

Research Article**Identification of hidden mineral deposits using airborne magnetic data in the Malayer-Esfahan metallogenic belt (MEMB), Iran**Mohammad Amin Jafari^{1*}, Mohammad Amini², Ahad Nazarpour³, Mohsen Golriz⁴

1- Master Graduate, School of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Ph.D. Student of Economic Geology, School of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

4- Department of Geography, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Keywords: Potential detection, Airborne magnetic, Magnetometry, Mineralization, Minerals, Malayer-Esfahan**1- Introduction**

Identifying the type of subsurface magnetic sources and their location are the main goals of interpreting magnetic maps, and this issue is of great importance due to its application in geological and mining sciences. Magnetic sources have different geometric and physical properties and are located at different depths (Kwan et al., 2018). Since magnetic anomalies are caused by changes in the magnetism of crustal rocks, sedimentary rocks often have minor magnetic effects, while minerals iron-rich igneous rocks often have high magnetic properties (Sehsah et al., 2019). Magnetic maps show anomalies resulting from significant changes in a part of the magnetic mineral, which exists inside rocks near the surface. Hence, accurate data interpretation of magnetic field data is much more complex than other potential data interpretations. Therefore, magnetometric operations are one of the most common geophysical methods used for exploration activities in various fields, especially the exploration of metal deposits such as Au, Ag, Cr, etc. (Ekwok et al., 2019). The basis of the magnetometric method is to change the magnetic susceptibility values of rocks and minerals, which is used to determine the scattering of magnetic minerals due to lithological and structural changes (de Castro et al., 2014). Malayer-Esfahan mineralization zone with a northwest-southeast trend is Iran's largest Zn-Pb mineralization belt with the sedimentary host rock. In addition to Zn-Pb deposits in this zone, other deposits such as Cu, Cr, Au, W, etc. can be seen, which shows the high potential of this zone in metal mineralization. Among the vital metal reserves in the Malayer-Esfahan zone, we can mention Tiran and Irankuh mining areas with Zn-Pb mineral potential, Muteh deposit with Au mineral potential, Cu well deposits with copper mineral potential, early Cretaceous tensile tectonics have led to the formation of horst and graben basins in this area. However, many deposits Zn-Pb, Cu, W, and Au have been deposited in the resulting graben basins (Rajabi et al., 2013). In this study, we investigate the potential of metal deposits using airborne magnetic data and identify anomalies caused by the Earth's magnetic field in the Malayer-Esfahan metallogenic zone.

2- Materials and methods

Identifying the type of subsurface magnetic sources and their location are the main goals of interpreting magnetic maps, and this issue is of great importance due to its application in geological and mining sciences. Magnetic sources have different geometric and physical properties and are located at different depths (Kwan et al., 2018). Since magnetic anomalies are caused by changes in the magnetism of crustal rocks, sedimentary rocks often have minor magnetic effects, while minerals iron-rich igneous rocks often have high magnetic properties (Sehsah et al., 2019). Magnetic maps show anomalies resulting from significant changes in a part of the magnetic mineral,

* Corresponding author: mohamadamin.jaafari@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2021.36501.2199

Received 2021-01-27

Accepted 2021-08-21 15

which exists inside rocks near the surface. Hence, accurate data interpretation of magnetic field data is much more complex than other potential data interpretations. Therefore, magnetometric operations are one of the most common geophysical methods used for exploration activities in various fields, especially the exploration of metal deposits such as Au, Ag, Cr, etc. (Ekwok et al., 2019). The basis of the magnetometric method is to change the magnetic susceptibility values of rocks and minerals, which is used to determine the scattering of magnetic minerals due to lithological and structural changes (de Castro et al., 2014). Malayer-Esfahan mineralization zone with a northwest-southeast trend is Iran's largest Zn-Pb mineralization belt with the sedimentary host rock. In addition to Zn-Pb deposits in this zone, other deposits such as Cu, Cr, Au, W, etc. can be seen, which shows the high potential of this zone in metal mineralization. The vital metal reserves in the Malayer-Esfahan zone are: Tiran and Irankuh mining areas with Zn-Pb mineral potential, Muteh deposit with Au mineral potential, Cu well deposits with copper mineral potential, early Cretaceous tensile tectonics have led to the formation of airborne geophysical surveys have been prepared and interpreted by the geological survey and mineral exploration of Iran (GSI) using three methods of magnetometry, electromagnetism and radiometry. The undeniable advantages of airborne geophysical sampling have made this method an efficient and fast method today.

In these methods, large areas are sampled at an acceptable speed. Airborne geophysical sampling is performed by measuring devices mounted on a helicopter or aircraft. In an airborne project, the effect of long-term changes in the magnetic field on the airborne magnetic data will be visible due to the large area covered and harvested at different time intervals. Airborne magnetic surveys in the study area, between 1974 and 1977, were carried out by Texas Air Services and under the supervision of the geological survey of Iran, with a distance of 7.5 km and 40 km of control lines. The magnetometer used in this harvest was Cesium vapour with a sensitivity of 0.02 nT (nanotesla). Since part of the study area is covered with alluvium and in some areas, the nature of lithology and erosion makes it challenging to observe geological structures directly; therefore, some of these obstacles can be overcome by processing airborne magnetic data. The output of magnetic data for interpretation is usually shown in contour maps or profiles and can be used to display and isolate anomalies through filtering.

The study area consists of 25 1:100,000 geological sheets including Aligoudarz, Arak, Ardal, Borujen, Boroujerd, Chadegan, Dehaghan, Delijan, Esfahan, Fereydun Shahr, Golpayegan, Izad khast, Khondob, Kuh dehgh, Kuh Dena, Mahallat, Malayer, Meymeh, Najaf-Abad, Riz lenjan, Semirom, Shahr -e- Kurd, Shazand, Shahreza and Varcheh that 64069 data collected from the study area were analyzed. In this study, using the airborne magnetite data of the Malayer-Esfahan mineralization zone, a map of the total intensity of the magnetic field in the region was prepared. Then, using the values of 51.09° for the inclination angle and 4.1° for the magnetic deflection angle, reduce to the pole (RTP) filter was applied to the total field strength map to return the data to the Earth's magnetic field conditions at the North Pole. Then filters were applied to the RTP map to separate the anomaly from the background. In order to process and interpret the airborne magnetic data qualitatively, Oasis Montaj software version 6.4 and ArcGIS version 10.8 have been used. Horst and graben basins in this area. However, many deposits Zn-Pb, Cu, W, and Au have been deposited in the resulting graben basins (Rajabi et al., 2013). In this study, we investigate the potential of metal deposits using airborne magnetic data and identify anomalies caused by the Earth's magnetic field in the Malayer-Esfahan metallogenic zone.

3- Discussion and conclusion

Using reduction to pole (RTP) filters, signal analytical and vertical derivatives were processed, and airborne magnetic data were interpreted. The map derived from the vertical derivative is considered the final map to identify anomalies resulting from airborne magnetic data. Due to the sedimentary nature of the Malayer-Esfahan area and the fact that the minerals in the rocks of this area usually have low magnetic properties, the anomalies obtained from the airborne magnetic data showed a relative overlap with the Zn-Pb deposits in the area. Therefore, the anomalies obtained in this study can be used to identify iron reserves other than Zn-Pb in this area. The igneous mass in the northwestern part of the study, an area with high overlap anomalies obtained from the vertical derivative, indicates that this is due to minerals with high magnetic properties. Anomalies resulting from the vertical derivative filter with iron deposits more than Zn-Pb deposits such as Shams-Abad and Akhtarchi Fe deposits, Astaneh and Muteh Au deposits, and Rousht W deposits, Ghaleh-Arab Cu deposit, Ahangaran Zn-Pb deposits, Saleh-Payghambar, Ab-Bagh, Dardahaneh, Khan-Abad, Lakan, etc. show overlap. In general, the results



of this study showed that in the northwestern, central, and southeastern parts of the Malayer-Esfahan metallogenic zone, there are new and hidden anomalies that can be used for sampling promising mineral areas by sampling and spectroscopy.

References

- de Castro, D. L., Fuck, R.A., Phillips, J.D., Vidotti, R.M., Bezerra, F.H., Dantas, E.L., 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics* 614, 128-145.
- Ekwok, S.E., Akpan, A.E., Ebong, E.D., 2019. Enhancement and modelling of aeromagnetic data of some inland basins, southeastern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences* 155, 43-53.
- Kwan, K., Johnson, I., Legault, J.M., Khaled, K., 2019. Mineralisation predictive targeting using Tensor Flow (Google) deep neural networks. *ASEG Extended Abstracts 2019*, 1-5.
- Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C., 2013. Metallogeny of Permian–Triassic carbonate-hosted Zn–Pb and F deposits of Iran: A review for future mineral exploration. *Australian Journal of Earth Sciences* 60, 197-216.
- Sehsah, H., Eldosouky, A.M., El Afandy, A.H., 2019. Unpaired ophiolite belts in the Neoproterozoic Allaqi-Heiani Suture, the Arabian-Nubian Shield: Evidences from magnetic data. *Journal of African Earth Sciences* 156, 26-34.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jafari, M.A., Amini, M., Nazarpour, A., Golriz, M., 2022. Identification of hidden mineral deposits using airborne magnetic data in the Malayer-Esfahan metallogenic belt (MEMB), Iran. *Adv. Appl. Geol.* 12(3), 502-519.

DOI: 10.22055/AAG.2021.36501.2199

url: https://aag.scu.ac.ir/article_17043.html?lang=en

©2022 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.



شناسایی نواحی امیدبخش معدنی جدید و پنهان با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد در کمربند فلززایی ملایر - اصفهان، ایران

محمدامین جعفری*

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمد امینی

دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران

احد نظرپور

گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

محسن گلریز

گروه جغرافیا، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*Mohamadamin.Jaafari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

چکیده

کمربند فلززایی ملایر - اصفهان میزبان ذخایر سرب و روی زیادی با سنگ میزبان رسوبی است. علاوه بر کانه‌زایی سرب و روی، در این پهنه کانه‌زایی مس، کروم، طلا، آهن، منگنز و تنگستن با سنگ میزبان‌های مختلفی نیز صورت گرفته است. در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد، مناطق امیدبخش معدنی در پهنه فلززایی ملایر - اصفهان معرفی شده‌اند. با استفاده از فیلترهای برگردان به قطب (RTP)، سیگنال تحلیلی و مشتق قائم پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس هوابرد صورت گرفت. نقشه حاصل از مشتق قائم به عنوان نقشه نهایی برای بارسازی آنومالی‌های حاصل از داده‌های مغناطیس هوابرد در نظر گرفته شده است. با توجه به رسوبی بودن پهنه ملایر - اصفهان و اینکه کانی‌های موجود در این سنگ‌ها خاصیت مغناطیسی کمی از خود نشان می‌دهند، آنومالی‌های بدست آمده با برخی از کانسارهای سرب و روی همپوشانی بالایی نشان نمی‌دهند. توده آذرین موجود در بخش شمال غرب منطقه مورد مطالعه با آنومالی‌های بدست آمده از مشتق قائم همپوشانی بالایی نشان می‌دهد که این به علت وجود کانی‌هایی با خاصیت مغناطیسی بالا در این توده است. آنومالی‌های حاصل از فیلتر مشتق قائم با کانسارهای آهنی بیشتر از کانسارهای سرب و روی مثل کانسار آهن شمس‌آباد و اخترچی، کانسار طلای آستانه و موته، کانسار تنگستن روست، کانسار مس قلعه عرب، کانسارهای سرب و روی آهنگران، صالح پیغمبر، آب باغ، دردهانه، خان‌آباد، لکان و ... تطابق نشان می‌دهد. بطور کلی نتایج این پژوهش نشان داد در قسمت‌های شمال غرب، مرکز و جنوب شرق پهنه فلززایی ملایر - اصفهان مناطقی به عنوان آنومالی‌های جدید و پنهان وجود دارند که می‌توان برای صحت‌سنجی مناطق امیدبخش معدنی از نمونه‌برداری و طیف‌سنجی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: پتانسیل‌یابی، مغناطیس هوابرد، مغناطیس‌سنجی، کانه‌زایی، ملایر - اصفهان

مقدمه

است (Dobrin and Savit, 1988). از آن جایی که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به‌وسیله تغییرات در مغناطیس سنگ‌های پوسته ایجاد می‌شوند، بنابراین سنگ‌های رسوبی غالباً اثرات مغناطیسی بسیار جزئی دارند و این در حالی است که سنگ‌های آذرین غنی از کانی‌های آهن، اغلب خاصیت مغناطیسی بالایی دارند. نقشه‌های تهیه‌شده از اندازه‌گیری‌های میدان پتانسیل نمی‌توانند هیچ‌گونه اطلاعات کمی درباره عمق، ابعاد و یا توزیع خاصیت فیزیکی مورد اندازه‌گیری در زیر

شناسایی نوع منابع مغناطیسی زیرسطحی و مکان‌یابی آنها، از اصلی‌ترین اهداف تفسیر نقشه‌های مغناطیسی محسوب می‌شوند و این موضوع به علت کاربرد در علوم زمین‌شناسی و معدن از اهمیت فراوانی برخوردار است. منابع مغناطیسی دارای خصوصیات هندسی و فیزیکی مختلفی هستند و در عمق‌های متفاوتی قرار دارند (Kwan et al., 2018). مطالعه مغناطیس زمین، قدیمی‌ترین روش اکتشاف ژئوفیزیکی برای اکتشاف ذخایر نفت، مواد معدنی و ...

این روش‌ها بهترین نتایج برای توده‌های عمیق را می‌توان تخمین زد. در سالیان اخیر، روش‌های مذکور به نحو فزاینده‌ای در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی در مقیاس اکتشاف کانی‌ها و ذخایر فلزی به‌کار گرفته شده‌اند (de Castro et al., 2014). از آن جایی که زمین به‌صورت طبیعی دارای میدان مغناطیسی است و این میدان بر حسب زمان و مکان تغییر می‌کند و تا کیلومترها در بالای آن گسترش دارد؛ به همین دلیل برداشت‌های مغناطیس‌سنجی از طریق هواپیما، هلیکوپتر یا ماهواره نیز امکان‌پذیر است. وجود کانی‌هایی مانند ایلمنیت، پیروتیت، ژاکوسیت، گوتیت، مگنتیت و هماتیت ممکن است، به‌صورت محلی یا منطقه‌ای در میدان زمین بی‌نظمی ایجاد کند. به‌طور معمول سنگ‌های آذرین و دگرگونی خاصیت مغناطیسی بیشتری نسبت به سنگ‌های رسوبی دارند. اندازه‌گیری تغییرات محلی میدان مغناطیسی اغلب ممکن است در شناسایی تغییرات سنگ‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد (de Castro et al., 2014).

هدف از برداشت‌های مغناطیسی، جست‌وجوی آنومالی‌های مغناطیسی در زیر سطح زمین است. اگرچه اکثر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها به‌صورت مشخص غیرمغناطیس هستند، ولی انواع خاصی از سنگ‌ها دارای مقدار کافی از کانی‌های مغناطیسی‌اند که می‌توانند آنومالی‌های مغناطیسی قابل توجهی ایجاد کنند (Eldosouky, 2019). معمولاً سنگ‌های رسوبی اثرات مغناطیسی بسیار جزئی دارند. از این رو تغییرات شدت میدان مغناطیسی در سطح زمین بیشتر مربوط به تغییرات سنگ‌شناختی سنگ‌های بستر و یا نفوذی‌های آذرین است (Ekwok et al., 2020). پی‌جویی‌های هوایی الکترومغناطیس به‌طور موفقیت‌آمیزی در سال‌های اخیر برای اکتشاف هماتیت و منیتیت در قسمت‌های مختلف جهان از جمله شمال کانادا، غرب آفریقا و آمریکای جنوبی انجام گرفته است (Chander et al., 2009). در منطقه بافین ایسلند کشور کانادا نیز مطالعات نقشه‌های پالئومغناطیس و رادیومتری منجر به کشف ذخایر پنهان روی شده است (Siemon, 2001). در بیشتر یافته‌های جدید اکتشافی، ژئوفیزیک نقش موثری در اکتشاف و نمایش ذخایر پنهان در عمق داشته است (Bishop and Lewis, 1992). با استفاده از خواص مختلف ذخایر سولفیدی نیز در منطقه شرقی کشور فنلاند با استفاده از مغناطیس‌سنجی و اشعه گاما جایگاه ذخایر شناخته شده در ابتدا مشخص شد و سپس بر اساس همین خواص جایگاه ذخایر کشف نشده یا پنهان تعیین شد (Clark, 1999).

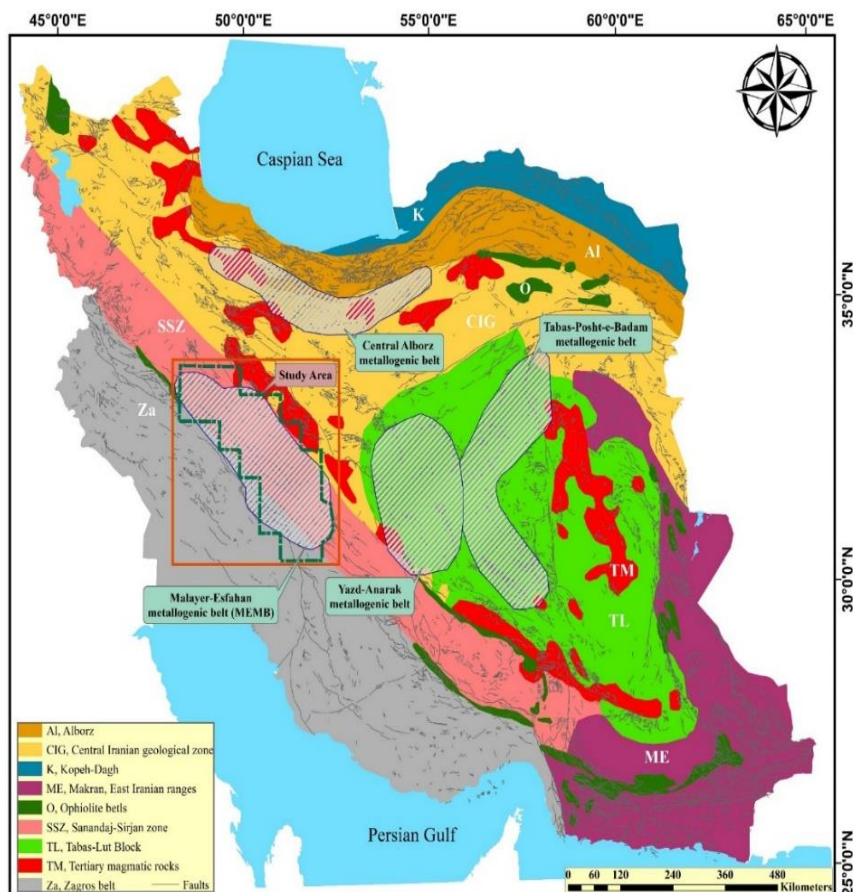
پهنه کانه‌زایی ملایر - اصفهان با روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق بزرگترین کمر بند کانه‌زایی سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی در ایران بشمار می‌رود (شکل ۱). در این پهنه علاوه بر ذخایر سرب و روی، ذخایر دیگری مانند مس، کروم، طلا و تنگستن دیده می‌شود که نشان از پتانسیل بالای این پهنه در کانه‌زایی فلزی دارد. از ذخایر مهم فلزی موجود در پهنه ملایر - اصفهان می‌توان به منطقه معدنی تیران، ایرانکوه با پتانسیل معدنی سرب و روی، کانسار موته با پتانسیل معدنی طلا، کانسار چاه‌مس با پتانسیل معدنی مس و ... اشاره کرد. زمین‌ساخت

سطح زمین فراهم کند (Telford et al., 1990). از این‌رو، روش مدل‌سازی داده‌ها این امکان مهم را در تعبیر و تفسیر داده‌های میدان مغناطیسی را مهیا می‌سازد. نقشه مغناطیسی مجموعه‌ای از ناهنجاری‌هایی را نشان می‌دهند که نتیجه تغییرات بزرگ در جزئی از کانی‌های مغناطیسی است، که در داخل سنگ‌های نزدیک به سطح وجود دارد. از این‌رو تفسیر دقیق داده‌های میدان مغناطیسی بسیار دشوارتر از تفسیر سایر داده‌های میدان پتانسیل است. بنابراین، عملیات مغناطیس‌سنجی از متداول‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای فعالیت‌های اکتشافی در زمینه‌های مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر فلزی مثل طلا، نقره، کروم و ... مورد استفاده قرار گرفته است (Nasri et al., 2020). مبنای روش مغناطیس‌سنجی تغییر مقادیر خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها است که از این اطلاعات برای تعیین پراکندگی کانی‌های مغناطیسی و در نتیجه تغییرات سنگ‌شناسی و ساختاری استفاده می‌شود (Ekwok et al., 2019).

یک پروژه ژئوفیزیکی بدون کاربرد روش مغناطیسی در آن، حداقل در مرحله شناسایی، به سختی قابل اجراست. بر روی داده‌های مغناطیس‌هاو برد پس از برداشت، باید تصحیحات مورد نیاز اعمال گردد. Milligan و Gunn (۱۹۹۷) به بررسی روش‌های پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌هاو برد پرداخته‌اند. Neawsuprap و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از پردازش و تفسیر داده‌های الکترومغناطیس و مغناطیس‌هاو برد به بررسی ساختارهای زیرسطحی پرداختند. از دهه ۴۰ و ۵۰ میلادی به بعد برای پیدا کردن انطباق بی‌هنجاری مغناطیسی با ساختارهای زمین‌شناسی، تلاش قابل توجهی جهت حل مسائل میدان پتانسیل صورت گرفته است (Eldosouky et al., 2018). استفاده از فرآیند مدل‌سازی برای تعیین پارامترهای هندسی و فیزیکی ساختارهای زمین‌شناسی توسط محققین زیادی بررسی شده است. کارهای ارائه شده توسط محققین شامل به‌کارگیری دو روش مدل‌سازی پیشرو و معکوس روی داده‌های میدان‌های پتانسیل و حل محدودیت‌های مربوط به هر یک از آن‌ها می‌شود. یکی از مشکلات اساسی در مدل‌سازی معکوس داده‌های میدان‌های پتانسیل، عدم یکتایی در پاسخ‌ها می‌باشد؛ که جهت رفع آن مطالعات بسیاری انجام شده است. Wilson و همکاران (۲۰۱۱) از مدل‌سازی معکوس سه‌بعدی داده‌های الکترومغناطیس، گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی‌هاو برد به‌منظور بررسی سنگ‌شناسی منطقه و مناطق پتانسیل‌دار برای اکتشاف معدن استفاده کردند. Kamkar Rouhani و Beiki (۲۰۰۹) به منظور پی‌جویی کرومیت در منطقه سبزو، به پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی پرداختند. با اعمال فیلتر روی داده‌های مغناطیس‌هاو برد می‌توان به دقت و صحت داده‌های برداشت شده پی‌برد. از میان انواع متداول این فیلترها می‌توان به زاویه‌تیلت (Miller and Singh, 1994; Ferreira et al., 2013; TDR)، زاویه‌نقشه‌تتا (Wijns et al., 2005)، مشتق افقی (Blakely and Simpson, 1986) و روش سیگنال تحلیلی (Cooper and Cowan, 2008) اشاره کرد. با بررسی

استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد به پتانسیل‌یابی ذخایر فلزی پنهان در پهنه فلززایی ملایر - اصفهان می‌پردازیم و سپس بررسی می‌شود که تا چه میزان سنگ‌های رسوبی از خود خاصیت مغناطیسی نشان می‌دهند.

کشتی کرتاسه زیرین سبب تشکیل حوضه‌های فرازمین و فروزمین در این پهنه شده است که بسیاری از کانسارهای سرب، روی، مس، تنگستن، طلا و... در حوضه‌های فروزمینی حاصل، نهشته شده‌اند (Rajabi et al., 2013). در این مطالعه با



شکل ۱- موقعیت کمرندهای متالوژن سرب و روی در ایران و جایگاه منطقه مورد مطالعه (Rajabi et al., 2012).

Fig. 1. Position of metallogenic belt of Pb and Zn in Iran and location of Malayer-Esfahan zone (Rajabi et al., 2012).

پرتکاپوی سندانج - سیرجان واقع شده است و دارای توان معدنی فلزی و غیرفلزی بالایی است. مواد معدنی فلزی در این منطقه شامل: سرب، روی، طلا، مس، نقره، کادمیوم، آهن و ... می‌باشد (Jafari et al., 2020). در پهنه ملایر - اصفهان پدیده‌های تکتونیکی بزرگ مقیاس وجود دارد که از لحاظ جایگاه تکتونیکی، حوضه‌های فورلندی یکی از اصلی‌ترین مناطق تشکیل کانسارها محسوب می‌شود (Momenzadeh, 1976). فاکتورهایی مانند شیب فرورانش، ساختار حرارتی فرورونده و الگوی کنوکسیون در استونسفر، همگی بر روی حوضه فورلندی تأثیرگذار هستند (Leach et al., 2001). کمریند فلززایی ملایر - اصفهان دارای ناپیوستگی‌های متعدد در دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک است که در قسمت شمال و مرکز ایران دیده می‌شود. آن چه که موجب تشخیص این ناحیه از مرکز و شمال ایران است، این پهنه در اشغال واحدهای اسلیتی و ماسه‌سنگی و دگرگونی ژوراسیک و توالی‌های کربناته - شیل - مارن کرتاسه می‌باشد.

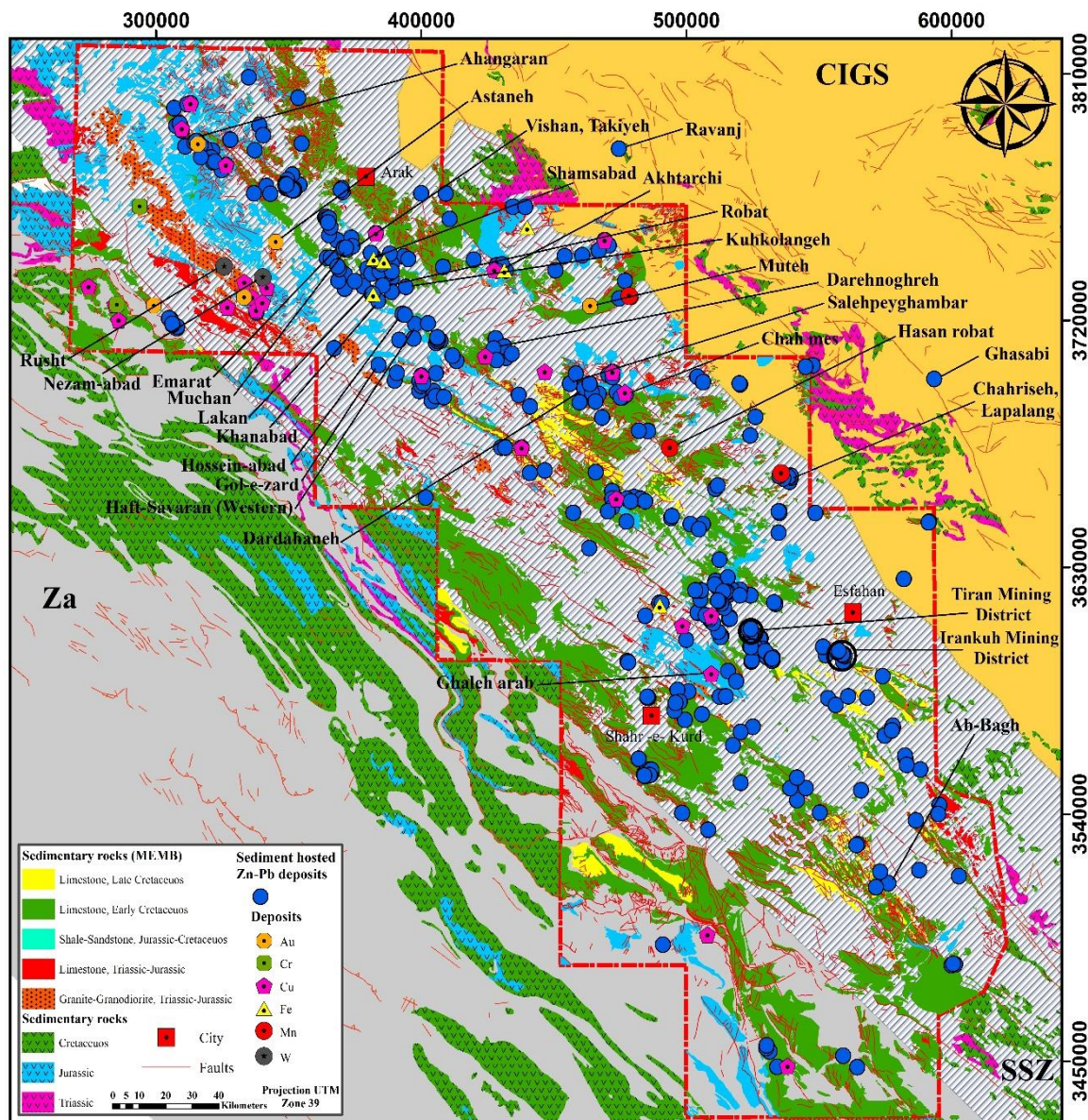
زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کمریند فلززایی ملایر - اصفهان یک پهنه دگرگونی با راستای شمال‌باختر - جنوب‌خاور است که بخش عمده‌ای از استان‌های مرکزی، اصفهان و همدان و بخش کمتری از استان‌های لرستان و چهارمحال و بختیاری را دربر می‌گیرد (Ehya et al., 2010). این پهنه در موقعیت زمین‌ساختی پشت کمانی جای دارد و در نتیجه فرورانش اقیانوس نوتتیس به زیر صفحه ایران ایجاد شده است و مهمترین کمریند فلززایی سرب و روی ایران از نوع MVT (می‌سی‌سی‌پی با میزبان رسوبی) و Sedex (کم‌تر) بشمار می‌رود (Rajabi et al., 2013). کانسارهای Sedex به همه کانسارهای سرب و روی با میزبان شیلی، ماسه‌سنگی سیلتستونی و یا جانشینی‌های کربناته درون توالی تخریبی گفته می‌شود و کانسارهای MVT، کانسارهایی هستند که در سکوه‌های کربناته تشکیل می‌شوند. منطقه مورد مطالعه در پهنه

نشانه می‌دهند (Rajabi et al., 2019). سایر واحدهای زمین‌شناسی موجود در این پهنه شامل سنگ‌های آهک کرتاسه بالایی و سنگ‌های آهک تریاس تا ژوراسیک و توده نفوذی بروجرد - اراک در شمال غرب پهنه ملایر - اصفهان می‌باشد که در بخش بعدی بصورت مفصل در مورد این واحد زمین‌شناسی و خاصیت کانه‌زایی آن بحث شده است.

بدلیل تأثیر فازهای کوهزایی لارامید توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی متعددی در این طبقات ژوراسیک تزریق شده است (Yarmohammadi et al., 2016).

مطابق نقشه زمین‌شناسی (شکل ۲) مهم‌ترین واحد سنگی در این پهنه به علت دارا بودن پتانسیل فراوان در تشکیل فلزات سرب و روی، واحد آهک کرتاسه زیرین و شیل و ماسه‌سنگ تریاس تا ژوراسیک می‌باشد که پتانسیل بالایی در تشکیل فلزات سرب و روی از خود



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی کمربند فلززایی ملایر-اصفهان (Rajabi et al., 2012).

Fig. 2. Geological map of Malayer-Esfahan metallogenic belt (Rajabi et al., 2012).

این توده‌ها از نظر کانه‌زایی حاوی طلا، تنگستن، مولیبدن و ... است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد گرانیتوئیدهای این منطقه در سری ماگمایی کالکوالکالن واقع هستند. اما بررسی‌ها نشان داده است که تحولات فازهای مختلف در این مجموعه گرانیتوئیدهای متفاوت بوده است (Khalaji et al., 2007).

زمین‌شناسی توده نفوذی بروجرد - اراک واقع در شمال- غرب پهنه ملایر - اصفهان

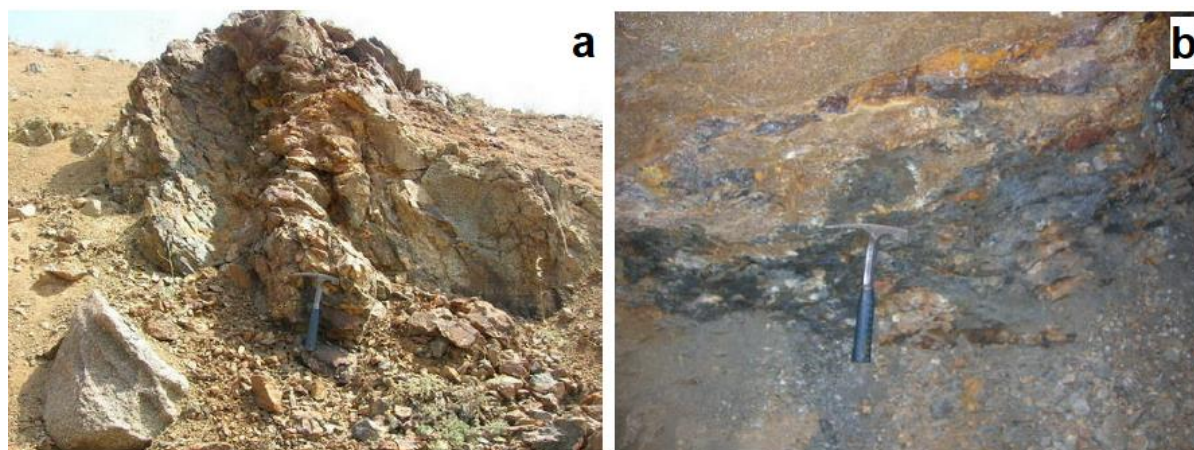
مجموعه توده‌های گرانیتوئیدی بین شهرستان‌های اراک و بروجرد یکی از متنوع‌ترین مجموعه توده‌های نفوذی سندج - سیرجان شمالی است که در شمال غرب پهنه فلززایی ملایر - اصفهان جای گرفته است.

گرانیتوئیدهای حد فاصل اراک تا بروجرد به سه گروه اصلی قابل تقسیم هستند: (۱) توده گرانیتوئیدی آستانه؛ (۲) کمپلکس گرانیتوئیدی بروجرد و (۳) توده‌های منفرد و کوچک توان‌دشت - گوشته. توده نفوذی آستانه دارای توپوگرافی بلندتر از سایر توده‌ها و سنگ‌های غالب گرانودیوریتی است. در این توده پلاسازی وجود داشته و در قدیم طلای پلاس از رودخانه مجاور آن استخراج شده است (Asgari, 2008; Valizadeh et al., 1993). کمپلکس بروجرد با وسعتی در حدود ۳۵۰ کیلومتر مربع در شرق شهرستان بروجرد واقع شده است و جاده بروجرد به سمت اراک از مرکز کمپلکس عبور می‌کند. این کمپلکس در بخش مرکزی پهنه سندر - سیرجان با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی به موازات گسل اصلی زاگرس در مجموعه دگرگونی همدان شامل شیست‌های درجه پایین تزریق شده است. توده‌های موجود در کمپلکس بروجرد به واحدهای اصلی گرانودیوریتی و کوارتزیدیوریتی تقسیم شده است (شکل a۳) (Ahmadi, 2007). توده‌های منفرد و کوچک توان‌دشت در جنوب کمپلکس بروجرد واقع شده و به صورت سه توده کوچک مجزا با ویژگی‌های تقریباً مشابه قابل تشخیص است.

توده نفوذی موجود در شمال‌غرب پهنه ملایر - اصفهان جزئی از بخش شمالی پهنه دگرگون شده سندر - سیرجان بوده و تکامل تکتونیکی آن مرتبط با زایش اقیانوسی نئوتتیس می‌باشد. جایگاه تکتونیکی توده گرانیت-گرانودیوریتی مزبور از نوع گرانیت‌های قوس آشفشانی (VAG) می‌باشد (Ahmadi, Khalaji et al., 2007). مجموعه سنگ‌شناسی این ناحیه بصورت توده‌های نفوذی گرانیت - گرانودیوریتی و سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای از نوع کالک شیست و مجاورتی از نوع هورنفلس و شیست لکه‌دار می‌باشد که استوک‌هایی از جنس گرانیت‌های اسفندار، دایک‌های پگماتیستی و آپلیتی رگه‌های کوارتز-تورمالینی مینرالیزه آن‌ها را همراهی می‌کنند. رگه‌های کوارتز - تورمالینی کم و بیش تنگستن‌دار مذکور، هم توده نفوذی اصلی و هم سنگ‌های رسوبی - دگرگونی پهنه ملایر - اصفهان را قطع کرده‌اند (Ghaderi et al., 2005). کانه‌زایی تنگستن و طلا در رگه‌های کوارتز - تورمالینی در قالب کانه شلیت در داخل کوارتزیدیوریت‌ها به مقدار بیشتر و در گرانودیوریت‌ها به مقدار کم‌تر با عیار تنگستن ۰/۲۲ درصد صورت گرفته است (شکل a۳) (Khalaji et al., 2007). بررسی‌های صحرائی نشان می‌دهد که توده مزبور به صورت ارتفاعات گرانیتوئیدی و ارتفاعات پست دگرگونه، بخش کوچکی از زون سندر-سیرجان را تشکیل می‌دهد. این توده در اثر فرورانش ورقه اقیانوس نئوتتیس به زیر ورقه قاره‌ای پلاتفرم ایران حاصل شده است (Mohajjel et al., 2003). مهم‌ترین حادثه زمین‌شناسی این منطقه، پیدایش توده گرانیتوئیدی در زمان ژوراسیک میانی می‌باشد که در درون فیلیت‌ها نفوذ کرده و دگرگونی مجاورتی در اثر نفوذ آن به وقوع پیوسته است. توده‌های گرانیتوئیدی در منطقه مورد مطالعه شامل

کوارتزیدیوریت بصورت مرتفع، گرانودیوریت بصورت تپه‌های کم ارتفاع و مونوزوگرانیت بصورت توده‌های کوچک و پست می‌باشند. این گرانیت‌ها از نوع تیپ I، متالومین تا کمی پرآلومین و دارای بیوتیت و هورنبلند می‌باشند که خود شاهدهی بر محیط تکتونیکی قوس آشفشانی (VAG) آن‌ها می‌باشند. تعیین محل دقیق کنتاکت گرانیتوئیدهای مذکور بسیار مشکل و همچنین یافتن توده‌های گرانیتوئیدی سالم و بدون دگرسانی در این منطقه بس مشکل است. اکثر نمونه‌های توده گرانیتی مورد نظر دارای دگرسانی‌های سوپرزن می‌باشند که تشخیص آن‌ها در نمونه دستی مشکل است (Khalaji et al., 2007). گرانیت‌های اسفندار، بصورت استوک در درون گرانودیوریت‌ها و گاه بصورت رگه‌هایی با روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق، دایک‌های پگماتیستی و آپلیتی و رگه‌های کوارتز - تورمالین مینرالیزه، توده‌های گرانیتوئیدی منطقه را قطع کرده‌اند. گرانودیوریت‌ها که بخش عمده توده را تشکیل می‌دهند در نمونه دستی به رنگ خاکستری و در زیر میکروسکوپ دارای بافت گرانولار است (Mohajjel et al., 2003). اعتقاد بر آن است که فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر خرده قاره ایران مرکزی در مزوزوئیک و ترشیاری، باعث تشکیل کمان ماگمایی با ماهیت اصلی کالکوالکان در پهنه سندر - سیرجان و پهنه ارومیه - دختر شده است. به نظر محققان، در کرتاسه بالایی قطعاتی از پوسته اقیانوسی فرو رو شکسته شده و در اثر نیروی وارد از طرف پوسته قاره‌ای عربی مجدداً به فرورانش خود ادامه می‌دهد و طی ۵ تا ۱۰ میلیون سال ماگماتیسم را طی ائوسن ایجاد کرده است. چنین بنظر می‌رسد که ماگماتیسم گرانیتوئیدی در منطقه بین اراک تا بروجرد (شمال‌غرب پهنه ملایر - اصفهان) در پهنه سندر - سیرجان شمالی از ژوراسیک میانی (اشکوب باتونین) شروع شده و در آخرین فاز آن در اواخر ائوسن (پریابونین) بوده است. این محدوده زمانی می‌تواند زمان فرایند و تحولات الگوهای ارائه شده برای فرورانش صفحه عربی را روشن کند (Ghaderi et al., 2005).

به منظور تعیین ویژگی‌های بارز کانه‌زایی مواد معدنی در کمر بند فلززایی ملایر - اصفهان، پنج ذخیره معدنی شاخص مورد بررسی قرار گرفت که عبارتند از کانسار آهنگران با پتانسیل معدنی سرب، روی، طلا، نقره و آهن (Momenzadeh et al., 1979)، مجموعه معدنی ایرانکوه با پتانسیل معدنی سرب، روی، نقره و آهن (Hosseini, 2016; Sadeghi, 2018; Dinani and Aftabi, 2016)، با پتانسیل معدنی سرب و روی (Momenzadeh et al., 1979)، کانسار موه پتانسیل معدنی طلا، نقره، تنگستن، مولیبدن، مس، سرب و روی (Kouhestani et al., 2014) و کانسار روش (شکل b۳) با پتانسیل معدنی تنگستن، بر، منگنز، آهن و مولیبدن (Ghaderi et al., 2005). ویژگی‌های زمین‌شناسی معادن نام برده شده بصورت کامل در (جدول ۱) ارائه شده است.



شکل ۳- (a) نمایی از رگه کانه‌دار به همراه سنگ میزبان کوارتز دیوریتی در توده نفوذی بروجرد و (b) نمایی از رگه کانه‌دار در توده نفوذی روش. Fig. 3. (a) View of mineralization vein with diorite quartz host rock in Borujerd intrusion and (b) View of mineralization vein in Rusht intrusion.

جدول ۱- مشخصات معادن سرب و روی، طلا و تنگستن در پهنه ملایر - اصفهان (Rajabi et al., 2012; Momenzadeh et al., 1979).

Table 1. Zn-Pb, Au, and W index deposits in Malayer-Esfahan zone (Rajabi et al., 2012; Momenzadeh et al., 1979).

Deposits	Ahangaran	Emarat	Irankuh Mining district	Muteh	Rusht
Host rock	Dolomite, Sandstone	Limestone, Shale	Carbonate rock	Metamorphed limestone, Marble	Granite, Granodiorite
Host rock age	Early Cretaceous	Early Cretaceous	Early Cretaceous	Jurassic-Cretaceous	Triassic-Jurassic
Mineralization (Main)	Galena, Pyrite, Chalcopyrite, Pyrrhotite, Hematite	Sphalerite, Galena, Pyrite, Chalcopyrite	Sphalerite, Galena, Pyrite, Marcasite	Quartz, Pyrite, Chalcopyrite	Quartz, Tourmaline, Chalcopyrite, Scheelite, Bismuth
Metal elements	Pb, Zn, Au, Ag, Fe	Pb, Zn	Pb, Zn, Ag, Fe	Au, Ag, W, Mo, Cu, Pb, Zn	W, B, ±Mo±Mn±Fe

کیلومتری و فاصله خطوط کنترلی ۴۰ کیلومتر انجام شد. مغناطیس‌سنج مورد استفاده در این برداشت از نوع بخار سزیم با حساسیت ۰/۰۲ نانوتسلا بوده است. از آنجایی که بخشی از محدوده مورد مطالعه از آبرفت پوشیده شده و در برخی مناطق نیز ماهیت سنگ‌شناسی و پدیده فرسایش، امکان مشاهده مستقیم ساختارهای زمین‌شناسی را با مشکل مواجه می‌کند؛ لذا می‌توان با پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی از برخی از این موانع گذشت. خروجی داده‌های مغناطیسی برای تفسیر، معمولاً به شکل نقشه‌های کنتری و یا نیم‌رخ نشان داده می‌شوند و به کمک فیلترکردن می‌توان برای نمایش و جداسازی آنومالی‌ها استفاده کرد. ۶۴۰۶۹ تعداد داده برداشت شده از منطقه مطالعاتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این پژوهش با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی پهنه کانه‌زایی ملایر-اصفهان، نقشه شدت کل میدان مغناطیس منطقه تهیه و سپس با بکارگیری مقادیر ۵۱/۰۹ درجه برای زاویه میل و ۴/۱ درجه برای زاویه انحراف مغناطیسی، فیلتر برگردان به قطب (RTP) بر روی نقشه شدت کل میدان اعمال شد تا داده‌ها به شرایط میدان مغناطیسی زمین در قطب شمال برگردند. در ادامه فیلترهایی با

مواد و روش‌ها

داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد

برداشت‌های ژئوفیزیک هوایی به سه روش مغناطیس‌سنجی، الکترومغناطیس و رادیومتری توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (GIS) تهیه و مورد تفسیر قرار گرفته‌اند. مزایای غیر قابل اغماض در برداشت‌های ژئوفیزیک هواپرد، این روش را امروزه به یک روش کارآمد و سریع تبدیل کرده است. در این روش‌ها نواحی با وسعت بالا با سرعت قابل قبولی برداشت می‌شوند. برداشت‌های ژئوفیزیک هواپرد توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری که به هلیکوپتر یا هواپیما نصب شده، انجام می‌شود. در یک پروژه هواپرد به دلیل وسعت بالای منطقه تحت پوشش و برداشت در بازه‌های زمانی متفاوت، اثر تغییرات بلند مدت میدان مغناطیسی در داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی قابل مشاهده خواهد بود. برداشت‌های مغناطیسی هوایی در منطقه مورد مطالعه، بین سال‌های ۱۹۷۴ و ۱۹۷۷ میلادی، توسط شرکت ایروسرویس تگزاس و تحت نظارت سازمان زمین‌شناسی ایران، با فاصله خطوط پرواز ۷/۵

بیشتر است. بنابراین همزمان با این تصحیح به نوعی تصحیح ارتفاعی نیز نیاز خواهد بود. دلیل دیگری که برای ثابت نبودن مقدار IGRF برداشت‌های هوابرد می‌توان ذکر کرد، زمان می‌باشد. اگر زمان برداشت داده طولانی شود، در یک نقطه ثابت میزان IGRF تنها بسته به زمان می‌تواند حدود ۵۰ تا ۶۰ نانوتسلا تغییر کند. بر روی داده‌های مورد بررسی در این مقاله تصحیح IGRF قبلاً اعمال شده بود. برای جلوگیری از ابهام در فاز داده‌ها از فیلترهای تفکیک کیفی و کمی بی-هنجاری مانند سیگنال تحلیلی، مشتق قائم و ... بر روی نقشه RTP منطقه، استفاده می‌شود. در ادامه داده‌های مغناطیس هوایی منطقه مورد مطالعه به کمک نرم‌افزار Oasis Montaj مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت.

نقشه میدان مغناطیسی کل محدوده مورد مطالعه (TMI)

مقدار کل حاصل از نیروی مغناطیسی که توسط مغناطیس‌سنج اندازه‌گیری می‌شود از رابطه ۱ بدست می‌آید (Chowdary, 1971):

$$F = \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \\ = \left[T^2 + \frac{4m^2}{(x^2 + d^2)} + \frac{4mT}{(x^2 + d^2)} (x \cos I \cos \gamma - d \sin I) \right]^{1/2} \quad \text{رابطه (1)}$$

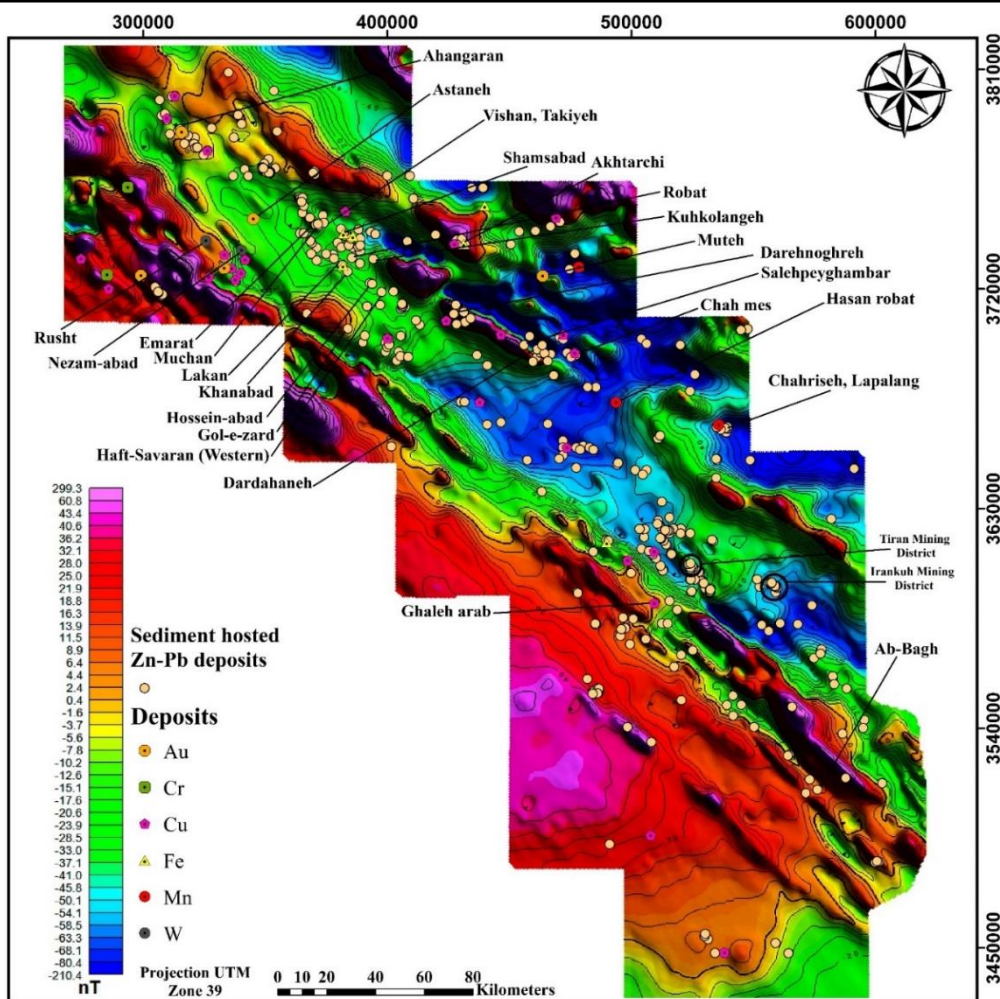
که I زاویه میل مغناطیسی، γ زاویه بین نصف‌النهار مغناطیسی و راستای پروفیل مورد نظر است. پارامتر m نیروی قطبی بر واحد طول و T پتانسیل ناشی از میدان نرمال زمین می‌باشد. پس از انجام مراحل پردازش و حذف اثرات غیرمرتبط با مقدار شدت میدان مغناطیسی واقعی بی‌هنجاری‌ها، نقشه‌ی بی‌هنجاری مغناطیسی با کیفیت بالا و عاری از نوفه و اثرات متفرقه مغناطیسی حاصل می‌گردد. این نقشه مقدار شدت میدان مغناطیسی کل را نشان می‌دهد و پایه‌ای برای تعیین مناطق پر اهمیت از نظر میدان مغناطیسی است. در این نقشه، میدان‌های دوقطبی که در راستای شمال‌غربی-جنوبی شرقی کشیده شده‌اند، مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری‌ها، در امتداد واحدهای مختلف زمین-شناسی موجود در منطقه قرار دارد. بیشترین مقدار میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در این منطقه حدود ۳۰۰ نانوتسلا و کمترین مقدار آن ۲۱۰- نانوتسلا می‌باشد. شکل ۴ نقشه شدت کل میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. از آن جایی که آنومالی‌های مغناطیس تحت تاثیر دوقطبی‌های موجود در میدان زمین هستند، نقشه شدت کل میدان مغناطیسی خود به تنهایی انتخاب درستی برای تفسیر نیست. بنابراین بایستی بر روی نقشه بدست آمده در شکل ۴ فیلتر برگردان به قطب اعمال گردد تا هر آنومالی بالای توده مسبب خود قرار گیرد.

هدف جداسازی آنومالی از زمینه بر روی نقشه RTP، اعمال شد. به منظور پردازش و تفسیر کیفی داده‌های مغناطیس هوایی، از نرم‌افزارهای Oasis Montaj ورژن ۶/۴ و ArcGIS ورژن ۱۰/۸ استفاده شده است.

بحث

پردازش داده‌های مغناطیس هوابرد

اندازه‌گیری داده‌های میدان پتانسیل یکی از ابزارهای مناسب در اکتشاف ذخایر معدنی است. در اکتشاف ذخایر معدنی، اغلب اندازه‌گیری‌ها به روش مغناطیسی به صورت مستقیم برای پی‌جویی کانی‌های مغناطیسی استفاده می‌شود، اما این روش برای اکتشاف کانی‌هایی که خود غیرمغناطیسی بوده و با کانی‌های مغناطیسی همراه هستند، نیز به کار می‌رود. با ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری، حتی می‌توان تغییرات بسیار جزئی شدت میدان مغناطیسی که در رابطه با سنگ‌های رسوبی نزدیک سطح زمین باشند را اندازه‌گیری کرد (Kwan and Legault, 2019). بنابراین، روش مغناطیس‌سنجی هوابرد یکی از روش‌های ژئوفیزیک هوایی است که بعلاوه سرعت و دقت بالای برداشت‌ها، پوشش گسترده، اقتصادی بودن و سهولت در برداشت، بیش از سایر روش‌ها برای پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی به کار برده می‌شود و معمولاً نتایج مطلوبی به دنبال دارد. روش مغناطیس‌سنجی هوایی در مقیاس بزرگ نیز برای تعیین محل گسل‌های بزرگ، مناطق خردشده و شکسته که اغلب در ارتباط با کانه‌سازی هستند، بسیار مفید واقع می‌شود (Chander et al., 2009). امروزه پی‌جویی‌های مغناطیسی به‌صورت هوایی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت‌های مغناطیس‌سنجی هوایی امروزه برای پی‌جویی ذخایر فلزی مانند فلزات پایه، آهن، کرومیت، طلا و ... به ویژه در نواحی بزرگ امری عادی، رایج و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. داده‌های مغناطیس هوابرد برداشت شده بایستی پردازش و تفسیر شوند تا بتوان ذخایر فلزی مورد نظر را پی‌جویی کرد (Sehsah et al., 2019). در روش مغناطیس‌سنجی، مغناطیدگی که ناشی از یک خاصیت ذاتی مواد به نام خودپذیری مغناطیسی است؛ حائز اهمیت بوده و به عوامل مختلفی بستگی دارد. در مقادیر مغناطیسی مشاهده‌ای یا قرائت شده آثار مزاحمی از عوامل و پدیده‌های مختلف وجود دارد که باعث تضعیف آثار ناشی از کانی‌سازی می‌شود؛ بنابراین باید از داده‌های مغناطیسی حذف گردد. در این گونه مطالعات چون آثار نوفه و حاشیه‌ای خیلی مؤثرند؛ بنابراین باید تصحیح IGRF با دقت بیشتری صورت پذیرند. در مطالعات مغناطیس‌سنجی زمینی، IGRF یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ اما در پروژه‌های هوابرد این‌گونه نیست. IGRF تابعی از چهار پارامتر است که سه پارامتر آن مکانی (X, Y, Z) و یک پارامتر آن زمانی است. در برداشت‌های هوابرد با بررسی مقادیرهای ماکزیمم و مینیمم ستون IGRF می‌توان مشاهده کرد، گاهی اختلاف این دو مقدار به ۳۰ نانوتسلا نیز می‌رسد و دلیل آن اختلاف ارتفاع پرواز در طی برداشت داده‌ها می‌باشد. پس در این گونه برداشت‌ها، اهمیت ارتفاع



شکل ۴- نقشه شدت کل میدان مغناطیسی پهنه فلززایی ملایر - اصفهان.

Fig. 4. Map of the intensity of the total magnetic field of the Malayer-Esfahan metallogenic zone.

هنجاری مغناطیسی بر روی توده مغناطیس قرار می‌گیرد (Blakely, 1996). به‌طور خلاصه، استفاده از فیلتر برگردان به قطب جهت دست-یابی به محل واقعی ناهنجاری‌ها با اعمال زاویه میل و انحراف مربوط به منطقه مورد مطالعه، انجام می‌شود (Clark, 1997; Kwan and Legault, 2019). به این منظور، بر اساس موقعیت جغرافیایی محدوده مورد بررسی و با لحاظ کردن مقادیر زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی به ترتیب ۵۱/۰۹ و ۴/۱ درجه با شدت کل میدان مغناطیسی ۴۷۲۳۰/۴ نانوتسلا، فیلتر برگردان به قطب اعمال شد.

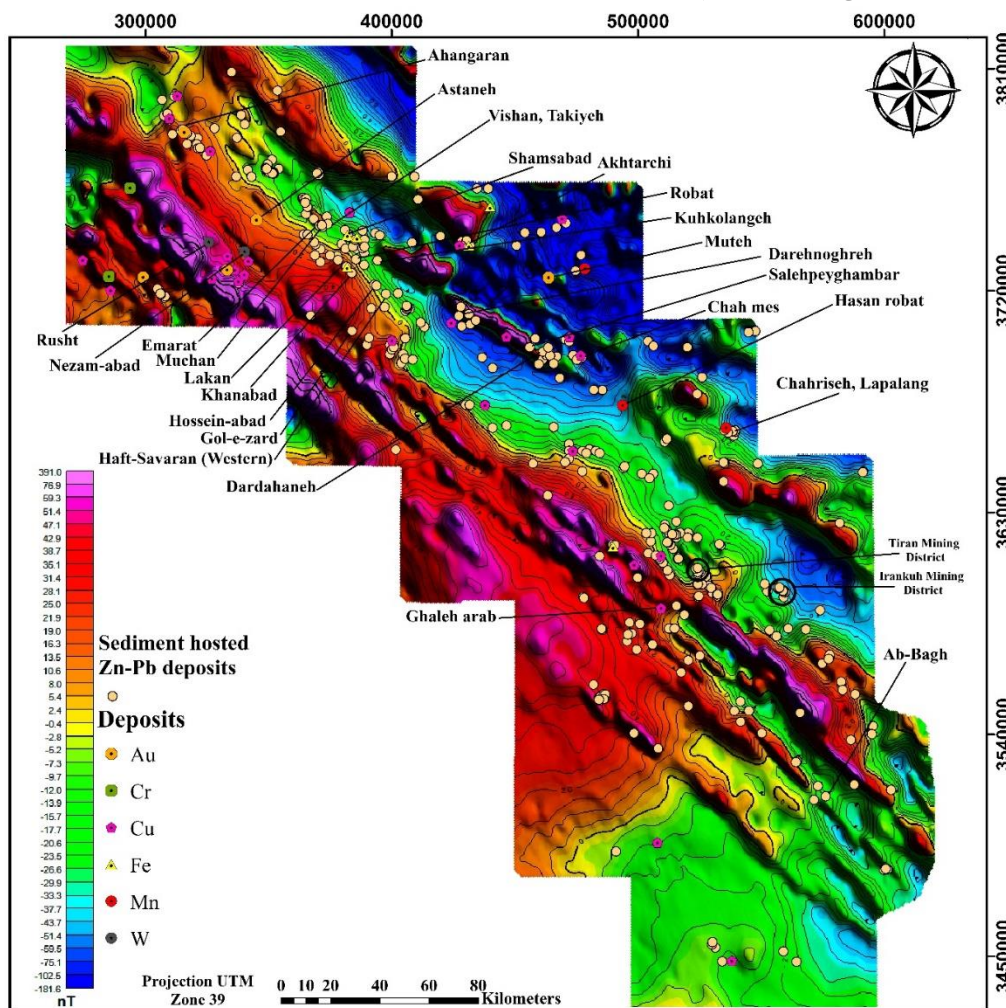
همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ این نقشه دقیقاً مشابه نقشه قبلی (شکل ۴) است؛ با این تفاوت که در این نقشه اندکی پیچش و جابجایی وجود دارد که دلیل این جابجایی و پیچش، جهت و مقدار میدان مغناطیسی زمین است. در عرض‌های جغرافیایی متفاوت مقادیر مختلفی دارد. در تطبیق این نقشه با نقشه زمین‌شناسی، بی‌هنجاری موجود در محدوده اختراچی که در شمال شرقی نقشه نشان داده شده-اند، بر روی واحد شیل-ماسه سنگ (ژوراسیک کرتاسه) قرار می‌گیرد که محل وجود ذخایر آهن است. در قسمت شمال غرب نقشه در توده نفوذی بروجرد-اراک نیز یک بی‌هنجاری دیده می‌شود که با انطباق آن با نقشه

فیلتر برگردان به قطب (RTP)

در تفسیر داده‌های مغناطیسی مهم‌ترین گام حذف اثر جابجایی میدان مغناطیسی است. بی‌هنجاری‌های گرانی مثبت تمایل دارند بر روی مرکز جرم توده تمرکز یابند، اما بی‌هنجاری‌های مغناطیسی زمانی که جهت مغناطیدگی و جهت میدان زمینه (Ambient field) هر دو با هم عمودی نیستند، صحت ندارد. به‌طور کلی اگر مغناطیدگی و میدان زمینه، عمودی نباشند، یک توزیع مغناطیدگی، به جای بی‌هنجاری مغناطیسی متقارن، بی‌هنجاری نامتوازن را تولید خواهد کرد. به عبارتی یک توده مغناطیسی مشخص بسته به موقعیت خود، بی‌هنجاری‌های مختلفی از خود نشان می‌دهد و این به دلیل تفاوت در مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین در نقاط مختلف آن می‌باشد. جهت تصحیح این اثر باید بردارهای مؤلفه میدان مغناطیسی زمین با مؤلفه‌های توده مغناطیسی هم‌جهت شوند. این عمل با فیلتر برگردان به قطب صورت می‌گیرد. در قطب شمال مغناطیسی جهت مغناطیدگی و میدان زمینه هر دو عمودی رو به پایین هستند. پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین با مؤلفه‌های توده آنومال، موازی و در جهت مرکز مغناطیدگی زمین واقع می‌شود و با این عمل پیک بی-

کربناته تشکیل می‌شوند. ماده معدنی مس در این پهنه غنی از پیریت، آسفالریت و گالن است که گاهی میزان کالکوپیریت در آن‌ها بالاست. در بیشتر موارد در کنسارهای مس رسوبی، چند لایه از ماده معدنی وجود دارد که ستبرای آن‌ها با همدیگر متفاوت است. به باور Singer (۱۹۹۵) این کنسارها تقریباً ۲۳ درصد ذخایر مس تولیدی دنیا را تشکیل می‌دهند و همین‌طور منابع مهمی برای فلزاتی از جمله نقره و کبالت به شمار می‌روند (Singer, 1995).

زمین‌شناسی، بی‌هنجاری بر روی واحد گرانیت-گرانودیوریت قرار می‌گیرد که نشان از وجود ذخایر تنگستن، کروم و مس دارد. همچنین آنومالی دیده شده در قلعه عرب واقع در مرکز محدوده مرتبط با کانی سازی مس می‌باشد. در جنوب شرقی نقشه مقادیر بالای مغناطیسی مربوط به رسوبات میزبان ذخایر سرب و روی در بستر سنگ‌های آهک کرتاسه پیشین می‌باشد که در منطقه آب باغ واقع شده است. ذخایر مس موجود در پهنه ملایر-اصفهان عمدتاً جزء ذخایر مس رسوبی بشمار می‌روند و همراه با سرب و روی و گاهی نقره و کادمیوم با سنگ میزبان



شکل ۵- نقشه شدت کل میدان مغناطیسی زمین پس از اعمال فیلتر RTP برای پهنه ملایر - اصفهان.

Fig. 5. Intensity map of the total magnetic field of the earth after applying RTP filter for Malayer-Esfahan zone.

تعیین محل منبع‌های مغناطیسی کاربرد دارد. سیگنال تحلیلی مطابق رابطه ۲ تابعی است که میدان مغناطیسی را با مشتق ارتباط می‌دهد.

$$|A(X, Y)| = \left[\left(\frac{\partial m}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (2)}$$

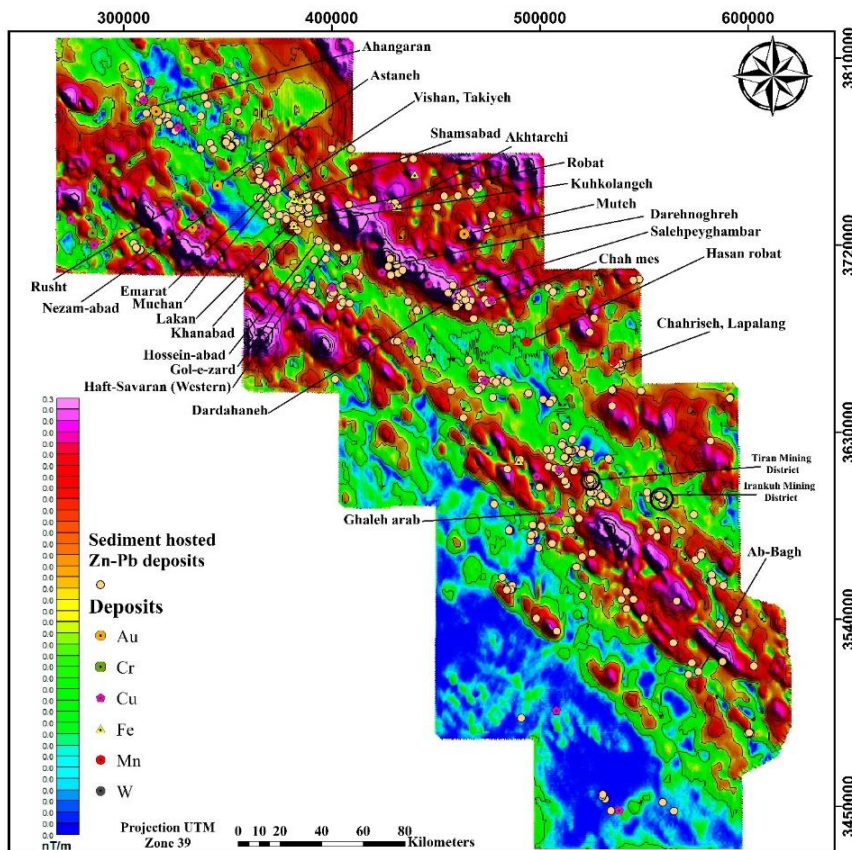
که در آن $\frac{\partial m}{\partial x}$ ، $\frac{\partial m}{\partial y}$ و $\frac{\partial m}{\partial z}$ به ترتیب مشتق‌های میدان نسبت به x ، y و z هستند و m همان آنومالی مغناطیسی می‌باشد. این تابع در زمینه تفسیر کارایی بسیار جالبی دارد. این تابع کاملاً به جهت مغناطیسی شدن

سیگنال تحلیلی

سیگنال تحلیلی با استفاده از مشتق در جهات مختلف اثر روند منطقه‌ای که از نوع درجه اول است را در سه جهت حذف می‌کند و با حذف اثر آنومالی‌های سطحی بدنه مغناطیسی را بهتر نشان می‌دهد (Ganiyu et al., 2013). مشکلات این روش یکی فاصله بدنه مغناطیسی نسبت به سطح زمین است که هرچه نزدیکتر باشد پاسخ مناسب‌تر است و دیگری اختلاف اثر خودپذیری بدنه مغناطیسی و سنگ‌های اطراف است که هرچه اختلاف بیشتر باشد، نقشه سیگنال تحلیلی واضح‌تر است (Nasri et al., 2020). سیگنال تحلیلی در

(Ganiyu et al., 2012). همچنین با استفاده از این تابع تحلیلی می‌توان موقعیت یک منبع مغناطیسی، بدون توجه به مغناطیس باقیمانده مربوط به منابع گوناگون را تعیین کرد. شکل ۶ نقشه حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی را نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده وجود توده‌ها یا آنومالی‌های متعدد مغناطیس و بارز کننده موقعیت تقریبی لبه‌های توده‌های مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه است.

و جهت میدان زمین وابسته است. این بدان معنی است که همه توده‌ها با هندسه یکسان دارای سیگنال تحلیلی یکسانی هستند. علاوه بر این که، همچنان که این بیشینه‌ها متقارن هستند، مستقیماً در بالای لبه‌های توده‌های عریض و دقیقاً در بالای مرکز توده‌های باریک تشکیل می‌شوند، به این ترتیب به آسانی هندسه مورد نظر تعیین می‌شود. به نظر می‌رسد که این تابع تحلیلی ابزار ارزشمندی برای تفسیر باشد



شکل ۶- سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی پهنه ملایر-اصفهان.

Fig. 6. Analytical signal magnetic field Malayer-Esfahan zone.

می‌دهند. فیلترهای فاز محلی معمولاً نتیجه مناسبی ارائه می‌دهد. محاسبه مشتق قائم مرتبه اول میدان مغناطیسی، یک روش پرکاربرد برای واضح‌تر کردن آنومالی‌های محلی است و اثر این روش ضعیف کردن آنومالی منطقه‌ای و تقویت آنومالی محلی است. با اعمال این فیلتر، آنومالی‌های سطحی نمود بیشتری پیدا می‌کند. بدین‌وسیله می‌توان رفتار یک توده‌های مغناطیسی را در سطح، بهتر مورد بررسی قرار داد (Gunn et al., 1997). روش مشتق قائم برای تقویت آنومالی‌های سطحی و کم عمق تر و تضعیف آنومالی‌های عمیق از جمله پی‌سنگ‌های منطقه در برداشت‌های هوایی است (Gunn, 1996). در برداشت‌های زمینی نیز برای اکتشاف مواد معدنی در بعضی موارد اهمیت زیادی دارد. از جمله کاربردهای آن تعیین مرز منشأهای مغناطیسی و جدایش آنومالی از زمینه است (Neawsuparp et al., 2005). نقشه بدست آمده در نتیجه اعمال فیلتر مشتق قائم اول روی داده‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. در این نقشه،

فیلتر مشتق قائم

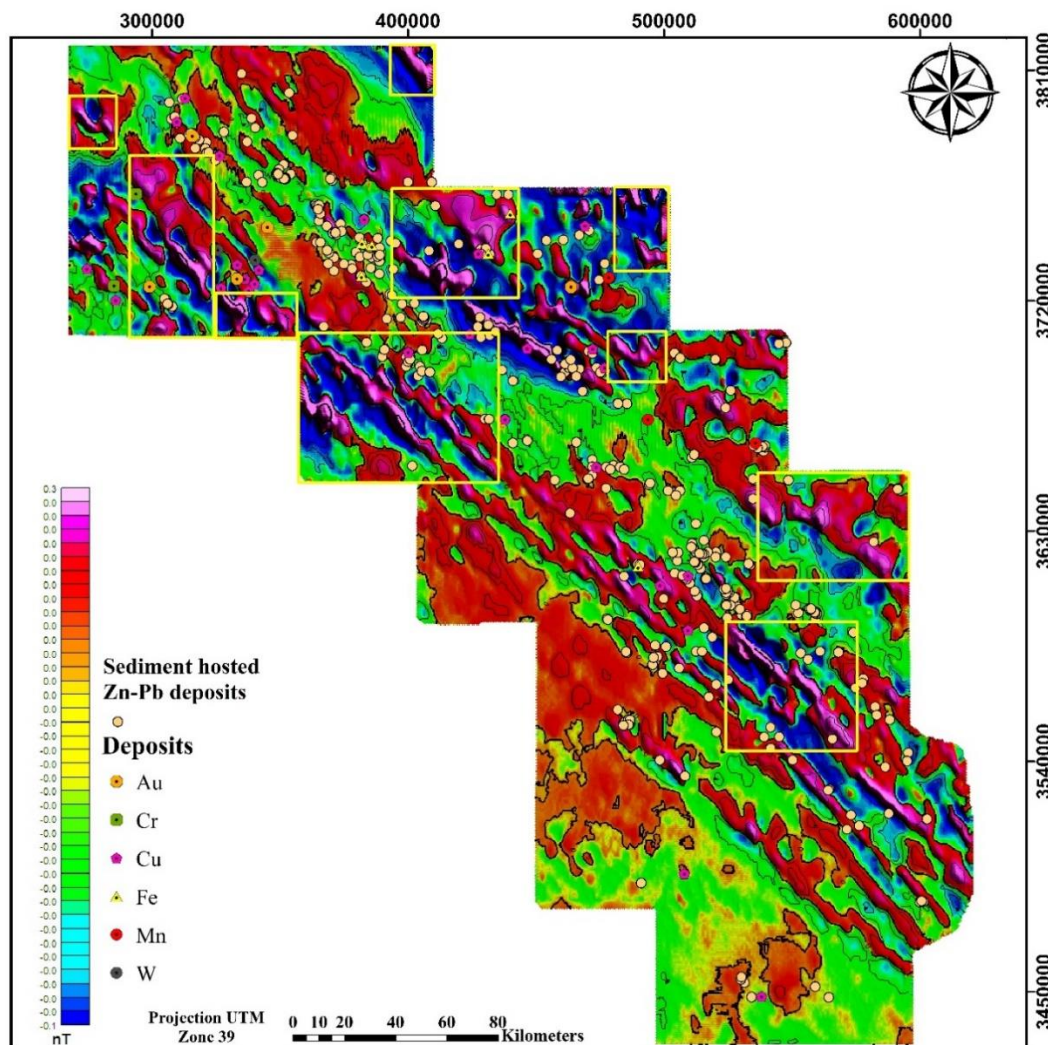
استفاده از روش گردایان قائم میدان پتانسیل نقش بسیار مهمی در بارزسازی ساختارهای زیرسطحی دارد و سبب وضوح بهتر اشکال آنومال به ویژه در لبه‌های آن‌ها خواهد شد. استفاده از فیلترهای فازی برای شناسایی لبه در داده‌های میدان پتانسیل مفید است. بطور ساده، رابطه ۳ برای تعریف این مشتق در حوزه مکان کارایی دارد (Blakely, 1996).

$$\frac{\partial}{\partial z} \phi(x, y, z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\phi(x, y, z) - \phi(x, y, z - \Delta z)}{\Delta z} \quad \text{رابطه (3)}$$

در این رابطه، $\phi(x, y, z)$ تابع پتانسیل و Δz مشتق مرتبه اول در راستای قائم می‌باشد. این فیلتر با تغییر فازی که در داده به وجود می‌آورد؛ لبه‌ها را به خوبی بارز می‌کنند؛ اما نوفه در داده را نیز افزایش

ساده مشتق قائم میدان پتانسیل، عبارت است از میدان اندازه‌گیری شده در راستای قائم در ارتفاع بالاتر، منهای میدان اندازه‌گیری شده هم راستای آن در ارتفاع پایین‌تر، تقسیم بر اختلاف ارتفاع بین دو نقطه. مشتق قائم، اثر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای را کاهش می‌دهد و دارای وضوح و درجه تفکیک‌پذیری بیشتری نسبت به میدان اصلی است (Baniamerian et al., 2012). آنومالی‌های پنهان و جدید بدست آمده از فیلتر مشتق قائم در شکل ۷ با حاشیه زرد رنگ مشخص شده‌اند.

چون اثر آنومالی‌های بزرگ و عمیق از بین رفته است، در نتیجه تجزیه توده‌های مغناطیسی را می‌توان مشاهده کرد. پس آهنگ تغییرات در عمق توسط فیلتر مشتق قائم بررسی می‌شود. از آنجا که اثر بی‌هنجاری‌های عمیق در گرادیان‌ها سریع از بین می‌رود، جهت بررسی بی‌هنجاری‌هایی با منشأ سطحی ترجیح داده می‌شوند و در نتیجه روشی مناسب برای شناسایی ساختارهای کم عمق نظیر گسل، ناودیس و تاقدیس می‌باشد (Blakely, 1996). به زبان



شکل ۷- فیلتر مشتق قائم مرتبه اول میدان مغناطیسی و شناسایی نواحی امیدبخش معدنی پنهان و جدید در پهنه ملایر-اصفهان.

Fig. 7. First-order vertical derivative filter magnetic field and Identification of hidden and new mineral deposits zone of the Malayer-Esfahan.

(Cooper and Cowan, 2003)، می‌توان تنها به همین مرتبه در مشتق‌گیری قائم اکتفا کرد.

آنومالی‌های بدست آمده از فیلتر مشتق قائم در محدوده مورد مطالعه نشان داد که این آنومالی‌ها بصورت پراکنده با سنگ‌های آهک کرتاسه زیرین، شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک تا کرتاسه و توده نفوذی گرانیت-گرانودیوریت موجود در منطقه که بخش اعظم آن در شمال غرب پهنه ملایر-اصفهان قرار دارد همپوشانی نسبی نشان می‌دهد. به دلیل اینکه توده نفوذی گرانیت-گرانودیوریتی تریاس-ژوراسیک، سنگ‌ها و کانی‌های تشکیل دهنده آن از سنگ‌های رسوبی (مثل سنگ‌های آهک)

نقشه مشتق قائم از آنجا که نوعی فیلتر بالاگذر می‌باشد، تصویری فیلتر شده از میدان مغناطیسی فراهم می‌آورد که ویژگی‌های زمین-شناسی نزدیک سطح زمین را برجسته‌تر می‌کند. از بین مشتقات قائم، مشتق مرتبه اول جهت بررسی اجسام نزدیک به سطح مناسب‌تر می‌باشد، زیرا تفکیک بی‌هنجاری توسط مشتق مرحله اول راحت‌تر و حداکثر محدوده مربوط به بی‌هنجاری‌ها تعیین می‌گردد (Blakely, 1996). با توجه به این نکته که مشتقات قائم حساس به نوفه بوده و با افزایش مرتبه مشتق‌گیری، دامنه نوفه‌ها بسیار افزایش می‌یابد

درون این توده گرانیت-گرانودیوریتی تشکیل شده است. از جمله کانسارهای شاخص تشکیل شده در این توده آذرینی گرانیت-گرانودیوریتی تریاس-ژوراسیک می‌توان به کانسارهای تنگستن روشت و نظام‌آباد و طلای آستانه اشاره کرد. در این محدوده کانه‌زایی، محلول هیدروترمال به‌صورت توده‌های بزرگ به همراه مواد پارائزن که خاصیت مغناطیس‌پذیری دارند مانند هماتیت، مگنتیت و ... است. در قسمت شمال‌غرب و مرکز پهنه ملایر-اصفهان با توجه به توده مغناطیسی بزرگی که از جنوب‌شرق به سمت شمال‌غرب کشیده شده و در قسمت‌های شمال‌غربی منطقه رخنمون بیشتری از خود نشان می‌دهد. به‌طور کلی نقشه مشتق اول قائم نشان داد کانسارهای آهن شمس‌آباد و اخترچی، کانسار طلای آستانه و موته، کانسار تنگستن روشت، کانسار مس قلعه عرب، کانسارهای سرب و روی آهنگران، صالح‌پیغمبر، آب باغ، دردهانه، خان‌آباد، لکان و ... همپوشانی بالایی با آنومالی‌های حاصل از این فیلتر در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند.

Mojarad و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی که در ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ مشکین‌شهر انجام دادند با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای ابرطیفی و داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی به پتانسیل-یابی مواد معدنی پرداختند. در این مطالعه مشخص شد نتایج حاصل از دورسنجی و پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی با هم همخوانی داشته و می‌توان از هرکدام از این روش‌ها به عنوان روشی جدا جهت شناسایی نواحی امیدبخش معدنی استفاده کرد. Mojarad (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای جهت پتانسیل‌یابی سنگ آهن در شرق نیریز فارس، از روش مغناطیس‌سنجی استفاده کرد و نشان داد که با اعمال فیلترهای برگردان به قطب (RTP)، ادامه فراسو تا ارتفاع ۱۰۰ متری، مشتق قائم مرتبه اول، سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت (کجی) می‌توان آنومالی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را شناسایی و مورد اکتشاف قرار داد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته و نقشه مشتق اول قائم که به عنوان نقشه مرجع برای تجزیه و تحلیل در این مطالعه در نظر گرفته شده (شکل ۷)؛ می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که در نواحی شمالی و مناطق جنوب‌شرق (کم‌تر) پهنه ملایر - اصفهان بصورت پراکنده مناطقی وجود دارد که با توجه به اینکه آنومالی به بیشترین حد خود رسیده (پیک آنومالی) اما ذخیره‌ای در این مناطق دیده نمی‌شود. می‌توان این مناطق را به عنوان مناطقی نام برد که دارای پتانسیل برای تشکیل ذخایر فلزی جدید و پنهان هستند لذا با توجه به اینکه در مناطق مشخص شده معادن کمی ثبت شده‌اند و یا فاقد معدن هستند می‌توان انتظار اکتشاف مناطق امیدبخش معدنی جدید در پهنه ملایر-اصفهان را داشت. بطور کلی برای صحت و دقت نواحی امیدبخش معدنی جدید و پنهان شناسایی شده این موارد پیشنهاد می‌شود: الف) انجام بازدید صحرایی، نمونه‌برداری، طیف‌سنجی. ب) استفاده از دورسنجی و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا برای بارسازی آنومالی‌ها. ج) تلفیق داده‌های ژئوفیزیک با داده‌های زمین‌شناسی و رسوبات آبراهه-ای.

خاصیت مغناطیسی بیشتری دارند بنابراین بی‌هنجاری‌های نشان داده شده با توده‌های نفوذی انطباق مناسب تری دارند.

در مغناطیس‌سنجی به علت استفاده از فیلتر برگردان به قطب، پیک بی‌هنجاری، نشان‌دهنده مرز و لبه آنومالی نبوده، بلکه روی مرکز آنومالی قرار می‌گیرد (Blakely, 1996). در این نقشه (شکل ۷)، بیشینه مقدار عددی سیگنال تحلیلی حدود ۰/۳ نانوتسلا بر متر است که با طیف رنگی بنفش نمایش داده شده و مقادیر کمتر از آن در حدود چند هزارم نانوتسلا بر متر هستند که با رنگ‌های قرمز، زرد، سبز و آبی مشخص شده‌اند، این مقادیر در شمال‌شرق، مرکز و جنوب‌شرق نقشه به ترتیب بیانگر واحدهای زمین‌شناسی آهک کرتاسه پایینی، شیل-ماسه-سنگ ژوراسیک تا کرتاسه و گرانیت-گرانودیوریت (شمال‌غرب پهنه ملایر اصفهان) می‌باشند. با اعمال این فیلتر، اثر سنگ‌های آهکی مثل کلسیت، دولومیت، سنگ‌های رسوبی مثل شیل و ماسه‌سنگ و گرانیت و گرانیتوئیدهای تریاس-ژوراسیک (شمال‌غرب پهنه) به خوبی دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش شناسایی توده‌های معدنی پنهان با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوایی در واحدهای رسوبی مانند سنگ‌آهک، شیل، ماسه‌سنگ و ... است که در شکل ۷ نشان داده شد. در این مطالعه ملاک برای شناسایی نواحی امیدبخش معدنی، نقشه مشتق قائم حاصل از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوارد است چون این فیلتر به خوبی می‌تواند رخنمون‌های معدنی و پنهان را نمایان سازد. با مقایسه نقشه حاصل از این فیلتر با جایگاه کانسارهای مختلف در پهنه ملایر - اصفهان به این نکته می‌رسیم که بیشتر از اینکه که آنومالی‌های حاصل از فیلتر مشتق قائم ذخایر متعدد سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی در منطقه را پوشش دهد؛ این آنومالی‌ها ذخایر آهنی مانند طلا، آهن، مس، تنگستن، کروم و منگنز توانسته به خوبی پوشش دهد زیرا کانی‌های تشکیل دهنده این ذخایر مثل مگنتیت، گوتیت، هماتیت، ایلمنیت و ... اغلب دارای خاصیت مغناطیسی هستند. ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی موجود در پهنه ملایر - اصفهان اغلب از نوع MVT و Sedex هستند و کانی‌های تشکیل دهنده این ذخایر، دارای خاصیت مغناطیسی کمی هستند به همین علت آنومالی‌های بدست آمده با این ذخایر همپوشانی کمتری نشان می‌دهد. البته ذکر این نکته ضروری است که آنومالی‌های بدست آمده با بعضی از ذخایر سرب و روی همپوشانی مناسبی نشان داد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان کرد که بعضی از کانی‌های اصلی سرب و روی مثل کانی پیریت در صورت هوازگی اکسیده شده و به هماتیت و گوتیت تبدیل شده و این کانی‌های آن نیز جزء کانی‌هایی محسوب می‌شود که خاصیت مغناطیسی از خود نشان می‌دهد.

همانطور که از نقشه‌های مشتق قائم، نقشه برگردان به قطب و سیگنال تحلیلی مشخص است در بخش شمال‌غربی پهنه ملایر - اصفهان توده آذرین بصورت پیشرفته وجود دارد که در همین محدوده با توجه به شکل ۲ کانه‌سازی رخ داده و کانسارهای، مس، طلا و تنگستن

منابع

- Ahmadi Khalaji, A., Valizadeh, M., W., Ismaili, D., 2007. Petrology and geochemistry of Boroujerd granitoid massif (western Iran). *Journal of Science, University of Tehran* 1, 1104-1016.
- Asgari, A., 2008. Astrology of Astana granitoid mass and its comparison with adjacent igneous masses, Ph.D Thesis, Islamic Azad University, Research Sciences Branch.
- Baniamerian, J., Oskooi, B., Imani, P., 2012. The analytic signal and derivatives of the fractional orders for potential fields (applications in processing and interpretation). *Iranian Journal of Geophysics* 6, 1-16.
- Bishop, J. R., Lewis, R.J.G., 1992. Geophysical signatures of Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology* 87, 913-930.
- Blakely, R.J., Simpson, R.W., 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics* 51, 1494-1498.
- Blakely, R. J., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge university press.
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM⁺, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113, 893-903.
- Clark, D. A., 1997. Magnetite petrophysics and magnetite petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 83-103.
- Clark, D. A., 1999. Magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exploration and magnetic interpretation. *Exploration Geophysics* 30, 5-26.
- Cooper, G.R., Cowan, D.R., 2008. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics* 73, H1-H4.
- de Castro, D. L., Fuck, R. A., Phillips, J. D., Vidotti, R. M., Bezerra, F. H., Dantas, E. L., 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics* 614, 128-145.
- Dobrin, M. B., Savit, C. H., 1988. Introduction to geophysical prospecting (Vol. 4), New York: McGraw-hill.
- Ehya, F., Lotfi, M., Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences* 37, 186-194.
- Ekwok, S. E., Akpan, A. E., Ebong, E. D., 2019. Enhancement and modelling of aeromagnetic data of some inland basins, southeastern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences* 155, 43-53.
- Ekwok, S. E., Akpan, A. E., Kudamnya, E. A., 2020. Exploratory mapping of structures controlling mineralization in Southeast Nigeria using high resolution airborne magnetic data. *Journal of African Earth Sciences* 162, 103700.
- Eldosouky, A. M., Elkhateeb, S. O., 2018. Texture analysis of aeromagnetic data for enhancing geologic features using co-occurrence matrices in Elallaqi area, South Eastern Desert of Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* 7, 155-161.
- Eldosouky, A. M., 2019. Aeromagnetic data for mapping geologic contacts at Samr El-Qaa area, North Eastern Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences* 12, 2.
- Ferreira, F. J., de Souza, J., de B. E S. Bongiolo, A., de Castro, L. G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics* 78, J33-J41.
- Ghaderi, M., Fardin Doust, Z., Herin, J., 2005. Study of rare earth elements in the tungsten deposits scheelite of southwest of Arak threshold. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 13, 29-42.
- Ganiyu, S. A., Badmus, B. S., Awoyemi, M. O., Akinyemi, O. D., 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.
- Gunn, P. J., 1996. Workshop Interpretation of aeromagnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*.
- Gunn, P. J., Maidment, D., Milligan, P. R., 1997. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17, 175-186.
- Hosseini-Dinani, H., Aftabi, A., 2016. Vertical litho-geochemical halos and zoning vectors at Goushfil Zn-Pb deposit, Irankuh district, southwestern Isfahan, Iran: Implications for concealed ore exploration and genetic models. *Ore Geology Reviews* 72, 1004-1021.
- Jafari, M.A., Nzarpour, A., Kananian, A., 2020. Comparison accuracy of Fuzzy-GAMMA and analytical hierarchy process (AHP) two methods with the potential detection of Cu metal in Malayer-Aligoudarz-Esfahan metallogenic zone. *Advanced Applied Geology* 10, 314-327.

- Kamkar Rouhani, A., Beiki, M., 2009. Processing and interpretation of airborne magnetic data for prospecting chromite deposits in the Sabzevar area. *Journal of the Earth and Space Physics*, 35(3).
- Khalaji, A. A., Esmaeily, D., Valizadeh, M. V., Rahimpour-Bonab, H., 2007. Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 29, 859-877.
- Kouhestani, H., Rashidnejad-Omran, N., Rastad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R. J., Ghaderi, M., 2014. Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 91, 89-106.
- Kwan, K., Johnson, I., Legault, J. M., Khaled, K., 2019. Mineralisation predictive targeting using TensorFlow (Google) deep neural networks. *ASEG Extended Abstracts*, pp. 1-5.
- Leach, D. L., Bradley, D., Lewchuk, M. T., Symons, D. T., de Marsily, G., Brannon, J., 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research. *Mineralium Deposita* 36, 711-740.
- Mojarad, S., Nejati kalate, A., Aghajani, H., 2019. Mineralization potential and integration of airborne magnetometric geophysical data data and EO-1, ASTER ester and Landsat-7 ETM⁺ hyperspectral satellite data (Sheet 1: 100,000 Meshkinshahr). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS* 11(3), 113-142.
- Mojarad, S., 2020. Iron Ore Potential Mapping Using Remote Sensing and Magnetometric Geophysical Surveys in Northeast of Neyriz, Fars Province. *Journal of Mineral Resources Engineering* 5(1), 1-20.
- Miller, H. G., Singh, V., 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics* 32, 213-217.
- Milligan, P.R., Gunn, P.J., 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17, 63-75.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L., Sahandi, M. R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.
- Momenzadeh, M., 1976. Stratabound lead-zinc ores in the Lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malayer-Esfahan district (west central Iran), lithology, metal content, zonation and genesis. Heidelberg, University of Heidelberg, 300.
- Momenzadeh, M., Shafiqhi, S., Rastad, E., Amstutz, G.C., 1979. The Āhangarān lead-silver deposit, SE-Malāyer, West Central Iran. *Mineralium Deposita* 14, 323-341.
- Nasri, .S., Nejati Kalateh, A., Roshandel Kahoo, A., Soleimani Monfared, M., 2020. New insights into the structural model of the Makran subduction zone by fusion of 3D inverted geophysical models. *Journal of Asian Earth Sciences* 188, 104075.
- Newsuparp, K., Charusiri, P., Meyers, J., 2005. New processing of airborne magnetic and electromagnetic data and interpretation for subsurface structures in the Loei area. *Northeastern Thailand: ScienceAsia* 31, 283-298.
- Pedersen, L.B., 1977. Interpretation of potential Field data a Generalized Inverse APPROACH. *Geophysical Prospecting* 25, 199-230.
- Rajabi, A., Mahmoodi, P., Rastad, E., Niroomand, S., Canet, C., Alfonso, P., Yarmohammadi, A., 2019. Comments on “Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50 km: Key to formation of Irankuh-Emarat Pb-Zn MVT belt, Central Iran” by Mohammad Hassan Karimpour and Martiya Sadeghi. *Journal of Geochemical Exploration* 205, 106346.
- Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C., 2013. Metallogeny of Permian-Triassic carbonate-hosted Zn-Pb and F deposits of Iran: a review for future mineral exploration. *Australian Journal of Earth Sciences* 60, 197-216.
- Sehsah, H., Eldosouky, A. M., El Afandy, A. H., 2019. Unpaired ophiolite belts in the Neoproterozoic Allaqi-Heiani Suture, the Arabian-Nubian Shield: Evidences from magnetic data. *Journal of African Earth Sciences* 156, 26-34.
- Siemon, B., 2001. Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics* 46, 65-76.
- Telford, W.M., Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Sheriff, R. E., 1990. *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Valizadeh, M., Ghasemi, H., 1993. Petrogenesis of Buin-Miandasht granitoid massif, southeast of Aligudarz. *Journal of Geoscience* 7, 83-74.
- Wijns, C., Perez, C., Kowalczyk, P., 2005. Theta map: Edge detection in magnetic data. *Geophysics* 70, 39-43.
- Wilson, G.A., Fraser, S., Cox Leif, H., Cuma, M., Zhdanov, M., Vallee, M.A., 2011. Lithological Classification of large-scale 3D inversion of airborne electromagnetic, gravity gradiometry, and magnetic data – A case study from Reid-Mahaffy. Ontario, SEG San Antonio 2011 Annual Meeting, 624-628.

Yarmohammadi, A., Rastad, E., Rajabi, A., 2016. Geochemistry, fluid inclusion study and genesis of the sediment-hosted Zn-Pb (\pm Ag \pm Cu) deposits of the Tiran basin, NW of Esfahan, Iran. Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry 193, 183-203.