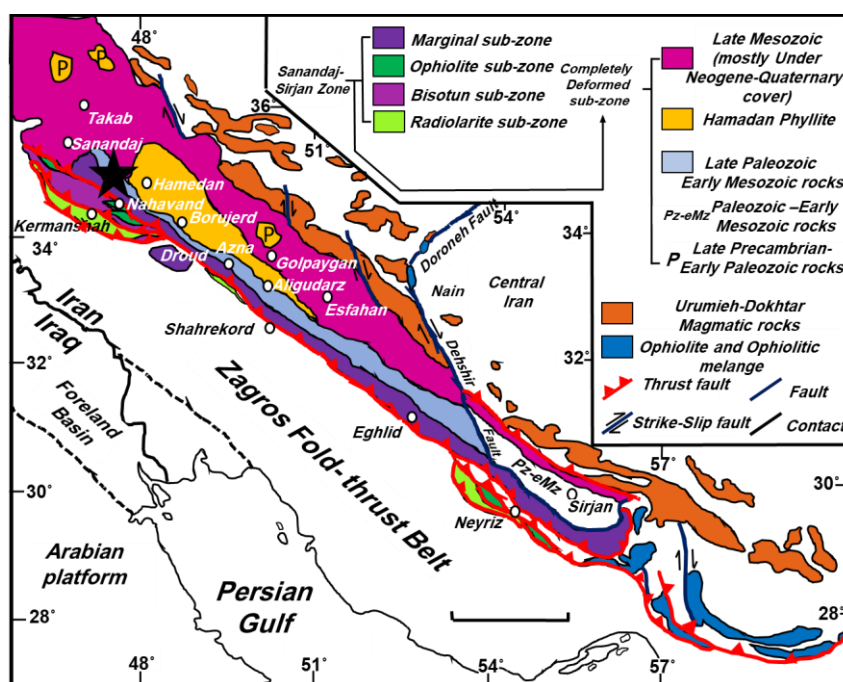
دارای مقادیر کافی مگنتیت اولیه برای ایجاد مغناطیس بالا هستند؛ در حالی که نفوذی‌های احیایی دارای ایلمنیت بیشتر از مگنتیت بوده و مغناطیس پایینی ایجاد می‌کنند (Ishihara, 1977). اسکارن‌ها ممکن است به سبب داشتن غلظت بالایی از مگنتیت و یا سایر کانی‌های مغناطیسی مانند پروتیت حرارت بالا، مغناطیس بالایی ایجاد کنند. از آنجایی که به طور معمول بر اثر متاسوماتیسم سنگ‌های دولومیتی مگنتیت فراوان پدید می‌آید، خاصیت مغناطیسی شدید کانسارهای اسکارن نیز می‌تواند ممکن است علاوه بر تشخیص وجود اسکارن، تشخیص دهنده سنگ مادر اولیه هم باشد (Li and Oldenburg, 1996; Currenti et al., 2007; Stocco et al., 2009). نشان‌های معدنی پیرامون آن مانند تکیه بالا (Maanijou et al., 2011; Aliani et al., 2012, Maanijou et al., 2013; Aliani et al., 2018; Barati et al., 2018)، گلالی (Moazami Goodarzi et al., 2022)، هزارخانی بالا و چرمه بالا (Ghorbani, 2007; Motevalli, 2005)، به عنوان بخشی از پهنه فلززایی آهن غرب کشور (سری سنقر) محسوب می‌شوند که در شمال‌غربی پهنه سنندج-سیرجان و در شمال‌شرقی شهرستان سنقر (استان کرمانشاه) (Ghorbani, 2007) (شکل ۱) و کمربند آتشفشانی سنقر-بانه (Azizi and Moinevaziri, 2009)، واقع شده‌اند. در شمال‌شرقی سنقر، توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق اسیدی به درون واحدهای سنگی ژوراسیک بالایی، شامل سنگ‌های آتشفشانی متاندزیت‌بازالتی و اسلیت‌های آهکی (کالک‌شیل) نفوذ کرده و باعث اسکارن‌زایی و کانه‌زایی آهن در این سنگ‌ها شده است. بخش اصلی ماده معدنی در کانسار خسروآباد در واحد متاندزیت‌بازالتی اسکارنی متمرکز شده است که موجب تمایز این نوع ذخیره از سایر ذخایر اسکارنی رایج با میزبان کربناته شده است (Ebrahimi Fard, 2020; Ebrahimi Fard et al., 2022a; Ebrahimi Fard et al., 2022b). بر اساس نریمانی (Narimani, 2017)، کانسار آهن خسروآباد حدود ۲۷۰۰۰۰ تن ذخیره قطعی با عیار ۵۲ درصد آهن دارد. سابقه

اکتشاف کانسنگ آهن بر پایه اثرات مغناطیسی آن، از نخستین کاربردهای ژئوفیزیک به روش مغناطیس‌سنجی در اکتشافات معدنی است. عملیات مغناطیس‌سنجی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای اکتشافات معدنی در کانسارهای مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر آهن استفاده می‌شود (Shirazi et al., 2018a; Shirazi et al., 2021a; Shirazi et al., 2021c; Khaber et al., 2021). بررسی‌های مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های کم‌هزینه، پرکاربرد و غیرمستقیم برای اکتشاف و ردیابی توده‌های نفوذی اکسیدان حاوی اکسید آهن-تیتانیوم مانند مگنتیت، تیتانومگنتیت و تیتانوهمازیت و نیز برخی از سولفیدهای آهن همچون پروتیت است (Robinson, 1988; Spicer et al., 2011; Donohue et al., 2012). کانسارهای اسکارن با جانشینی سنگ‌های کربناته در حین دگرگونی مجاورتی و فرایند متاسوماتیسم تشکیل می‌شوند (Cooper and Cowan, 2006; Ganiyu et al., 2013). کانسارهای اسکارن آهن ممکن است در نتیجه تمرکز میزان زیاد مگنتیت (Parker and Huestis, 1974) یا سایر کانی‌های مغناطیسی همچون پروتیت دما بالا (Scales and Snieder, 2000) خاصیت مغناطیسی شدید نشان دهند. پس از انتخاب مناطق مستعد، از روش مغناطیس‌سنجی با هدف دستیابی به خودپذیری مغناطیسی و وضعیت ساختاری زیرسطحی کانسار از طریق اندازه‌گیری میدان مغناطیسی کل در یک محدوده استفاده می‌شود (Parker and Huestis, 1974; Scales and Snieder, 2000; Cooper and Cowan, 2006; Ganiyu et al., 2013; Shirazi et al., 2018b; Shirazi et al., 2022; Ghiasi et al., 2023).

بعضی از کانسارهای اسکارنی پاسخ‌های ژئوفیزیکی شدیدی از خود نشان می‌دهند. تقریباً تمام اسکارن‌ها چگال‌تر از سنگ‌های اطراف خود بوده و بنابراین ممکن است بی‌هنجاری گرانی و یا ناپیوستگی لرزه‌ای ایجاد کنند. این مورد شاخص برخی اسکارن‌های بزرگ آهن محسوب می‌شود که شاید بیش از چند میلیارد تن مگنتیت داشته باشند. نفوذی‌های نسبتاً اکسیدان، معمولاً

در انجام این پژوهش، از فیلترهای پردازشی مانند سیگنال تحلیلی، ادامه فراسو و برگردان به قطب برای تعیین موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی موجود در محدوده در محیط نرم‌افزار Geosoft استفاده شد. پژوهش‌های قبلی بیانگر وضعیت بهتر بخش‌های شرقی و مرکزی این کانسار است (Afzal et al., 2010). از برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی برای تعیین موقعیت توده‌های نفوذی اکسیدان و تفکیک موقعیت آنها از توده‌های احیایی در عمق استفاده شد. هدف از این پژوهش، تحلیل نتایج حاصل از اکتشافات ژئوفیزیکی (مغناطیس‌سنجی زمینی) در محدوده کانسار آهن خسروآباد، با هدف ردیابی و شناسایی پهنه‌های کانسار احتمالی و نیز عمق نفوذ و جای‌گیری توده‌های نفوذی مگنتیتی نیمه‌عمیق و کانی‌سازی همراه در منطقه و معرفی مناطق مستعد و پتانسیل‌دار به همراه نقاط حفاری مناسب است.

بررسی‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی (هوابرد و زمینی) در محدوده شمال‌شرقی سنقر شامل: ۱) تهیه نقشه مغناطیس‌هوابردی ۱:۲۵۰۰۰۰ کرمانشاه توسط یوسفی و فریدبرگ (Yousefi and Friedberg, 1978) است که وجود بی‌هنجاری‌های نواری شکل باریکی با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی را با توده‌های مغناطیسی کم‌عمق مرتبط دانسته‌اند. این توده‌ها در بخش شمالی محدوده‌های هزارخانی بالا، تکیه بالا، خسروآباد و چرمه بالا واقع شده‌اند؛ ۲) طباطبایی و نصرت ماکویی (Tabatabaie and Nosrat, 1994) در گزارش نهایی بررسی‌های ژئوفیزیک بی‌هنجاری‌های آهن‌دار در منطقه خسروآباد، عمق ذخیره معدنی را تا ۴۰ و بیشینه ۸۰ متر برآورد کردند؛ ۳) سامانی (Samani, 2013) از مهندسین مشاور شرکت نگین کاوان نوید پارس، عملیات حفاری، مغناطیس‌سنجی و تخمین ذخیره کانسار آهن خسروآباد را انجام داد.



شکل ۱. موقعیت پهنه سنندج - سیرجان و زیرپهنه‌های آن بر اساس محجل و همکاران (Mohajjel et al., 2003)، منطقه خسروآباد با ستاره سیاه نشان داده شده است.

Fig. 1. The location of Sanandaj-Sirjan and its sub-zones, (based on Mohajjel et al., 2003), Khosrow Abad district shown as a black star.

زمین‌شناسی

پهنه سنندج - سیرجان بخشی از پهنه چین خوردگی - رورانندی زاگرس در ایران به شمار می‌آید و دربرگیرنده توده‌های آذرین درونی مرکب و چند فازی مرتبط با کمان ماگمایی مزوزوئیک است (Khalaji et al., 2007; Mahmoudi et al., 2011). این توده‌های آذرین در زمان فرورانده شدن پوسته اقیانوسی نئوتیس به زیر بلوک ایران مرکزی در جهت شمال‌شرقی و برخورد صفحه عربستان با ایران، در پهنه سنندج - سیرجان جای گیر شده‌اند (Berberian and King, 1981; Mohajjel and Fergusson, 2000; Mohajjel et al., 2003; Alavi, 2004; Ghasemi and Talbot, 2006).

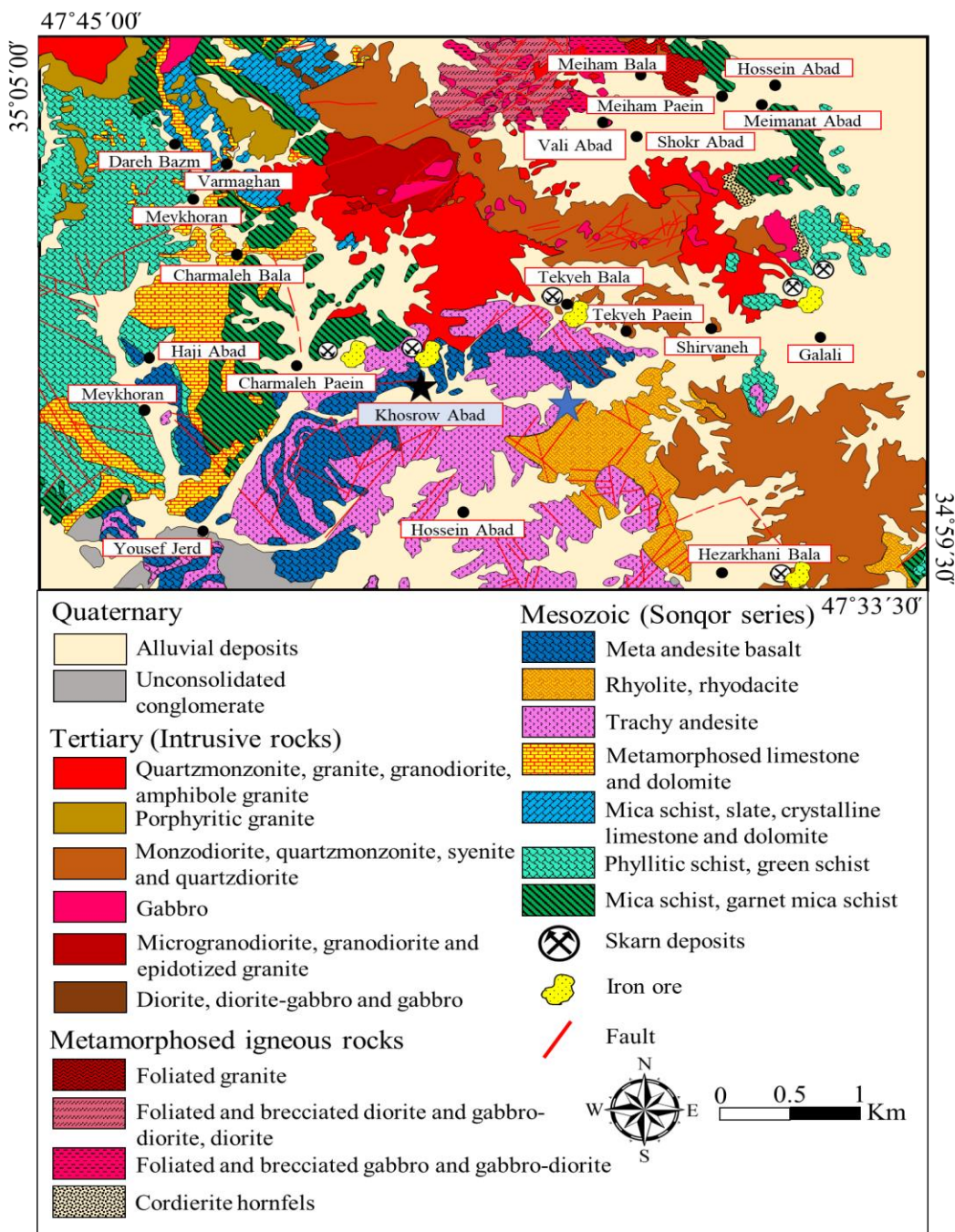
طبق پژوهش‌های انجام‌شده، با توجه به تقسیم‌بندی پهنه ساختاری سنندج - سیرجان (Mohajjel, 1997)، محدوده مورد بررسی در زیرپهنه با دگرشکلی‌های پیچیده جای دارد (شکل ۱). از ویژگی‌های این زیرپهنه، عملکرد شدید فرایندهای دگرگونی و زمین‌ساختی پیرو آن است که همراه با وقوع شکستگی‌های گسترده و راندگی‌های فراوان بوده و موجب بروز پیچیدگی‌های ساختاری در آن شده است (Alavi, 1994; Agard et al., 2011). مباحث مرتبط با ژئودینامیک و ماگماتیسیم بخش شمالی پهنه ساختاری سنندج - سیرجان و همچنین تشکیل سری آتشفشانی - رسوبی سنقر توسط ابراهیمی فرد و همکاران (Ebrahimi Fard et al., 2022a; Ebrahimi Fard et al., 2022b) بیان شده است.

توده‌های آذرین در سری آتشفشانی - رسوبی سنقر (تریاس - ژوراسیک) نفوذ کرده‌اند و در اثر واکنش سیال‌های گرمابی بالآمده با سنگ میزبان، کانسار اسکارن و کانه‌زایی کانسارهای آهن گلالی، خسروآباد، تکیه بالا، چرمه بالا و پایین و هزارخانی بالا رخ داده‌اند. کانه‌زایی اسکارنی نیز اصلی‌ترین شکل کانه‌زایی منطقه مجاور (منطقه باباعلی) و مگنتیت مهم‌ترین کانه در منطقه است.

منطقه خسروآباد در شمال‌غربی پهنه سنندج - سیرجان و

شمال‌شرقی شهرستان سنقر قرار دارد (Mohajjel, 1997). کانسار آهن خسروآباد در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شمال شهرستان کرمانشاه و ۴۰ کیلومتری شمال‌شرقی سنقر و در نزدیکی روستای خسروآباد قرار دارد. کانسار خسروآباد جزئی از سری آتشفشانی - رسوبی سنقر بوده که با روند شمال‌غربی و جنوب‌شرقی در جنوب ناحیه قروه قرار گرفته است (شکل ۲ و جدول ۱). سنگ‌های میزبان اصلی دربرگیرنده کانسار خسروآباد شامل واحد متاندزیت‌بازالتی (بخشی از مجموعه آتشفشانی - رسوبی سری سنقر) و به مقدار کمتر سنگ‌های کربناته است که طی نفوذ توده کوارتزموزنویتی، سیالات گرمایی آهن دار در محل برخورد واحد متاندزیت‌بازالتی با واحد کربناته تزریق‌شده و اسکارن خسروآباد را تشکیل داده است (شکل‌های ۳ و ۴). این واحدهای سبزرنگ اغلب به وسیله رسوبات عهد حاضر پوشیده شده است. در بخش غربی کانسار آهن خسروآباد و در محل مرز سنگ‌آهک با توده نفوذی کوارتزموزنویتی، هاله دگرگونی مجاورتی از نوع اسکارن کالک‌سیلیکات هورنفلس رخ داده و سنگ‌های کربناتی منطقه اغلب به اسکارن و مرمر دگرگون شده‌اند (شکل ۵).

بزرگ‌ترین رخنمون ماده معدنی در خسروآباد، در شمال‌غربی منطقه و مربوط به بخش (A) است (Motevalli, 2005; Ebrahimi Fard et al., 2022a). ماده معدنی در این بخش به صورت رخنمون‌های پرعیاری از لایه‌ها و عدسی‌های چین‌خورده و نامنظم کانسنگ مگنتیتی، درون واحد متاندزیت‌بازالتی مشاهده می‌شود. کانسنگ رخنمون‌یافته در این بخش، لایه‌ای و عدسی شکل است. پهنه معدنی در این بخش حدود ۵۰ متر طول، ۳۰ متر پهنا و در حدود ۰/۶ تا ۰/۵ متر ضخامت دارد (Motevalli, 2005). بخش عمده پهنه اسکارنی در محل مرز واحد متاندزیت‌بازالتی با سنگ‌آهک و در همبری توده نفوذی کوارتزموزنویتی اتفاق افتاده است (شکل ۵). پهنه‌های اسکارنی به صورت درون‌اسکارن و برون‌اسکارن در کانسار خسروآباد گسترش دارند.



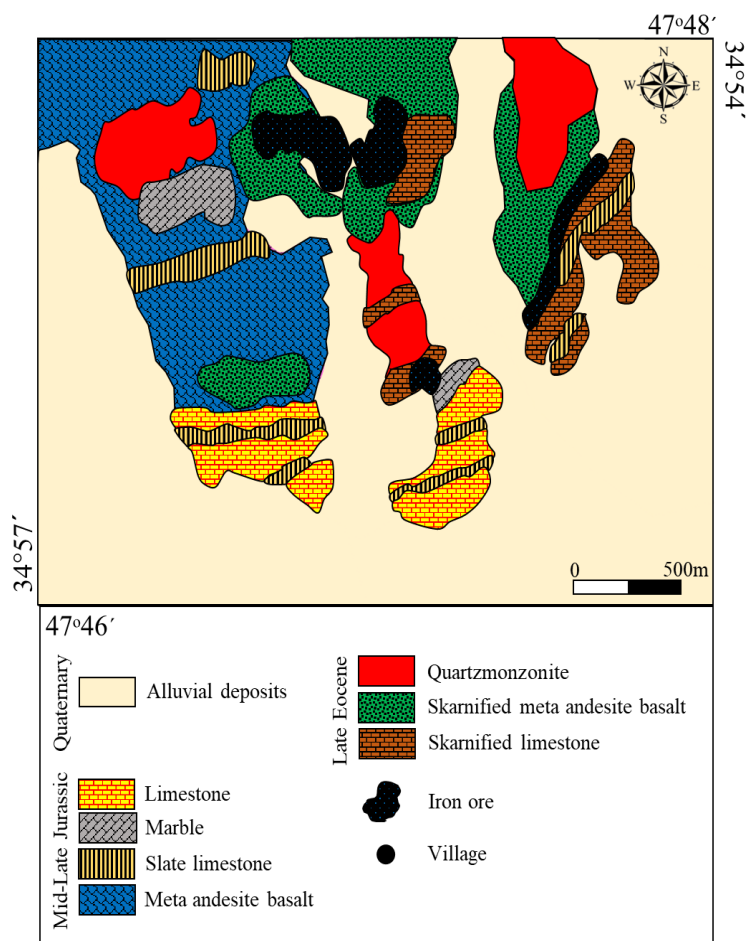
شکل ۲. نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی شمال شرقی سنقر و موقعیت منطقه خسروآباد بر روی آن (علامت ستاره مشکی) (اقتباس همراه با تغییرات از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سنقر (Eshraghi et al., 1996) و ۱:۱۰۰۰۰۰ قروه (Hosseini, 1999)). موقعیت تعدادی از کانسارهای آهن اسکارن واقع در مجموعه آتشفشانی-رسوبی سری سنقر نشان داده شده است.

Fig. 2. The simplified geological map of northeastern Sonqor and location of the Khosrow Abad district (black star), (modified after the 1:100000 geological map of Sonqor (Eshraghi et al., 1996) and 1:100000 map of Qorveh (Hosseini, 1999)). The location of some known skarn iron deposits located in the volcano-sedimentary complex of the Sonqor series is presented in the map.

جدول ۱. خلاصه‌ای از ویژگی‌های زمین‌شناسی محدوده معدنی خسروآباد

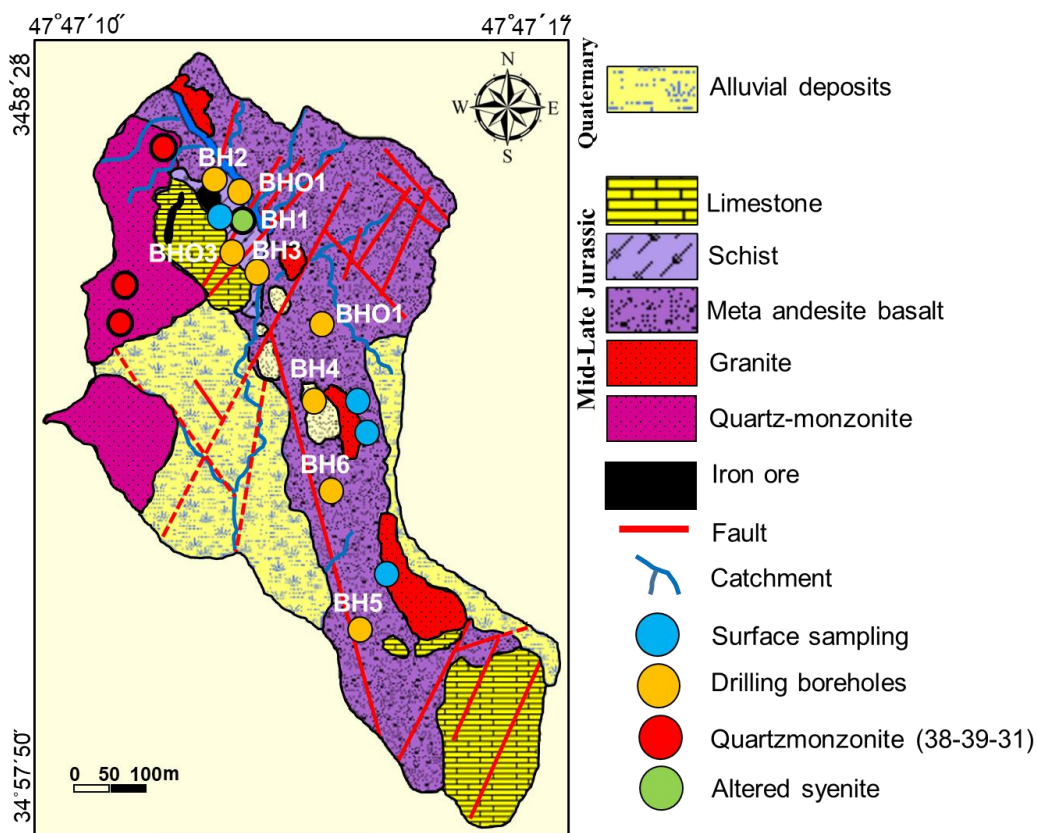
Table 1. A summary of the geological characteristics of the Khosrow Abad mining area

Lithology	Host rock	Mineralization	Mineral assemblage
Mata basaltic andesite, Skarnified meta basaltic andesite, Limestone, Skarnified limestone	Meta basaltic andesite (Footwall)	Magnetite + Hematite + Pyrite + Chalcopyrite + Malachite	Clinopyroxene + Garnet + Magnetite + Hematite + Pyrite + Chalcopyrite + Actinolite + Epidote + Chlorite + Albite
Ore skarn, Quartz monzonite body, Granite body, Syenite body	Limestone (Hanging wall)	Magnetite + Pyrite	Clinopyroxene + Talc + Serpentine + Actinolite + Dolomite



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده ۱:۵۰۰۰ منطقه معدنی خسروآباد (اقتباس همراه با تغییرات از متولی (Motevalli, 2005))

Fig. 3. Simplified 1:5000 geological map of the Khosrow Abad mining district (modified after Motevalli, 2005)



شکل ۴. موقعیت نمونه‌برداری‌های سطحی و گمانه‌های حفاری‌شده بر روی نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده ۱:۱۰۰۰ کانسار خسروآباد (با تغییرات از نریمانی (Narimani, 2017))

Fig. 4. Location of surface sampling and drilled boreholes on the 1:1000 simplified geological map of the Khosrow Abad deposit (with modifications from Narimani, 2017)

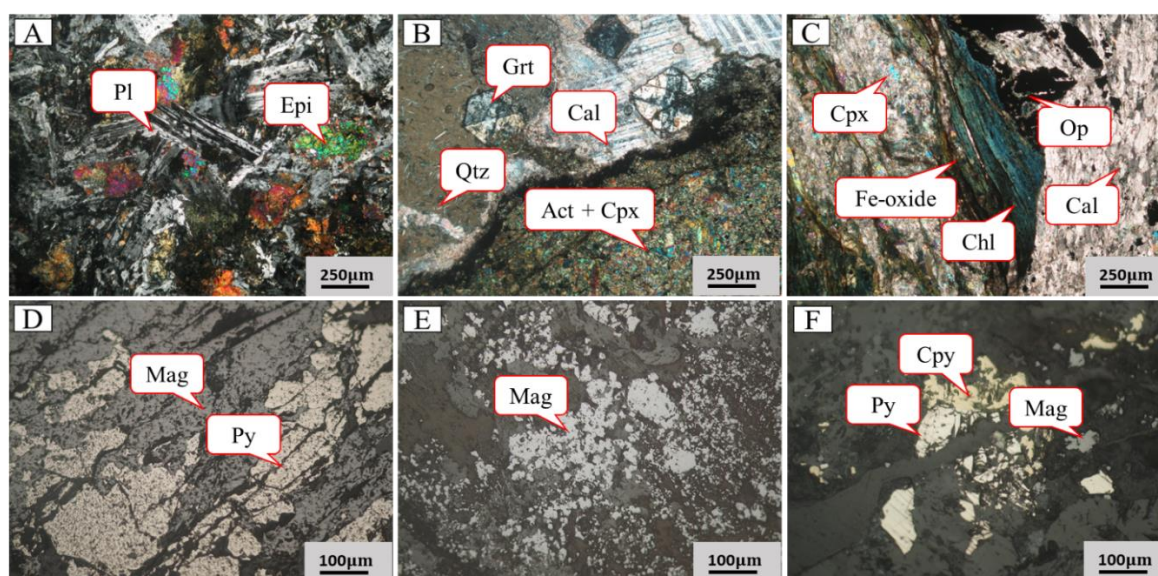


شکل ۵. پهنه معدنی کانسار خسروآباد در مرز بین واحد متاآندزیت‌بازالتی، واحد کربناتی و توده کوارتز مونزونیتی، دید به سمت شمال‌غربی

Fig. 5. Mineral zone of Khosrow Abad ore deposit bounded between basaltic meta-andesite, carbonate, and quartz monzonite intrusive body, (northwest view)

امتداد تقریباً N10W است که دارای شیب بیش از ۸۰ درجه به طرف شرق بوده و تمرکز کانی‌سازی آهن اغلب در یال شرقی این گسل صورت گرفته است. این گسل امتدادلغز یک پهنه بُرشی در واحد آتشفشانی دگرگون‌شده ایجاد کرده است که حاصل آن ایجاد درزه‌ها و شکستگی‌هایی با دو روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی و شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است و گسله‌های با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی در این پهنه بُرشی بیشتر هستند.

کانی‌های کالک‌سیلیکات شامل گارنت، کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز سدیک (آلبیت)، اکتینولیت، اپیدوت و کلریت (شکل ۶-A، B و C)، همراه با کانی‌های اکسیدی و سولفیدی شامل پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت و هماتیت (شکل ۶-D، E و F) کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده پهنه‌های اسکارنی در کانسار خسروآباد هستند. سامانه اصلی شکستگی در محدوده کانسار خسروآباد، یک گسله بزرگ امتدادلغز راست‌گرد با امتداد تقریباً شمالی- جنوبی (شمالی، شمال‌غربی- جنوبی، جنوب‌شرقی) با

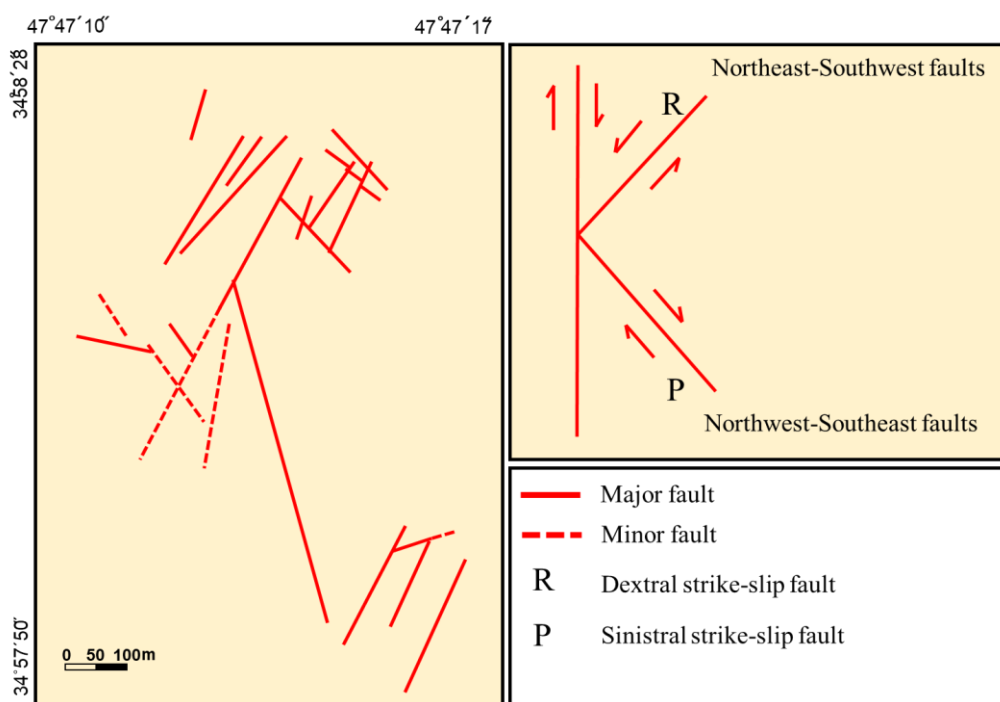


شکل ۶. تصویرهای میکروسکوپی از پهنه اسکارنی و کانه‌زایی کانسار آهن خسروآباد. A: کانی‌های اسکارنی اپیدوت و پلاژیوکلاز سدیک (آلبیت) (نور عبوری xpl); B: ادخال بلورهای خودشکل گارنت در کلسیت همراه با اکتینولیت و کلینوپیروکسن (دیوپسید) (نور عبوری xpl); C: کلریت حاصل از دگرسانی کانی‌های اسکارنی اولیه در امتداد شکستگی‌های سنگ میزبان متاآندزیت بازالت اسکارنی (نور عبوری xpl); D: درهم‌رشدی کانه‌های اکسیدی (مگنتیت) و سولفیدی (پیریت) زون اسکارنی (نور انعکاسی ppl); E: مگنتیت‌های توده‌ای پهنه اسکارنی (نور انعکاسی ppl); F: درهم‌رشدی کانه‌های اکسیدی (مگنتیت) و سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت) پهنه اسکارنی (نور انعکاسی ppl). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Mag: مگنتیت، Py: پیریت، Cpy: کالکوپیریت، Chl: کلریت، Epi: اپیدوت، Act: اکتینولیت، Ca: کلسیت، Grt: گارنت، Qtz: کوارتز، Cpx: کلینوپیروکسن، Op: کانی‌های کدر، Pl: پلاژیوکلاز).

Fig. 6. Microscopic images of the skarn and mineralization zone from the Khosrow Abad iron deposit. A: Skarn minerals, epidote, and sodic plagioclase (albite) (transmitted light xpl), B: Inclusion of Euhedral garnet in calcite associated with actinolite and clinopyroxene (diopside) (transmitted light xpl), C: Chlorite formed by alteration of primary skarn minerals developed in basalt meta-andesite host rock fractures (transmitted light xpl), D: Intergrowth of oxide (magnetite) and sulfide (pyrite) minerals in skarn zone (reflected light ppl), E: Massive magnetites of skarn zone (ppl reflected light), and F: Intergrowth of oxide (magnetite) and sulfide (pyrite, chalcopyrite) minerals of skarn zone (reflected light ppl). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Mag: magnetite, Py: pyrite, Cpy: chalcopyrite, Chl: chlorite, Epi: epidote, Act: actinolite, Ca: calcite, Grt: garnet, Qtz: Quartz, Cpx: clinopyroxene, Op: opaque minerals, Pl: plagioclase).

شمال‌شرقی - جنوب‌غربی تحت تأثیر قرار گرفته و بین ۱۰ تا ۳۰ متر جابه‌جا شده‌اند. بنابراین، گسله اصلی امتدادلغز تقریباً شمالی-جنوبی نقش اصلی را در زمین‌ساخت و تمرکز کانی‌سازی در منطقه داشته است. در سامانه گسله فرعی، گسله‌های شمال‌شرقی-جنوب‌غربی عملکرد شاخص‌تر و تراکم بیشتری دارند و به نظر می‌رسد که جوان‌ترین سامانه گسلی در منطقه بوده و تمرکز ثانویه کانی‌سازی آهن در پهنه بُرشی خسروآباد نیز در امتداد درزه‌ها و شکستگی‌های هم‌راستا با این گسل‌هاست.

گسله‌های با امتداد شمال‌شرقی - جنوب‌غربی در حقیقت، گسله‌های نوع (R) بوده و در نتیجه اغلب دارای جابه‌جایی امتدادلغز چپ‌گرد هستند که در نقشه زمین‌شناسی محدوده کانسار نیز این امر به وضوح دیده می‌شود و جابه‌جایی این گسله‌ها حتی در خود گسله اصلی نیز حدود ۱۰۰ متر جابه‌جایی ایجاد کرده است (شکل ۷). گسله‌های با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی اغلب دارای جابه‌جایی راست‌گرد بوده و گسله‌های نوع (P) در پهنه بُرشی را تشکیل می‌دهند (شکل ۷). این گسله‌ها تأثیر زیادی در زمین‌ساخت و کانی‌سازی منطقه نداشته و خود توسط گسله‌های



شکل ۷. نمایی از سامانه گسلی اصلی و فرعی منطقه خسروآباد، برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰ کانسار خسروآباد (با تغییرات از نریمانی (Narimani, 2017)).
Fig. 7. The major and minor fault systems of the Khosrow Abad district, based on the 1:1000 map of the Khosrow Abad (modified from Narimani, 2017)

شمال‌غربی - جنوب‌شرقی (هم‌راستا با گسله اصلی امتدادلغز و دارای نقش اصلی در زمین‌ساخت و تمرکز کانی‌سازی) و همچنین روند شمال‌شرقی - جنوب‌غربی (هم‌راستا با گسله فرعی با عملکرد شاخص‌تر و تراکم بیشتر) شناسایی شد و پروفیل‌های برداشت به

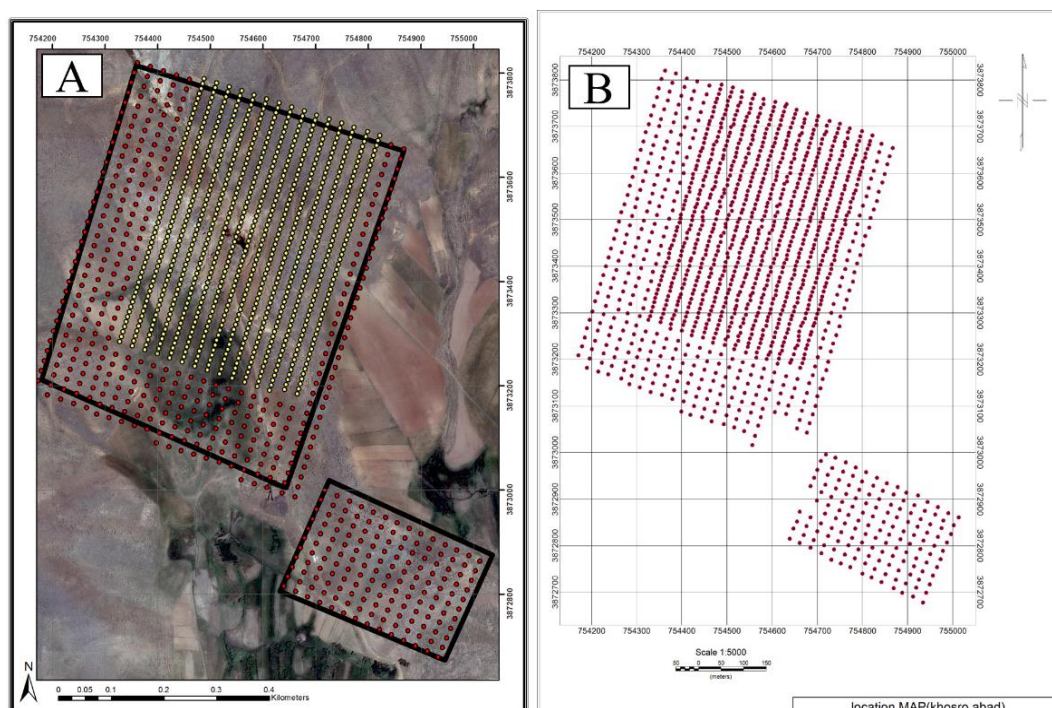
عملیات مغناطیس‌سنجی

روش مطالعه

با توجه به نقشه زمین‌شناسی، مشاهدات صحرائی، امتداد ساختارهای زمین‌شناسی و همچنین روند کانی‌سازی غالب، روند

ایستگاه انجام‌شد. برای ثبت داده‌های مغناطیسی از دستگاه مگنومتر پروتون مدل G856 ساخت شرکت ژئومتریکس آمریکا استفاده شد. بر اساس شکل ۸، کلیه برداشت‌های مغناطیسی بر روی واحدهای متاندزیت‌بازالتی و کوارتزموزنویتی انجام شد.

صورت شبکه منظمی، عمود بر امتداد ظاهری این ساختارها (رگه‌ها و گسل‌های احتمالی) و با امتداد شمال‌شرقی-جنوب‌غربی طراحی شدند (شکل ۸- A و B). در طراحی انجام‌شده، شبکه برداشت ۲۵*۱۰ متر (با فاصله پروفیلی و ایستگاهی به ترتیب ۲۵ و ۱۰ متر) و در مناطق اطراف با شبکه برداشت ۲۵*۲۰ متر در ۱۳۵۰



شکل ۸. A: نقشه موقعیت برداشت‌های ژئوفیزیکی در محدوده خسروآباد به همراه تصویر ماهواره‌ای و B: نقشه ایستگاه‌های قرائت‌شده در محدوده خسروآباد

Fig. 8. A: Location map of geophysical survey pattern in the Khosrow Abad district associated with satellite image, and B: Measuring points map in the Khosrow Abad district

روی داده‌ها، بر مبنای دارابودن یا نبودن مقادیر مغناطیس باقی‌مانده و امکانات نرم‌افزاری، صورت گرفت.

همچنین در این پژوهش برای دستیابی به مقادیر واقعی هر اندازه‌گیری، تأثیر کلیه عواملی که به ایجاد انحرافات از مقدار واقعی منجر می‌شدند، از مجموعه داده‌ها حذف شد. برای برداشت داده‌ها در شبکه پیش‌گفته از دو دستگاه مغناطیس‌سنج استفاده شد

بعد از برداشت اطلاعات، تصحیحات ضروری بر روی داده‌ها انجام شد و در نهایت نقشه شدت مغناطیس کل پیشنهادی تلفورد و همکاران (Telford et al., 1990) ترسیم شد. همچنین از فیلتر برگرداندن به قطب پیشنهادی بارانوف و ناد (Baranov and Naudy, 1964) به منظور قراردادن ناهنجاری‌ها بر روی منشأ ایجادکننده آنها استفاده شد. سپس تفسیرهای کیفی و کمی بر

بین‌المللی ژئومغناطیسی برای محاسبه تغییرات میدان مغناطیسی زمین و نیز تهیه یک تخمین قابل قبول در نزدیکی و بالای سطح زمین برای قسمت بزرگ مقیاس میدان مغناطیسی زمین که از درون سطح سرچشمه می‌گیرد، استفاده می‌شود. مؤلفه‌های میدان مغناطیسی منطقه مورد بررسی با استفاده از مختصات جغرافیایی نقطه‌ای از منطقه، از سامانه IGRF به دست آمده که در جدول ۲، نشان داده شده‌اند.

در این پژوهش، به منظور دستیابی به نتایج مطلوب با کمترین خطای ممکن، فیلترهایی بر روی داده‌های برداشت شده اعمال شد. برای بررسی دقیق‌تر نقشه‌های ژئوفیزیکی و تعبیر و تفسیر نتایج به دست آمده، اقدام به اعمال فیلترهای مختلف بر روی داده‌ها و ترسیم نقشه‌های به دست آمده در منطقه مورد بررسی شد. در بخش‌های بعدی به شرح مراحل انجام کار و بررسی نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود. بعد از آماده‌سازی داده‌ها و ایجاد فایل‌های لازم، نقشه‌های شدت میدان کل مغناطیسی و نقشه‌های پردازشی مختلف با شبکه‌بندی داده‌ها از طریق سلول‌های مناسب تهیه شدند.

که برای انجام تصحیحات روزانه داده‌های مغناطیسی از قرائت متوالی در زمان‌های متفاوت در یک نقطه انجام شد. در منطقه مورد بررسی به دلیل وسعت کم و همچنین ناچیز بودن اثر ارتفاع به دلیل نبود توپوگرافی از جنس سنگ‌های با ویژگی مغناطیس بالا از انجام تصحیحاتی، مانند تصحیحات طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع و همچنین تغییرات روزانه بر روی داده‌ها صرف نظر شد. پس از برداشت مغناطیسی منطقه مورد بررسی و تصحیحات لازم و با بازنگری‌های انجام شده، به منظور کنترل وضعیت آنومالی‌های موجود اضافه برداشت انجام شد. در نهایت برای ادامه مراحل پردازش از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj استفاده شد.

پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی در محدوده مورد بررسی

تخمین مؤلفه‌های ساختاری مدفون، هدف اصلی و مهم تفسیر داده‌های مغناطیسی است (Fedi et al., 2010). تفسیر کمی اطلاعات مغناطیسی برای تخمین مؤلفه‌های هندسی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و ساختارهای زمین‌شناسی، هدف مشترک بیشتر روش‌های پیشنهادی است (Selim, 2016). از روش میدان مرجع

جدول ۲. مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین در محدوده مورد بررسی

Table 2. Earth's magnetic field parameters in the study area.

Magnetic field element	The number of points collected	Field tilt angle (degrees)	Field deflection angle (degrees)	Average IGRF (gamma)
Value in range	1350	53.4	4.8	47515

مغناطیسی (به ویژه مگنتیت) است. البته به کارگیری این فیلتر، علاوه بر مشخص کردن ناهنجاری‌های مغناطیسی حاصل از تجمع کانی‌های مغناطیسی، می‌توان حضور پدیده‌های ساختمانی نظیر مرزها و گسل‌های احتمالی را نیز در محدوده مورد بررسی مشخص کرد. در شکل ۹-۱، شدت کل میدان مغناطیسی زمین

نقشه شدت میدان مغناطیسی کل

نقشه شدت کل میدان مغناطیسی، برداشتی کلی از داده‌های مغناطیسی فراهم می‌کند و برای تفسیرهای کلی استفاده می‌شود (Liu and Mackey, 1998). در محدوده مورد بررسی، میزان شدت میدان مغناطیسی زمین در ارتباط با حضور کانی‌های

برای محدوده نشان‌داده شده است.

نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMI) به همراه موقعیت ایستگاه‌های برداشت در **شکل ۹-A** آورده شده است. با توجه به **شکل ۹-A**، یک بی‌هنجاری با امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرقی و به صورت عدسی‌های منفصل و هم‌روند با گسل اصلی منطقه مشاهده می‌شود. بی‌هنجاری کوچک‌تری نیز به صورت متقاطع و با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی در محدوده مورد بررسی بارز شد. با در نظر گرفتن میزان شدت میدان مغناطیسی و همچنین شکل قرارگیری خطوط کنتور شدت میدان، این آنومالی ممکن است مربوط به حضور کانه‌زایی مگنتیت به صورت سطحی باشد. به بیان کلارک و همکاران (Clark, 1999)، برای یک کانسار با عیار و ضخامت زیاد، این نوسان در حدود ۵۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ نانوتسلا، برای یک کانسار با عیار و ضخامت متوسط در حدود ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نانوتسلا و برای یک کانسار با عیار و ضخامت ضعیف در حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نانوتسلا است. البته این مقادیر با افزایش عمق کاهش می‌یابد. بیشینه و کمینه شدت میدان مغناطیسی کل در این نقشه به ترتیب ۴۹۰۲۰/۱ نانوتسلا دارای روندهای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی- جنوب‌غربی و مرتبط با کانه‌زایی‌های رخداده در محل برخورد واحدهای متاآندزیت‌بازالتی و سنگ‌آهک متبلور و ۴۶۴۲۶/۱ نانوتسلا با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و مربوط به درزه و شکستگی‌های موجود در واحد متاآندزیت‌بازالتی میزبان است. این میزان تغییرات در منطقه خسروآباد نشان‌دهنده کانه‌زایی از نوع مگنتیت است. با توجه به گسترش بی‌هنجاری اصلی احتمال وجود گسل‌های متقاطع و تجمع کانی‌سازی در آنها وجود دارد. در نقشه شدت کل میدان مغناطیسی دقیقاً بر روی منبع ایجادکننده خود قرار نمی‌گیرد، بنابراین نقشه برگردان به قطب تهیه می‌شود. در نقشه TMI محل‌های کانی‌سازی نسبت به محل بی‌هنجاری‌ها کمی جابه‌جایی دارد که به دلیل میل و انحراف میدان مغناطیسی در منطقه است. بیشینه و کمینه شدت میدان مغناطیسی کل در نقشه تهیه‌شده توسط سامانی (Samani, 2013) در محدوده خسروآباد، به ترتیب

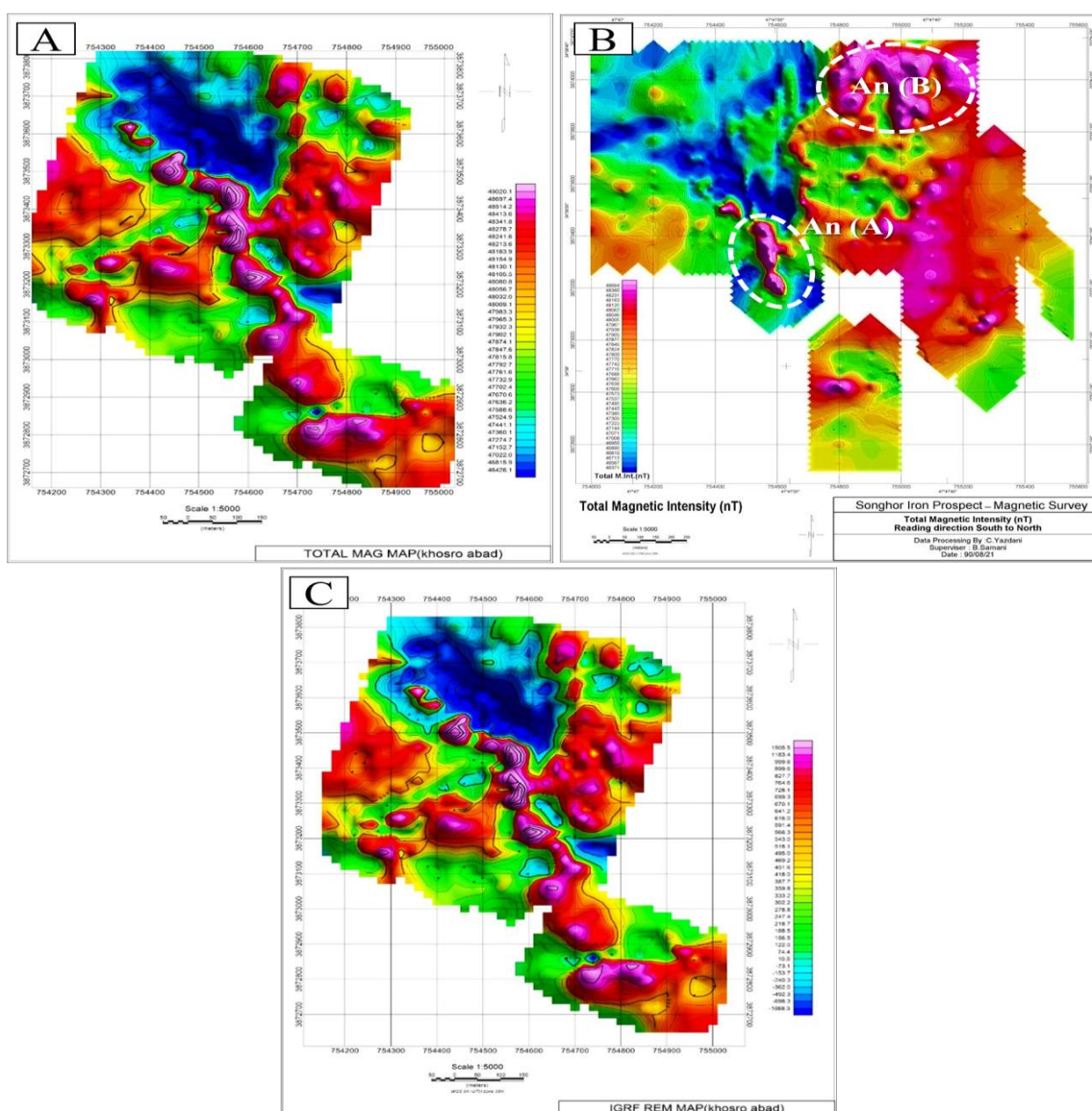
۴۸۶۹۴ نانوتسلا دارای روند شرقی- غربی برای بی‌هنجاری بزرگ‌تر (B) و شمالی- جنوبی برای بی‌هنجاری کوچک‌تر (A) احتمالاً مرتبط با کانه‌زایی‌های رخداد در واحدهای متاآندزیت‌بازالتی میزبان و ۴۶۳۷۱ نانوتسلا با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و مربوط به درزه و شکستگی‌های موجود در واحد متاآندزیت‌بازالتی میزبان کانه‌زایی است (**شکل ۹-B**). چنان‌که در **شکل ۹-C** نشان‌داده شده است، از نظر شکل کلی با نقشه شدت میدان مغناطیسی کل تفاوت چندانی وجود ندارد، فقط مقادیر آن تا حدود ۴۷۵۱۵ نانوتسلا کمتر است و بیشینه مقدار بی‌هنجاری‌ها این نقشه برابر ۴۵۳۴ نانوتسلاست.

نقشه برگردان به قطب

استفاده از انتقال به قطب برای دستیابی به محل واقعی بی‌هنجاری‌ها باید با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد بررسی صورت‌گیرد (Clark, 1999). تفسیر اصلی از مجموع داده‌های مغناطیسی روی داده‌های انتقال‌داده شده به قطب صورت می‌گیرد (Nakatsuka and Okuma, 2006). با استفاده از این عمل می‌توان میدان مغناطیسی را از یک میل مغناطیسی، جایی که میدان زمین شیب‌دار است، به میدان در قطب مغناطیسی انتقال داد. در این حالت بی‌هنجاری‌ها به طور عمودی در بالای منبع ایجادکننده خود قرار می‌گیرند (Arkani-Hamed and Urquhart, 1990). به کارگیری فیلتر برگردان به قطب، به فراهم‌آمدن شرایط مناسب برای شناسایی محل واقعی ناهنجاری‌ها در یک محدوده منجر می‌شود. نقشه برگردان به قطب محدوده مورد بررسی در **شکل ۱۰-A** آورده شده است. از آنجایی که اثر زاویه میل میدان در این نقشه برطرف شده است، بنابراین بخشی از بی‌هنجاری‌های منفی در محدوده مورد بررسی ممکن است مربوط به شیب‌دار بودن توده‌های مغناطیسی و یا ناشی از سطحی بودن توده‌های مغناطیسی باشد. به نظر می‌رسد بخش عمده آن ممکن است حاصل شکستگی‌های ساختاری (درزه، گسل و همبری زمین‌شناسی) باشد. این بی‌هنجاری منفی بر روی نقشه در مناطق شمالی کانسار

شمال‌غربی - جنوب شرقی و مربوط به گسلش و ایجاد درزه و شکستگی‌های موجود در واحد متانندزیت‌بازالتی میزبان کانه‌زایی) است که این تغییرات زیاد نشان‌دهنده وجود کانی‌سازی مگنتیتی در این محدود است.

خسروآباد قرار دارد. چنان‌که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار بی‌هنجاری حدود ۴۹۴۷۴/۶ نانوتسلا (دارای روندهای شمال‌غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی و مرتبط با کانه‌زایی‌های رخداد در محل برخورد واحدهای متانندزیت‌بازالتی و سنگ‌آهک متبلور) و کمترین مقدار آن ۴۶۶۶۱/۱ نانوتسلا (با روند



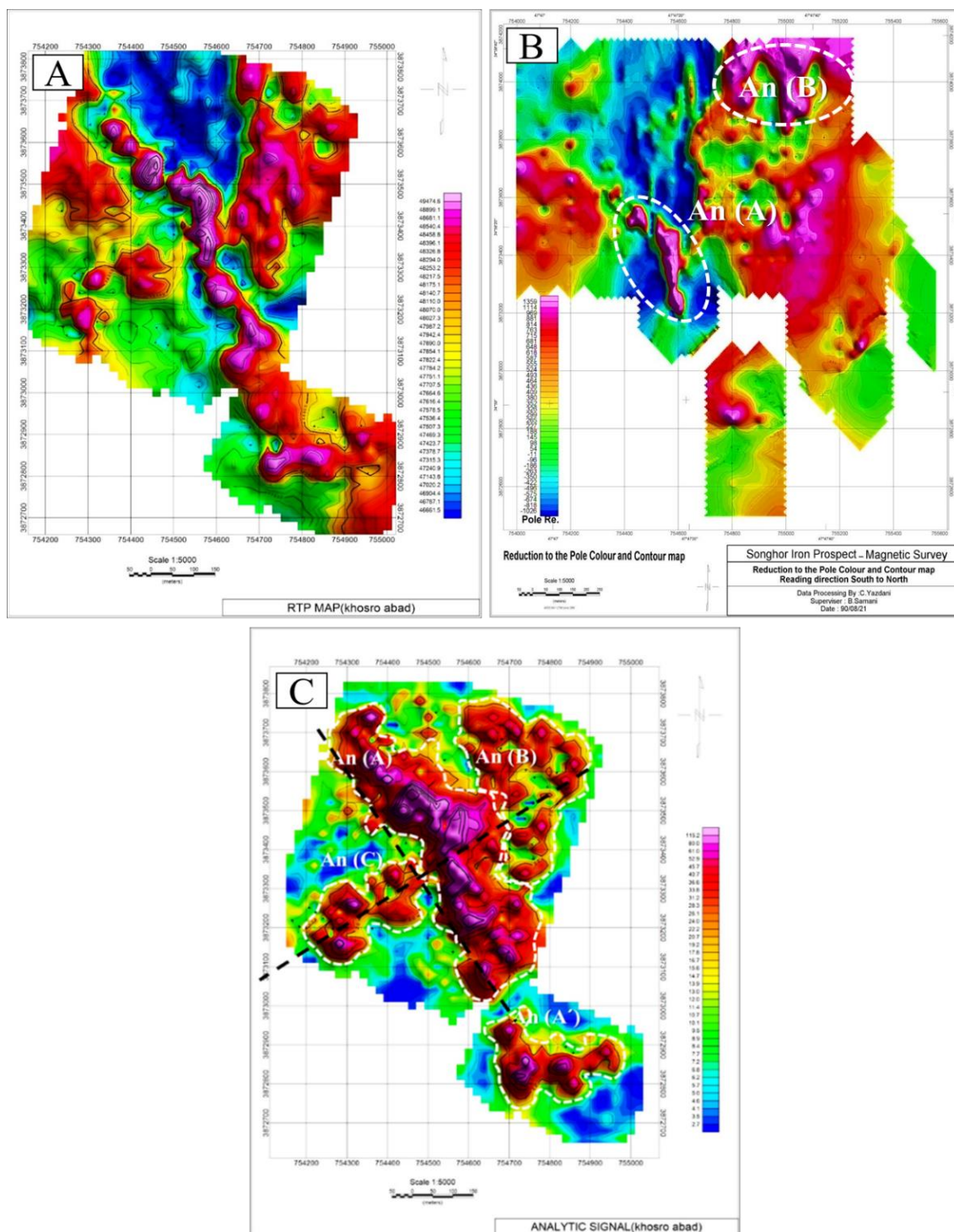
شکل ۹. A: نقشه میدان مغناطیسی کل تهیه‌شده از داده‌های محدوده خسروآباد، B: نقشه میدان مغناطیسی کل تهیه‌شده توسط سامانی (Samani, 2013) در محدوده خسروآباد و C: نقشه مغناطیس باقی‌مانده محدوده خسروآباد

Fig. 9. A: Total magnetic field map, B: Total magnetic field map prepared by Samani (2013) in the Khosrow Abad district, and C: IGRF-REM map of the Khosrow Abad deposit

نقشه سیگنال تحلیلی

نقشه سیگنال تحلیلی به عنوان فیلتری مهم در تحلیل داده‌های مغناطیسی محدوده معدنی خسروآباد، مورد استفاده قرار گرفت. به وسیله این فیلتر می‌توان مرز توده را تخمین زد؛ به طوری که لبه‌های توده بیشینه مقادیر سیگنال تحلیلی را نشان می‌دهند (Shirazi et al., 2021b; Alvandi et al., 2022; Abbass et al., 2023). در این فیلتر مرز منشأهای مغناطیسی بر نقاط بیشینه نقشه سیگنال تحلیلی منطبق است. هدف این روش، شناسایی عوارض سطحی و گسل‌هاست. تفاوت آن با مشتق قائم، عدم وجود ارقام منفی در سیگنال تحلیلی است. در این نقشه در صورت وجود سنگ‌های آذرین با ویژگی خودپذیری مغناطیسی بالا، بی‌هنجاری‌های کاذبی ایجاد می‌شوند که باید آنها را از بی‌هنجاری‌های واقعی تفکیک کرد. با تهیه نقشه سیگنال تحلیلی و تطابق حاشیه‌های بی‌هنجاری مغناطیسی با محدوده محیطی کانسار، گسترش طولی و عرضی آن روی سطح زمین با دقت بیشتر نشان داده می‌شود (MacLeod et al., 1993). نقشه سیگنال تحلیلی در منطقه خسروآباد، در شکل ۱۰-C نشان داده شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، بی‌هنجاری‌هایی که در نقشه شدت میدان مغناطیسی کل وجود داشتند، با کمی جابه‌جایی بر روی منشأ به وجود آورنده خود منتقل شده‌اند. به کمک این نقشه می‌توان تا حدودی به مرز بین ماده معدنی و باطله پی‌برد. در خصوص بی‌هنجاری بزرگی که در مرکز محدوده دیده می‌شود مرز بین کانه‌زایی و سنگ مادر مشخص شده است. مناطق دارای اهمیت با رنگ‌های قرمز نمایش داده شده‌اند. در این نقشه به خوبی روند پر قدرت کانه‌زایی در منطقه قابل مشاهده است. چنان‌که روی نقشه سیگنال تحلیلی مشاهده می‌شود، بی‌هنجاری (A) با شدت بسیار خوب، بی‌هنجاری (A') با شدت خوب، منطبق با محل برخورد واحدهای متاآندزیت‌بازالتی اسکارنی با سنگ آهک متبلور و بی‌هنجاری‌های (B) و (C) با شدت متوسط، منطبق با واحدهای متاآندزیت‌بازالتی کمتر اسکارنی شده قابل مشاهده است.

محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با خط چین سفیدرنگ نشان داده شده است. در شکل ۱۰-A، بی‌هنجاری‌های (A) و (A') و (B) بی‌هنجاری‌های شدت بالای این محدوده‌اند. محل این بی‌هنجاری‌ها بر روی منبع ایجادکننده بی‌هنجاری قرار دارد. بی‌هنجاری (C) با شدت متوسط تا نسبتاً ضعیف بر روی نقشه مشخص شده است. مقایسه نقشه برگردان به قطب (RTP) و نقشه شدت میدان مغناطیسی کل نشان‌دهنده جابه‌جایی کم بی‌هنجاری‌ها به سمت شمال و قرار گرفتن در محل واقعی خود است. بر اساس بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در نقشه RTP، نقاط حفاری در کمر پایین ماده معدنی واقع در واحد متاآندزیت‌بازالتی اسکارنی شده و بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده معدنی خسروآباد (شکل ۴) پیشنهاد می‌شود. در بیشتر موارد، محل برداشت‌های مغناطیسی با محل جای‌گیری توده نفوذی منطبق نیست و بنابراین منبع ایجادکننده بی‌هنجاری‌های مشاهده شده بدون تردید متاآندزیت‌بازالتی‌های حاوی کانی‌سازی مگنتیت هستند. برای تفسیر بهتر نتایج مغناطیس‌سنجی، نقشه زمین‌شناسی و کانی‌سازی بر نقشه RTP در محدوده خسروآباد منطبق شد. بر این اساس نتایج به این صورت بیان می‌شود: رخنمون‌های اصلی توده مگنتیتی در مرز بین واحدهای متاآندزیت‌بازالتی اسکارنی و واحد آهک متبلور قرار گرفته است (شکل‌های ۴ و ۱۰-A). همچنین، در نقشه برگردان به قطب تهیه شده توسط سامانی (Samani, 2013) در محدوده خسروآباد، بیشترین مقدار بی‌هنجاری حدود ۱۳۵۹ نانوتسلا (شامل بی‌هنجاری‌های (A) و (B) با روندهای شرقی-غربی و شمالی-جنوبی مرتبط با کانه‌زایی‌های رخداد در محل برخورد واحدهای متاآندزیت‌بازالتی و سنگ آهک متبلور) و کمترین مقدار آن ۱۰۲۶- نانوتسلا (دارای روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و مربوط به گسلش و ایجاد درزه و شکستگی‌های موجود در واحد متاآندزیت‌بازالتی میزبان کانه‌زایی) است که این تغییرات زیاد بیانگر وجود کانی‌سازی مگنتیتی در این محدود است (شکل ۱۰-B). محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نیز با خط چین سفیدرنگ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. A: نقشه برگردان به قطب محدوده خسروآباد، B: نقشه برگردان به قطب تهیه شده توسط سامانی (Samani, 2013) در محدوده خسروآباد و C: نقشه سیگنال تحلیلی در محدوده خسروآباد (خط چین ها مرز حدودی بی هنجاری است).

Fig. 10. A: RTP map, B: RTP map of prepared by Samani (2013) in the Khosrow Abad district, and C: Analytical signal map of the Khosrow Abad deposit (anomalies marked by dash lines)

فرعی نسبت‌داده می‌شود که معمولاً عمود بر گسل اصلی قرار می‌گیرند. در نقشه سیگنال تحلیلی (AAS) محل کانی‌سازی‌ها با محل بی‌هنجاری‌ها انطباق خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۰-۱). روند کانی‌سازی در انطباق با نقشه زمین‌شناسی، کنترل گسلی کانی‌سازی را می‌رساند (شکل‌های ۴ و ۱۰-۱). جابه‌جایی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و همچنین رخنمون‌های کانی‌سازی مگنتیت هر دو ممکن است در اثر عملکرد گسل‌های اصلی و فرعی منطقه باشد. با توجه به شکل ۱۰-۱، کانی‌سازی مگنتیت در امتداد گسل اصلی منطقه اتفاق افتاده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود، پیمایش‌های مغناطیسی بعدی با پروفیل‌های عمودی بر راستای گسل یادشده، خارج از پنجره مورد بررسی در این پژوهش نیز صورت گیرد.

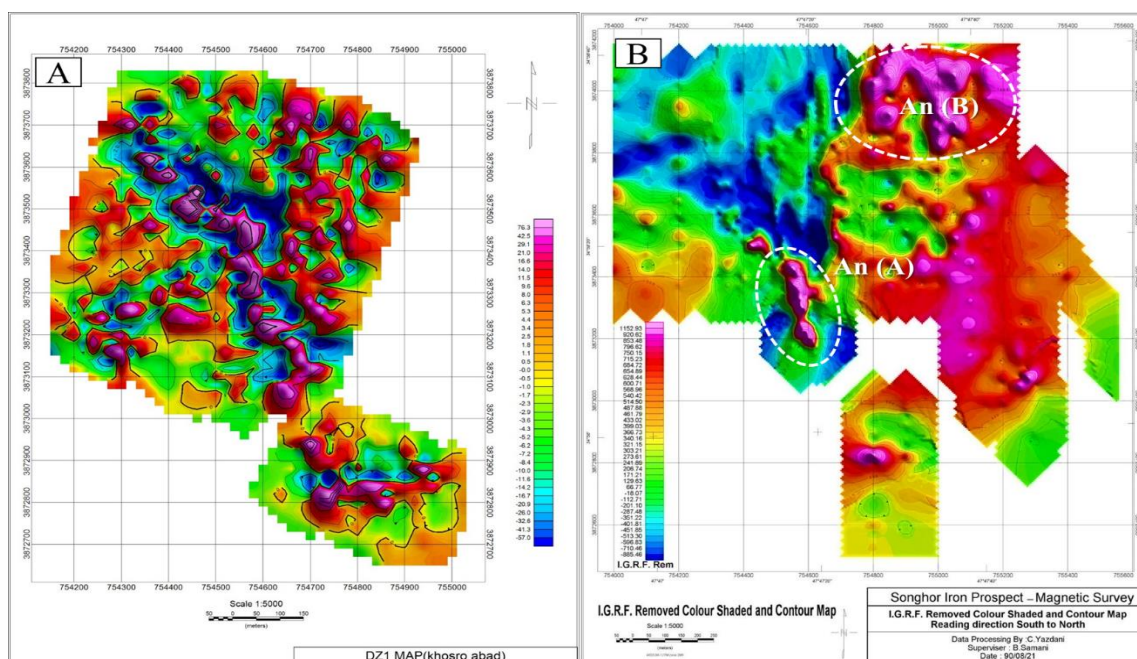
نقشه مشتقات قائم مرتبه اول میدان مغناطیسی

از فیلتر مشتق قائم مرتبه اول، برای تقویت بی‌هنجاری‌های سطحی نسبت به بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر در جهت قائم استفاده می‌شود. با اعمال این فیلتر بر روی نقشه برگرداندن به قطب، بی‌هنجاری‌های سطحی نمود بیشتری پیدا می‌کند که به وسیله آن می‌توان رفتار توده‌های مغناطیسی سطحی را به طور مؤثرتری مورد بررسی قرارداد (Tarlowski et al., 1997). فیلتر مشتق اول قائم، اثر بی‌هنجاری‌های عمیق با بسامد پایین را حذف می‌کند و تأثیر منابع کم‌عمق با بسامد بالا را نشان می‌دهد و در نتیجه اثرات ناحیه‌ای و تداخل بین بی‌هنجاری‌های مجاور از بین می‌رود (Cooper and Cowan, 2004). نقشه گرادین قائم، با فراهم کردن تصویری فیلترشده از میدان مغناطیسی، ویژگی‌های مغناطیس نزدیک سطح زمین را برجسته می‌سازد (Cooper and Cowan, 2004). بنابراین، برای تشخیص بی‌هنجاری‌های محلی نقشه مشتق قائم مرتبه اول تهیه‌شد (شکل ۱۱-۱). استفاده از این نقشه، نقش مؤثری در تشخیص پهنه‌های بی‌هنجاری نزدیک به سطح، روند گسل‌ها و شکستگی‌ها و همچنین بررسی پیوستگی کانی‌سازی آهن را در محدوده ایفا می‌کند. با توجه به پهنه‌های بی‌هنجاری قابل مشاهده

با این نقشه می‌توان تا حدودی به مرز ماده معدنی با سنگ‌های زمینه پی‌برد. در این نقشه که با هدف مشخص شدن حاشیه‌های بی‌هنجاری ایجادشده است، ابعاد محدوده بی‌هنجاری از شمال‌غربی به سمت جنوب‌شرقی، به ترتیب شامل بی‌هنجاری (A) حدود 700×200 متر، بی‌هنجاری (A') حدود 300×120 متر و از شمال‌غربی به سمت جنوب‌شرقی شامل بی‌هنجاری (B) حدود 400×200 متر و بی‌هنجاری (C) حدود 300×180 متر است (شکل ۱۰-۱). در محدوده بی‌هنجاری‌های (B) و (C)، با توجه به این که خود از بی‌هنجاری‌های با شدت کمتری تشکیل شده‌اند، ابعاد کل محدوده بی‌هنجار در نظر گرفته شده است. با مقایسه این نقشه و نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی (شکل ۴)، محل بی‌هنجاری‌های (A) و (A') در محل برخورد واحدهای متاآندزیت‌بازالتی و سنگ‌آهک متبلور، محل بی‌هنجاری (B) در واحد متاآندزیت‌بازالتی و محل بی‌هنجاری (C) به صورت عمقی در زیر واحدهای کواترنری قرار گرفته است. شکل‌های ۴ و ۱۰-۱، گسترش بی‌هنجاری‌های ناشی از کانی‌سازی مگنتیت را بیشتر از آنچه که رخنمون دارد، نشان می‌دهد. بی‌هنجاری (A) بر رخنمون مگنتیت در قسمت شمال‌غربی نقشه زمین‌شناسی منطبق است؛ اما گسترشی بیش از سه برابری آن در امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی مشاهده می‌شود. بی‌هنجاری (A') که کمی در جهت جنوب‌شرقی نسبت به بی‌هنجاری (A) جابه‌جایی دارد؛ ولی با آن هم امتداد است، در مرز بین واحدهای متاآندزیت‌بازالتی و سنگ‌آهک متبلور قرار دارد. با توجه به حضور کم‌رنگ توده نفوذی در محل بی‌هنجاری‌ها، انطباق این بی‌هنجاری‌ها بر رخنمون واحدهای متاآندزیت‌بازالتی اسکارنی و نیز هم‌امتداد بودن آن دو، به طور قطع منبع ایجادکننده هر دو بی‌هنجاری کانی‌سازی مگنتیت است. در یک امتداد قرار گرفتن بی‌هنجاری‌های (A) و (A') (امتداد غربی- جنوب‌شرقی)، نشان‌دهنده گسل است که با گسل اصلی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ تهیه‌شده توسط نریمانی (Narimani, 2017) هماهنگی کاملی دارد. جابجایی بی‌هنجاری (B) نسبت به بی‌هنجاری (A) در جهت شمال‌غربی به گسل‌های

محدوده بی‌هنجاری، در بی‌هنجاری جنوب‌شرقی کمتر از بی‌هنجاری‌های دیگر این محدوده است. با توجه به این نقشه، محدوده‌های بی‌هنجاری از بخش‌های کوچک‌تری تشکیل شده است و در داخل آنها، تغییراتی در مقدار خودپذیری مغناطیسی وجود دارد. خطوط استخراج‌شده از نقشه سیگنال تحلیلی مطابقت دارند. با انطباق این نقشه با نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی خسروآباد (شکل ۴)، می‌توان نتیجه گرفت که روند خطوط مغناطیسی اصلی محدوده (A و A') با محل برخورد بین واحدهای متاندزیت‌بازالتی و سنگ آهک متبلور منطبق هستند. همچنین، در نقشه مشتق قائم مرتبه اول تهیه‌شده توسط سامانی (Samani, 2013) در محدوده خسروآباد، به نظر می‌رسد که بی‌هنجاری‌های فرعی واقع در بخش شرقی و جنوب‌شرقی محدوده دارای شکل هموارتری هستند (شکل ۱۱-B).

در این نقشه (شکل ۱۱-A)، تعدادی خطواره مغناطیسی نیز قابل تشخیص است. به نظر می‌رسد عمده‌ترین خطواره‌ها در این محدوده در جهت شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و منطبق با واحد متاندزیت‌بازالتی میزبان است. چنان‌که در شکل ۱۱-A دیده می‌شود، بیشترین مقادیر تغییرات در این نقشه منطبق بر بی‌هنجاری‌های نقشه برگردان به قطب است. نقشه مشتق اول قائم برای بررسی پیوستگی کانی‌سازی‌ها ترسیم‌شده و در شکل ۱۱-A نشان داده شده است. با دور شدن از منشأ میدان‌های مغناطیسی، بی‌هنجاری‌ها کشیده‌تر و پهن‌تر می‌شوند؛ یعنی منشأهای سطحی، دارای ناهنجاری‌های تیز و منشأهای عمیق دارای بی‌هنجاری‌های نرم‌تری هستند. در مقایسه بی‌هنجاری واقع در محدوده خسروآباد، به نظر می‌رسد در این محدوده بی‌هنجاری‌های جنوب‌شرقی (بی‌هنجاری A') و جنوب‌غربی (بی‌هنجاری C) دارای شکل هموارتری هستند و گسترش بی‌هنجاری‌های مثبت و منفی داخل



شکل ۱۱. A: نقشه مشتق قائم مرتبه اول (تغییرات قائم) شدت میدان مغناطیسی محدوده خسروآباد و B: نقشه مشتق قائم مرتبه اول (تغییرات قائم) شدت میدان مغناطیسی تهیه‌شده توسط سامانی (Samani, 2013) در محدوده خسروآباد

Fig. 11. A: First-order vertical derivative map of magnetic field intensity of Khosrow Abad district, and B: First-order vertical derivative map (vertical changes) of magnetic field intensity prepared by Samani (2013) in the Khosrow Abad district

نقشه گسترش به بالا در محدوده (ادامه فراسو)

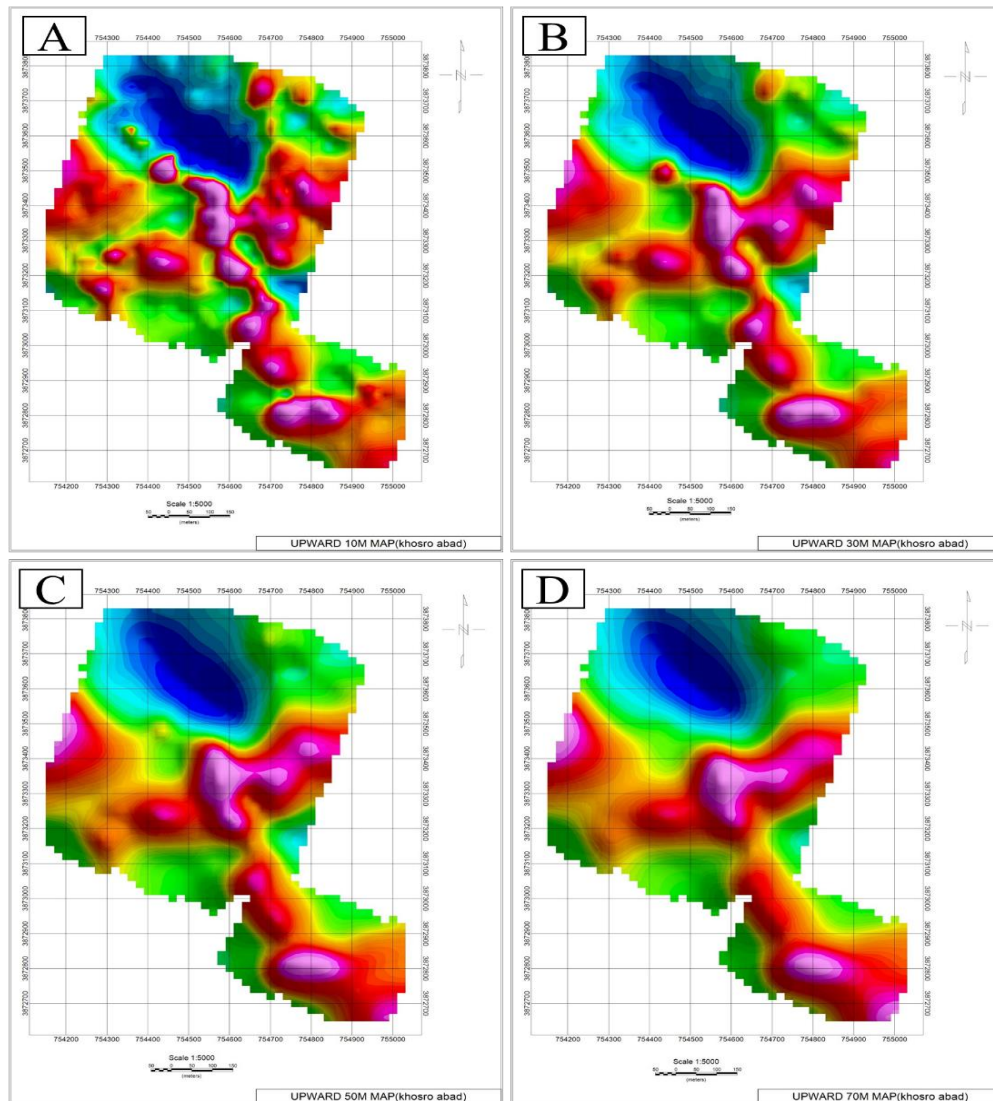
فیلتر فراسو برعکس فیلتر مشتق قائم اول عمل می‌کند؛ به طوری که بی‌هنجاری‌های مرتبط با منشأهای عمیق را تقویت و بی‌هنجاری‌های مرتبط با منشأهای سطحی را تضعیف کرده و اثر منابع محلی را کاهش می‌دهد (Robinson, 1988; Blakely, 1996; Kim et al., 2021; Motlagh et al., 2022; ElGalladi et al., 2022; El-Raouf et al., 2023). روش ادامه فراسو با حذف اثر بی‌هنجاری‌های سطحی دارای بسامد بالا، اثر بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر را بهتر نمایان می‌سازد (Ganiyu et al., 2013). به طور کلی، در محدوده مورد بررسی، از فیلتر ادامه فراسو به منظور واضح‌تر شدن گسترش عمقی بی‌هنجاری‌های موجود و همچنین وجود و یا عدم وجود ارتباط بین بی‌هنجاری‌ها استفاده شده است.

نقشه ادامه فراسو در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ متری برای محدوده خسروآباد تهیه شده است (شکل ۱۲- A، B، C و D). گسترش عمقی زیاد بی‌هنجاری اصلی، مهم‌ترین پدیده قابل تشخیص در نقشه‌های ادامه فراسو است. با مقایسه نقشه ادامه فراسوی ۱۰ متر و ۷۰ متر منطقه مشخص می‌شود که هرچند وسعت بی‌هنجاری در بخش شمال‌غربی (واقع در مرز واحدهای متآندزیت‌بازالتی و سنگ آهک متبلور) با افزایش عمق در حال کوچک‌تر شدن است؛ اما این بی‌هنجاری در بخش جنوب‌شرقی (واقع در واحدهای متآندزیت‌بازالتی) همچنان تداوم دارد (شکل ۱۲- A و D). در این بخش، تغییرات پسماند شدت کل میدان مغناطیسی و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در نقشه ادامه فراسوی ۷۰ متر به صورت واضح مشاهده می‌شود و در مقایسه با نقشه ادامه فراسوی ۱۰ متر، از گسترش و پراکنش آن در قسمت‌های شمال‌غربی کاهش یافته است. این نتایج بیانگر آن است که ماده معدنی با گسترش مناسب، دست‌کم تا عمق بیش از ۷۰ متری در واحدهای متآندزیت‌بازالتی اسکارنی ادامه می‌یابد (شکل ۱۲- A و D). نقشه‌های ادامه فراسو بر هم‌منشأ بودن منبع بی‌هنجاری‌های (A) و (A') دلالت دارند.

همچنین، نقشه ادامه فراسو در ارتفاع‌های ۲۰، ۵۰ و ۷۰ متری برای

تخمین عمق

تعیین محل، عمق و شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی یکی از اهداف مهم تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی است. برای تعیین مرزها و عمق بی‌هنجاری، روش‌هایی بر پایه مشتقات میدان به کار گرفته شد (Sahoo et al., 2021; Shaole et al., 2021; Zhao et al., 2023). ابتدا پترز (Peters, 1949) مسئله تخمین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را مطرح کرد. روش‌های موفق قدیمی بر پایه واهم آمیخت تدوین شده بودند. ورنر رابطه ساده‌شده‌ای را برای تعیین عمق یک دو بعدی نازک به شکل خطی نسبت به مؤلفه‌های دایک ا ارائه کرد (Hartman et al., 1971). روش ورنر برای تحلیل ناپوستگی‌های مغناطیسی با استفاده از مشتقات قائم و افقی شدت میدان مغناطیسی کل بسط داده شد. تامپسون (Thompson, 1982)، روشی را بر مبنای معادله همگن اوپلر بنا نهاد که پژوهشگرانی مانند فیتز جرالده و همکاران (Fitz Gerald et al., 2004) آن را تکمیل کردند. از روش‌های خودکار مانند طیف توانی، واهم آمیخت اوپلر و واهم آمیخت ورنر برای تفسیر سریع و تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها استفاده می‌شود (Thompson, 1982; Nabighian, 1972). در این پژوهش برای تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها، روش واهم آمیخت اوپلر به کار گرفته شده است. از آنجایی که تخمین عمق اوپلر بر اساس مشتقات اول (جهتی و قائم) صورت می‌گیرد، در تمام جاهایی که مشتقات تغییراتی دارند، تخمین عمق انجام می‌شود که امکان دارد مربوط به بی‌هنجاری‌ها نباشد، بنابراین در این بررسی‌ها از روش تلفیقی اوپلر - پاور اسپکتروم استفاده شده است.



شکل ۱۲. نقشه‌های ادامه فراسوی تهیه شده در محدوده خسروآباد. A: نقشه ادامه فراسو ۱۰ متر، B: نقشه ادامه فراسو ۳۰ متر، C: نقشه ادامه فراسو ۵۰ متر و D: نقشه ادامه فراسو ۷۰ متر

Fig. 12. Upward continuation maps prepared in the Khosrow Abad district. A: 10-meter, B: 30-meter, C: 50-meter, and D: 70-meter upward continuation maps

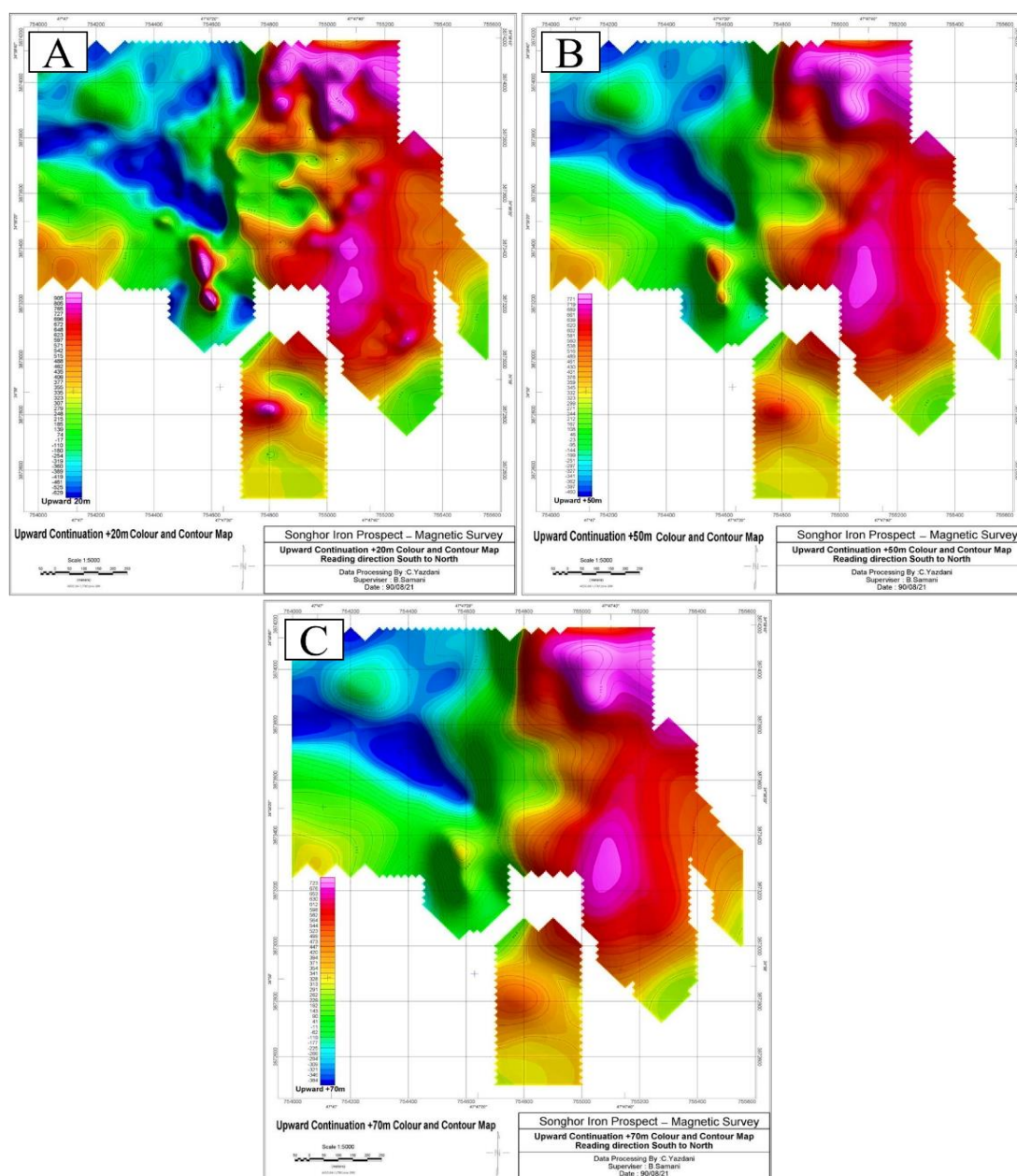
می‌شود و معادله اوپلر با احتساب خطای عمق مجاز و شاخص ساختاری در نظر گرفته شده برای آن حل می‌شود (جدول ۳). در این روش، به کمک مؤلفه‌های مختلف نتایج نهایی فیلتر شده و تنها پاسخ‌های مناسب برای نمایش انتخاب می‌شوند. روش واهم‌آمیخت اوپلر بر اساس مشتقات میدان مغناطیسی است که

روش واهم‌آمیخت اوپلر

برای تخمین عمق کمینه تا متوسط توده‌های دارای ویژگی مغناطیسی زیرسطحی نقشه تخمین عمق اوپلر تهیه شده است. در روش اوپلر استاندارد، یک پنجره متحرک با ابعاد مشخص (یک مقدار صحیح ضرب در اندازه سلول گرید ورودی) در نظر گرفته

بی‌هنجاری) قرار گیرد. اگر دوقطبی به طور کامل در آن قرار نگیرد یا چندین ناهنجاری در آن جای بگیرند، آنگاه نتایج این روش با خطا همراه خواهد بود.

نسبت به نویز حساسیت بسیاری دارد. این امر سبب می‌شود که این تخمین تنها برای داده‌هایی با نویز بسیار اندک کارآمد باشد. به علاوه، در پنجره اوپلر تنها باید یک دوقطبی مغناطیسی (یک



شکل ۱۳. نقشه‌های ادامه فراسوی تهیه‌شده در محدوده خسروآباد. A: نقشه ادامه فراسو ۲۰ متر، B: نقشه ادامه فراسو ۵۰ متر و C: نقشه ادامه فراسو ۷۰ متر تهیه‌شده توسط سامانی (Samani, 2013)

Fig. 13. Upward continuation maps prepared in the Khosrow Abad district. A: 20-meter, B: 50-meter, and C: 70-meter andp, continuation maps of prepared by Samani (2013)

جدول ۳. مقدار شاخص ساختاری (SI) تخمین عمق اویلر

Table 3. Structural index (SI) value of Euler's depth estimation

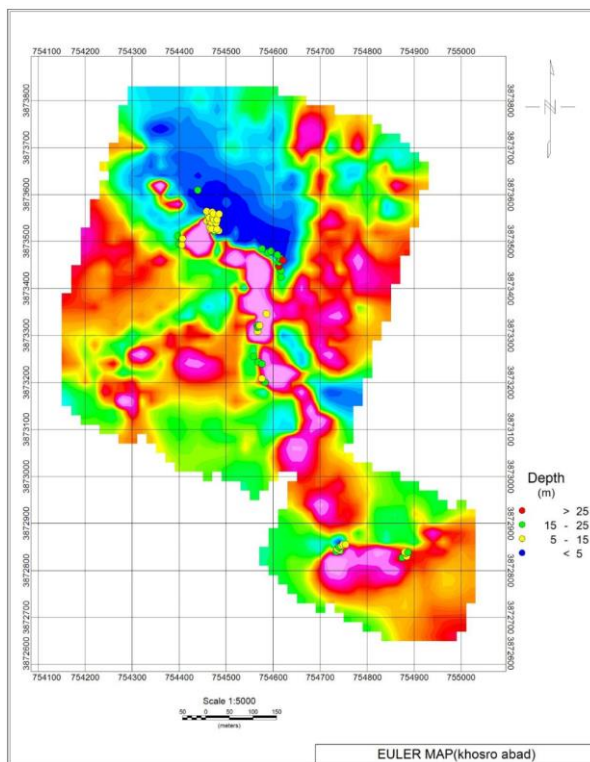
The shape of the magnetic source	Structural index
sphere	3
vertical cylinder (pipe)	2 – 2.25
Horizontal cylinder	2 – 2.75
Faulting of a thin layer	2
The edge of a thin layer (flood, dike, etc.)	1 – 1.3
fault/Contact	0

روش طیف انرژی بی‌هنجاری‌ها بر حسب بسامد یا طول موج ترسیم می‌شود و شیب قسمت‌های مختلف این طیف انرژی قابل تبدیل به عمق تقریبی است. چون طیف انرژی در حیطه بسامد است، در نتیجه بدون موقعیت مکانی است و در نتیجه تخمین عمق توده‌ها به طور کلی جدا از منطقه انجام می‌شود. بنابراین، مشخص نیست که این عمق به طور دقیق در چه مکانی واقع می‌شود؛ اما با ترکیب روش‌های مختلف پردازش و تفسیر می‌توان اطلاعات به دست آمده را در هم آمیخت و تا حدودی حدس زد که عمق تقریبی مربوط به کدام توده است. به عنوان مثال با ترکیب روش اویلر و این روش می‌توان تا حدودی محل و عمق توده‌ها را تخمین زد. بر مبنای روش اسپکتور و گرانت (Spector and Grant, 1970)، تخمین عمق داده‌های خسروآباد دارای عمق زیاد و در حدود ۰/۰۳ کیلومتر است که برآوردی صحیح است (شکل ۱۵-B). بنابراین با توجه به شکل ۱۵-B، کمینه عمق بی‌هنجاری‌ها در بیشتر مناطق معادل ۳۰ متر است. به هر حال باید توجه داشت که این روش‌ها همگی ریاضی هستند و کاربرد آنها و اعداد و ارقام به دست آمده همگی دارای تقریب هستند. در واقع تفسیر کمی داده‌های مغناطیسی بسیار پیچیده و مشکل است و نباید تصور کرد که ارقام و اعداد صد درصد عملیاتی و قابل استناد هستند؛ اما با بررسی مقاله‌های مختلف می‌توان دریافت که امکان کاربرد آنها به طور نسبی قابل قبول است و می‌تواند دید خوبی برای تعیین موقعیت محل حفاری‌های اکتشافی بدهد (شکل ۱۵-A و B).

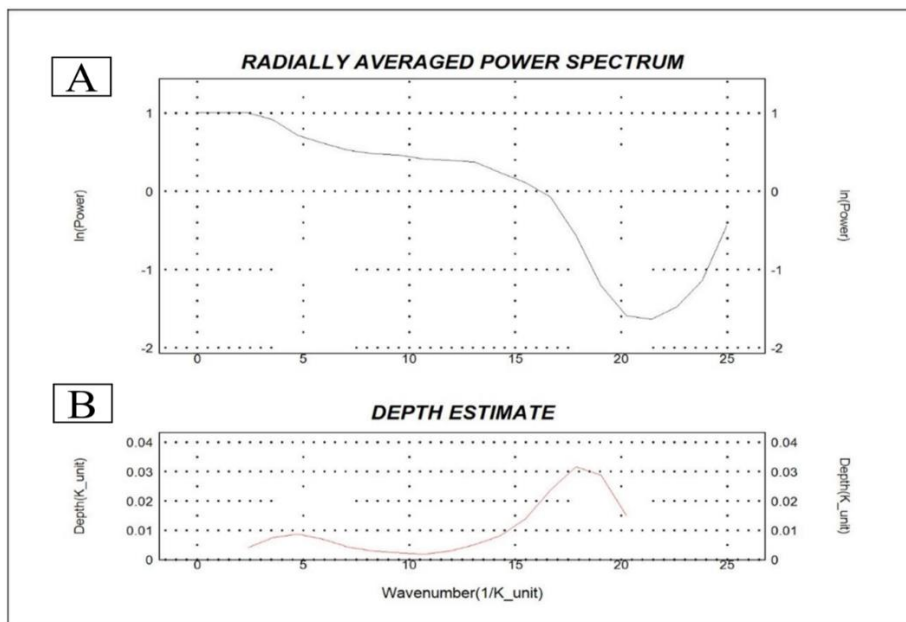
در این پژوهش برای تخمین عمق سعی شده است با فیلتر کردن نتایج اویلر، نتایج دارای خطا تا حد امکان از نتایج نهایی حذف شوند. این امر به آن معناست که برای تخمین عمق‌های مناسب، باید از چندین اندازه مختلف پنجره اویلر استفاده کرد (Reid et al., 1990; Reid et al., 2014). همان‌طور که مشاهده می‌شود نقاط آبی سطح توده را در اعماق کمتر از ۵ متر نشان داده است که به تدریج به سمت نقاط قرمز رنگ در عمق بیشتر از ۲۵ متری ختم می‌شود (شکل ۱۴). با ترسیم نقشه تخمین عمق اویلر، عمق مناسب برای مدل مصنوعی دایکی شکل بیشتر از ۲۵ متر به دست آمد (شکل ۱۴). نقشه تخمین با شاخص ساختاری ۱/۳ و اندازه پنجره ۲۵*۲۵ متر تهیه شد. بیشترین جواب‌های به دست آمده از تخمین عمق اویلر استاندارد، عمق‌های بین ۵ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۲۵ متر را نشان می‌دهد که با عمق مدل مصنوعی دایکی شکل سازگار است.

تحلیل طیف توان

روش تخمین عمق با استفاده از تحلیل طیف توان یکی از روش‌های خودکار تخمین عمق است که با در نظر گرفتن توزیع آماری منشأهای ایجاد بی‌هنجاری به تخمین عمق می‌پردازد. نخستین تحلیل طیف توان برای تخمین عمق ناهنجاری‌های میدان پتانسیل توسط اسپکتور و گرانت (Spector and Grant, 1970) انجام شد و بعدها توسط پژوهشگران دیگر توسعه داده شد. در این



شکل ۱۴. نقشه رنگی نقاط واهم‌آمیخت اوپلر با مقیاس رنگی عمق تخمینی مشخص برای محدوده خسروآباد
Fig. 14. Euler's deconvolution colored map, colored scale showing the estimated depth

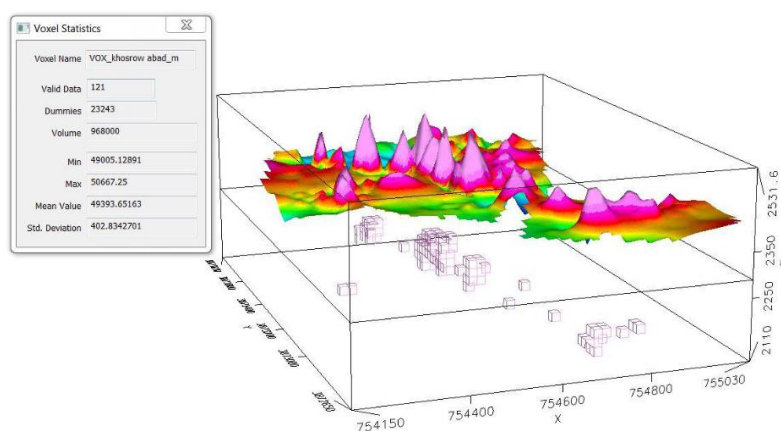


شکل ۱۵. A و B: نمودار مربوط به داده‌های طیف انرژی محدوده خسروآباد
Fig. 15. A and B: Radially powered spectrum data in the Khosrow Abad deposit

مدل‌سازی وارون سه‌بعدی داده‌ها

روند بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشاهده‌شده بر روی سطح را می‌توان با استفاده از داده‌ها، مدل‌سازی کرد. طبق لی و الدنبرگ (Li and Oldenburg, 1996)، به طور کلی مدل‌های زیادی می‌توانند داده‌ها را بازتولید کنند؛ در حالی که برخی از این مدل‌ها برای اهداف خاص منطقی نیستند. هدف از وارون‌سازی، بازتولید داده‌های صحیح است. داده صحیح یعنی داده‌ای که با دقت اندازه‌گیری شون (Lelièvre, 2003). در این پژوهش، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی خودپذیری مغناطیسی به کمک نرم‌افزارهای voxel geosoft و Encom انجام شد. در این پژوهش برای انجام بررسی کمی (عمق و حجم) از مدل‌سازی به روش وارون‌سازی سه‌بعدی استفاده شده است. به دلیل اینکه کاربر کمترین دخالت در فرایند وارون‌سازی را دارد، پاسخ به دست آمده پایداری زیادی

دارد. از مکعب خودپذیری مغناطیسی حاصل از مدل‌سازی با توجه به مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده خودپذیری مغناطیسی سطوح، می‌توان فضای زیرسطحی هم‌مقدار را استخراج کرد که این سطوح در فضای زیرسطحی زمین دارای شکل هندسی سه‌بعدی است. به همین دلیل عمق و حجم آن قابل محاسبه است و در آن حجم اندازه‌گیری شده بیانگر حجم ماده معدنی است. جرم و حجم مدل‌سازی شده در بسته نرم‌افزاری Encom Quickmag به صورت سه‌بعدی محاسبه و نمایش داده می‌شود. چنان‌که در نقشه تفسیری شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، آنومالی خطی هم‌راستا با گسل‌های منطقه و به صورت موازی یکدیگر با عمق متوسط قرار دارند. گسل‌ها یا خطوط مرزی سامانه، کانی‌سازی را در این محدوده کنترل کرده‌اند. تفسیر ژئوفیزیکی این منطقه در نقشه شکل ۱۷ خلاصه شده است.



شکل ۱۶. نمایش سه‌بعدی از توزیع خودپذیری مغناطیسی با مقدار آستانه در محدوده خسروآباد

Fig. 16. Initial 3D model view of the magnetic susceptibility, in the Khosrow Abad district

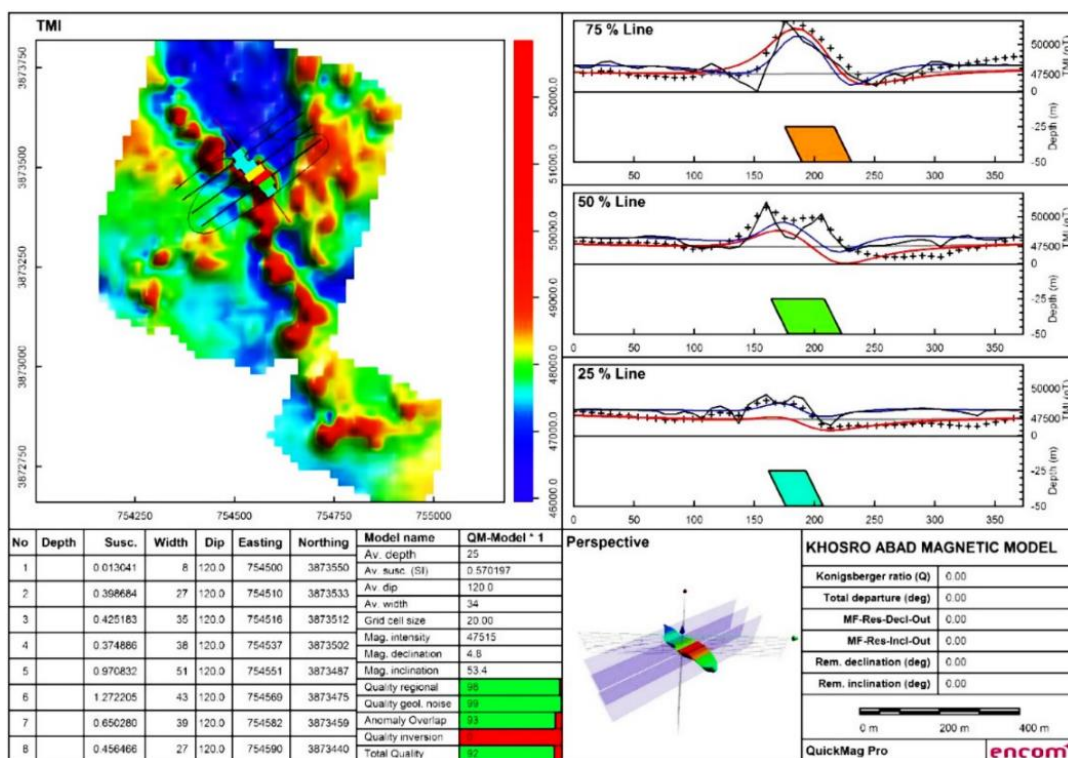
مختصات نقاط حفاری پیشنهادی در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین موقعیت نقاط حفاری پیشنهادی در شکل ۱۸-A و B و اعتبارسنجی گمانه‌ها در شکل ۱۹ نشان داده شده است. به عنوان مثال، گمانه BH-1 در بی‌هنجاری بلوک An(A) واقع شده است و طبق بررسی‌های انجام‌شده، این بی‌هنجاری به عنوان بی‌هنجاری

اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی توسط گمانه‌ها

در مدل‌سازی انجام‌شده، توده‌هایی با ویژگی مغناطیسی بالا شناسایی شدند. بر اساس نتایج تفسیر کلاسیک (نقشه سیگنال تحلیلی، نقشه برگردان به قطب و ادامه فراسو) و همچنین نتایج مدل‌سازی تعدادی نقطه برای انجام عملیات حفاری پیشنهاد شد.

بیانگر موفق‌بودن روند بررسی‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسار آهن در منطقه است.

با شدت خوب معرفی شده و طبق نقشه ادامه فراسو عمق بیش از ۳۰ متر برای این بی‌هنجاری در نظر گرفته شده است. این پیش‌بینی انطباق خوبی را با اطلاعات حفاری انجام‌شده، نشان می‌دهد که



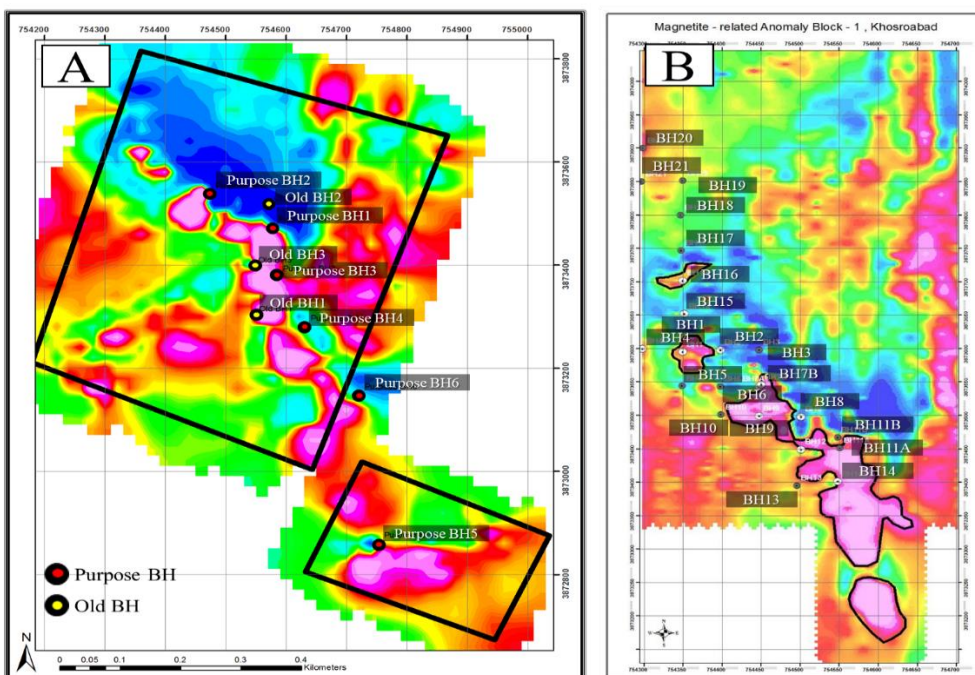
شکل ۱۷. مدل تهیه‌شده با نرم‌افزار Encom Quickmag در محدوده خسروآباد

Fig. 17. Output model prepared by Encom Quickmag software in the Khosrow Abad district

جدول ۴. مختصات گمانه‌های پیشنهادی در محدوده خسروآباد

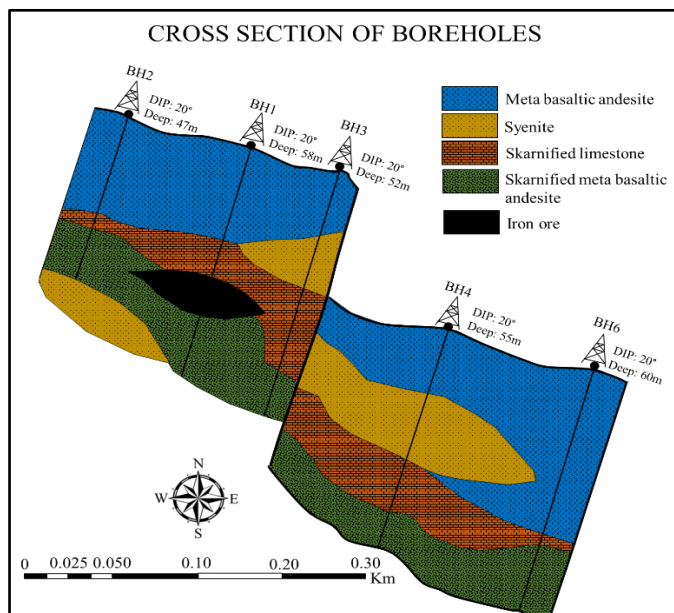
Table 4. Proposed boreholes coordinate in the Khosrow Abad deposit

Boreholes number	X	Y	Dip (degrees)	depth (m)	azimuth (m)
BH1	754578	3873471	20	50	220
BH2	754473	3873536	20	50	220
BH3	754585	3873380	20	50	220
BH4	754631	3873279	20	50	220
BH5	754753	3872858	20	50	220
BH6	754721	3873146	20	50	220



شکل ۱۸. A: موقعیت گمانه‌های پیشنهادی بر روی نقشه میدان مغناطیسی کل و B: محل گمانه‌های حفاری پیشنهادی توسط سامانی (Samani, 2013) در محدوده خسروآباد

Fig. 18. A: Proposed borehole's location on the total magnetic field map, and B: Proposed borehole's location by Samani (2013) in the Khosrow Abad district



شکل ۱۹. اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی به کمک اطلاعات گمانه‌های حفاری شده در محدوده خسروآباد

Fig. 19. Validation of magnetometric geophysical modeling results with actual data of drilled boreholes in the Khosrow Abad district

نتیجه‌گیری

- محدوده موردنظر پتانسیل خوبی برای کانی‌سازی آهن دارد. با توجه به شدت بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده‌شده و خودپذیری مغناطیسی به دست آمده برای مدل‌ها، به صورت کلی، می‌توان گفت که احتمال کانی‌سازی آهن به خصوص توده مگنتیتی در این محدوده بسیار بالاست.

- در این محدوده در مجموع، ۱۳۰۵ ایستگاه مورد بررسی‌های مغناطیس‌سنجی قرار گرفته است و با بررسی نقشه شدت میدان کل تهیه‌شده از داده‌های تصحیح‌شده از محدوده، چند بی‌هنجاری مغناطیسی در راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و به صورت عدسی‌های منفصل از یکدیگر و در راستای گسل اصلی منطقه قابل مشاهده است. بیشترین شدت میدان ثبت‌شده در این محدوده ۵۲۰۴۹ نانوتسلا (روندهای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی - جنوب‌غربی و مرتبط با کانه‌زایی‌های رخداد در محل برخورد واحدهای متاآندزیت‌بازالتی و سنگ‌آهک متبلور) و کمترین شدت میدان ثبت‌شده ۴۳۶۱۹ نانوتسلا (با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و مربوط به درزه و شکستگی‌های موجود در واحد متاآندزیت‌بازالتی) است که با توجه به میزان شدت میدان زمینه در منطقه ($IGRF=47515nT$) این میزان از تغییرات ناشی از وجود کانی مگنتیت با عیار متوسط در محدوده خسروآباد است.

- با توجه به نقشه باقی‌مانده IGRF Removed و کسر ۴۷۵۱۵ نانوتسلا از داده‌های ثبت‌شده بیشینه این نقشه در موقعیت بی‌هنجاری‌ها برابر ۴۵۳۴ نانوتسلاست.

- با استفاده از مشخصات جهتی میدان مغناطیسی منطقه، زاویه میل و زاویه انحراف فیلتر برگردان به قطب روی داده‌ها اعمال شد. در

نقشه برگردان به قطب، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به صورت یک دوقطبی کشیده در راستای مرز برخورد واحدهای متاآندزیت‌بازالتی و سنگ‌آهک میزبان است که این شکل از بی‌هنجاری مغناطیسی، نشان‌دهنده وجود کانی‌زایی مگنتیت احتمالی به صورت پرکننده فضای ایجادشده توسط فرایند گسلش در منطقه است. شکل و حجم این نوع از کانه‌زایی به طور کامل بستگی به فضایی دارد که توسط سامانه گسله ایجادشده است.

- با اعمال فیلترهای مشتقات قائم میدان مغناطیسی، آنومالی‌های کم عمق و سطحی با طول موج کوتاه از عوامل منطقه‌ای با طول موج بلند جداسازی می‌شوند. همان‌طور که در نقشه مربوط به این بخش مشاهده می‌شود، بی‌هنجاری‌های سطحی به صورت عدسی‌های کوچک و منفصل قابل بررسی هستند.

- بر اساس تحلیل داده‌های مغناطیس‌سنجی و شواهد سطحی ذخیره، ماده معدنی به شکل چهار بلوک دارای بی‌هنجاری مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه شناسایی شد.

- با توجه به فیلترهای بالاگذر، ترازهای ناهنجاری مغناطیسی در اعماق بالاتر از ۳۰ متر کم اثر می‌شوند که این شرایط نشان‌دهنده کم عمق بودن منشأ آنومالی‌هاست.

قدردانی

نویسندگان مقاله از جناب آقای مهندس باباخانی و جناب آقای مهندس عسگرزاده برای همکاری در انجام این پژوهش، کمال تشکر را دارند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

1. International Geomagnetic Reference Field (IGRF)
2. Total Magnetic Intensity (TMI)
3. Reduction to pole (RTP)
4. IGRF-REM
5. Amplitude of Analytic Signal (AAS)
6. Upward continuation
7. deconvolution
8. Power spectrum analysis

References

- Abbass, A.A., Fidelis, I.K. and Shakarit, B.A., 2023. Interpreting the magnetic signatures and radiometric indicators within Kogi State, Nigeria for economic resources. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(2): 100157. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100157>
- Afzal, P., Alghalandis, Y.F., Khakzad, A., Moarefvand, P. and Omran, N.R., 2010. Application of power spectrum-area fractal model to separate anomalies from background in Kahang Cu-Mo porphyry deposit, Central Iran. *Archives of Mining Sciences*, 55(3): 389–401. Retrieved Jun 16, 2023, from <https://www.infona.pl/resource/bwmetal.element.baztech-article-BPZ5-0008-0025>
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynch, B., Spakman, W., Monie, D., Meyer, B. and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148 (5–6): 692–725. <https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3–4): 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–20. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Aliani, F., Maanijou, M. and Miri, M., 2012. Petrology of the Tekyeh-Bala area granite veins (northeast of Sonqor), some evidence for A2-type granitoids. *Petrological Journal*, 3(9): 1–16. Retrieved Jun 16, 2023, from https://ijp.ui.ac.ir/article_16091_en.html?lang=en
- Aliani, F., Maanijou, M., Sabouri, Z. and Miri, M., 2018. Petrology and geochemistry of some granitoid and intermediate rocks in southwest of the Qorveh area (Kurdistan). *Petrological Journal*, 9(1): 21–44. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22108/ijp.2018.100707.1000>
- Alvandi, A., Deniz Toktay, H. and Nasri, S., 2022. Application of direct source parameter imaging (direct local wave number) technique to the 2D gravity anomalies for depth determination of some geological structures. *Acta Geophysica*, 70(2): 659–667. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00750-6>
- Arkani-Hamed, J. and Urquhart, W.E.S., 1990. Reduction to the pole of the North American magnetic anomalies. *Geophysics*, 55(2): 218–225. <https://doi.org/10.1190/1.1442829>
- Azizi, H. and Moinevaziri, H., 2009. Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran. *Journal of Geodynamics*, 47(4): 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2008.12.002>
- Baranov, V. and Naudy, H., 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29(1): 67–79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>
- Barati, M., Ghilzar Khojasteh, Z. and Gholipoor, M., 2018. Study of iron mineralization in Tekieh Bala iron index, based on mineralogical and geochemical evidence. *Petrological Journal*, 8(32): 167–196. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22108/ijp.2017.81995.0>
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(11): 1764–1766. <https://doi.org/10.1139/e81-163>
- Blakely, R.J., 1996. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, the United Kingdom, 291 pp. Retrieved Jun 16, 2023, from https://www.academia.edu/5146061/Potential_Theory_in_Gravity_and_Magnetic_Applications_Richard_J_Blakely
- Clark, D.A., 1999. Magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exploration and magnetic interpretation. *Exploration Geophysics*, 30(1–2): 5–26. <https://doi.org/10.1071/EG999005>
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2004. Filtering using variable order vertical derivatives. *Computers and Geosciences*, 30(5): 455–459. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.001>
- Cooper, G. R.J. and Cowan, D.R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers and Geosciences*, 32(10): 1585–1591. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.016>

- Currenti, G., Napoli, R., Carbone, D., Del Negro, C. and Ganci, G., 2007. Inverse modeling in geophysical applications. *Applied and Industrial Mathematics In Italy II*. pp. 279-290). https://doi.org/10.1142/9789812709394_0025
- Donohue, J., Hill, Q. and Brewster, D., 2012. Geophysics at the Hawsons Iron Project, NSW? Eastern Australia? s new magnetite resource. *ASEG Extended Abstracts*, 2012(1): 1–6. <https://doi.org/10.1071/ASEG2012ab210>
- Ebrahimi Fard, H., 2020. Mineral chemistry and geochemistry of skarn zones in the KhosrowAbad iron deposit, NE Sonqor. MS.c. thesis, University of Kharazmi, Tehran, Iran, 323 pp.
- Ebrahimi Fard, H., Mehrabi, B. and Ghasemi Siani, M., 2022a. Geothermometry of skarn zones in the Khosrow Abad iron deposit, Northeast of Sonqor. *Advanced Applied Geology*, 12(1): 90–111. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22055/AAG.2021.34687.2155>
- Ebrahimi Fard, H., Mehrabi, B. and Ghasemi Siani, M., 2022b. Investigation of microstructure controls on alteration and iron mineralization in Khosrow Abad deposit, Northeastern of Sonqor. *Researches in Earth Sciences*, 13(1): 21–51. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.48308/esrj.2022.101057>
- ElGalladi, A., Araffa, S., Mekkawi, M. and Abd-ElHai, M., 2022. Exploring mineralization zones using remote sensing and aeromagnetic data, West Allaqi Area, Eastern Desert, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(2): 417–433. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.03.007>
- El-Raouf, A.A., Doğru, F., Abdelrahman, K., Fnais, M. S., El Manharawy, A. and Amer, O., 2023. Using Airborne Geophysical and Geochemical Methods to Map Structures and Their Related Gold Mineralization. *Minerals*, 13(2): 237. <https://doi.org/10.3390/min13020237>
- Eshraghi, S.A., Jafarian, M.B. and Eghlimi, B., 1996. Explanatory text of Sonqor. Geological map 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran. Retrieved Jun 16, 2023, from <https://ngdir.ir/contents/2349>
- Fedi, M., Cella, F., Quarta, T. and Villani, A.V., 2010. 2D continuous wavelet transform of potential fields due to extended source distributions. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 28(3): 320–337. <https://doi.org/10.1016/j.acha.2010.03.002>
- Fitz Gerald, D., Reid, A., and McInerney, P., 2004. New discrimination techniques for Euler deconvolution. *Computers and Geoscience*, 30: 461–469. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.144.24>
- 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(1): 66. <http://dx.doi.org/10.5539/esr.v2n1p66>
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>
- Ghiasi, S.M., Hosseini, S.H., Afshar, A. and Abedi, M., 2023. A novel magnetic interpretational perspective on charmaleh iron deposit through improved edge detection techniques and 3D inversion approaches. *Natural Resources Research*, 32: 147170. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10135-7>
- Ghorbani, M., 2007. *The Economic Geology of Iran*. Springer Dordrecht, 572 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5625-0>
- Hartman, R.R., Teskey, D.J. and Friedberg, J.L., 1971. A system for rapid digital aeromagnetic interpretation. *Geophysics*, 36(5): 891–918. <https://doi.org/10.1190/1.1440223>
- Hosseini, M., 1999. Description of geological map 1:100,000 of Qorveh Quadrangle". Organization of Geology and Mineral Exploration of the country. Retrieved Jun 16, 2023, from <https://ngdir.ir/contents/1476>
- Ishihara, S., 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining geology*, 27(145): 293–305. Retrieved Jun 16, 2023, from https://www.jstage.jst.go.jp/article/shigenchishitsu1951/27/145/27_145_293/_pdf
- Khalaji, A.A., Esmaeily, D., Valizadeh, M.V. and Rahimpour-Bonab, H., 2007. Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj–Sirjan Zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(5–6): 859–877. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.06.005>

- Khayer, K., Shirazi, A., Shirazi, A., Ansari, A., Nazarian, H. and Hezarkhani, A., 2021. Determination of Archie's Tortuosity Factor from Stoneley Waves in Carbonate Reservoirs. *International Journal of Science and Engineering Applications (IJSEA)*, 10: 107–110. Retrieved Jun 16, 2023, from <https://ijsea.com/archive/volume10/volume10issue8.pdf>
- Kim, B., Jeong, S., Bang, E., Shin, S., and Cho, S., 2021. Investigation of iron ore mineral distribution using aero-magnetic exploration techniques: Case study at Pocheon, Korea. *Minerals*, 11(7): 665. <https://doi.org/10.3390/min11070665>
- Lelièvre, P.G., 2003. Forward modeling and inversion of geophysical magnetic data. Doctoral dissertation, University of British Columbia, 223 pp. Retrieved Jun 16, 2023, from https://gif.eos.ubc.ca/sites/default/files/lelievre_master_thesis.pdf
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1996. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2): 394–408. <https://doi.org/10.1190/1.1443968>
- Liu, S. and Mackey, T., 1998. Using images in a geological interpretation of magnetic data. *Australian*. Geological Survey Organisation Research Newsletter, 28: 1–3. Retrieved Jun 16, 2023, from <https://www.ga.gov.au/pdf/Corp0082.pdf>
- Maanijou, M., Aliani, F. and Miri, M., 2011. Geochemistry and petrology of granophyric granite veins penetrated the igneous intrusive complex south of Qorveh Area, west Iran. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(10): 926–934. Retrieved Jun 16, 2023, from https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Maanijou/publication/267844471_Geochemistry_And_Petrology_Of_Granophyric_Granite_Veins_Penetrated_In_The_Igneous_Intrusive_Complex_In_South_Of_Qorveh_Area_West_Iran/links/54bdf2730cf218d4a16a476f/Geochemistry-And-Petrology-Of-Granophyric-Granite-Veins-Penetrated-In-The-Igneous-Intrusive-Complex-In-South-Of-Qorveh-Area-West-Iran.pdf
- Maanijou, M., Aliani, F., Miri, M. and Lentz, D.R., 2013. Geochemistry and petrology of igneous assemblage in the south of Qorveh area, west Iran. *Geochemistry*, 73(2): 181–196. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2013.04.001>
- MacLeod, I. N., Jones, K. and Dai, T.F., 1993. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Exploration geophysics*, 24(3–4): 679–688. <https://doi.org/10.1071/EG993679>
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B. and Mohajjel, M., 2011. U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.03.006>
- Moazami Goodarzi, F., Zareisahamieh, R., Zamanian, H., Ahamadi Khalaji, A. and Mahmoudi, S., 2022. Petrogenesis of fertile Skarns related to Songhor granitoid complex (North of Sanandaj–Sirjan Zone, Iran). *Petrological Journal*, 13(2): 31–64. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22108/ijp.2021.125518.1208>
- Mohajjel, M., 1997. Structure and tectonic evolution of Paleozoic-mesozoic rocks, Sanandaj–Sirjan Zone, Western Iran: Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia (Unpublished). Retrieved Jun 16, 2023, from <https://ro.uow.edu.au/theses/1984>
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1125–1139. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7)
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. and Sahandi, M. R., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(4): 397–412. (in Persian with English abstract) [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00035-4)
- Motevalli, K., 2005. Mineralogy, Geochemistry, and Genesis of Khosrowabad and Tekye Bala Iron Deposits in Northeastern Sonqor. MSc thesis, University of Tarbiat Modarres, Tehran, Iran, 144 pp.
- Motlagh, Z.K., Rasti, A. and Safaei, S., 2022. Geology, geochemistry and geophysical studies in exploration of copper and iron reserves: A case study. *Technium Economic Geology*

- Marine, 1(1): 1–19.
<https://doi.org/10.47577/eco.v1i1.7474>
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507–517. <https://doi.org/10.1190/1.1440276>
- Nakatsuka, T. and Okuma, S., 2006. Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. *Exploration Geophysics*, 37(1): 121–128.
<https://doi.org/10.1071/EG06121>
- Narimani, A., 2017. Final report of the detailed exploration operation project in Khosrowabad Sonqor iron deposit. Pichab Kansar Consulting Engineers, Tehran, Report 1, 129 pp.
- Parker, R.L. and Huestis, S.P., 1974. The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography. *Journal of Geophysical Research*, 79(11): 1587–1593.
<https://doi.org/10.1029/JB079i011p01587>
- Peters, L.J., 1949. The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. *Geophysics*, 14(3): 290–320.
<https://doi.org/10.1190/1.1437537>
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.T. and Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55(1): 80–91.
<https://doi.org/10.1190/1.1442774>
- Reid, A.B., Ebbing, J. and Webb, S.J., 2014. Avoidable Euler errors—the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophysical Prospecting*, 62(5): 1162–1168. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12119>
- Robinson, E.S., 1988. *Basic exploration geophysics*. Wiley, New York, 562 p. Retrieved Jun 16, 2023, from
<https://www.wiley.com/en-us/Basic+Exploration+Geophysics-p-9780471879411>
- Sahoo, S., Singh, A., Biswas, S. and Sharma, S. P., 2021. 3D Subsurface Characterization of Banded Iron Formation Mineralization using Large-Scale Gravity Data: A Case Study in Parts of Bharatpur, Dausa and Karauli Districts of Rajasthan, India. *Natural Resources Research*, 30(5): 3121–3138.
<https://doi.org/10.1007/s11053-021-09880-y>
- Samani, B., 2013. Report of the end of the Khosrow Abad iron ore exploration operation, Sonqor County. Negin Kavan Navid Pars Company, Tehran, Report 1, 108 pp.
- Scales, J.A. and Snieder, R., 2000. The anatomy of inverse problems. *Geophysics*, 65(6): 1708–1710. <https://doi.org/10.1190/geo2000-0001.1>
- Selim, E.S.I., 2016. The integration of gravity, magnetic, and seismic data in delineating the sedimentary basins of northern Sinai and deducing their structural controls. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115, 345–367. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.10.012>
- Shaole, A., Zhixin, Z., Kefa, Z. and Jinlin, W., 2021. Subsurface structures of the Xiaorequanzi deposit, NW China: new insights from gravity, magnetic and electromagnetic data. *Geophysical Prospecting*, 69(2): 434–447.
<https://doi.org/10.1111/1365-2478.13049>
- Shirazi, A., Hezarkhani, A., Shirazi, A., Khakmardan, S. and Rooki, R., 2022. K-means clustering and general regression neural network methods for copper mineralization probability in Chahar-Farsakh, Iran. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 65(1): 79–92.
<https://doi.org/10.25288/tjb.1010636>
- Shirazi, A., Hezarkhani, A., Timkin, T. and Shirazi, A., 2021a. Investigation of magneto-/radio-metric behavior to identify an estimator model using K-means clustering and Artificial Neural Network (ANN) (Iron Ore Deposit, Yazd, IRAN). *Minerals*, 11(12): 1304.
<https://doi.org/10.3390/min11121304>
- Shirazi, A., Shirazi, A. and Nazarian, H., 2021b. Application of remote sensing in earth sciences—A review. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 10(5): 45–51. Retrieved Jun 16, 2023, from
<https://ijsea.com/archive/volume10/volume10issue5.pdf>
- Shirazi, A., Shirazi, A., Nazarian, H., Khayer, K. and Hezarkhani, A., 2021c. Geophysical study: Estimation of deposit depth using gravimetric data and Euler method (Jalalabad iron mine, Kerman province of IRAN). *Open Journal of Geology*, 11(8): 340–355.
<https://doi.org/10.4236/ojg.2021.118018>

- Shirazi, A., Shirazi, A., and Hezarkhani, A., 2018a. Predicting gold grade in Tarq 1: 100000 geochemical map using the behavior of gold, Arsenic, and Antimony by K-means method. *Journal of Mineral Resources Engineering*, 2(4): 11–23. <https://doi.org/10.30479/jmre.2018.1382>
- Shirazi, A., Shirazi, A., Heidarlaki, S. and Ziiai, M., 2018b. Exploratory Remote Sensing Studies to Determine the Mineralization Zones around the Zarshuran Gold Mine. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 7(9): 274–279. Retrieved Jun 16, 2023, from https://www.academia.edu/54487803/Exploratory_Remote_Sensing_Studies_to_Determine_the_Mineralization_Zones_around_the_Zarshuran_Gold_Mine
- Spector, A. and Grant, F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): 293–302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>
- Spicer, B., Morris, B. and Ugalde, H., 2011. Structure of the rambler rhyolite, Baie Verte Peninsula, Newfoundland: inversions using UBC-GIF Grav3D and Mag3D. *Journal of Applied Geophysics*, 75(1): 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.013>
- Stocco, S., Godio, A. and Sambuelli, L., 2009. Modeling and compact inversion of magnetic data: A Matlab code. *Computers and Geosciences*, 35(10): 2111–2118. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2009.04.002>
- Tabatabai, S.H. and Nusrat Makoi, T., 1994. Final report of the project of geophysical studies of iron-bearing anomalies. General Directorate of Mines and Metals of Kermanshah Province, Ministry of Industries and Mines, Kermanshah, Report 1, 50 pp.
- Tarlowski, C., Gunn, P.J. and Mackey, T., 1997. Enhancements of the magnetic map of Australia. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17: 77–82. Retrieved Jun 16, 2023, from <https://ecat.ga.gov.au/geonetwork/srv/api/record/s/fae9173a-71b3-71e4-e044-00144fdd4fa6>
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics*. Cambridge University Press, New York, 751 pp.
- Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47(1): 31–37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Yousefi, E. and Friedberg, J.L., 1978. Aeromagnetic map of Sanandaj quadrant, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran. Retrieved Jun 16, 2023, from <https://ngdir.ir/contents/3897>
- Zhao, W., Yang, C., Tong, R., Chen, L., Chen, M., Gillen, K. M., Li, G., Chao, M., Wang, Y, Xi, W and Li, J., 2023. Relationship Between Iron Distribution in Deep Gray Matter Nuclei Measured by Quantitative Susceptibility Mapping and Motor Outcome After Deep Brain Stimulation in Patients With Parkinson's Disease. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 58(2): 581–590. <https://doi.org/10.1002/jmri.28574>