

Research Article

Inverse modeling and interpretation of magnetic and geoelectrical data in the gold area of Hassan Abad (south of Golpayegan)

Ahadolah Fazeli Oladi¹, Hassan Zamanian^{2*}

1- Department of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Tehran University, Tehran, Iran

Keywords: *Gold, Magnetometry, Specific resistivity, Induced polarization, Inverse modeling*

1-Introduction

The Sanandaj-Sirjan zone is the most active zone in Iran from the tectonic point of view. The most crucial deformation and transformation event that affected Sanandaj-Sirjan is related to the closing of the Neotethys Ocean and related orogenic processes, which took place during the Mesozoic era. The studies and examination of the structures in this region have a particular complexity, indicating several ductile and brittle-ductile metamorphic phases (Mohajjel et al., 2003). During orogenic processes, orogenic gold deposits are formed, an essential and economical type of gold mineralization (Groves et al., 2003). These deposits occur in metamorphic belts (Bierlein and Growe, 2000; Grow, 2000; Goldfarb et al., 2001). Considering the geodynamic tectonic position of the active continental margin of the Sanandaj-Sirjan zone, it can be expected that gold mineralization of the orogenic type occurred in most parts of this zone (Aliyari et al., 2012; Niromand et al., 2011). Several orogenic gold deposits have been introduced in this area (Rashidnejad-Omran et al., 2001; Kouhestani et al., 2006; Abdollahi et al., 2009; Asadi et al., 2018).

Essential geological units from old to new include black slates, phyllites, mica schists, and metamorphosed greywacke sandstones with shale and talc schist interlayers. On the other hand, there are limited outcrops of dolomite limestone in the vicinity of the mineralized zone in the southwest. The outcrop rock units in the area, which are medium to low metamorphosed greenschist facies, include a collection of calc schist, phyllite, schist, metamorphic sandstone, and sometimes metamorphosed volcanic rocks. The age of these units is attributed to the Late Paleozoic to Jurassic periods. An essential mineralized silica zone is located in the west and southwest of the Hassan Abad area. In the range of stone sequences, under the influence of several metamorphic phases, they lose their original order and show new fabrics. The type and intensity of deformation are not the same, but different types of deformations are observed in the region as shear zones, from ductile to brittle to brittle. Gold and tungsten mineralized during the transition from ductile to brittle and brittle shear zones. Gold mineralization in the transition zones from malleable to brittle has a lens-shaped geometry in the direction of slope and extension. The empty spaces that were formed during the deformation and mylonitization process along with the foliation, as well as the micro-fractures in the porphyroclasts that were created during the cataclastic flow of the crystals, both by quartz and sulfide minerals of the hydrothermal stage. They are filled at the same time.

The interesting point is that gold grade changes are closely related to metamorphosis. This relationship is determined by the results of the chemical analysis of the samples taken from the trenches and surface samples that were dug perpendicular to the trend of the rock units so that the high grades of gold are strongly deformed into siliceous and sulfide parts. (mylonite and cataclasite) belong. The mineralogy of the mineral includes pyrite, arsenopyrite, galena, sphalerite, chalcopyrite, and pyrrhotite. Based on the studies, the fabrics determining the cutting direction in this range include sigma-type porphyroclasts and Z-shaped

* Corresponding author: hasanzamanian@yahoo.com

DOI: 10.22055/aag.2024.44283.2393

Received: 2023-07-26

Accepted: 2024-05-03

folds. The Z-shaped porphyroclasts observed in the ore units have a core zone of quartz or orthoclase, are well visible on a macroscopic scale, and represent a left-handed shear movement.

2-Material and methods

The presence of sulfide minerals with low specific resistance and high electrical chargeability next to the siliceous areas associated with gold and silver mineralization, which have high specific resistance and lower electrical chargeability, provides enough contrast to using specific resistance and induced polarization (IP) methods. In the last few decades, extensive studies have been conducted on geophysical methods (magnetometry, specific electrical resistance, and IP) in the search for gold deposits.

3-Results and discussions

The present study investigates the geophysical data collected in the Hasan Abad gold field. This study aims to identify areas with mineral potential with the help of the results obtained from geophysical data and to determine the points related to mineralization using two-dimensional and three-dimensional inverse modeling of geophysical data. In this regard, after the inversion of magnetic data, specific resistance, and induced polarization, the spatial relationship between gold mineralization and changes in magnetic susceptibility, specific resistance, and electrical chargeability is investigated. Then, the spatial relationship between gold mineralization and changes in the mentioned geophysical quantities is shown by comparing the mentioned models with the geological information and the results of geochemical analysis of the boreholes in the area. To cover the Hassan Abad area, 66 profiles with northeast-southwest direction (N39E) with a data collection grid of 25 x 50 meters were selected as identification, and the extension of profiles was selected as northeast-southwest and all measurements It has been taken on profiles in this direction. At the time of harvesting, the intensity of the reference magnetic field (IGRF) in the studied area is 47386 nanotesla. Figure 4(a,b) shows the magnetic field intensity map of the region before and after applying daily corrections and removing the geomagnetic reference field. In addition to the magnetometer survey, the IP/RS survey was conducted in the Hasanabad area of 5 profiles. The samples were taken with a polar-dipole array for one profile with an electrode distance of 20 meters to a depth of 50 meters and a bipolar-dipole array for four profiles with electrode distances of 10 and 20 meters to a depth of about 40 meters. Although by applying the usual processing on the magnetic data, it is possible to find out the location of the magnetic masses or roughly estimate the depth of the magnetic sources with Euler's mixing method, the precise determination of the shape and depth of the magnetic self-susceptibility masses The above requires doing inverse modeling of the data. In other geophysical methods, such as electrical resistivity and induced polarization, determining inhomogeneity shape and depth is only possible by performing inverse data modeling. In order to invert the magnetic data, Mag3D 4.0 software was used. Lee and Aldenberg provide the inverse modeling method used in this software. In this modeling, the model range is divided into m grids (mesh) of rectangular cubes, then the constant magnetization value is calculated for each grid. Because the measured data usually has some noise, the primary purpose of data inversion is to obtain a suitable model using this noise data. In order to invert the data using this algorithm, it is first necessary to introduce the estimated amount of noise in the data to the software.

For this purpose, it is assumed that the variance in the data has a Gaussian distribution. The possible error of each data is determined according to the standard deviation of Gaussian distribution. In the inversion of magnetic data in the Hasan Abad area, the Gaussian coefficient equal to the standard deviation of one percent (1%) plus one nanotesla was allocated. Then, the modeling area was divided into grids with dimensions of 15x30x30 meters and a maximum magnetization value of 0.003, and the minimum value of zero was added to the model as a constraint. It should be noted that the maximum magnetization value of the range of anomalies SI 0.004 has been obtained, but for better representation in the modeling, the maximum value SI 0.03 has been considered. Then, three-dimensional inversion was performed on the magnetic data of the Hassan Abad area. According to the maximum value of magnetization obtained in modeling and comparison with the geological map and the value of schist magnetization, the detected anomaly may be due to the presence of schists in the study area.

4-Conclusion

By comparing the results of the vertical sections of the inverse modeling of the magnetic data with the vertical sections of the inverse modeling of the specific resistance and induced polarization along 5 IP/RS profiles, the border of extreme changes in magnetic susceptibility was associated with low specific resistance and high chargeability. It makes mineralization possible in these areas. The comparison of the results of the inversion modeling of the magnetic data with the geochemical analyses of the exploratory boreholes dug in the region showed that during the changes in the magnetic susceptibility, the gold and copper grades increased strongly, generally according to the raw data of the harvest. The load capacity in the Hasan Abad area is high and has reached a maximum of about 80 mV/V. Therefore, the probability of sulfide mineralization percentage in the Hassan Abad area will be very high. In the modeled sections, the specific resistance has been recognized, as well as the faults, and since the mineralization in these areas is veined and located in the fault zone, most of the anomalies located in the fault zone have been noticed in the excavations. Some of the anomalies are located in areas with high specific resistance, some of which are related to the formation effect, and some of which are seen as dykes in the sections and may be related to silica veins in which there is a possibility of gold mineralization. Some of the anomalies that show a large extent in the sections are also probably related to the construction effect.

5-References

- Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., 2012. Gold Deposits in the Sanandaj–Sirjan Zone: Orogenic Gold Deposits or Intrusion - Related Gold Systems. *Resource Geology* 62(3), 296-315. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00196.x>.
- Bierlein, F.P., Crowe, D.E., 2000. Phanerozoic orogenic lode gold deposits: Reviews in Economic Geology 13, 103-139. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.03>.
- 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(4), 397-412. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00035-4).
- Rashidnejad-Omran, N., Emami, M.H., Sabzehei, M., Pique, A., Rastad, F., Behhon, H., Juteau, T., 2001. Metamorphic and Magmatic event of the Muteh Gold Mine (Northeast Golpayegan). *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 11(43-44), 88-99. (in Persian with English Abstract) <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id= 30925>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Fazeli Oladi, A., Zamanian, H., 2024. Inverse modeling and interpretation of magnetic and geoelectrical data in the gold area of Hassan Abad (south of Golpayegan). *Adv. Appl. Geol.* 14(2), 556-577.

DOI: 10.22055/aag.2024.44283.2393

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19096.html

©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

مدل سازی وارون داده‌های مغناطیسی و ژئوالکتریکی و تفسیر آنها در محدوده طلای حسن آباد (جنوب گلپایگان)

احداله فاضلی اولادی

دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

حسن زمانیان*

استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* hasanzamanian@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

چکیده

محدوده طلای حسن آباد در بخش مرکزی پهنه سنندج - سیرجان و ۱۸ کیلومتری جنوب باختری گلپایگان قرار دارد. پی‌جویی ژئوفیزیکی با برداشت‌های مغناطیس‌سنجی مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی انجام و جهت تخمین ژرفای منابع مغناطیسی پردازش واهمامیخت اوپلر صورت گرفت، سپس مدل‌سازی وارون سه بعدی داده‌های مغناطیسی منطقه بر اساس الگوریتم لی و الدنبرگ انجام گردید. ژرفای بیشینه خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده از نتایج وارون‌سازی با ژرفای متوسط منابع مغناطیسی به دست آمده از روش واهمامیخت اوپلر سازگاری دارد. افزون بر این، مدل‌های دو بعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی با مقاطع قائم مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی، مقایسه شد. توالی‌های سنگی نظم اولیه را تحت تاثیر دگرشکلی از دست داده و شدت یکسان نبوده و به صورت پهنه‌های برشی گذر از شکل‌پذیر به شکننا تا شکننا مشاهده می‌شوند. کانه‌زایی طلا با عیار مناسب به همراه بیسموت تنگستن و رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی حاوی کانه‌زایی سولفیدی به صورت پیریت، آرسنوپیریت، گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و پیروتیت روی داده است. زون‌های دگرسانی شامل آرژیلیک، فیلیک، سرسیتی، سیلیسی و سولفیدی می‌باشد. در مقاطع مدل‌سازی مقاومت‌ویژه به خوبی گسل‌ها تشخیص، و کانی‌زایی و حفاری در این نواحی رگه‌ای و در پهنه گسلی قرار می‌گیرند هیجده گمانه مغزه گیری و بیست گمانه RC حفاری شدند. بررسی‌های زمین‌شناسی دگرسانی و کانی‌سازی سطحی و زیر سطحی گمانه‌ها نشان دهنده کانی‌سازی طلا در مناطقی با میزان بالای تغییرات خودپذیری مغناطیسی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: طلا - مغناطیس‌سنجی - مقاومت‌ویژه - پلاریزاسیون القایی - مدل‌سازی وارون

۱-مقدمه

(Goldfarb et al., 2001). با در نظر گرفتن جایگاه زمین‌ساختی ژئودینامیکی حاشیه فعال قاره‌ای پهنه سنندج - سیرجان، می‌توان انتظار داشت که کانه‌زایی طلای نوع کوهزایی، در بیشتر بخش‌های این پهنه روی داده باشد (Aliyari et al., 2011; Niromand et al., 2012). در این پهنه چندین کانسار طلا از نوع کوهزایی معرفی شده است (Rashidnejad-Omran et al., 2001; Kouhestani et al., 2006; Abdollahi et al., 2009; Asadi et al., 2018). این پهنه در زمان تریاس فوقانی تا کرتاسه بالایی و در طی فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران تحت تاثیر دگرگونی ناحیه‌ای قرار گرفته است و باعث ایجاد توالی‌های دگرگونی شیست سبز تا آمفیبولیت در واحدهای آتشفشانی - رسوبی به سن پالئوزوئیک تا مزوزوئیک شده است (Rashidnejad-Omran et al., 2001; Mohajjel et al.,)

پهنه سنندج - سیرجان، از دیدگاه زمین‌ساخت، فعال‌ترین پهنه در ایران است. مهمترین رویداد دگرشکلی و دگرگونی که سنندج - سیرجان را تحت تاثیر قرار داده، در ارتباط با بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و فرآیندهای کوهزایی مربوط به آن است، که در طول دوران مزوزوئیک صورت گرفته است. مطالعات و بررسی ساختارها در این منطقه پیچیدگی خاصی دارند که بیانگر رخداد چندین فاز دگرریختی شکل‌پذیر و شکننا - شکل‌پذیر در آن است (Mohajjel et al., 2003). در طی فرایندهای کوهزایی، کانسارهای طلای کوهزایی که نوع با اهمیت و اقتصادی از کانی‌زایی طلا هستند، تشکیل می‌شوند (Groves et al., 2003). این کانسارها در کمربندهای دگرگون شده ایجاد می‌شوند (Bierlein and Crowe, 2000;)

آنتیموان حسن‌آباد در شمال شرق ایران (Alaminia et al., 2011) اشاره داشت. در مطالعه حاضر، به بررسی داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده اکتشافی طلای حسن‌آباد در جنوب باختر گلپایگان پرداخته می‌شود. هدف از این مطالعه، شناسایی مناطق دارای پتانسیل معدنی به کمک نتایج حاصل از داده‌های ژئوفیزیکی و تعیین نقاط مرتبط با کانی‌سازی با استفاده از مدل‌سازی وارون دو بعدی و سه بعدی داده‌های ژئوفیزیکی می‌باشد. در این راستا، پس از انجام وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی، مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی، ارتباط فضایی بین کانی‌سازی طلا با تغییرات خودپذیری مغناطیسی، مقاومت‌ویژه و شارژپذیری الکتریکی بررسی می‌شود. سپس با مقایسه مدل‌های یاد شده با اطلاعات زمین‌شناسی و نتایج تجزیه‌های ژئوشیمیایی گمانه‌های اکتشافی موجود در منطقه، ارتباط فضایی بین کانی‌سازی طلا با تغییرات کمیت‌های ژئوفیزیکی یاد شده نشان داده می‌شود.

۲- زمین‌شناسی

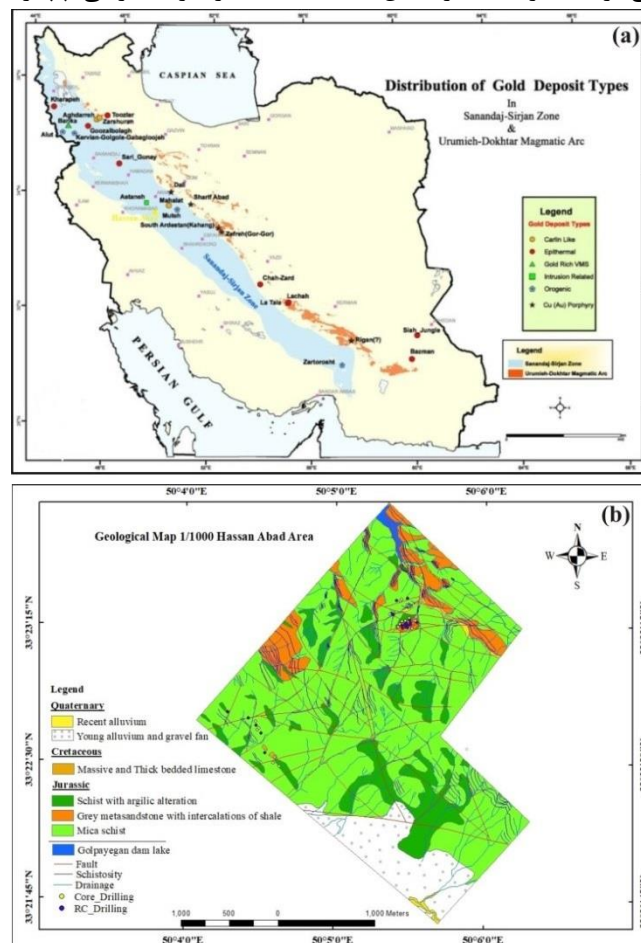
۲-۱- زمین‌شناسی منطقه و کانی‌سازی طلای حسن‌آباد
کانسار طلای حسن‌آباد، با مختصات ۲۶ ۴۶ ۵۲ خاوری و ۲۴ ۳۳ شمالی در ۱۸ کیلومتری جنوب باختری گلپایگان و در ۱۶۶ کیلومتری شمال باختری شهر اصفهان و در قسمت میانی کمربند سندانج - سیرجان واقع شده است. شکل ۱a موقعیت ساختاری منطقه را نشان می‌دهد.

با توجه به نقشه زمین‌شناسی تهیه شده (شکل ۱b) مهمترین واحدهای زمین‌شناسی از قدیم به جدید شامل اسلیت‌های سیاه، فیلیت و میکاشیست، ماسه سنگ‌های گری و کی دگرگون شده با میان‌لایه‌های شیل و تالک شیست است. از طرفی در مجاورت زون کانه‌دار جنوب باختری رخنمون‌های محدودی از آهک دولومیتی بروز دارد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه که در حد رخساره شیست سبز متوسط تا پایین دگرگون شده‌اند، شامل مجموعه‌ای از کالک-شیست، فیلیت، شیست، ماسه سنگ دگرگونی و گاهی سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده هستند. سن این واحدها به پالئوزویک پسین تا ژوراسیک نسبت داده شده است. مهمترین زون سیلیسی کانه‌دار در باختر و جنوب باختری محدوده حسن‌آباد واقع شده است. در محدوده توالی‌های سنگی، تحت تاثیر چندین فاز دگرشکلی، نظم اولیه خود را از دست داده و

(2003; Aliyari et al., 2012; Kouhestani et al., 2014). بنابراین محدوده حسن‌آباد، شامل تناوبی از شیست و میکاشیست می‌باشد و برای کشف کانسارهای کوهزایی بسیار با اهمیت است. به طور کلی سنگ‌های آذرین نسبت به سایر انواع سنگ‌ها خودپذیری مغناطیسی بیشتری دارند. هرچند تأثیر واکنش‌های شیمیایی محلول‌های گرمایی بر این سنگ‌ها سبب دگرسان شدن آنها شده و به طور ویژه در صورت وجود کانی مگنتیت، سبب از بین رفتن این کانی و کاهش آثار مغناطیسی ناشی از آن می‌گردند. در نتیجه، کنتراست قابل توجه بین خودپذیری مغناطیسی سنگ‌های میزبان و نواحی حاوی کانی‌سازی ایجاد شده و هدف اکتشافی مناسبی برای روش مغناطیس‌سنجی فراهم می‌شود. افزون بر این، دگرسانی گرمایی معمولاً به کاهش مقاومت‌ویژه بیشتر سنگ‌های آتشفشانی و تشکیل کانی‌های با شارژپذیری بالای الکتریکی می‌انجامد. برای نمونه، وجود کانی‌های رسی و سولفیدی که مقاومت‌ویژه پایین و شارژپذیری الکتریکی بالایی دارند در کنار نواحی سیلیسی مرتبط با کانی‌سازی طلا و نقره که دارای مقاومت‌ویژه بالا و شارژپذیری الکتریکی پایین‌تری هستند؛ کنتراست کافی برای استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی (Induced Polarization, IP) فراهم می‌کند. در چند دهه اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، مغناطیس‌سنجی، مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP در پی جویی کانسارهای طلای کوهزایی صورت گرفته است. برای نمونه می‌توان به داده‌های مغناطیسی هوابرد برداشت شده در شمال خاوری کوئینزلند استرالیا (Irvine and Smit, 1990)، معدن طلای اپی‌ترمال وایهی (Modriniak and Marsden, 1938)، طلا-نقره اپی‌ترمال منطقه آتشفشانی کورومندل واقع در جزیره شمالی (Locke et al., 2007)، مطالعه داده‌های IP در کانسار طلا-نقره اپی‌ترمال هیشیکاری در جنوب باختر ژاپن (Okada, 2000)، مس و طلای پورفیری در کوه میلیگان کانادا (Oldenburg et al., 1997)، کانسار مس وادی الرجیتا در صحرای سینای مصر (Salem et al., 2013)، مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی و IP/RS با هدف اکتشاف کانسار شمالی مس-طلای پورفیری دالی (Mushtaghian et al., 2022)، مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی و ژئوالکتریکی و تفسیر آنها در اندیس طلای اپی‌ترمال کوه‌لخت (Janghorban et al., 2022)، برداشت ژئوفیزیک به روش IP/RS در منطقه‌ی طلا-

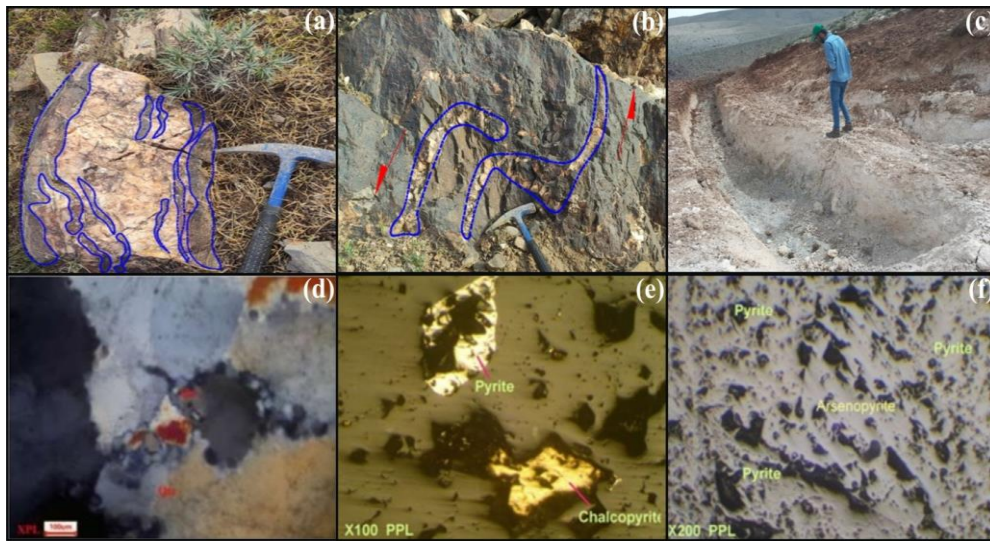
ارتباط توسط نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از ترانشه‌ها و نمونه‌های سطحی است که عمود بر روند برگوارگی واحدهای سنگی حفر شده‌اند، مشخص می‌شود، به طوری که عیارهای بالای طلا به بخش‌های سیلیسی و سولفیدی به شدت دگرشکل (میلونیتی و کاتاکلاستی) تعلق دارند. کانی‌شناسی ماده معدنی شامل پیریت، آرسنوپیریت، گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و پیروتیت است (شکل ۲ e,f). براساس مطالعات انجام شده فابریک‌ها تعیین کننده سوی برش در این محدوده شامل پورفیروکلاست‌های نوع سیگما و چین-های Z شکل است. پورفیروکلاست‌های Z شکل مشاهده شده در واحدهای کانه‌دار منطقه هسته‌ای از جنس کوارتز یا اورتوکلز داشته و بخوبی در مقیاس ماکروسکوپی قابل مشاهده بوده و نمایانگر حرکت برشی چپگرد است (شکل ۲b).

فابریک‌های جدیدی را نشان می‌دهند. نوع و شدت دگرشکلی یکسان نبوده، بلکه انواع دگرشکلی‌ها به صورت پهنه‌های برشی گذر از شکل‌پذیر به شکننا تا شکننا در منطقه مشاهده می‌شوند. کانه‌زایی طلا به همراه تنگستن در پهنه‌های برشی گذر از شکل‌پذیر به شکننا و شکننا روی داده است. کانه‌زایی طلا در پهنه‌های گذر از شکل‌پذیر به شکننا، دارای ژئومتری عدسی شکل و در جهت شیب و امتداد برگوارگی است. فضاهای خالی که در طی دگرشکلی شکل‌پذیر و فرآیند میلونیتی شدن هم روند با برگوارگی به وجود آمده‌اند و نیز ریزشکستگی‌های موجود در پورفیروکلاست‌ها که در حین جریان کاتاکلاستیکی بلورها ایجاد شده‌اند، هر دو توسط کوارتز و کانی‌های سولفیدی مرحله هیدروترمال به طور همزمان پر شده‌اند. نکته جالب این که، تغییرات عیار طلا با دگرشکلی ارتباط نزدیک دارد. این



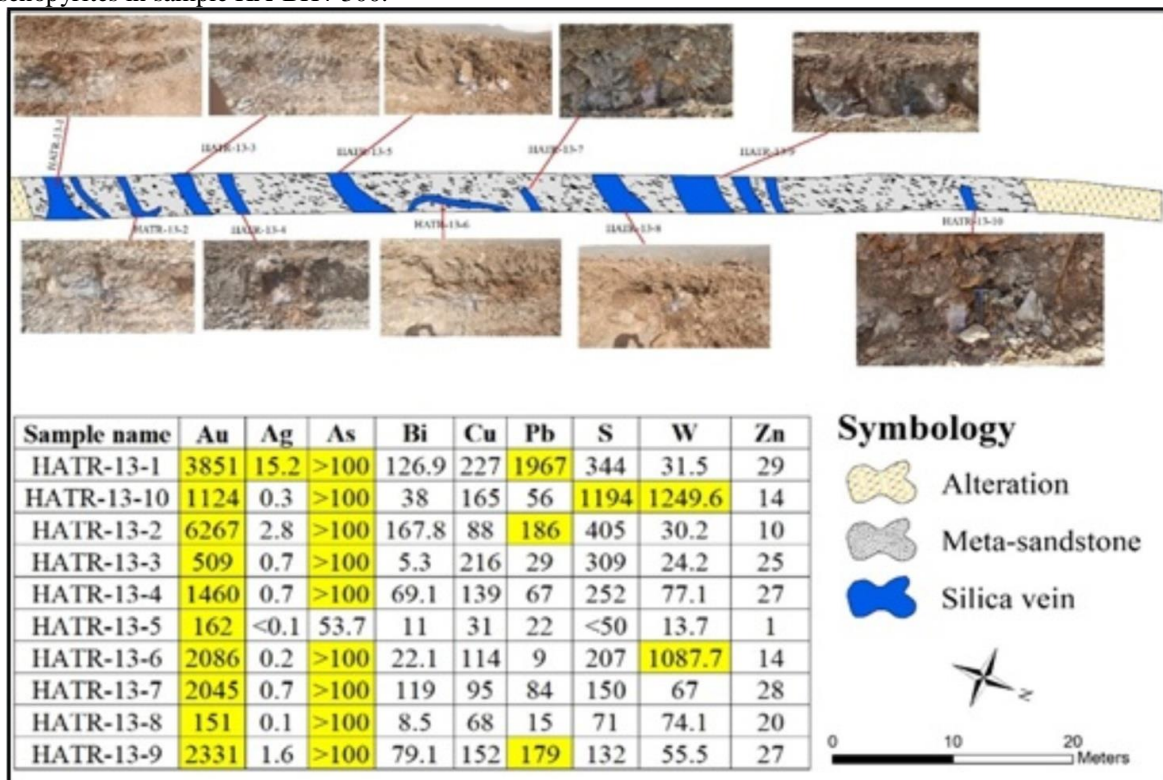
شکل ۱- (a) توزیع و پراکندگی انواع مختلف کانساری طلا در زون سنندج - سیرجان، و (b) نقشه زمین‌شناسی حسن‌آباد (مقیاس ۱/۱۰۰۰).

Fig 1. Distribution and dispersion of different types of gold deposits in Sanandaj-Sirjan zone, and (b) Geological map of the Hassan Abad (scale: 1/1000).



شکل ۲- (a) گسترش برگوارگی میلونیتی در زون کانه دار سیلیسی، (b) پورفیروکلاست های Z شکل، نشان دهنده سوی برشی چپگرد در بخش های سیلیسی، (c) نمایی از دگرسانی آرزپلیک سنگ دربرگیرنده در حاشیه شمالی HA-Vein-1، (d) نمایی از بافت کاتاکلاستیک حاوی بلورهای کوارتز با خاموشی موجی شدید و مرزهای مضرس، (e) نمایی از کانه زایی سولفیدی به صورت پیریت و کالکوپیریت در گمانه HABH-1 و (f) آرسنوپیریت ها در نمونه HA-BH4-300.

Fig 2. (a) The spread of mylonitic foliation in the silica mineralized zone, (b) Z-shaped porphyroclasts, showing left-handed shear direction in siliceous sections, (c) A view of the argillic alteration of the surrounding rock in the northern margin of HA-Vein-1, (d) view of cataclastic texture containing quartz crystals with strong wave extinction and marred boundaries, (e) A view of sulfide mineralization in the form of pyrite and chalcopyrite in HABH-1 borehole, and (f) Arsenopyrites in sample HA-BH4-300.



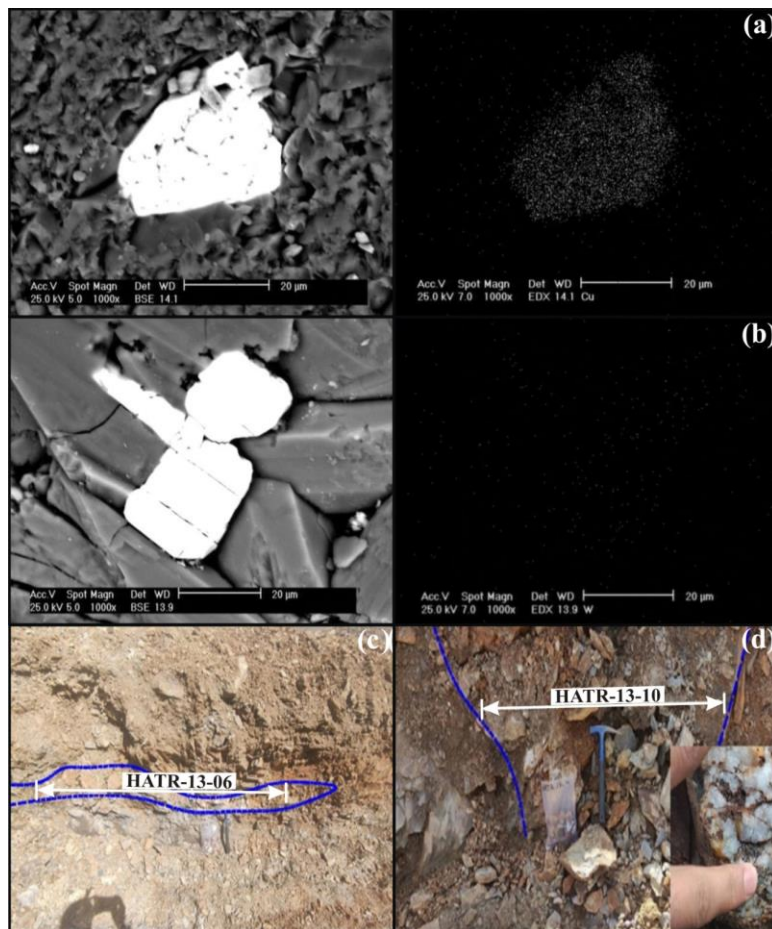
شکل ۳- مقطع زمین شناسی ترانشه HATR-13.
Fig 3. Geological section of HATR-13 trench.

گمانه حفاری‌های مغزه‌گیری ۳۱۱ متر بوده و گمانه‌های RC اغلب تا ۱۰۰ متر حفاری شده‌اند.

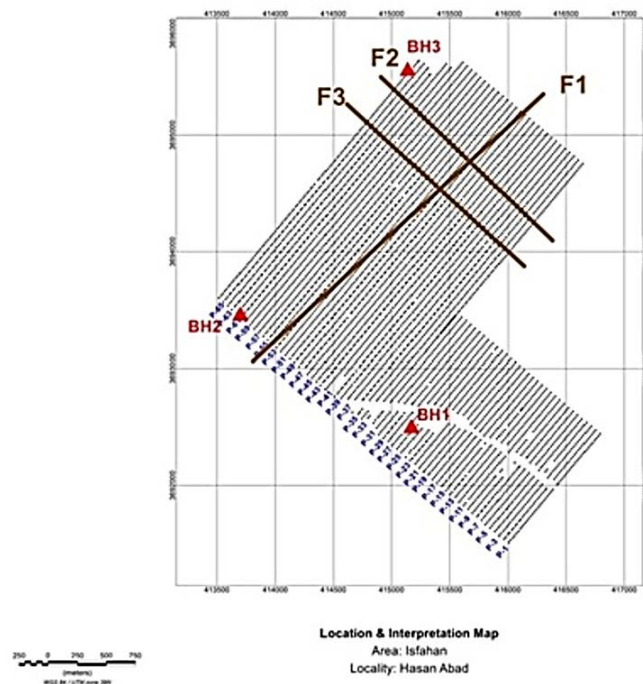
۳- مطالعات مغناطیسی سنجی

برای پوشش محدوده حسن‌آباد، ۶۶ پروفیل با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (N39E) با شبکه برداشت داده‌ها ۵۰×۲۵ متر به صورت شناسایی انتخاب گردید و امتداد پروفیل‌ها شمال شرقی - جنوب غربی انتخاب شده و تمامی اندازه‌گیری‌ها بر روی پروفیل‌هایی با این راستا برداشت شده است (شکل ۵). در زمان برداشت، شدت میدان مغناطیسی مرجع زمین (IGRF) در منطقه مورد مطالعه ۴۷۳۸۶ نانوتسلا می‌باشد. شکل ۶ نقشه شدت میدان مغناطیسی منطقه را قبل و پس از اعمال تصحیحات روزانه و حذف میدان مرجع ژئومغناطیسی زمین نشان می‌دهد.

ترانشه حفر شده بر روی زون HA-Vein-1 در زمره مهمترین زون‌های محدوده حسن‌آباد بوده که از توسعه خوبی برخوردار است (شکل ۳). این زون ۲۰۰ متر طول داشته و ضخامت آن ۱۰ تا ۱۳۰ متر تغییر می‌کند. عیار طلا در نمونه‌های برداشت شده از این ترانشه‌ها اغلب از چند دهم گرم در تن تا بیش از ۳۲ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. عیار عناصر بیسموت، آرسنیک و تنگستن هم در نمونه‌های برداشت شده از این ترانشه‌ها بالاست و همبستگی مناسبی با طلا دارد. براساس نتایج SEM در نمونه‌ها کالکوپیریت و تنگستن مشاهده می‌شود (شکل ۴b). به همین دلیل بر روی این زون ۴ ترانشه بزرگ با راستای شمالی-جنوبی به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر حفر شده است (HATR-11, HATR-12, HATR-13, HATR-14). بر روی این زون تعداد ۱۸ گمانه اکتشافی حفر شده و از این تعداد ۱۱ گمانه به روش RC و ۷ گمانه به روش مغزه‌گیری، با شبکه ۲۰ تا ۴۰ متری حفاری شده است. بیشترین عمق



شکل ۴- (a) کانی کالکوپیریت، (b) کانی تنگستن- تصویر میکروسکوپ الکترونی، (c) وضعیت زون‌های کانه‌دار، و (d) نمونه‌های برداشت شده از آنها.
Fig 4. (a) Chalcopyrite mineral, (b) Tungsten mineral - Electron microscope image, (c) The state of mineralized zones, and (d) samples taken from them

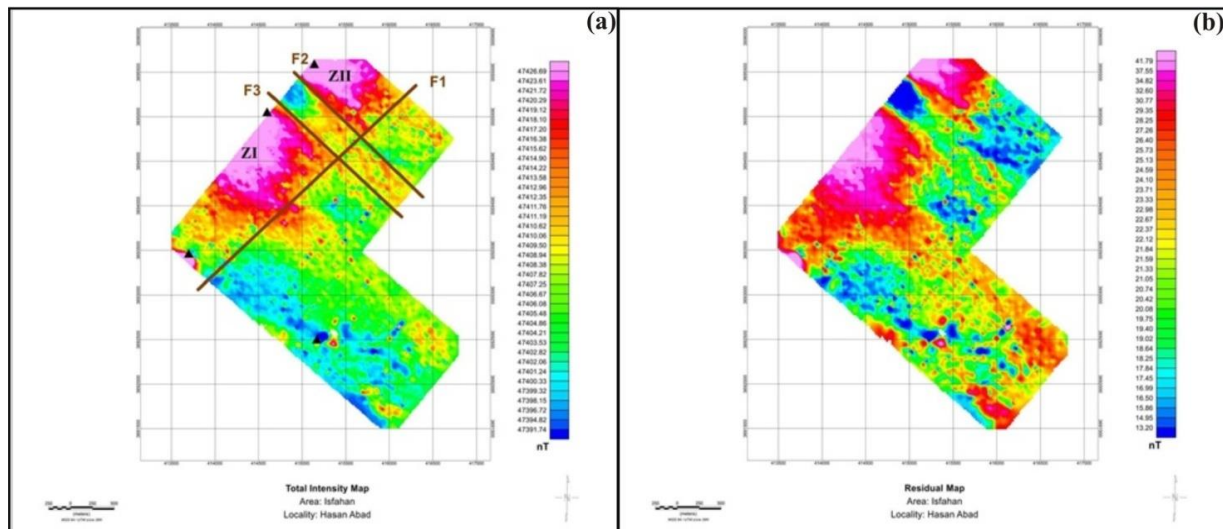


شکل ۵- نقشه موقعیت و تفسیر موقعیت پروفیل‌ها، نقاط اندازه‌گیری و نتایج تفسیرهای انجام شده شامل محدوده‌های بی‌هنجاری، همبری‌ها، گسل‌ها و محل حفاری‌های اکتشافی پیشنهادی.

Fig 5. Location map and interpretation of the position of profiles, measurement points and the results of the interpretations, including the ranges of anomalies, hembries, faults and the location of the proposed exploratory excavations

و انحراف میدان مغناطیسی زمین تابعی از موقعیت جغرافیایی نقاط اندازه‌گیری است به همین دلیل شکل یک بی‌هنجاری مغناطیسی علاوه بر شکل و خودپذیری مغناطیسی سازندهای زیر سطحی به جهت القاء شوندگی مغناطیسی زمین نیز وابسته است. لذا موارد فوق سبب ایجاد جابجایی و انحراف در شکل و محل آنومالی‌های مغناطیسی نسبت به منبع ایجاد کننده آنها می‌شود. برای حذف این اثر از فیلتر برگردان به قطب استفاده می‌شود. با اعمال این فیلتر، آنومالی‌ها به طور قائم در بالای منبع ایجاد کننده خود قرار می‌گیرند، لذا محل واقعی منبع آنومالی‌ها مشخص می‌شود. با اعمال این روش برای محدوده عملیاتی در نقشه برگردان به قطب، محل آنومالی‌ها تغییر کرده و محل واقعی آنومالی‌ها در رأس منشأ آنها قرار می‌گیرد و از حالت دوقطبی خارج و به یک قطبی تبدیل می‌شوند. در حقیقت، این نقشه موقعیت آنومالی‌ها را در حالتی که در قطب قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. این کار به نام عملیات برگردان به قطب نامیده شده و در این صورت در محدوده آنومالی‌ها می‌توان

در مرحله بعد، با هدف جداسازی بی‌هنجاری ناشی از منبع مغناطیسی محلی از آثار مغناطیسی ناحیه‌ای، اثر میدان مغناطیسی ناشی از عوامل ناحیه‌ای با انجام پردازش ادامه فراسو محاسبه شده و از میدان کل مغناطیسی نشان داده شده در شکل ۶ کاسته شد. با انجام چند مرحله محاسبه ادامه فراسوی داده‌های مغناطیسی با ارتفاع‌های متفاوت، گسترش فراسو تا ارتفاع صد و پنجاه متری با رفتار خطی به عنوان بهترین معرف تغییرات ناحیه‌ای انتخاب گردید. شکل ۷ به ترتیب نقشه ادامه فراسوی پنجاه، صد و صدوپنجاه متری بی‌هنجاری میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. از مقایسه نقشه‌های فراسو با یکدیگر و همچنین مقایسه آنها با نقشه شدت میدان باقیمانده چنین می‌توان نتیجه گرفت که اثر منشاء زون‌های بی‌هنجاری حداکثر تا عمق حدود ۱۵۰ متر مشاهده می‌شود. همچنین با توجه به نقشه‌های فراسو دیده می‌شود که مراکز زون‌های بی‌هنجاری ZII و ZI در عمق به یکدیگر می‌پیوندند و در نهایت به صورت یک منشا ظاهر می‌گردند. با توجه به این که زاویه میل



شکل ۶- (a) نقشه تغییرات شدت میدان کل محدوده حسن آباد، و (b) نقشه شدت میدان مغناطیسی کل محدوده حسن آباد پس از اعمال تصحیحات روزانه و حذف IGRF.

Fig 6. (a) The map of changes in the field intensity of the entire Hassan Abad area, and (b) The map of the magnetic field intensity of the entire Hassan Abad area after applying daily corrections and removing IGRF.

براساس معادله X, Y, Z و مختصات نقاط برداشتی، X_0, Y_0, Z_0 ، مختصات منبع، T میدان کل، N اندیس ساختاری می باشند که مقدار آن از ۰ برای همبری های افقی تا ۳ در مورد منابع مغناطیسی کروی شکل تغییر می کند (Thompson, 1982). شکل ۷ نتایج ژرفاسنجی به روش واهمامیخت اولیر را با فرض کروی بودن توده های مغناطیسی و استفاده از اندیس ساختاری ۳ نشان می دهد. روش تخمین عمق اولیر یک روش اتوماتیک تخمین عمق می باشد که بر روی داده های مغناطیسی عمل می کند تا عمق منبع مغناطیسی را تعیین کند. در این روش یک پنجره مربعی کوچک بر روی تمام داده ها حرکت می کند و در هر پنجره بهترین تطبیق عمق (best - fit) برای یک مدل با هندسه خاص محاسبه می شود. نتایج بدست آمده بر روی نقشه رسم شده و متناسب با عمق محاسبه شده با مقیاس رنگ نشان داده می شوند و در مجموع یک نقشه اولیر سه بعدی ایجاد می شود. این روش داده های میدان مغناطیسی کل و نیز مشتقات افقی X و Y و مشتق قائم را بکار می برد. یک مزیت مهم معادله اولیر این است که نسبت به زاویه میل، انحراف و مغناطیس باقیمانده حساس نمی باشد. برای محدوده مورد مطالعه، اندکس ساختاری برابر ۲، سایز سلول گرید ۱۰ متر، اندازه پنجره تجسس ۲۰ و بیشترین مسافت قابل قبول ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است، همچنین ماکزیمم خطای تخمین عمق برای این محدوده ۸٪ قرار داده

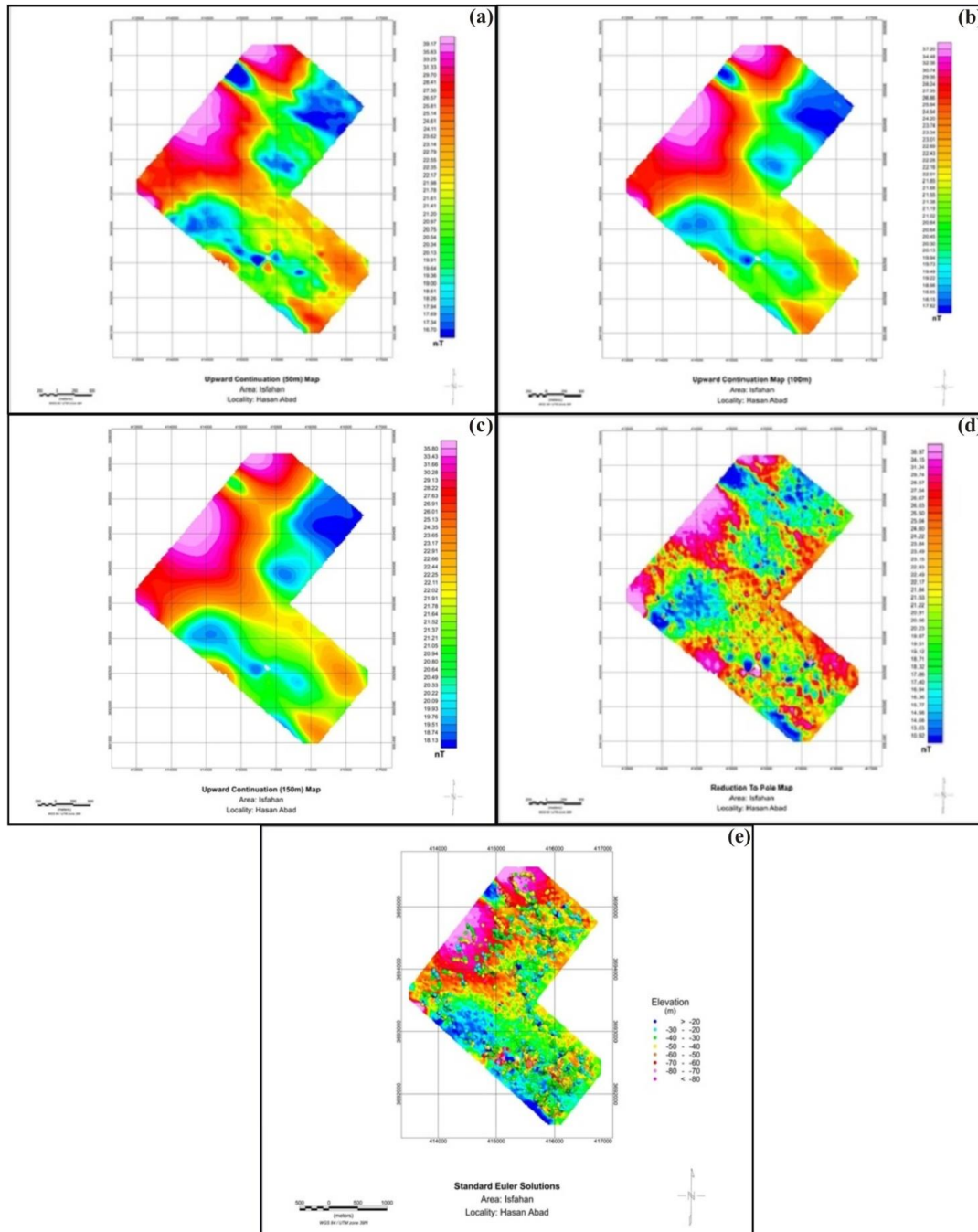
حفاری های اکتشافی را با دقت بیشتری پیشنهاد داد. به منظور حذف آنومالی های ناحیه ای در تعبیر و تفسیر، نقشه برگردان قطب (RTP) از نقشه شدت میدان باقیمانده تهیه گردیده و با این نقشه مقایسه می شود (شکل ۷d). از پردازش هایی مانند فیلترها و تبدیل به قطب اطلاعی در مورد ژرفای توده های منبع مغناطیسی به دست نمی آید. برای تخمین ژرفای منابع بی هنجاری مغناطیسی، روش هایی بدون نیاز به وارون سازی داده ها ابداع شده است که از میان آنها می توان به روش واهمامیخت اولیر اشاره نمود. از مزیت های استفاده از روش اولیر این است که نیازی به اطلاعاتی درباره جهت مغناطیس شدگی نمی باشد و حضور مغناطیس پسماند نیز تأثیری بر نتایج به دست آمده ندارد (Ravat, 1996; Oruç and Selim, 2011; Usman, 2018). این روش با فرض این که میدان های گرانی و مغناطیسی در هر پنجره مختصاتی از داده ها همگن هستند اعمال می شود زیرا با وجود این فرض این میدان ها از رابطه اولیر پیروی خواهند کرد (Nik Farjam et al., 2015). در روش یاد شده از گرادیان های قائم مغناطیسی استفاده می شود (Saif et al., 2018). رابطه اولیر در مختصات کارتزین به صورت زیر نوشته می شود:

(رابطه ۱)

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial T}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial T}{\partial z}(z - z_0) = N(B - T)$$

متوسط ۳۵ متر تخمین زده شده است و انطباق نسبی با عمق-های به دست آمده از روش‌های دیگر را دارد.

شده است. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، عمق مشخص شده بی‌هنجاری‌های ردیابی شده در محدوده مورد مطالعه، از عمق حدود ۱۰ متر تا عمق حدود ۹۰ متر و با مقدار



شکل ۷- نقشه شدت میدان مغناطیسی ناحیه‌ای با انجام ادامه فراسو تا ارتفاع (a) پنجاه‌متری، (b) صد‌متری، (c) یکصدوپنجاه متری، (d) نقشه برگردان به قطب (RTP)، و (e) نقشه تخمین ژرفای منابع مغناطیسی کروی با استفاده از واهمامیخت اوپلر بر داده‌های نمایش داده شده.

Fig 7. Regional magnetic field intensity map by continuing beyond to a height of (a) fifty meters, (b) hundred meters, (c) one hundred and fifty meters, (d) map of return to the pole (RTP), and (e) Depth estimation map of spherical magnetic sources using Euler integration on the displayed data.

نداشت (جدول ۱) و لذا در این محدوده تعداد ۵ پروفیل برداشت گردید (شکل ۸). برداشت‌ها با آرایه قطبی-دوقطبی برای یک پروفیل با فاصله الکترودی ۲۰ متر تا عمق بررسی ۵۰ متر و آرایه دوقطبی-دوقطبی برای ۴ پروفیل با فواصل الکترودی ۱۰ و ۲۰ متر تا عمق حدود ۴۰ متر برداشت گردیده است (شکل. **Error! Reference source not found.**۲).

۴- مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی افزون بر برداشت مغناطیس‌سنجی، برداشت IP/RS در محدوده حسن‌آباد به تعداد ۸ پروفیل ۳۰۰ تا ۵۴۰ متری پیشنهاد شده بود که پروفیل‌های ۲، ۳ و ۴ به دلیل وجود ارتفاعات خشن و صعب‌العبور بودن امکان برداشت وجود

جدول ۱- مشخصات پروفیل‌های برداشت شده در محدوده حسن‌آباد

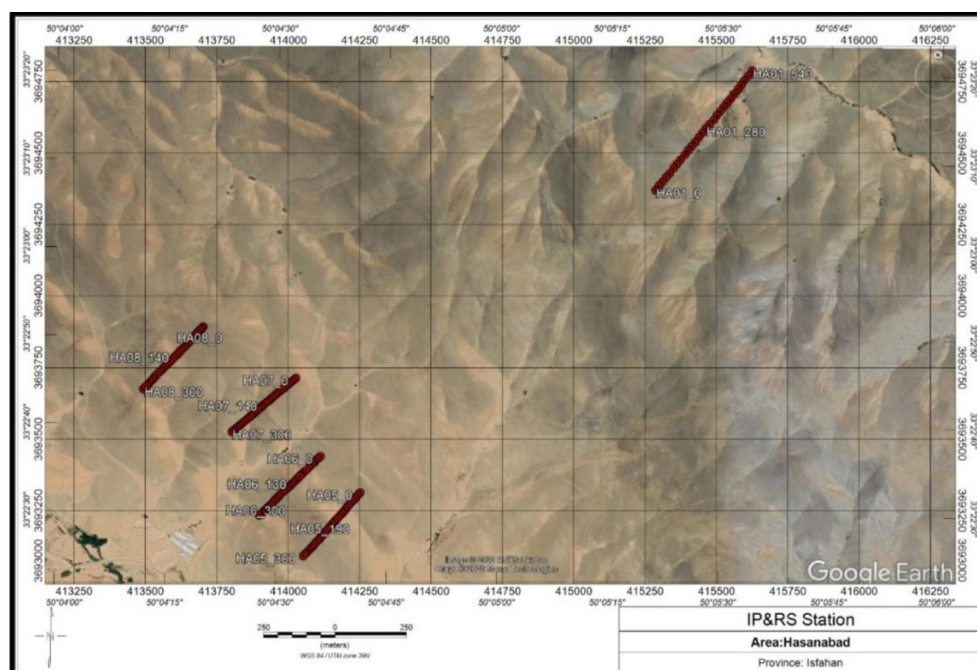
Table 1. Characteristics of profiles collected in Hassan Abad area

Profile name	Azimuth (degrees)	Length (m)	Coordinates (UTM)	
			First	The end
HA01	38	540	415285- 3694371	415626- 3694791
HA05	221	300	414048- 3693090	414248- 3693312
HA06	225	300	413894- 3693232	414109- 3693439
HA07	229	300	413798- 3693525	414023- 3693713
HA08	223	300	413488- 3693675	413699- 3693893

جدول ۲- تعداد نقاط برداشت شده در محدوده حسن‌آباد.

Table 2. Number of points collected in Hassan Abad area.

profile number	array Harvest	Electrode spacing	of data retrieved The number
HA01	bipolar - Polar	20	135
HA05	bipolar - bipolar	10 - 20	268
HA06	bipolar - bipolar	10 - 20	280
HA07	bipolar - bipolar	10 - 20	281
HA08	bipolar - bipolar	10 - 20	281
	total		1245



شکل ۸- موقعیت ایستگاه‌های IP/RS (دوایر قرمز رنگ) محدوده حسن‌آباد بر روی تصویر ماهواره‌ای.

Fig 8. Location of IP/RS stations (red circles) of Hassan abad area on the satellite image.

مدل m با تعداد بلوک‌های پیش بینی شده برابر خواهد بود. هدف وارون‌سازی این است که با تغییر مقادیر المان‌های بردار m ، پاسخی برای تخمین داده‌های d به دست آید که مجموع مربعات اختلاف داده‌های تخمین زده شده با داده‌های اندازه‌گیری شده کمتر از حداکثر خطای مورد قبول باشد (Li and Oldenburg, 1996, Spichak, 2020). با کمینه‌سازی تابع زیر می‌توان به هدف حداقل‌سازی خطای داده دست یافت. (رابطه ۳)

$$\Phi_d = \|w_d = (d - d^{obs})\|_2^2$$

در رابطه Wd تابع کوواریانس خطای داده می‌باشد. این تابع به شکل یک ماتریس قطری که درایه‌های روی قطر آن برابر انحراف معیار خطای اندازه‌گیری داده‌ها است، بیان می‌شود. همچنین d^{obs} داده‌های اندازه‌گیری شده است. هرچند می‌توان با کمینه‌سازی Φ_d تا حد دلخواه خطا را کوچک نمود، اما ممکن است این مساله به قیمت ایجاد مدلی بسیار پیچیده که تحت تاثیر نوفه‌های سطحی موجود در داده‌ها است، تمام شود. برای جلوگیری از این مشکل لازم است با ایجاد محدودیت برای طول بردار مدل به صورت کلی زیر تعریف می‌گردد. (رابطه ۴)

$$\Phi_m(m) = \|w_m = (m - m_0)\|_2^2$$

که در آن، m_0 مدل اولیه و w_m ماتریس کوواریانس و ارتباط فضایی اجزای مدل می‌باشد. معمولاً برای ایجاد یک مدل همواره، w_m به صورت ماتریس حاوی ضرایب مشتقات مرتبه اول مدل تعریف می‌شود. اکنون با ترکیب معادلات ۳ و ۴، تابع جدیدی به نام تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود که با کمینه‌سازی آن، هم مقدار خطای تخمین داده و هم طول مدل تخمین زده شده به حداقل می‌رسد. (رابطه ۵)

$$\Phi(m) = \Phi_m(m) + \beta(\Phi_d - \Phi_d^*)$$

در معادله ۵، β ضریب لاگرانژ و Φ_d^* نیز مقدار خطای تخمین داده می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار بهینه ضرایب لاگرانژ، از ارتباط بین مقدار طول مدل و خطای داده‌ها در شکل ۹ که به منحنی Trade-Off شناخته می‌شود، استفاده می‌شود. منحنی یاد شده بیان می‌کند که اگر مدل به دست آمده بسیار ساده باشد، میزان خطای مدل‌سازی افزایش می‌یابد.

۵- مبانی مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی

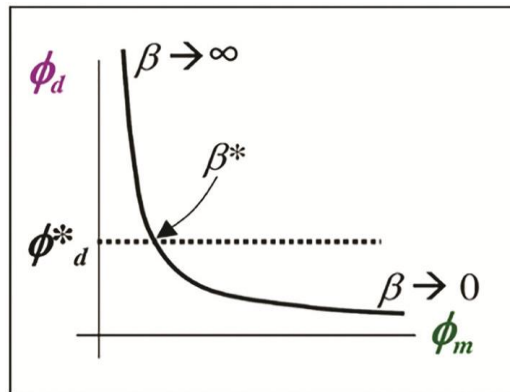
هرچند با اعمال پردازش‌های معمول بر داده‌های مغناطیسی می‌توان به حدود محل قرارگیری توده‌های مغناطیسی پی برد و یا با روش واهمامیخت اولیر به طور تقریبی ژرفای قرارگیری منابع مغناطیسی را تخمین زد، اما تعیین دقیق شکل و گسترش ژرفای توده‌های با خودپذیری مغناطیسی بالا مستلزم انجام مدل‌سازی وارون داده‌ها است. در سایر روشهای ژئوفیزیکی مانند روشهای مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی نیز تعیین شکل و ژرفای ناهمگنی‌ها تنها با انجام مدل‌سازی وارون داده‌ها امکان‌پذیر است. از نقطه نظر علم فیزیک، همواره رابطه‌ای ریاضی بین پارامترهای فیزیکی توده‌های مدفون در زمین و داده‌های ژئوفیزیکی اندازه‌گیری شده با دستگاه وجود دارد. با توجه به وجود این رابطه، می‌توان الگوریتمی بازگشتی را به گونه‌ای تعریف کرد که با در دست داشتن داده‌های ژئوفیزیکی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه، محاسبه مقادیر مجهول پارامترهای فیزیکی توده‌های مدفون محدوده مورد مطالعه، امکان‌پذیر باشد. فرآیند یاد شده، مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی نامیده می‌شود. برای نمونه، اگر مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده، با بردار d و مقادیر نامعلوم پارامترهای مدل با بردار m نشان داده شوند، معادله کلی (۲) بین بردار داده‌ها و بردار مدل ارتباط برقرار می‌کند (Menk, 2018; Abedi, 2020).

$$d = G(m) \quad (\text{رابطه ۲})$$

در معادله ۲، عملکرد G هسته داده (کرنل) نامیده می‌شود. نوع هسته، با توجه به نوع داده‌ها و هدف مدل‌سازی متفاوت خواهد بود (Li and Oldenburg, 1996; Meng, 2017). اگر ماتریس G دارای استقلال خطی نسبت به m باشد، می‌توان رابطه ۲ را به سادگی به صورت حاصل ضرب کرنل و بردار مدل نمایش داد. در عمل به منظور وارون‌سازی دو بعدی یا سه بعدی داده‌ها، زمین به بلوک‌هایی با ابعاد از پیش تعیین شده تقسیم می‌شود. این ابعاد در طول حل مساله ثابت مانده و تنها کمیت فیزیکی موجود در آنها مانند خودپذیری مغناطیسی یا مقاومت ویژه الکتریکی تغییر می‌کند. این فرآیند را مش‌بندی مدل می‌نامند. مقادیر کمیت فیزیکی موجود در بلوکها همان پارامترهای مدل m هستند که با استفاده از رابطه ۲ با داده‌های اندازه‌گیری شده ارتباط دارد. بنابراین تعداد المان‌های بردار

طول مدل و خطای داده قابل قبول باشد (Oldenburg and Pratt, 2007; Ren and Kalscheuer, 2020).

در حالی که اگر خطای مدل سازی بسیار کم باشد، مدل پیچیده‌ای ساخته می‌شود که تفسیر را مشکل می‌سازد. با انتخاب مقدار بهینه ضریب لاگرانژ (β) در محل حداکثر انحنای نمودار Trade-Off، می‌توان مدلی ایجاد کرد که از نظر



شکل ۹- منحنی Trade-Off؛ رابطه بین مدل و طول خطا را نشان می‌دهد (Oldenburg and Pratt, 2007).

Fig 9. Trade-off curve; It shows the relationship between the model and the error length (Oldenburg and Pratt, 2007)

وارون سازی داده‌ها با استفاده از این الگوریتم ابتدا لازم است که مقدار نوفه تخمینی موجود در داده‌ها به نرم افزار معرفی شود. برای این منظور فرض می‌شود که نوفه موجود در داده‌ها دارای توزیع گوسی است. خطای ممکن هر داده با توجه به انحراف معیار توزیع گوسی نوفه تعیین می‌شود. در وارون سازی داده‌های مغناطیسی در محدوده حسن‌آباد، مقدار نوفه گوسی برابر با انحراف معیار یک درصد (۱٪) به علاوه ۱ نانوتسلا اختصاص داده شد. سپس محدوده مدل سازی به توری‌هایی با ابعاد $15 \times 30 \times 30$ متر تقسیم و مقدار مغناطیس پذیری بیشینه 0.003 و کمینه صفر به صورت قید به مدل اضافه شد. لازم به ذکر است مقدار مغناطیس پذیری بیشینه محدوده‌های بی-هنجاری SI 0.004 به دست آمده است ولی برای نمایش بهتر در مدل سازی مقدار بیشینه SI 0.003 در نظر گرفته شده است. سپس وارون سازی سه بعدی بر روی داده‌های مغناطیس منطقه حسن‌آباد انجام گرفت. با توجه به ماکزیمم مقدار مغناطیس-پذیری به دست آمده در مدل سازی و مقایسه با نقشه زمین‌شناسی و نیز مقدار مغناطیس‌پذیری شیبست می‌توان احتمال داد بی‌هنجاری ردیابی شده در اثر وجود شیبست‌ها در محدوده مورد مطالعه باشد.

با توجه به اطلاعات بدست آمده در محدوده حسن‌آباد، ارزیابی ذخیره بر روی زون سیلیسی شماره ۱ انجام شده است. بر روی این زون تعداد ۱۸ گمانه حفر شده است. از این تعداد

در پژوهش حاضر، مدل خودپذیری مغناطیسی محدوده مورد مطالعه با استفاده از وارون سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی به دست آمده است. بدین منظور از نرم افزار Mag3D 4.0 UBC استفاده شد. همچنین تخمینی از مدل مقاومت ویژه و شارژپذیری الکتریکی با استفاده از وارون سازی دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی برداشت شده به دست آمد. مدل سازی یاد شده در امتداد پروفیل‌های نشان داده شده در شکل ۸ و با استفاده از نرم افزار UBC DCIP2D 3.2 صورت گرفت. پارامترهای موجود در معادلات ۳، ۴ و ۵ برای وارون سازی داده‌های مغناطیسی با استفاده از روش ارائه شده توسط لی و اولدنبرگ (Oldenburg and Li, 1994) محاسبه شده‌اند.

۵-۱- نتایج مدل سازی وارون سه بعدی داده‌های مغناطیسی

به منظور وارون سازی داده‌های مغناطیسی از نرم‌افزار Mag3D 4.0 استفاده شده است. روش مدل سازی وارون مورد استفاده در این نرم افزار رالی و والدنبرگ ارائه داده‌اند. در این مدل سازی، محدوده مدل به m توری (مش) مکعب مستطیل تقسیم شده سپس برای هر توری، مقدار ثابت مغناطیس‌پذیری محاسبه می‌شود. چون داده‌های اندازه‌گیری شده معمولاً دارای مقداری نوفه هستند، هدف اصلی وارون سازی داده‌ها به دست آوردن مدل مناسب با استفاده از این داده‌های نوفه‌دار است. به منظور

از این بلوک‌های کوچک تخمین انجام گیرد و از میانگین عیار ریز بلوک‌ها، عیار هر بلوک به دست آید. جهت برآورد ذخیره در این محدوده پس از بررسی‌های آماری کلاسیک و نیز بعد از بررسی همبستگی داده‌ها در موقعیت فضایی کانسار، با استفاده از روش آماری کلاسیک عکس مجذور فاصله و با استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ معمولی اقدام به تخمین ذخیره طلا در زون شماره ۱ شد. شعاع جستجو که تابعی از دامنه (شعاع تاثیر) واریوگرام است، با توجه به شبکه حفاری و مدل واریوگرام انتخابی در هر یک از سه جهت X ، Y و Z در زون ۱ مطالعاتی به ترتیب برابر با ۲۸، ۳۴، و ۱۴ متر در نظر گرفته شد. تعداد نمونه‌های درگیر در شعاع جستجوی اولیه در حالت حداقل ۲ نمونه و در وضعیت حداکثر ۴ نمونه و در شعاع جستجوی ثانویه حداقل ۱ نمونه و حداکثر ۴ نمونه در نظر گرفته شده است. در زون ۳ به دلیل نداشتن همبستگی مناسب بین داده‌های آن، تصمیم بر استفاده از روش کلاسیک عکس مجذور فاصله به منظور تخمین ذخیره در این زون شد که در راستاهای X ، Y و Z از شعاع جستجوی ۲۳، ۲۳ و ۱۰ متر استفاده شده است. تعداد نمونه‌های درگیر در شعاع جستجوی اولیه حداقل یک نمونه و حداکثر ۴ و در شعاع جستجوی ثانویه برابر با حداقل ۱ و حداکثر ۳ نمونه انتخاب شده است. شعاع جستجو یا همان تأثیر ثانویه در هر همه زون ها ۲ برابر شعاع جستجوی اولیه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۰).

بر اساس مدل‌سازی انجام شده با تخمینگر کریجینگ معمولی در زون ۱ تناژ ماده معدنی در رده قطعی (خطای زیر ۳۰ درصد) با عیار حد ۵۰۰ میلی گرم در تن، میزان ذخیره در حدود ۲۶۹۶۵۹۵ تن با عیار متوسط طلای ۱۶۴۴ میلی گرم در تن، محاسبه شده است (جدول ۳).

۱۱ گمانه به روش RC و ۷ گمانه به روش مغزه‌گیری، با شبکه ۲۰ تا ۴۰ متری حفاری شده است. بیشترین عمق گمانه حفاری‌های مغزه‌گیری ۳۱۱ متر بوده و گمانه‌های RC اغلب تا ۱۰۰ متر حفاری شده‌اند. با استفاده از داده‌های موجود، به منظور تهیه مدلی بهینه، ابتدا داده‌های سطحی و سپس داده‌های زیرسطحی مرتب‌سازی شده است. داده‌هایی که در این پروژه به منظور مدل‌سازی استفاده شده است شامل: اطلاعات مربوط به ترانشه‌ها و داده‌های مربوط به نمونه‌های لیتوژنوشیمی همراه آنالیز طلا، اطلاعات گمانه‌های مغزه‌گیری و RC اعم از مختصات مکانی، ارتفاع، شیب، آزیموت و عمق نهایی به همراه نتایج آنالیز نمونه‌های برداشتی از گمانه‌ها و ویژگی‌های زمین-شناسی گمانه‌ها (سنگ‌شناسی، ساخت، بافت، رنگ و نوع و شدت دگرسانی‌ها)، لایه اطلاعاتی توپوگرافی با مقیاس ۱:۱۰۰۰. پس از جمع‌بندی و مرتب‌سازی کلیه داده‌های مربوط به گمانه‌ها و آنالیز عنصر طلا در قالب اکسل و تبدیل آن به فرمت اجرایی نرم افزار دیتامین (فرمت متنی TEXT)، داده‌ها وارد نرم‌افزار دیتامین شده و پردازش‌های تحلیلی بر روی آن‌ها اعمال شده است. در ادامه با استفاده از روش‌های کلاسیک مقاطع، کریجینگ و عکس مجذور فاصله IDW تخمین ذخیره کانسار اصلی حسن‌آباد انجام پذیرفت و نهایتاً ذخیره کانسار با توجه به رده‌بندی‌های استاندارد موجود طبقه بندی شد. در ادامه مطالعات، اقدام به تهیه رویه توپوگرافی با استفاده از داده‌های توپوگرافی موجود شد. پس از تهیه مدل بلوکی و مشخص شدن فضای تخمین، می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف تخمینی مدل عیاری را تهیه کرد. برای این کار، ابتدا هر یک از بلوک‌ها در هر یک از سه جهت X ، Y و Z باید به چند بخش موسوم به زیربلوک تقسیم شوند و در مورد هر یک



شکل ۱۰- (a) نمایشی از وضعیت گمانه‌های حفاری شده در محیط دیتامین، و (b,c) مدل سه بعدی کانسار طلای حسن‌آباد با تخمین به روش کریجینگ.

Fig 10. (a) A view of the condition of drilled boreholes in the data mine environment, and (b,c) 3D model of Hassan Abad gold mine with kriging estimation.

جدول ۳- ارزیابی ذخیره زون شماره ۱ در رده قطعی به روش کریجینگ.

Table 3. Evaluation of reserve zone number 1 in the definite category by Kriging method.

Limit value (ppb)	500 (ppb)	1000(ppb)
Average rate (ppb)	1644/031	2267/384
Tonnage (ton)	2,696,595	1,887,696

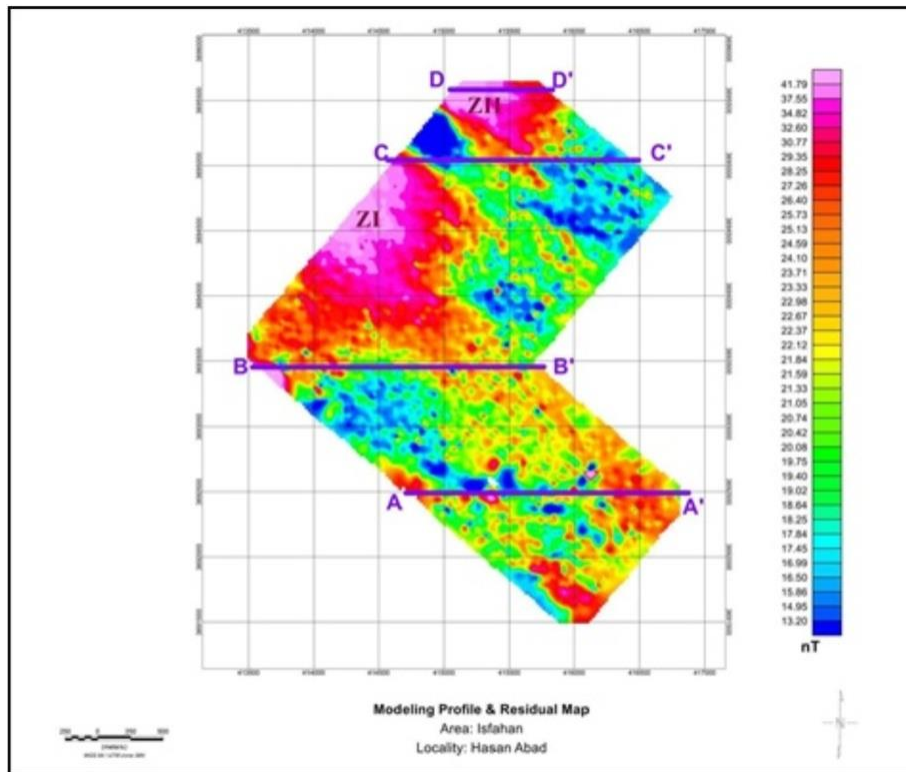
هنجاری کوچکی از نزدیک سطح زمین شروع شده است. مقدار مغناطیس پذیری بیشینه در این محدوده $SI 0,0035$ می باشد (شکل ۱۳ a,b).

برشی قائم از مدل سازی در راستای مقطع CC با راستای شرقی- غربی، زون بی هنجاری ZI مشاهده می شود که از نزدیک سطح زمین شروع شده است و مقدار مغناطیس پذیری نزدیک سطح حدود $SI 0,001$ است و در اعماق بیشتر به حدود $SI 0,003$ می رسد. برشی قائم از مدل سازی در راستای مقطع DD با راستای شرقی- غربی، زون بی هنجاری ZII مشاهده می شود که از نزدیک سطح زمین شروع شده است و مقدار مغناطیس پذیری نزدیک سطح حدود $SI 0,0025$ است و در اعماق بیشتر به حدود $SI 0,003$ می رسد (شکل ۱۳ c,d).

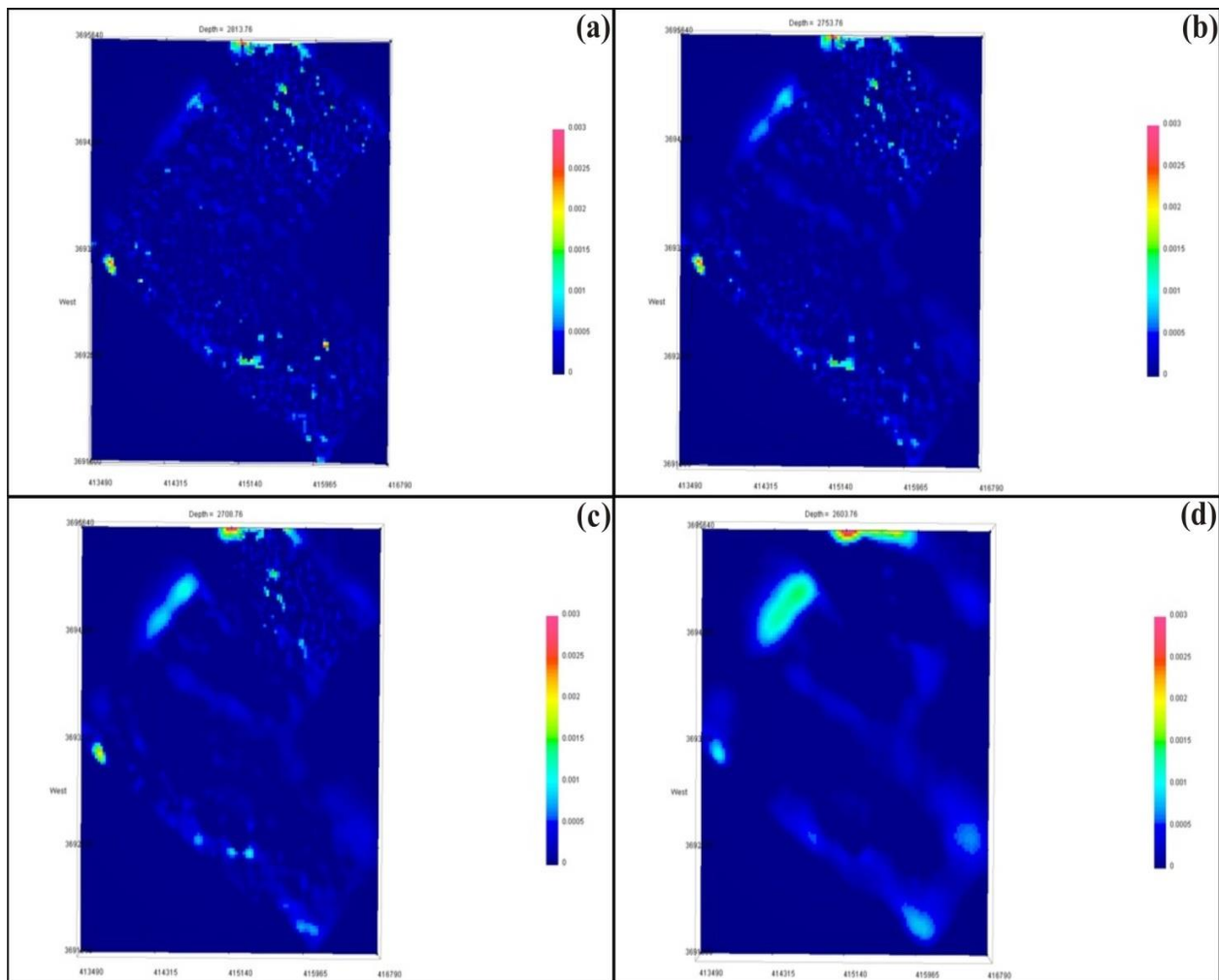
۲-۵- نتایج مدل سازی وارون دو بعدی داده های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی

به منظور بررسی وضعیت و گسترش عمقی زون های بی هنجاری، چهار پروفیل به نام های AA ، BB ، CC و DD بر روی شکل ۱۱ نشان داده شده است و سطح بالایی مدل سازی در ارتفاع های ۲۸۰۰ متر، ۲۷۵۰ متر، ۲۷۰۰ متر، ۲۶۰۰ متر (شکل ۱۲).

در برش قائم از مدل سازی هنگامی که از سمت جنوب به سمت شمال پیش می رویم در راستای مقطع AA با امتداد شرقی- غربی، بی هنجاری کوچکی مشاهده می گردد که نزدیک سطح زمین واقع شده است. مقدار مغناطیس پذیری بیشینه در این محدوده $SI 0,0025$ می باشد. در برش قائم از مدل سازی در راستای مقطع شرقی- غربی BB زون بی



شکل ۱۱- مقاطع مدل سازی بر روی نقشه شدت میدان باقیمانده.
 Fig 11. Modeling sections on the residual field intensity map.



شکل ۱۲- سطح بالایی مدل سازی در ارتفاع های (a) ۲۸۰۰ متر، (b) ۲۷۵۰ متر، (c) ۲۷۰۰ متر و (d) ۲۶۰۰ متر.

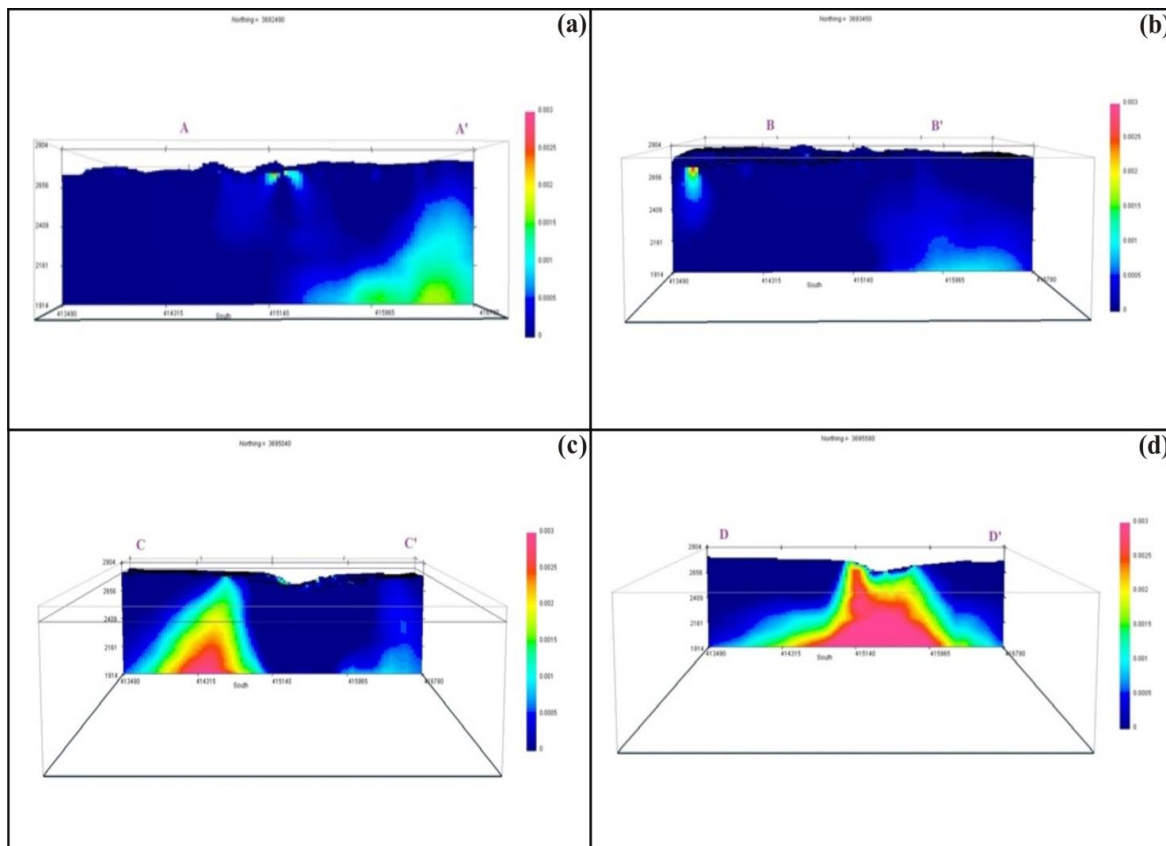
Fig 12. The upper level of modeling at heights of (a) 2800 meters, (b) 2750 meters, (c) 2700 meters, and (d) 2600 meters.

حفاری های سیستماتیک به صورت ترکیبی از حفاری های مغزه گیری و RC انجام شده است. این حفاری ها شامل ۲۰ گمانه RC به طول ۱۳۰۵ متر و ۱۸ گمانه مغزه گیری به طول ۱۵۷۰ متر است. به منظور یافتن رابطه فضایی بین نواحی کانی سازی و مدل خودپذیری مغناطیسی، نتایج مدل سه بعدی تخمین زده شده خودپذیری مغناطیسی با نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی گمانه های موجود در منطقه مقایسه شد نتایج حاصل از مقایسه اطلاعات مربوط به آنالیز ژئوشیمیایی گمانه ها با مقطع مدل خودپذیری مغناطیسی در امتداد گمانه های یاد شده در شکل های (۱۵ و ۱۶) نشان داده شده است.

۶- مقایسه نتایج حاصل از وارون سازی سه بعدی با نتایج

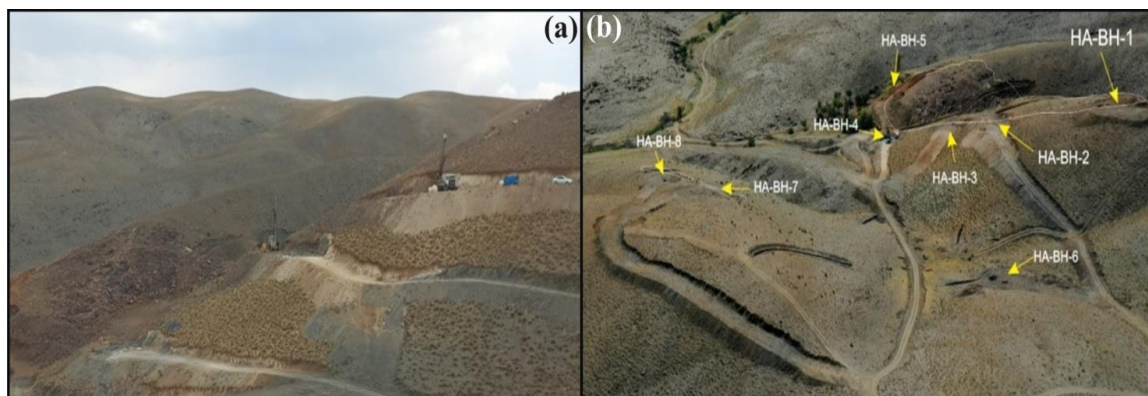
تجزیه های ژئوشیمیایی گمانه های موجود در منطقه

در محدوده حسن آباد، حفاری های بر روی چهار رگه انجام شده است. این رگه ها به ترتیب شامل رگه های HA-Vein-1, HA-Vein2, HA-Vein3, HA-Vein8 است که در آن مقادیر طلا بالا گزارش شده است. این حفاری ها با دو روش مغزه گیری و RC انجام شده و نتایج مناسبی بدست آمده است (شکل ۱۴). عملیات حفاری این محدوده در سال ۱۴۰۱ انجام شد. برنامه حفاری به دو صورت شناسایی و سیستماتیک برنامه ریزی شده بود. حفاری های شناسایی به روش مغزه گیری حفاری شده و



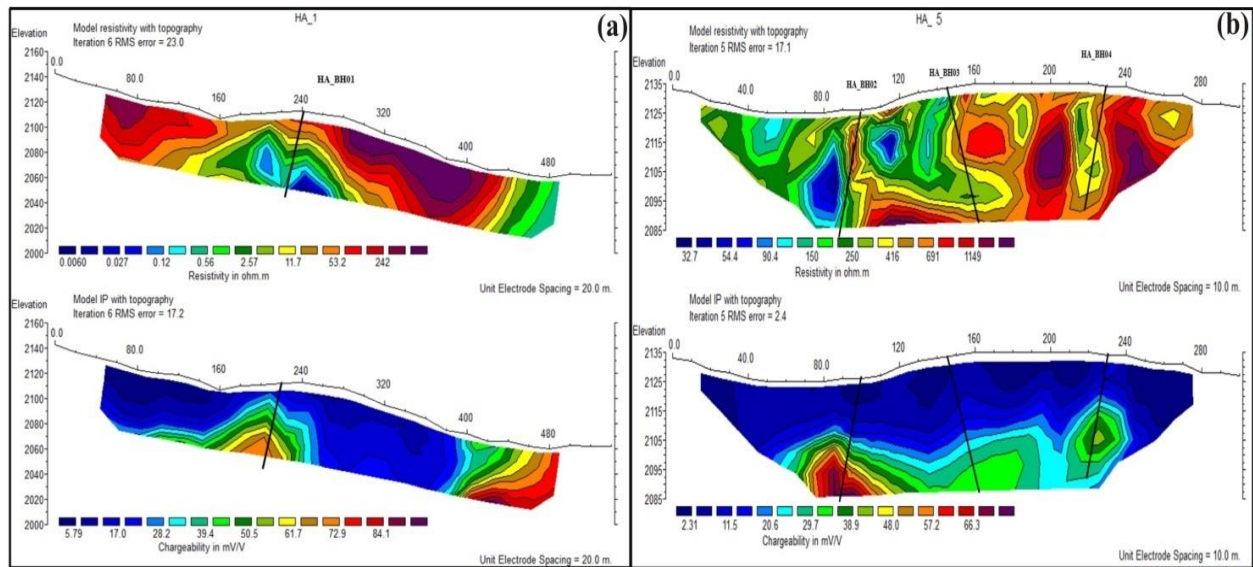
شکل ۱۳- (a) برشی قائم از مدل سازی در راستای پروفیل AA، دید به سمت شمال، (b) برشی قائم از مدل سازی در راستای پروفیل BB، دید به سمت شمال، (c) برشی قائم از مدل سازی در راستای پروفیل CC، دید به سمت شمال، و (d) برشی قائم از مدل سازی در راستای پروفیل DD، دید به سمت شمال.

Fig 13. (a) A vertical section of the modeling along the AA profile, looking north, (b) A vertical section of the modeling along the BB profile, looking north, (c) A vertical section of the modeling along the CC profile, looking north, and (d) A vertical section of the modeling along the DD profile, looking north.



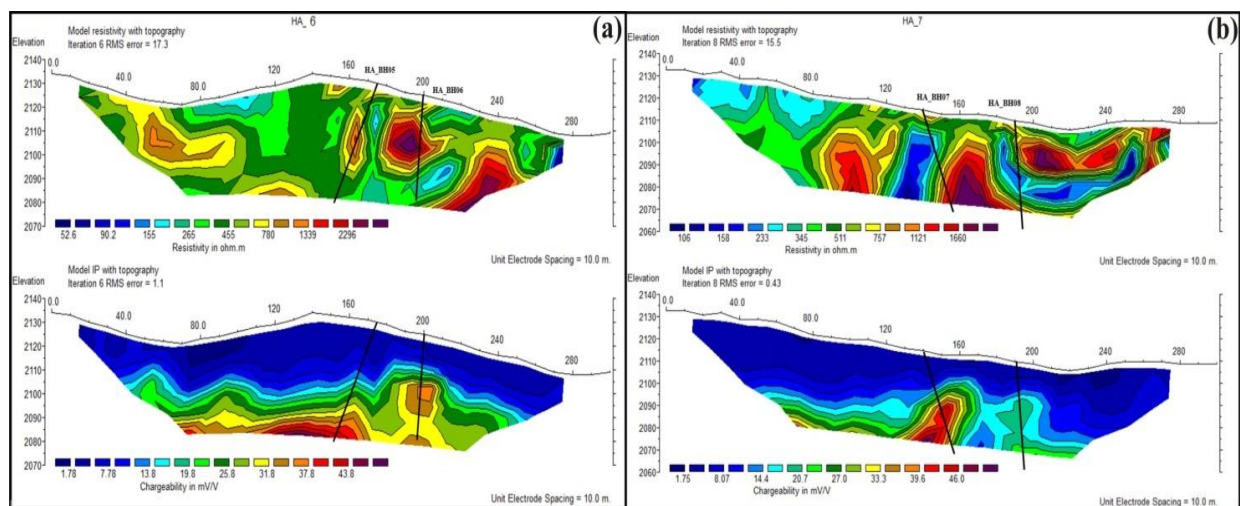
شکل ۱۴- (a) نمایی از حفاری های ترکیبی RC و مغزه گیری در محدوده حسن آباد (دید به سمت جنوب)، و (b) موقعیت نقاط حفاری مغزه گیری بر روی زون های کانه دار بخش باختری محدوده حسن آباد (دید به سمت جنوب غرب).

Fig 14. (a) A view of the combined RC and core drilling in the Hassan Abad range (view to the south), and (b) The location of the core drilling points on the mineralized zones of the western part of the Hassan Abad range (view towards the southwest).



شکل ۱۵- (a) مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل HA01، و (b) مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل HA05.

Fig 15. (a) Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on HA01 profile, and (b) Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on HA05 profile.



شکل ۱۶- (a) مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل HA05 و HA06، و (b) مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل HA07 و HA08.

Fig 16. (a) Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on HA05 and HA06 profiles, and (b) Models resulting from two dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on HA07 and HA08 profiles.

۷- نتیجه‌گیری

با مقایسه نتایج مقاطع قائم وارون داده‌های مغناطیسی با مقاطع قائم مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی در امتداد ۵ پروفیل IP/RS، مرز تغییرات شدید خود پذیری مغناطیسی با مقاومت‌ویژه پایین و شارژپذیری بالا همراه شد که امکان کانی‌سازی را در این نواحی محتمل می‌سازد. مقایسه نتایج مربوط به مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی با آنالیزهای ژئوشیمیایی گمانه‌های اکتشافی حفر شده در منطقه، نشان داد که در هنگام تغییرات خودپذیری مغناطیسی، عیار طلا به شدت افزایش پیدا می‌کند به طور کلی با توجه به داده‌های خام برداشت شده در محدوده حسن‌آباد، مقدار بارپذیری بالا بوده و حداکثر به حدود ۸۰ میلی ولت بر ولت رسیده است. لذا وجود درصد کانی‌زایی سولفیدی در محدوده حسن‌آباد بسیار زیاد خواهد بود. در مقاطع مدل‌سازی شده مقاومت ویژه، به خوبی گسل‌ها تشخیص داده شده است و از

آنجائیکه کانی‌زایی در این نواحی رگه‌ای بوده و در زون گسله قرار می‌گیرند در حفاری‌ها، بیشتر بی‌هنجاری‌های که در زون گسله قرار گرفته‌اند، مورد توجه بوده است. پاره‌ای از بی‌هنجاری‌ها بر نواحی با مقاومت‌ویژه بالا قرار گرفته‌اند که به صورت دایک مانند در مقاطع دیده می‌شوند ممکن است مربوط به رگه‌های سیلیسی باشد که در آنها احتمال کانی‌زایی طلا می‌رود.

سپاسگزاری

این پژوهش با همکاری دانشگاه لرستان و شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران انجام شد. از شرکت مهندسی مشاور زمین آب پی، شرکت آتین معدن میدیا و آقایان مهندس شاکرمی، دکتر احمدی، دکتر ژولیده سر، دکتر محمودی، مهندس جعفری، مهندس هنرور، دکتر اسماعیلی و جناب آقای صدیقی، کمال تشکر، قدردانی و سپاس را داریم.

مراجع

- Abdollahi, M.J., Karimpour, M.H., Kheradmand, A., Zarasvandi, A.R., 2009. Stable isotopes (O, H, and S) in the Muteh gold deposit, Golpaygan area, Iran. *Natural Resources Research* 18, 137–151. <https://doi.org/10.1007/s11053-009-9103-3>.
- Abedi, M., 2020. A focused and constrained 2D inversion of potential field geophysical data through Delaunay triangulation, a case study for iron-bearing targeting at the Shavaz deposit in Iran. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 309, 106604. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106604>.
- Alaminia, Z., Karimpour, M., HeydarianShahri, M., Hammam, M., 2009. Mineralization and interpretation of geophysical data using the IP/RS method in the gold-antimony area of Hassan Abad, northeastern Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 4, 723-734. (in Persian) <http://ijcm.ir/article-1-501-fa.html>.
- Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., 2012. Gold Deposits in the Sanandaj–Sirjan Zone: Orogenic Gold Deposits or Intrusion - Related Gold Systems. *Resource Geology* 62(3), 296-315. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00196.x>.
- Asadi, S., Niroomand, S., Moore, F., 2018. Fluid inclusion and stable isotope geochemistry of the orogenic-type Zinvinjian Cu–Pb–Zn–Au deposit in the Sanandaj–Sirjan metamorphic belt, Northwest Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 184, 82-96. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.013>.
- Bierlein, F.P., Crowe, D.E., 2000. Phanerozoic orogenic lode gold deposits: Reviews in Economic Geology 13, 103-139. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.03>.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., Gardoll, S., 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews* 18, 1-75. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00016-6).
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F., Hart, C.J.R., 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research and exploration significance. *Economic Geology* 98(1), 1-29. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.1.1>.
- Irvine, R.J., Smith, M.J., 1990. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, Elsevier 36(1-3), 375-412.
- Janghorban, G., Abtahi Forushani, M., Mushtghian, K., AsadiHarouni, H., Sadeghi Sorkhani, H., Haj Heydari, M., 2021. Inverse modeling and interpretation of magnetic and geoelectric data in the epithermal gold

- index of Kuh-e Lakht. Scientific Quarterly of Earth Sciences 32, 121-132. (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.259045.1861>.
- Kouhestani, H., Rastad, E., Rashidnejad-Omran, N., Mohajjel, M., 2006. Gold Mineralization in Chah-Bagh Ductile-Brittle Shear Zones, Muteh Mining District, Sanandaj-Sirjan Zone. Scientific Quarterly Journal, Geosciences 60(15), 142-165. (in Persian) <http://dx.doi.org/10.22071/gsj.2009.57851>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.027>.
- Li, Y., Oldenburg, D.W., 1996. 3-D inversion of magnetic data. Geophysics 61(2), 394-408.
- Locke, C.A., Cassidy, J., Harris, M.C., Kirkby, A., Mauk, J.L., Morrell, A.E., Rowland, J.V., Smith, N., 2007. Geophysical characteristics of the southern Coromandel Volcanic Zone, New Zealand, and associated epithermal deposits, ASEG Extended Abstracts. Taylor & Francis 1, 1-5.
- Meng, Z., 2017. New potential data inversion to obtain the geological structures with a Laplacian kernel, International Geophysical Conference, Qingdao, China, 17-20. <https://doi.org/10.1190/IGC2017-068>.
- Menke, W., 2018. Geophysical data analysis: Discrete inverse theory, Academic press.
- Modriniak, N., Marsden, E., 1938. Experiments in geophysical survey in New Zealand. Department of Scientific and Industrial Research.
- 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(4), 397-412. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00035-4).
- Mushtaghian, K., Abtahi Forushani, M., AsadiHaruni, H., Haj Heydari, M., Janghorban, G., 2021. Inverse modeling of Magnetic and IP/RS data for exploration of Northern Dalli Copper-Gold porphyry deposit. Scientific Quarterly of Earth Sciences 32, 121-132. (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.272272.1886>.
- Nik Farjam, M., Farahani, S. Vahzarkhani, A., 2016, depth estimation by Euler deconvolution method in the eastern part of Hanar Anomaly, Birjand, Iran. Geophysics Conference, 17. <https://sid.ir/paper/849892/fa>.
- Niroomand, Sh., Goldfarb, R.J., Moore, F., Mohajjel, M., Marsh, E.E., 2011. The Kharapeh orogenic gold deposit: geological, structural, and geochemical controls on epizonal ore formation in West Azerbaijan Province, Northwestern Iran. Mineralium Deposita 46, 409-428. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0335-x>.
- Okada, K., 2000. Geophysical exploration at Hishikari gold mine, Kagoshima, Japan, The Leading Edge. Society of Exploration Geophysicists 19(7), 744-750.
- Oldenburg, D.W., Li, Y., 1994. Inversion of induced polarization data. Geophysics 59(9), 1327-1341.
- Oldenburg, D.W., Li, Y., Ellis, R.G., 1997. Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan. Geophysics 62(5), 1419-1431.
- Oldenburg, D.W., Pratt, D.A., 2007. Geophysical inversion for mineral exploration: a decade of progress in theory and practice. Proceedings of exploration 7(5), 61-95.
- Oruç, B., Selim, H.H., 2011. Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform. Journal of Applied Geophysics, Elsevier 74(4), 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.05.007>.
- Rashidnejad-Omran, N., Emami, M.H., Sabzehei, M., Pique, A., Rastad, F., Behhon, H., Juteau, T., 2001. Metamorphic and Magmatic event of the Muteh Gold Mine (Northeast Golpayegan). Scientific Quarterly Journal, Geosciences 11(43-44), 88-99. (in Persian with English Abstract) <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=30925>.
- Ravat, D., 1996. Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations, Journal of Environmental and Engineering Geophysics. Society of Exploration Geophysicists 1(3), 229-238.
- Ren, Z., Kalscheuer, T., 2020. Uncertainty and Resolution Analysis of 2D and 3D Inversion Models Computed from Geophysical Electromagnetic Data. Surveys in Geophysics 41, 47-112. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09567-3>.

- Saif, M.R., Mohammadzadeh Moghadam, M. Mirzaei, S., 2018, Identification and location of underground targets and facilities based on magnetometric data using analytical signal, Euler and 3D inversion methods. *Modern Defense Sciences and Technologies* 9(3), 359-368. <https://sid.ir/paper/167420/fa>.
- Salem, S.M., Arafa, S.A., Ramadan, T.M., El Sayed, A., 2013. Exploration of copper deposits in Wadi El Regeita area, Southern Sinai, Egypt, with contribution of remote sensing and geophysical data. *Arabian Journal of Geosciences* 6(2), 321-335. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0346-z>.
- Spichak, V.V., 2020. Modern Methods for Joint Analysis and Inversion of Geophysical Data. *Russian Geology and Geophysics* 61 (3), 341-357. <https://doi.org/10.15372/RGG2019092>.
- Thompson, D.T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics. Society of Exploration Geophysicists* 47(1), 31-37.
- Usman, N., 2018. Automatic interpretation of magnetic data using Euler deconvolution with modified algorithm, Ph.D. thesis, Universiti Sains Malaysia.