Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2026, Vol. 16(1): 57 - 76

Research Article

Application of geophysical data (magnetics and geoelectric) in identifying Au mineralization in the Bazman 3 epithermal deposit (southeast of Iran)

Ahmad Baharvandi[1], Farhad Ehya [2]*, Mohammad Ali Aliabadi[1]

1- Department of Geology, Maha.C, Islamic Azad University, Mahallat, Iran
2- Department of Geology, Be.C, Islamic Azad University, Behbahan, Iran

Keywords: *Bazman3, Magnetometry, Special Resistance, Induction Polarization, Epithermal*

1-Introduction

The Bazman 3 exploration area in southeastern Iran is considered one of the areas prone to gold mineralization within the framework of epithermal deposits. The lack of accurate information on subsurface structures and alteration distribution has created a serious obstacle to the targeted exploration of mineral resources. In recent years, the use of geophysical methods such as magnetometry, resistivity, and IP have been proposed as effective tools in identifying mineralization zones.

In the last few decades, extensive studies have been conducted on the use of geophysical, magnetometric, electrical resistivity, and IP methods in the search for epithermal gold deposits. For example, airborne magnetic data collected in northeastern Queensland, Australia (Irvine and Smit, 1990), the Waihi epithermal gold mine (Modriniak and Marsden, 1938), the epithermal gold-silver of the Coromandel volcanic region in the North Island (Locke et al., 2007), Data study at the Hishikari epithermal gold-silver deposit in southwestern Japan (Okada, 2000), the Wadi Al-Rajita copper deposit in the Sinai Desert of Egypt (Salem et al., 2013), inversion modeling of magnetic data and RS/IP with the aim of exploring the northern Dali porphyry copper-gold deposit (Mushtaghian et al., 2022), geophysical survey using the RS/IP method in the Bazaman 3 gold zone in southeastern Iran.

2-Materials and methods

During the data collection period, by setting up a fixed station, daily changes were recorded every 2 minutes to make daily corrections and check for the possible presence of magnetic storms. To cover this area, a 40 × 80 grid (profile spacing 80 meters and sampling point spacing 40 meters) was selected as identification. Considering the mineralization of the area and the results of geological studies, the north-south profile direction was chosen to be approximately perpendicular to the mineralization direction, and all points were sampled on profiles with this direction. In total, samples were taken on 51 profiles. All stations have been collected with G.P.S devices. The collected IP/RS field data are modified and modeled using processing software, and geophysical sections are prepared, which include two two-dimensional sections of resistivity and induced polarization. During modeling, the elevation of the survey line points was used for topographic corrections to calculate and apply the effect of topography on the location and value of the measured parameters. Electrical resistivity and induced polarization sections show lateral and depth variations of these physical parameters, and using these variations alone does not lead to identification of the lithology type. Therefore, to reduce uncertainty in identifying the lithology type when interpreting geoelectrical sections, it is necessary to use geological data of the region as well as information from existing drilling boreholes.

* Corresponding author: ehya.farhad@gmail.com
DOI: 10.22055/aag.2026.51614.2560
Received: 2026-01-26
Accepted: 2026-05-11

ISSN: 2717-0764

3-Results and discussion

In the Bazman 3 area located in Sistan-va-Baluchistan province, magnetometric studies were conducted, considering the geological conditions and the results of initial reconnaissance studies, which showed evidence of the possibility of polymetallic mineralization. To cover the exploration area and based on the objectives of the desired geophysical studies, 51 profiles with a north-south orientation and a data collection grid of 40 × 80 meters were selected as identification. After the magnetometry was taken, necessary corrections were made, and various maps were prepared, the results of the data interpretation were explained in detail. The following general conclusion is presented for the Bazman 3 area, taking into account the objectives of the studies. The field intensity changes of the entire range vary between 45100 and 49200 nanotesla. By preparing a residual anomaly map and removing the regional anomaly, five anomaly zones with the following characteristics have been detected in this range:

1- The ZI anomaly zone is located in the northeast of the traced area. The maximum field intensity in this anomaly zone is about 49,000 nanotesla. The anomaly is located in the Md unit (andesite-dacite lava and tuff) and the Ngvs unit (marl, volcaniclastic sandstone, silt and conglomerate). Also, in parts of this anomaly zone, argillic alteration and iron oxide, as well as gold and copper geochemical anomalies, have been detected.

2- Anomaly zone ZII has been detected in the northwestern part of the area. The maximum field intensity in this anomaly zone is about 47800 nanotesla. Also, argillic alteration and iron oxide have been detected in parts of this anomaly zone.

3- Anomaly zone ZIII has been detected in the eastern part of the area with an approximate north-south extension. The maximum field intensity in this anomaly zone is about 48,000 nanotesla. This anomaly zone is located in the Md (andesite-dacite lava and tuff), Ma (heavily altered sediments), Ngvs (marl, volcaniclastic sandstone, silt, and conglomerate) and alluvial units. Also, in parts of this anomaly zone, argillic alteration, iron oxide, silica, and copper geochemical anomaly have been detected.

4- Anomaly zone ZIV is located in the west of the detected area. The maximum field intensity in this anomaly zone is about 47300 nanotesla in this zone, the anomaly is located in the Md (andesite-dacite lava and tuff), Ma (heavily altered deposits) and alluvial units. Also, in parts of this anomaly zone, alteration of iron oxide and silica has been detected.

5- Anomaly zone ZV is located south of the detected area. The maximum field intensity in this anomaly zone is about 47400 nanotesla. In this zone, the anomaly is located in the Md (andesite-dacite lava and tuff), Ma (heavily altered deposits) and alluvial units. Also, in parts of this anomaly zone, argillic alteration, iron oxide, silica and also gold geochemical anomaly have been detected.

According to the maps, the origin of the ZII anomaly zone is observed up to a maximum depth of about 100 meters, the origin of the ZIII and ZIV anomaly zones is observed up to a maximum depth of about 250 meters, and the origin of the ZI and ZV anomaly zones is observed up to a maximum depth of about 300 meters.

4-Conclusions

Within the time range of 3, 5 designed profiles have been sampled. The samples have been taken with a polar-dipole array with electrode distances of 20, 40 and 60 meters to a depth of 200 meters. Since the best way to explore epithermal gold deposits is to use tectonic models and alteration models, and given that these deposits are mostly formed as veins in fault zones, Therefore, in the modeled resistivity sections, it is important to determine the faults and anomalies in or around these areas. By comparing the results of the inverted vertical sections of magnetic data with the inverted vertical sections of resistivity and induced polarization data modeling along the 7 IP/RS profiles, the boundary of severe changes in magnetic susceptibility was accompanied by low resistivity and high chargeability, which makes mineralization possible in these areas. Comparison of the results of inverse modeling of magnetic data with geochemical analyses of exploratory boreholes drilled in the region showed that during magnetic susceptibility changes, The gold grade increases sharply. In general, according to the raw data collected in the Bazman 3 area, the chargeability value is high and has reached a maximum of about 80 mV/V. Therefore, the percentage of sulfide mineralization in the Bazman 3 area will be very high. In the modeled resistivity sections, faults have been well recognized, and since the mineralization in these areas is vein-like and is located in the fault

ISSN: 2717-0764
CC BY

zone, in the drillings, most of the anomalies located in the fault zone have been noted. Some of the anomalies are located on areas of high specific resistance that appear as dykes in sections and may be related to silica veins where gold mineralization is likely.

5-References

Irvine, R.J. and Smith, M.J. 1990. Geophysical Exploration for Epithermal Gold Deposits. Journal of Geochemical Exploration 36, 375-412.

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 and Francis 1, 1–5.

Modriniak, N., Marsden, E., 1938. Experiments in geophysical survey in New Zealand. Department of Scientific and Industrial Research.

Mushtaghian, K., Abtahi Forushani, M., AsadiHaruni, H., Haj Heydari, M., Janghorban, G., 2022. 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.

Okada, K., 2000. Geophysical exploration at Hishikari gold mine, Kagoshima, Japan, The Leading Edge. Society of Exploration Geophysicists 19(7), 744-750.

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.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Baharvandi, A., Ehya, F., Aliabadi, M A,. 2026. Application of geophysical data (magnetics and geoelectric) in identifying Au mineralization in the Bazman 3 epithermal deposit (southeast of Iran). Adv. Appl. Geol. 16 (1), 57-76.
DOI: 10.22055/aag.2026.51614.2560
https://aag.scu.ac.ir/article_20633.html

©2026 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

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

کاربرد داده های ژئوفیزیکی (مغناطیس سنجی و ژئوالکتریک) در شناسایی کانی سازی طلا در کانسار اپی‌ترمال بزمان ۳ (جنوب شرق ایران)

احمد بهاروندی
گروه زمین‌شناسی، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران
فرهاد احیاء
گروه زمین‌شناسی، واحد بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی، بهبهان، ایران
محمدعلی علی آبادی
گروه زمین‌شناسی، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران
ehya.farhad@iau.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

چکیده

محدوده طلای بزمان ۳ در جنوب شرق ایران، در شمال غربی پهنه آتشفشانی بزمان قرار گرفته است. این محدوده از توابع استان سیستان و بلوچستان می‌باشد. در این پژوهش، با هدف شناسایی مناطق پتانسیل دار کانی‌سازی طلا در کانسار اپی‌ترمال بزمان، داده‌های ژئوفیزیکی شامل مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی (IP) مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام مطالعات ژئوالکتریک، ۵ پروفیل طراحی شده برداشت گردید. برداشت‌ها با آرایه قطبی– دوقطبی با فواصل الکترودی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر تا عمق ۲۰۰ متر انجام شد. تفسیر نقشه‌های بی هنجاری و پروفیل‌های ژئوالکتریک، منجر به شناسایی پنج زون بی هنجاری (ZI تا ZV) شد که هم پوشانی قابل توجهی با نواحی دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک دارند. زون‌های بی هنجاری ZIII وZV به عنوان مناطق دارای بیشترین پتانسیل کانی‌سازی طلا معرفی شد. نتایج این مطالعه می تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی حفاری‌های اکتشافی و مدل سازی‌های سه بعدی دقیق‌تر در آینده باشد.

واژه‌های کلیدی: *بزمان ۳، مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، اپی‌ترمال*

۱- مقدمه

محدوده اکتشافی بزمان ۳ در جنوب شرق ایران یکی از نواحی مستعد کانی‌سازی طلا در چارچوب کانسارهای اپی‌ترمال محسوب می‌شود، نبود اطلاعات دقیق از ساختارهای زیر سطحی و پراکندگی‌ای دگرسانی، مانعی جدی در مسیر اکتشاف هدفمند منابع معدنی ایجاد کرده است. در سال های اخیر، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مانند مغناطیس سنجی،مقاومت ویژه و IP به عنوان ابزارهای موثر در شناسایی زون‌های کانی سازی مطرح شده‌اند. در چند دهه اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی و IP در پی‌جویی کانسارهای طلای اپی- ترمال 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 اپی ترمال منطقه آتشفشانی کورومندل واقع در جزیره شمالی (Locke et al., 2007)، مطالعه داده‌های در کانسار طلا – نقره اپی‌ترمال هیشیکاری در جنوب باختر ژاپن (Okada, 2000)، کانسار مس وادی الرجیتا در صحرای سینای مصر (et al., Salem 2013) مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی و RS/ IP با هدف اکتشاف کانسار شمالی مس – طلای پورفیری دالی (Mushtaghian et al., 2022)، برداشت ژئوفیزیک به روش RS/ IP در منطقه طلای بزمان ۳ در جنوب شرق ایران اشاره داشت. در مطالعه حاضر ، به بررسی داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده اکتشافی طلای بزمان۳ در جنوب

شرق ایران 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 مدل وارون دو بعدی و سه بعدی داده‌های ژئو فیزیکی می‌باشد. در این راستا، پس از انجام وارون سازی داده‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، ارتباط فضایی بین کانی-سازی طلا با تغییرات خودپذیری مغناطیسی، مقاومت ویژه 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 کانی-سازی طلا با تغییرات کمیت ژئوفیزیکی یاد شده نشان داده می‌شود.

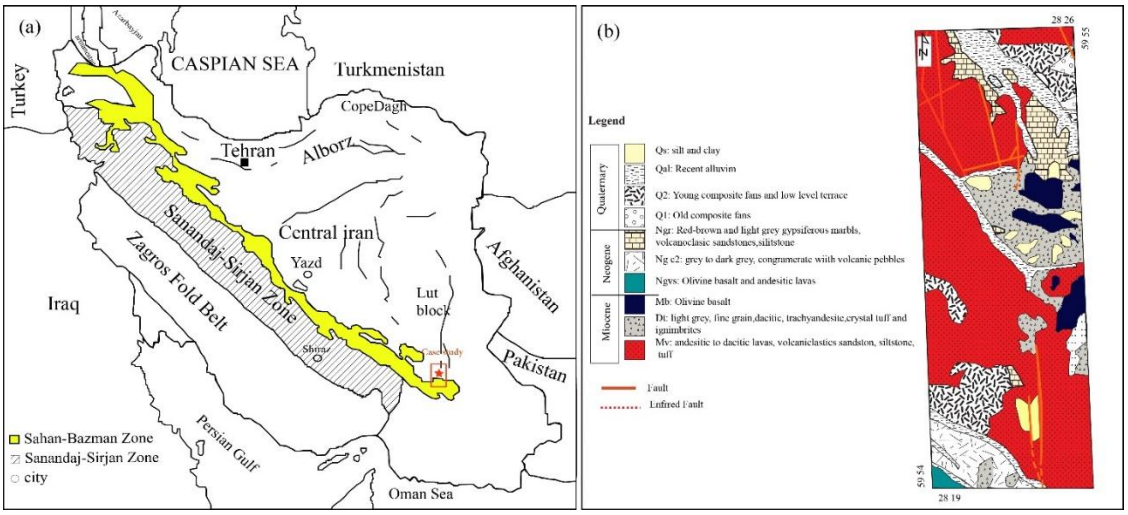
۲- زمین‌شناسی

کانسار طلای بزمان ۳ به وسعت تقریبی ۴۳ کیلومتر مربع در فاصله حدود ۱۶۰ کیلومتری شمال باختری شهرستان ایرانشهر، در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه حد فاصل پهنه‌های لوت، حوضه فلیشی مکران و فرونشست جازموریان و در بخش انتهایی جنوب شرقی کمان ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است (شکل ۱ a).

مهمترین واحدهای زمین‌شناسی منطقه، شامل سنگ‌های آتشفشانی، آذرآواری و نهشته‌های آواری است (شکل ۱ b). این واحدها به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول که قدیمی‌تر هستند شامل واحدهای داسیتی و آندزیتی بوده و متحمل دگرسانی آرژیلیک و پروپلیتیک شده‌اند. گروه دوم شامل گدازه-های آندزیتی، آندزیت بازالتی و اولیوین بازالت است که بسیار جوان بوده و مربوط به فوران‌های جوان بزمان می‌باشند. آتشفشان بزمان با ارتفاع ۳۴۹۰ متر از سطح دریا در ۲۰ کیلومتری جنوب این محدوده قرار دارد. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه بزمان واحدهای رسوبی-تخریبی کربونیفر و سازند کربناته جمال با سن پرمین هستند که توسط توده گرانیتی بزمان با سن کرتاسه قطع شده‌اند. واحدهای رسوبی-تخریبی ائوسن و میوسن به گونه کمربند چین‌خورده- گسلیده با روند شمال- شمال‌خاوری، جنوب-جنوب‌خاوری در بخش شرقی آتشفشان بزمان رخنمون دارند. در بخش جنوبی آتشفشان، سنگ‌های آتشفشانی نئوژن و کواترنری گسترش دارند. سنگ-های آتشفشانی جوان به حالت افقی یا با شیب کم روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند. آتشفشان بزمان به گونه یک آتشفشان استراتوولکان است که در زمان کواترنری فورآن‌های انفجاری و غیرانفجاری داشته است. بدین ترتیب و برپایه مطالعات صحرایی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه در دو گروه سنگ‌های آتشفشانی نئوژن و سنگ‌های آتشفشانی کواترنری تقسیم می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی کواترنری از دهانه اصلی آتشفشان یا دهانه‌های جانبی آن فوران کرده‌اند. بیشتر دهانه-های جانبی آتشفشان در بخش شمالی و شمال‌شرقی آن تشکیل شده‌اند. سنگ‌ایی که از دهانه اصلی آتشفشان فوران کرده‌اند پیرامون آن پراکنده شده و مساحتی بیش از ۳۰۰ کیلومتر مربع را پوشانده‌اند. ایـن واحدهای سنگی (کواترنری) از قدیم به جدید شامل توف و برش‌های آتشفشانی، گدازه آندزیتی پورفیری صورتی- خاکستری و گدازه آندزیتی خاکستری تیره تا سبز تیره هستند. مجموعه یاد شده توسط افقی از پومیس پوشیده شده است که به ویژه در دامنه‌های شرقی و جنوبی راس قله رخنمون دارد. جوان‌ترین افق‌های آتشفشانی بزمان گدازه-هایی هستند که از دهانه‌های جانبی فوران کرده‌اند (Kav Mining Engineering Company, 2018) (شکل ۱ b).

اختلاف ارتفاع در محدوده مطالعاتی حدودا به ۱۰۰ متر می‌رسد. برجستگی عمومی در بخش‌های جنوبی، همانند ارتفاعات خاص منطقه بوده و هر چقدر به شمال‌شرق منطقه نزدیک می‌شویم از ارتفاعات منطقه کاسته می‌شود. رگه‌ها و تپه‌های سیلیسی شده توده‌ای، متراکم و ستیغ‌ساز هستند. مورفولوژی کانسار به سمت شمال به صورت تپه ماهوری است و در دشت سمسور در شمال‌شرق مورفولوژی ویژه مناطق بیابانی دیده می‌شود (شکل ۲). توپوگرافی منطقه غالباً شامل تپه‌هایی با ارتفاع کم می‌باشد. رودهای فصلی و آب سطحی در بستری پهن در جهت شیب عمومی منطقه جریان دارند. ماسه-های بادی در سراسر منطقه گسترش دارند (Kav Mining Engineering Company, 2018).

دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک، همراه با شکستگی‌های پر شده با کوارتز نشان دهنده فعالیت‌های گرمابی مرتبط با کانی‌سازی طلا هستند (Kav Mining Engineering Company, 2018).



شکل۱- (a) موقعیت محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه ساختاری ایران با تغییرات از (Sahandi et al., 2014)، (b) نقشه زمین‌شناسی محدوده بزمان۳ با مقیاس (۱/۱۰۰۰) (Kav Mining Engineering Company, 2018)

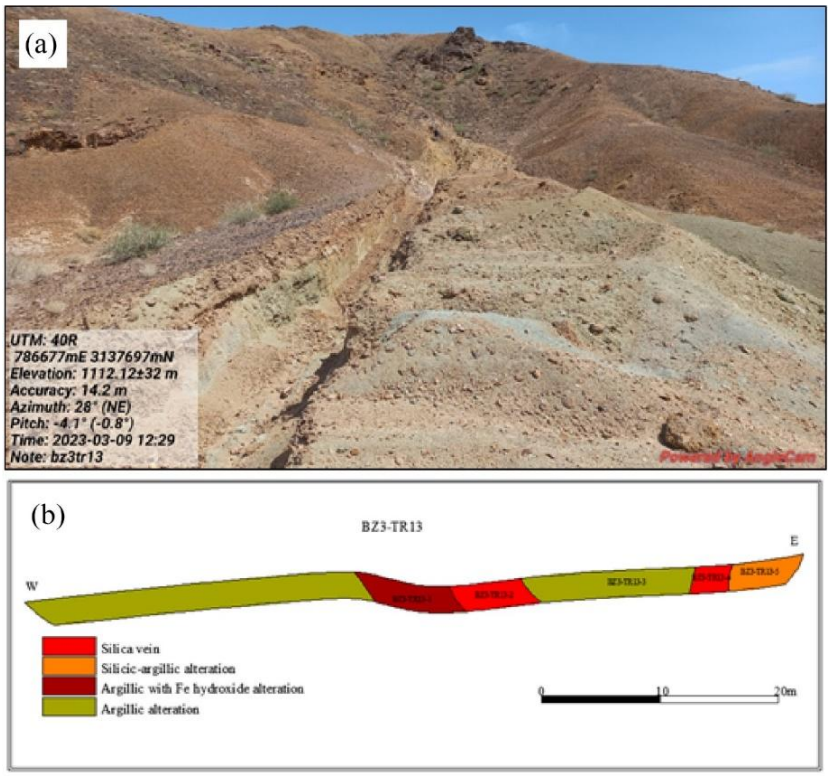
Fig 1. (a) The location of the range on the Iran Structure Map (Sahandi et al., 2014), (b) Geological map of the Bazman3 (scale:1/1000)) (Kav Mining Engineering Company, 2018)



شکل ۲- نمایی از توف‌های داسیتی همراه با رگه‌های سیلیسی در جنوب خاوری محدوده بزمان ۳ و نمایی از رگه‌های سیلیسی-کربناته.

Fig 2. View of dacite tuffs with silica veins in the southeast of the Bazman 3 area and a view of silica-carbonate veins.

ترانشه BZ3-TR13 (شکل ۳) در محل نمونه‌ای با عیار طلای ۱۳ گرم در تن طراحی شده است. این ترانشه به طول ۶۶ متر با راستای باختری-خاوری حفر شده به طوریکه بخش اصلی این ترانشه زون دگرسانی آرژیلیک بوده و زون سیلیسی برشی شده در بخش میانی و انتهای ترانشه توسعه یافته است. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که عیار طلا در زون سیلیسی انتهای ترانشه بالغ بر ۹ گرم در تن گزارش شده و در برخی نمونه‌ها غنی‌شدگی دارد (جدول ۱). به همین دلیل بر روی این زون ۴ ترانشه بزرگ با راستای شمالی-جنوبی به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر حفر شده است (BZ3TR-11,BZ3TR-12, BZ3TR-13, BZ3TR-14). بر روی این زون تعداد ۴۸ گمانه اکتشافی حفر شده و از این تعداد ۴۱ گمانه به روش RC و۵ گمانه به روش مغزه‌گیری، با شبکه ۸۰ تا ۴۰ متری حفاری شده است. بیشترین عمق گمانه حفاری‌های مغزه‌گیری ۳۱۱ متر بوده و گمانه‌های RC اغلب تا ۱۰۰ متر حفاری شده‌اند.



شکل۳- (a) تصویر صحرایی از ترانشه BZ3TR-13 و (b) مقطع زمین‌شناسی ترانشه BZ3TR-13.

Fig 3. (a) Field image of trench BZ3TR-13 and (b) Geological section of BZ3TR-13 trench

جدول ۱- نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده از ترانشه TR13 بزمان ۳

Table 1. Results of analysis of samples taken from trench TR13 at time 3

Sample	Au(ppb)	Ag(ppm)	Al(ppm)	As(ppm)	Ba(ppm)	Bi(ppm)	Cd(ppm)	Cu(ppm)	Fe(ppm)	Mn(ppm)	Mo(ppm)	Pb(ppm)	S(ppm)	Sb(ppm)	Sn(ppm)	W(ppm)	Zn(ppm)
BZ3-TR13-1	59	0.075	64994	20.7	1747	0.075	0.4	7	27658	1007	0.375	6	6971	1.2	0.6	1.6	57
BZ3-TR13-2	32	0.075	62262	30.7	1843	0.075	0.4	7	33895	117	1.5	4	3794	1.5	0.9	1.5	31
BZ3-TR13-3	144	0.075	63248	21.1	1302	0.075	0.2	17	21507	756	0.8	0.75	5295	0.8	0.7	1.7	300
BZ3-TR13-4	9767	13.2	31798	26.3	898	0.8	0.5	252	13648	287	2	166	3238	6.5	1.3	1.4	178
BZ3-TR13-5	179	0.075	67855	133	1394	0.075	0.9	13	13704	76	1.3	0.75	1520	3.5	0.3	2.5	32

۳- مواد و روش‌ها

در پیگیری انجام مطالعات در محدوده بزمان، سه اکیپ ژئوفیزیک، از شرکت معدن کاو برداشت داده‌های مغناطیسی را از تاریخ ۱۴۰۱/۰۹/۲۳ تا ۱۴۰۱/۱۰/۰۹ انجام دادند. در طی دوره برداشت داده‌ها، با برپایی ایستگاه ثابت، تغییرات روزانه هر ۲ دقیقه جهت انجام تصحیحات روزانه و بررسی وجود احتمالی طوفان‌های مغناطیسی ثبت می‌گردید. در مجموع در این محدوده، ۱۳۴۷۴ ایستگاه مورد برداشت شدت کل میدان مغناطیسی قرار گرفته است. برای پوشش این محدوده شبکه ۴۰ × ۸۰ (فاصله پروفیل‌ها ۸۰ متر و فاصله نقاط برداشت ۴۰ متر) به صورت شناسایی انتخاب گردید. با توجه به مینرالیزاسیون منطقه و نتایج مطالعات زمین‌شناسی، امتداد پروفیل‌ها شمالی-جنوبی انتخاب شده تا به طور تقریبی بر امتداد مینرالیزاسیون عمود باشد و تمامی نقاط بر روی پروفیل-هایی با این راستا برداشت شده است. در مجموع برداشت‌ها بر روی ۵۱ پروفیل انجام شده است. کلیه ایستگاه‌ها با دستگاه‌های G.P.S برداشت شده است. داده‌های صحرایی برداشت شده IP/RS، با استفاده از نرم افزارهای پردازشی، اصلاح و مدل سازی شده و مقاطع ژئوفیزیکی تهیه می‌شوند که شامل دو مقطع دوبعدی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون‌القایی هستند. هنگام

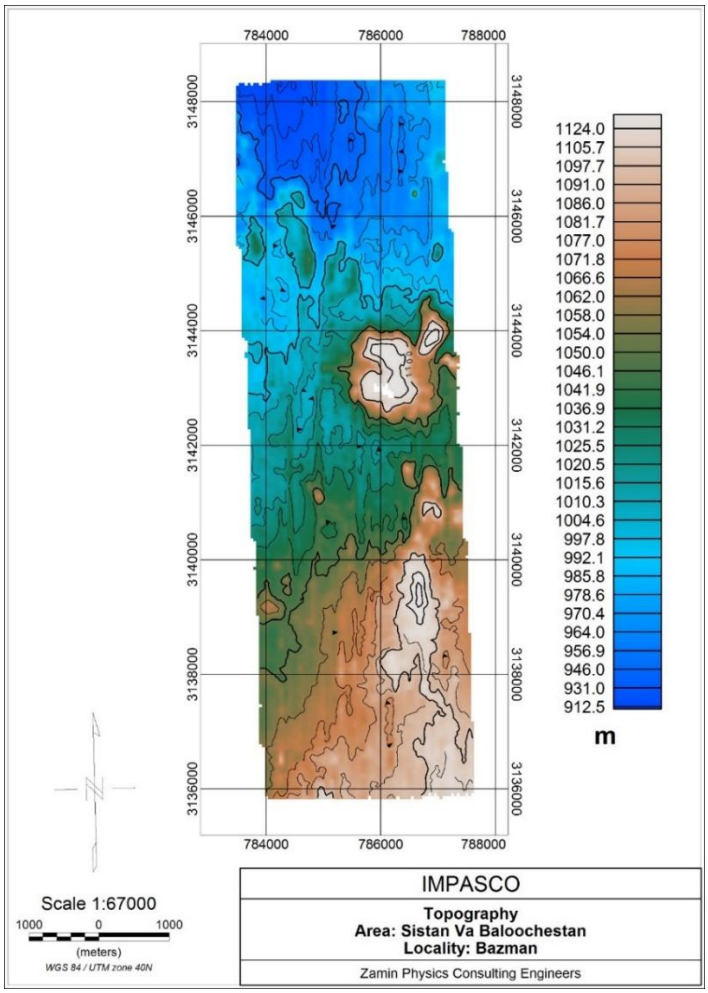
مدل‌سازی از ارتفاع نقاط خط برداشت برای تصحیحات توپوگرافی استفاده شده تا تاثیر توپوگرافی بر روی موقعیت و مقدار پارامترهای اندازه گیری شده محاسبه و اعمال شود.

در این مطالعه از نرم افزار Res2Dinv برای پردازش داده-های توموگرافی الکتریکی استفاده شد. دامنه تغییرات مقادیر مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی از کوچک به بزرگ با طیف رنگی آبی تا بنفش رنگ نمایش داده شده است.

مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی تغییرات جانبی و عمقی این پارامترهای فیزیکی را نشان می‌دهند و صرفاً استفاده از این تغییرات منجر به شناسایی نوع لیتولوژی نمی-شود. بنابراین جهت کاهش عدم قطعیت در شناسایی نوع لیتولوژی در زمان تفسیر مقاطع ژئوالکتریکی، نیاز به استفاده از داده‌های زمین‌شناسی منطقه و نیز اطلاعات گمانه های حفاری موجود می‌باشد.

۴-مطالعات مغناطیس سنجی

برای پوشش محدوده بزمان ۳، ۵۱ پروفیل با راستای شمالی – جنوبی با برداشت داده‌ها شبکه ۴۰ × ۸۰ (فاصله پروفیل‌ها ۸۰ متر و فاصله نقاط برداشت ۴۰ متر) به صورت شناسایی انتخاب گردید و با توجه به کانی‌زایی منطقه و نتایج مطالعات زمین-شناسی، امتداد پروفیل‌ها شمالی - جنوبی انتخاب شده تا امتداد پروفیل شمالی – جنوبی به طور تقریبی بر امتداد کانی-زایی عمود باشد و تمامی نقاط بر روی پروفیل‌هایی با این راستا برداشت شده است (شکل ۴).



شکل ۴- نقشه توپوگرافی محدوده به همراه موقعیت پروفیل‌ها و نقاط اندازه‌گیری شده ونتایج تفسیرهای انجام شده شامل محدوده‌های بی‌هنجاری، همبری‌ها ،گسل‌ها ومحل حفاری‌های اکتشافی پیشنهادی.

Fig 4. 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

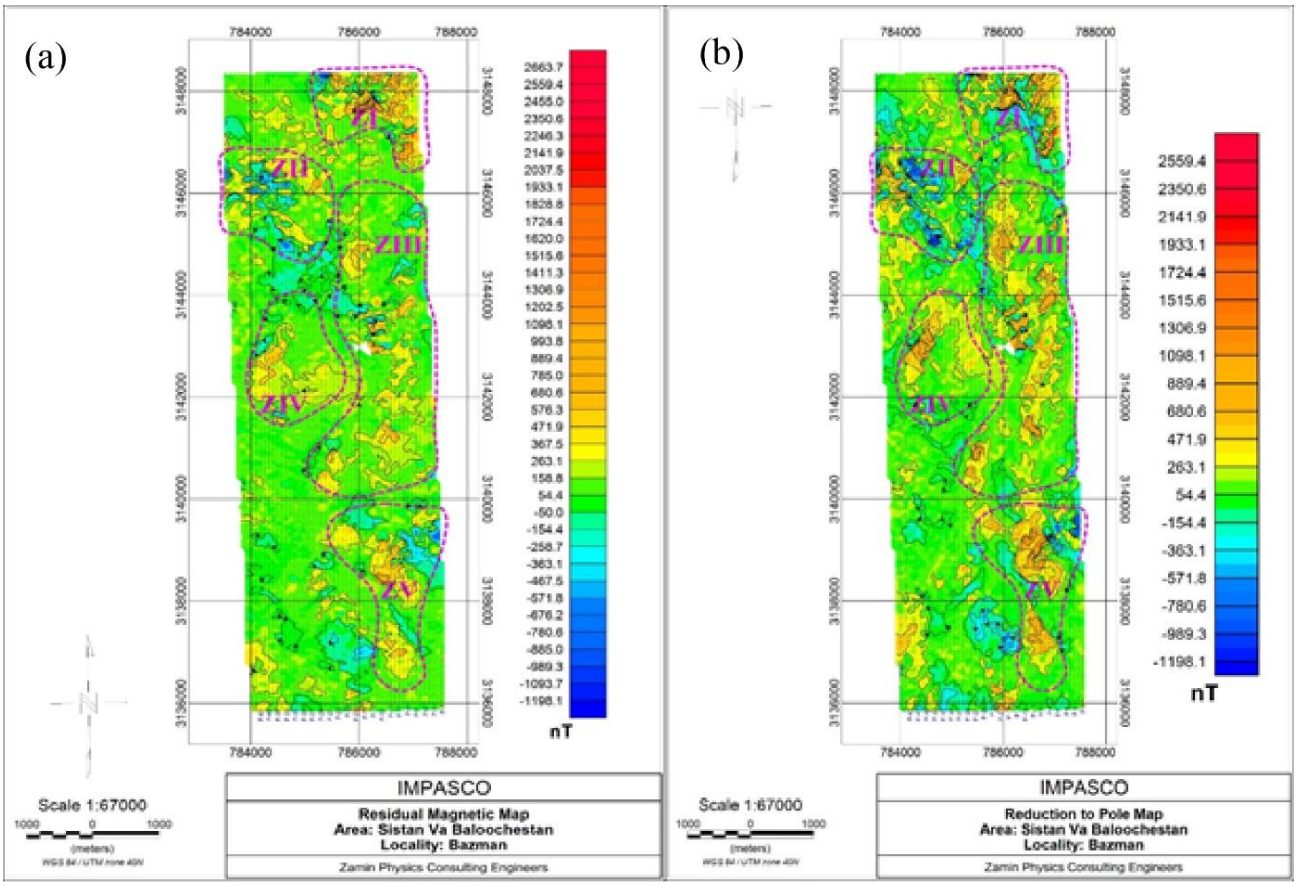
در زمان برداشت، شدت میدان مغناطیسی مرجع زمین (IGRF) در منطقه مورد مطالعه ۴۶۴۱۵ نانو تسلا می‌باشد (شکل ۵). نقشه شدت میدان مغناطیسی منطقه را قبل و پس از اعمال تصحیحات روزانه و حذف میدان مرجع ژئومغناطیسی زمین نشان می‌دهد. در مرحله بعد، با هدف جداسازی بی‌هنجاری ناشی از منبع مغناطیسی محلی از آثار مغناطیسی 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 ۶) به ترتیب نقشه ادامه فراسوی۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ 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 ZIII و ZV در عمق به یکدیگر می‌پیوندد و در نهایت به صورت یک منشاء ظاهر می‌گردند. با توجه به این که زاویه میل 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 حفاری‌های اکتشافی را با دقت بیشتری پیشنهاد داد. به منظور حذف آنومالی‌های ناحیه‌ای در تعبیر و تفسیر، نقشه برگردان قطب (RTP) از نقشه شدت میدان باقیمانده تهیه گردیده و با این نقشه مقایسه می‌شود (شکلd۷). از پردازش‌هایی مانند فیلترها و تبدیل به قطب اطلاعی در مورد ژرفای توده‌های منبع مغناطیسی به دست نمی‌آید. برای تخمین ژرفای منابع بی‌هنجاری مغناطیسی، روش‌هایی بدون نیاز به وارون‌سازی داده‌ها ابداع شده است که از میان آنها می‌توان به روش واهمامیخت اویلر اشاره نمود. از مزیت‌های استفاده از روش اویلر این است که نیازی به اطلاعاتی درباره جهت مغناطیس‌شدگی نمی‌باشد و حضور مغناطیس پسماند نیز تأثیری بر نتایج به دست آمده ندارد (Ravat, 1996). این روش با فرض این که میدان‌های گرانی و مغناطیسی در هر پنجره مختصاتی از داده‌ها همگن هستند اعمال می‌شود زیرا با وجود این فرض این میدان‌ها از رابطه اویلر پیروی خواهند کرد (Nik Farjam et al., 2015). در روش یاد شده از گرادیان‌های قائم مغناطیسی استفاده می‌شود (Saif et al., 2018). رابطه اویلر در مختصات کارتزین به صورت زیر نوشته می‌شود:

(رابطه ۱)

$$(\mathbf{x}-x_0)\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}}+(y-y_0)\frac{\partial T}{\partial z}+(z-z0)\frac{\partial T}{\partial z}=N(B-T)$$

براساس معادله ۱، X،Y و Z مختصات نقاط برداشتی، X0، Y0 وZ0 ، مختصات منبع، T میدان کل، N اندیس ساختاری می‌باشند که مقدار آن از برای همبری‌های افقی تا ۳ مورد منابع مغناطیسی کروی شکل تغییر می‌کند (Thompson, 1982). (شکل۶ e) نتایج ژرفاسنجی به روش و اهمامیخت اویلر را با فرض کروی بودن توده‌های مغناطیسی و استفاده از اندیس ساختاری ۳ نشان می‌دهد. روش تخمین عمق اویلر یک روش اتوماتیک تخمین عمق می‌باشد که بر روی داده‌های مغناطیسی عمل می‌کند تا عمق منبع مغناطیسی را تعیین کند. در این روش یک پنجره مربعی کوچک بر روی تمام داده‌ها حرکت می‌کند و در هر پنجره بهترین تطبیق عمق (best - fit) برای یک مدل با هندسه خاص محاسبه می‌شود. نتایج بدست آمده بر روی نقشه رسم شده و متناسب با عمق محاسبه شده با مقیاس رنگ نشان داده می‌شوند و در مجموع یک نقشه اویلر سه بعدی ایجاد می‌شود. این روش داده‌های میدان مغناطیسی کل و نیز مشتقات افقی x و y و مشتق قائم را بکار می‌برد. یک

مزیت مهم معادله اویلر این است که نسبت به زاویه میل، انحراف و مغناطیس باقیمانده حساس نمی‌باشد. 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 شده است. همانگونه که در (شکل ۶ e) مشاهده می‌شود، عمق مشخص شده بی-هنجاری‌های ردیابی شده در محدوده مورد مطالعه، از عمق حدود ۴۰ متر تا عمق حدود ۵۰ متر و با مقدار متوسط ۳۵ متر تخمین زده شده است و انطباق نسبی با عمق‌های به دست آمده از روش‌های دیگر را دارد.

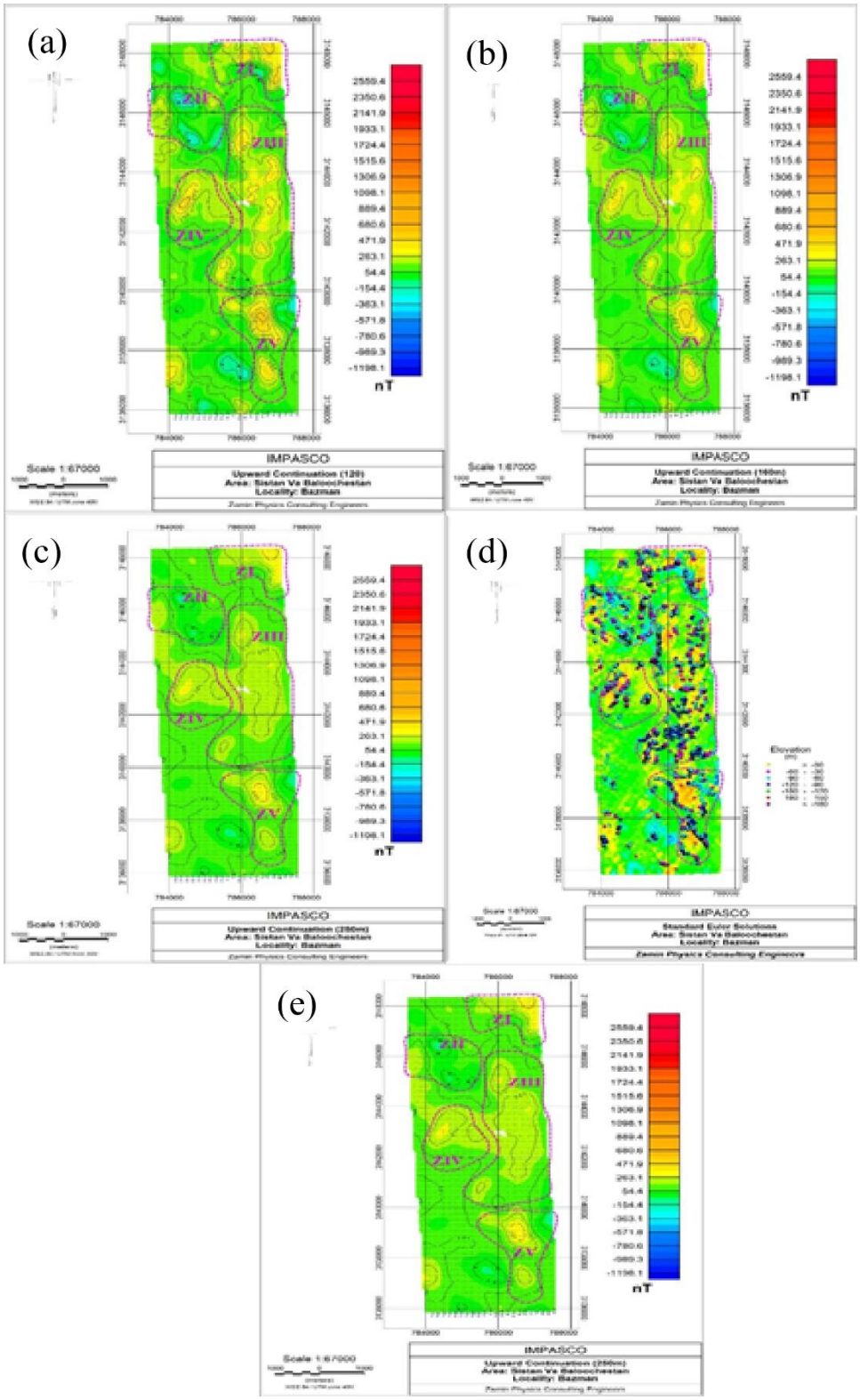


شکل ۵- (a) نقشه تغییرات شدت میدان کل محدوده و (b) نقشه شدت میدان مغناطیسی کل محدوده پس تصحیحات روزانه و حذف IGRF

Fig 5. (a) The map of changes in the field intensity of the entire bazman 3 area, and (b) The map of the magnetic field intensity of the entire bazman3area after applying daily corrections and removing IGRF.

۵ - مطالعات ژئوفیزیک به روش مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی

افزون بر برداشت مغناطیس‌سنجی، برداشت IP/RS در محدوده بزمان ۳ به تعداد ۵ پروفیل با آزیموت ۸۸ تا ۱۳۴درجه و طول ۱۱۸۰ تا ۲۵۲۰ متری پیشنهاد شده بود (جدول ۲) و لذا در این محدوده تعداد ۵ پروفیل برداشت گردید (شکل ۷). 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 (جدول ۳).



شکل ۶- (a) نقشه فراسو در ارتفاع ۴۰ متر، (b) نقشه فراسو در ارتفاع ۸۰ متر و (c) نقشه فراسو در ارتفاع ۱۶۰ متر، (d) نقشه بر گردان قطب (RTP) و (e) نقشه تخمین ژرفای منابع مغناطیسی کروی با استفاده از واهمامیخت اویلر بر داده‌های نمایش داده شده.

Fig 6. Regional magnetic field intensity map by continuing beyond to a height of (a)40 meters, (b) 80 meters and (c) 160 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.

جدول ۲- مشخصات پروفیل‌های برداشت شده در محدوده بزمان۳
Table 2. Characteristics of profiles collected in Bazman 3 area

Profile name	Azimuth (degrees)	Length (m)	Coordinates (UTM)	
			First	The end
BZ 01	88	2520	415285- 3694371	415626- 3694791
BZ 05	134	1180	414048- 3693090	414248- 3693312
BZ 06	138	1180	413894- 3693232	414109- 3693439
BZ 07	142	1180	413798- 3693525	414023- 3693713
BZ 08	149	1180	413488- 3693675	413699- 3693893

جدول ۳- تعداد نقاط برداشت شده در محدوده بزمان۳
Table 3. Number of points collected in Bazman3 area

profile number	array Harvest	Electrode spacing	of data retrieved The number
BZ01	bipolar - Polar	20	135
BZ05	bipolar - bipolar	10 - 20	268
BZ06	bipolar - bipolar	10 - 20	280
BZ07	bipolar - bipolar	10 - 20	281
BZ08	bipolar - bipolar	10 - 20	281
Total			1245

۶- مبانی مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی

هرچند با اعمال پردازش‌های معمول بر داده‌های مغناطیسی می‌توان به حدود محل قرارگیری توده‌های مغناطیسی پی‌برد و یا با روش واهامیخت اویلر 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 مقاومت ویژه 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 اندازه گیری 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 اندازه‌گری شده توسط دستگاه، محاسبه مقادیر مجهول پارامترهای فیزیکی توده‌های مدفون محدوده مورد مطالعه، امکان پذیر 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).

$$d=G(m) \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

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 مد m هستند که با استفاده از رابطه ۲ با داده‌های اندازه‌گیری شده ارتباط دارد. بنابراین تعداد المان‌های بردار مدل m با تعداد بلوک‌های پیش‌بینی 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.

$$\emptyset_d = \|w_d = (d - d^{obs})\|_2^2 \quad \text{(رابطه۳)}$$

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 dobs داده‌های اندازه‌گیری شده است. هرچند می‌توان با کمینه‌سازی $\emptyset_d$ 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.

$$\emptyset_m(m) = \|w_m = (m - m_0)\|2 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

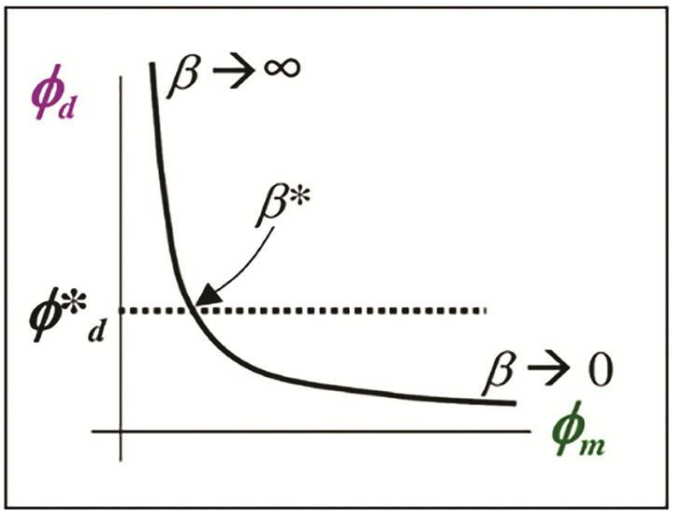
که در آن، m_0 مدل اولیه و w_m ماتریس کوواریانس و یا ارتباط فضایی اجزای مدل می‌باشد. معمولا برای ایجاد یک مدل هموار، w_m به صورت ماتریس حاوی ضرایب مشتقات مرتبه اول مدل تعریف می‌شود. اکنون با ترکیب معادلات ۳ و ۴، تابع جدیدی به نام تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود که با کمینه‌سازی آن، هم مقدار خطای تخمین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

$$\emptyset(m) = \emptyset m(m) + \beta(\emptyset_d - \emptyset_d^*) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

در معادله ۵، در معادله ۵، β ضریب لاگرانژ و $\emptyset_d^*$ نیز مقدار خطای تخمین داده می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار بهینه ضرایب لاگرانژ، از ارتباط بین مقدار طول مدل و خطای داده‌ها در شکل ۸ 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. در حالی که اگر خطای مدل‌سازی 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 طول مدل و خطای داده قابل قبول باشد (Oldenburg and Pratt, 2007; Ren and Kalscheuer, 2020).

در پژوهش حاضر، مدل خودپذیری مغناطیسی محدوده مورد مطالعه با استفاده از وارون‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی به دست آمده است، بدین منظور از نرم افزار UBC Mag3D 4.0 استفاده شد. همچنین تخمینی از مدل مقاومت ویژه و شارژپذیری الکتریکی با استفاده از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی برداشت شده به دست آمد. مدل‌سازی یاد شده در امتداد پروفیل‌های نشان داده شده در شکل ۷ و با استفاده از نرم افزار UBC DCIP2D 3.2صورت گرفت. پارامترهای موجود در معادلات ۳، ۴ و ۵ برای وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی با استفاده از روش ارائه شده توسط اولدنبرگ و لی (Oldenburg and Li, 1994) محاسبه شده‌اند.



شکل ۷ - منحنی Trade-Off ؛ رابطه بین مدل و طول خطا را نشان می‌دهد (Oldenburg and Pratt, 2007).

Fig 7. Trade-off curve; It shows the relationship between the model and the error length (Oldenburg and Pratt, 2007).

۶-۱- نتایج مدل‌سازی وارون سه بعدی داده‌های مغناطیسی

به منظور وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی از نرم‌افزار Mag3D 4.0 استفاده شده است. روش مدل‌سازی وارون مورد استفاده در این نرم افزار را لی و الدنبرگ ارائه داده‌اند. در این مدل‌سازی، 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 وارون‌سازی داده‌ها به دست آوردن مدل مناسب با استفاده از این داده‌های نوفه‌دار است. به منظور وارون‌سازی داده‌ها با استفاده از این الگوریتم ابتدا لازم است که مقدار نوفه تخمینی موجود در داده‌ها به نرم‌افزار 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 وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی در محدوده بزمان۳، مقدار نوفه گوسی برابر با انحراف معیار یک درصد (۱ ٪) به علاوه ۱ نانوتسلا اختصاص داده شد. سپس محدوده مدل‌سازی به توری‌هایی با ابعاد ۱۵×۳۰×۳۰ متر تقسیم و مقدار مغناطیس پذیری بیشینه ۰/۰۰۳ و کمینه صفر به صورت قید به مدل اضافه شد. لازم به ذکر است مقدار مغناطیس پذیری بیشینه محدوده‌های بی‌هنجاری SI ۰/۰۰۳ به دست آمده است ولی برای نمایش بهتر در مدل‌سازی مقدار بیشینه SI ۰/۰۰۳ در نظر گرفته شده است. سپس وارون‌سازی سه بعدی بر روی داده‌های مغناطیس منطقه بزمان۳ انجام گرفت. با توجه به ماکزیمم مقدار مغناطیس‌پذیری به دست آمده در مدل‌سازی و مقایسه با نقشه زمین‌شناسی و نیز مقدار مغناطیس‌پذیری شیست می‌توان احتمال داد بی‌هنجاری ردیابی شده در اثر وجود شیست‌ها در محدوده مورد مطالعه باشد.

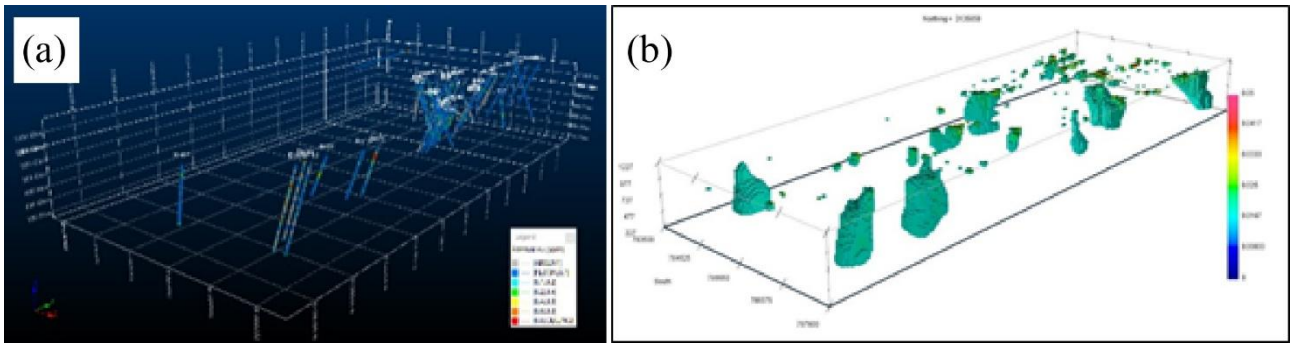
با توجه به اطلاعات بدست آمده در محدوده بزمان ۳، ارزیابی ذخیره بر روی زون سیلیسی شماره ۱ انجام شده است. بر روی این زون تعداد ۴۶ گمانه حفر شده است. از این تعداد ۴۱ گمانه به روش RC و ۵ گمانه به روش مغزه‌گیری، با شبکه ۸۰ تا ۴۰ متری حفاری شده است. بیشترین عمق گمانه حفاری‌های مغزه‌گیری ۳۱۱ متر بوده و گمانه‌های 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 لیتوژئوشیمی 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 زمین‌شناسی گمانه‌ها (سنگ‌شناسی، ساخت، بافت، رنگ و نوع و شدت دگرسانی‌ها)، لایه اطلاعاتی توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰پس از جمع‌بندی و مرتب‌سازی کلیه داده‌های مربوط به گمانه‌ها و آنالیز عنصر طلا در قالب اکسل و تبدیل آن به فرمت اجرایی نرم افزار دیتاماین (فرمت متنی TEXT)، داده‌ها وارد نرم‌افزار دیتاماین شده و پردازش‌های تحلیلی بر روی آن‌ها اعمال شده است. در ادامه با استفاده از روش‌های کلاسیک مقاطع، کرجینگ و عکس مجذور فاصله IDW تخمین ذخیره کانسار اصلی بزمان۳ انجام پذیرفت و نهایتا ذخیره کانسار با توجه به رده‌بندی‌های استاندارد موجود طبقه‌بندی 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، Yو Z باید به چند بخش موسوم به زیربلوک تقسیم شوند و در مورد هر یک 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 زمین‌آماری 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 ، Yو 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 نظرگرفته 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، Yو Z از شعاع جستجوی 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 همه زون‌ها ۲ برابر شعاع جستجوی اولیه در نظر گرفته شده است (شکل ۸).

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 میلی‌گرم در تن، میزان ذخیره در حدود ۲۶۹۶۵۹۵ تن با عیار متوسط طلای ۱۶۴۴ میلی‌گرم در تن، محاسبه شده است (جدول ۴).

۷-مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی سه بعدی با نتایج تجزیه‌های ژئوشیمیایی گمانه‌های موجود در منطقه

در محدوده بزمان۳، حفاری‌های بر روی پنج رگه انجام شده است. این رگه‌ها به ترتیب شامل رگه‌های Bz3p2, Bz3p3, Bz3p4, Bz3p5, Bz3p8 است که در آن مقادیر طلا بالا گزارش شده است. این حفاری‌ها با دو روش مغزه‌گیری و RC انجام شده و نتایج مناسبی بدست آمده است (شکل۹). عملیات حفاری این محدوده در سال ۱۴۰۱ انجام شد. برنامه حفاری به دو صورت شناسایی و سیستماتیک برنامه‌ریزی شده بود. حفاری‌های شناسایی به روش مغزه‌گیری حفاری شده و حفاری‌های سیستماتیک به صورت ترکیبی از حفاری‌های مغزه-گیری و RC انجام شده است. این حفاری‌ها شامل ۲۰ گمانه RC به طول ۱۳۰۵ متر و ۱۸ گمانه مغزه‌گیری به طول ۱۵۷۰ متر است. به منظور یافتن رابطه فضایی بین نواحی کانی‌سازی و مدل خودپذیری مغناطیسی، نتایج مدل سه بعدی تخمین زده شده خودپذیری مغناطیسی با نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی گمانه‌های موجود در منطقه مقایسه شد نتایج حاصل از مقایسه اطلاعات مربوط به آنالیز ژئوشیمیایی گمانه‌ها با مقطع مدل‌خودپذیری مغناطیسی در امتداد گمانه‌های یاد شده در شکل‌های ۱۰تا۱۳ نشان داده شده است.



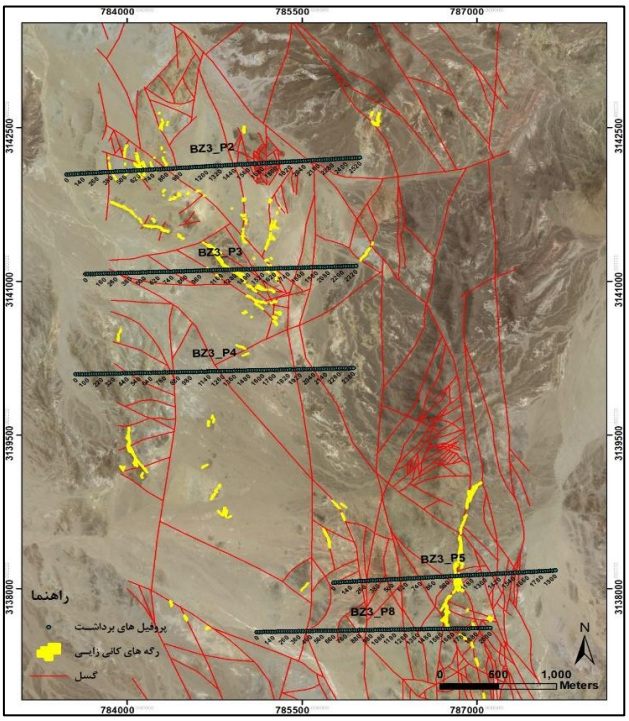
شکل ۸- (a) نمایی از وضعیت گمانه‌های حفاری شده در محیط دیتاماین و (b) مدل سه بعدی کانسار طلای بزمان۳ با تخمین به روش کریجینگ.

Fig 8. (a) A view of the condition of drilled boreholes in the data mine environment and (b) 3D model of Bazman3 gold mine with kriging estimation.

جدول ۴- ارزیابی ذخیره زون شماره ۱ در رده قطعی به روش کریجینگ.

Table 4. 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

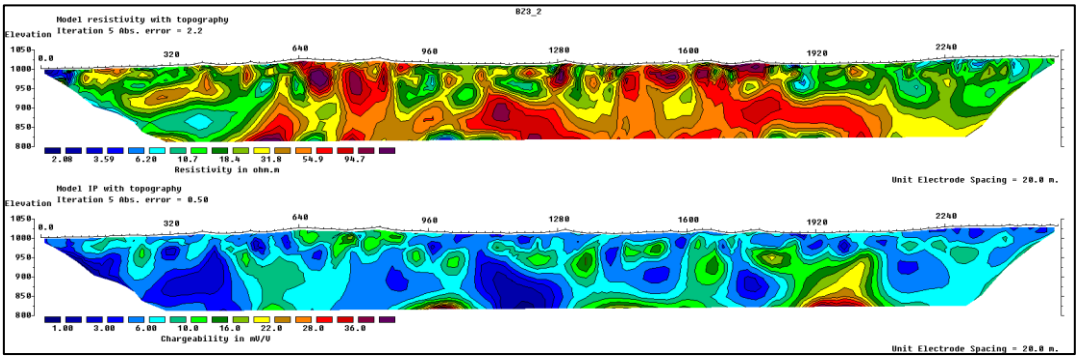


شکل۹- موقعیت نقاط حفاری مغزه‌گیری بر روی زون‌های کانه‌دار بخش باختری محدوده بزمان۳

Fig 9. The location of the core drilling points on the mineralized zones of the western part of the Bazman3 range

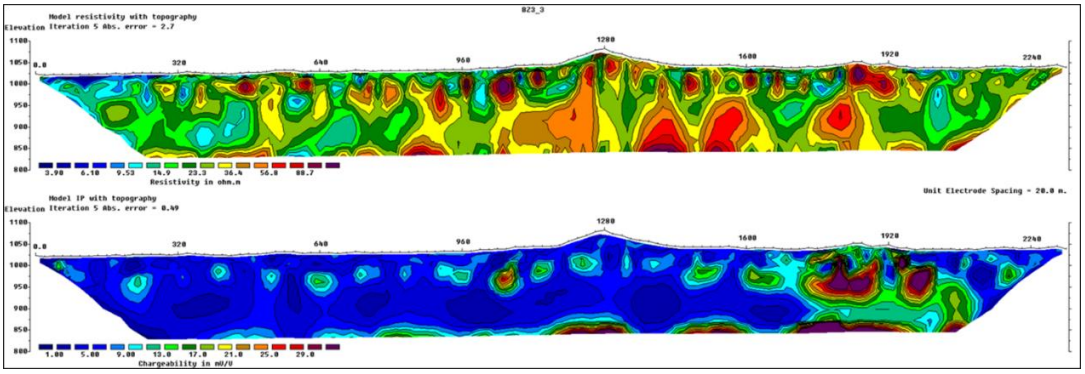
نمونه‌برداری از حفاری‌های RC از متراژهایی صورت پذیرفت که قطعات سیلیسی مشاهده گردید و رنگ کاتینگ حفاری سفید تا زرد تغییر می‌کرد. اما بخش‌های تیره که حاوی سنگ دربرگیرنده شیست و ماسه‌سنگ دگرگونی بوده نمونه‌ای برداشت نگردید. در نهایت نمونه‌ای از تمام متراژهای حفاری به صورت همگن نیز برداشت شده و به آزمایشگاه ارسال گردید. نمونه‌ها به روش ICP-MS و Fire assay آنالیز گردید. در بخش میانی رگه شماره ۱، به طور سیستماتیک تعداد ۱۱ گمانه RC با فواصل ۲۰ تا ۴۰ متر حفر شده است. عمق این گمانه‌ها اغلب ۱۰۰ متر بوده و نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده از آنها نشان می‌دهد عیار طلا در نمونه‌ها بسیار بالا بوده و گاهی بیش از ۲۰ گرم در تن گزارش شده است. در برخی از این گمانه‌ها نمونه معرفی از سراسر گمانه برداشت شده که نشان می‌دهد میانگین عیار طلا در برخی از گمانه‌ها بالا است. بعنوان مثال در ۱۰۰ متر گمانه BZRC-5، میانیگن عیار طلا ۱۱۸۲ میلی‌گرم در تن اندازه‌گیری شده است. در کل گمانه BZARC-8 میانگین عیار طلا ۱۹۳۵ میلی‌گرم در تن، در کل گمانه BZARC-6، ۵۶۱ میلی‌گرم در تن، در کل گمانه BZARC-9، ۶۱۰ میلی‌گرم در تن و در کل گمانه ۷، مقدار میانگین عیار طلا، ۴۰۰ میلی‌گرم در تن گزارش شده که این مقادیر میانگین طلا برای این زون کانه‌دار بی‌نظیر است. هرچند انتخاب نمونه از کاتینگ حفاری به صورت بصری انجام شده و سعی شده نمونه‌گیری از زون‌هایی باشد که دارای رنگ روشن بوده و از سنگ دربرگیرنده شیستی تیره رنگ نمونه برداری نشود، با این حال نمونه‌ها همگی همگن بوده و معرف متراژی است که به وسیله آن نمونه نامگذاری شده است. بعنوان مثال در گمانه BZRC-8، عیار طلا در متراژ ۱۱ تا ۱۲ بیش از ۱۲ گرم در تن و در متراژ ۱۲ تا ۱۳ بیش از ۱۳ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. نتایج آنالیز نمونه‌ها همچنین نشان می‌دهد همبستگی معنی‌داری بین مقادیر بالای طلا، آرسنیک، بیسموت و تنگستن وجود دارد و عناصر مذکور دارای غنی‌شدگی مشخصی هستند. هرچند مقادیر آرسنیک واقعی نبوده و در نتایج آنالیز بعنوان حد بالای تشخیص دستگاه (>100ppm) گزارش شده است. همبستگی بالای این عناصر نشان می‌دهد که طلا احتمالاً به صورت کمپلکس‌های آرسناته، بیسموتیتی و ولفرامیتی حمل شده است. در گمانه BZARC-1 مقادیر بالای طلا در عمق ۱۱ تا ۱۳ متر گزارش شده است. در حالیکه در برخی عمق‌ها نظیر عمق ۱، ۱۸ و ۷۹ مقادیر طلا در حد غنی‌شدگی گزارش شده

است. توسعه کانه‌زایی طلا در گمانه BZRC-9 به‌خوبی مشهود است به طوریکه عیار طلا در عمق ۱ تا ۳، ۲۴ تا ۲۵، ۸ تا ۱۲ متر بالا بوده و عناصر، تنگستن، بیسموت و نقره نیز غنی‌شدگی نشان می‌دهد.



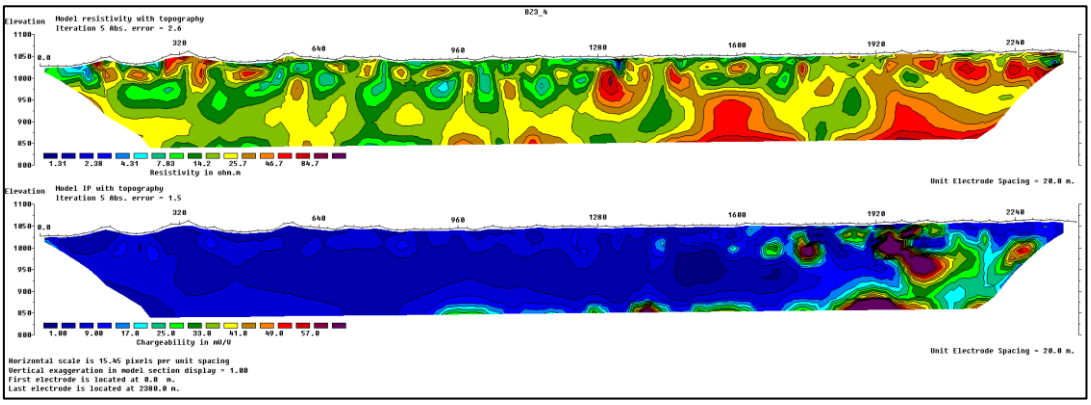
شکل ۱۰- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p2

Fig 10. Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and inducedpolarization (bottom) with topographical correction applied on BZ3p2 profile



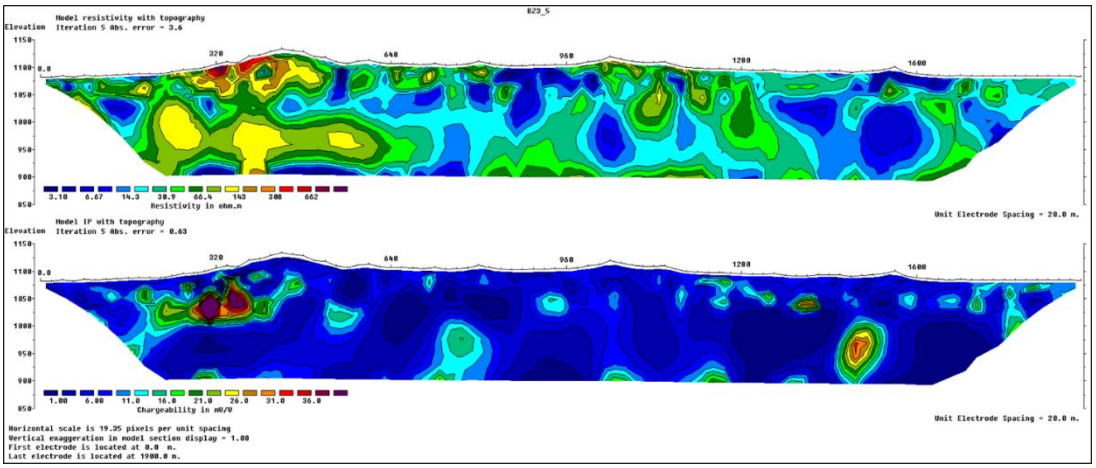
شکل۱۱- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p3

Fig 11. Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on BZ3p3 profile.



شکل ۱۲- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p4

Fig 12. Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on BZ3p4 and BZ06 profiles,



شکل ۱۳- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p8.

Fig 13. Models resulting from two dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied BZ3p8 profiles.

۸- نتایج حاصل از بررسی‌های مغناطیسی

در محدوده بزمان۳ واقع در استان سیستان و بلوچستان با توجه به شرایط زمین‌شناسی و نتایج مطالعات شناسایی اولیه انجام شده وجود شواهدی بر احتمال کانی‌سازی پلی‌متال، مطالعات مغناطیس‌سنجی انجام گرفت. برای پوشش محدوده اکتشافی و بر مبنای اهداف مطالعات ژئوفیزیک مورد نظر، ۵۱ پروفیل با راستای شمالی- جنوبی با شبکه برداشت داده‌ها ۴۰ × ۸۰ متر به صورت شناسایی انتخاب گردید. پس از برداشت مغناطیس-سنجی و اعمال تصحیحات لازم و تهیه نقشه‌های مختلف، نتایج تفسیر داده مشروحاً بیان گردید. نتیجه‌گیری کلی زیر برای محدوده بزمان۳ با در نظر گرفتن اهداف مطالعات ارایه می‌گردد.

تغییرات شدت میدان کل محدوده بین ۴۵۱۰۰ تا۴۹۲۰۰ نانوتسلا متغیر است. با تهیه نقشه بی‌هنجاری باقیمانده و حذف بی‌هنجاری ناحیه‌ای، پنج زون بی‌هنجاری با مشخصات زیر در این محدوده ردیابی گردیده است:

۱- زون بی‌هنجاری ZI در شمال‌شرقی محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۹۰۰۰ نانوتسلا می‌باشد.

بی‌هنجاری در واحد Md (گدازه آندزیت-داسیت و توف) و واحد Ngvs (مارل، ماسه‌سنگ ولکانوکلاستیک، سیلت و کنگلومرا) واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی و اکسید آهن و نیز بی‌هنجاری ژئوشیمی طلا و مس ردیابی شده است.

۲-زون بی‌هنجاری ZII، در قسمت شمال غربی محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۷۸۰۰ نانوتسلا می‌باشد همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی و اکسید آهن ردیابی شده است.

۳-زون بی‌هنجاری ZIII، در قسمت شرقی محدوده با امتداد تقریبی شمالی - جنوبی ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۸۰۰۰ نانوتسلا می‌باشد. این زون بی‌هنجاری در واحدهای Md (گدازه آندزیت-داسیت و توف)، Ma (واریزه‌های به شدت آلتره شده)، Ngvs (مارل، ماسه‌سنگ ولکانوکلاستیک، سیلت و کنگلومرا) و آبرفت واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی، اکسید آهن، سیلیس و نیز بی‌هنجاری ژئوشیمی مس ردیابی شده است.

۴-زون بی‌هنجاری ZIV، در غرب محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۷۳۰۰ نانوتسلا می‌باشد. دراین زون بی‌هنجاری در واحدهای Md (گدازه آندزیت-داسیت و توف)، Ma (واریزه‌های به شدت آلتره شده) و آبرفت واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون اکسید آهن و سیلیس ردیابی شده است.

۵-زون بی‌هنجاری ZV، در جنوب محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود

۴۷۴۰۰ نانوتسلا می‌باشد. در این زون بی‌هنجاری در واحدهای Md (گدازه آندزیت- داسیت و توف)، Ma (واریزه‌های به شدت آلتره شده) و آبرفت واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی، اکسید آهن، سیلیس و نیز بی‌هنجاری ژئوشیمی طلا ردیابی شده است.

با توجه به نقشه‌های فراسو، اثر منشاء زون بی‌هنجاری ZII حداکثر تا عمق حدود ۱۰۰ متر، اثر منشاء زون‌های بی‌هنجاری ZIII و ZIV حداکثر تا عمق حدود ۲۵۰ متر و اثر منشا زون‌های بی‌هنجاری ZI و ZV حداکثر تا عمق حدود ۳۰۰ متر مشاهده می گردد.

با توجه به نقشه‌های فروسو و سیگنال تحلیلی، می‌توان احتمال داد مراکز زون‌های بی‌هنجاری از عمق کمتر از ۳۰ متر شروع شده‌اند.

با انجام مدل‌سازی سه بعدی، وضعیت و گسترش عمقی زون‌های بی‌هنجاری مشخص گردید .همچنین با توجه به مدل-سازی سه بعدی، مقدار بیشینه مغناطیس‌پذیری حدود 0.05 SI برآورد شده است.

با انجام مدل‌سازی دو بعدی، وضعیت و گسترش عمقی زون‌های بی‌هنجاری در راستای پنج مقطع مشخص گردید.

با توجه به نقشه زمین‌شناسی محدوده و مقادیر مغناطیس-پذیری برآورد شده در مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی، احتمال دارد بی‌هنجاری‌های ردیابی شده در محدوده زون‌های بی‌هنجاری ZIII و ZV مربوط به توده‌های نفوذی احتمالی باشد.

۹- نتیجه‌گیری

در محدوده بزمان ۳، ۵ پروفیل طراحی شده برداشت گردیده است. برداشت‌ها با آرایه قطبی – دوقطبی با فواصل الکترودی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر تا عمق ۲۰۰ متر، انجام شده است. از آنجاییکه برای اکتشاف ذخایر طلای اپی‌ترمال، بهترین راه استفاده از مدل‌های تکتونیکی و مدل‌های آلتراسیونی است و با توجه به اینکه این ذخایر بیشتر به صورت رگه‌ای در زون‌های گسله تشکیل می‌شوند، لذا در مقاطع مدل‌سازی شده مقاومت ویژه، تعیین گسل‌ها و بی‌هنجاری‌های این نواحی یا اطراف آن مهم می‌باشد. 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 داده-های 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 بزمان۳، مقدار بارپذیری بالا بوده لذا وجود درصد کانی‌زایی سولفیدی در محدوده بزمان۳ 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 بی-هنجاری‌ها 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 مقاله حاصل بخشی از فعالیت‌های پژوهشی لازم برای اخذ درجه دکتری زمین‌شناسی اقتصادی نویسنده اول از دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات می‌باشد. از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران بخاطر همکاری در دسترسی به داده‌های معدنی و ژئوفیزیکی و ارائه پشتیبانی فنی، و شرکت مهندسین مشاور زمین آب پی به دلیل ارائه خدمات تخصصی زمین‌شناسی، مشاوره‌های فنی و همکاری در تحلیل داده‌ها صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. از داوران محترم مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته که با ارائهٔ پیشنهادات سازنده موجب ارتقا کیفیت مقاله شدند، سپاسگزاریم.

مراجع

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.

Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., 2022. 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.

Irvine, R.J. and Smith, M.J. 1990. Geophysical Exploration for Epithermal Gold Deposits. Journal of Geochemical Exploration 36, 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.

Kav Mining Engineering Company., 2018. Geological-Mining Map Report 1:10000, Time 3, Minerals Procurement and Production Company.

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 and 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. 237pp

Modriniak, N., Marsden, E., 1938. Experiments in geophysical survey in New Zealand. Department of Scientific and Industrial Research.

Mushtaghian, K., Abtahi Forushani, M., AsadiHaruni, H., Haj Heydari, M., Janghorban, G., 2022. 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., 2015, depth estimation by Euler deconvolution method in the eastern part of Hanar Anomaly, Birjand, Iran. Geophysics Conference 17. https://sid.ir/paper/849892/fa.

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., Pratt, D.A., 2007. Geophysical inversion for mineral exploration: a decade of progress in theory and practice. Proceedings of exploration 7(5), 61-95.

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.

Sahandi, M., Soheili, M., 2014. Geological Map of Iran, scale 1:1000000. Geological Survey of Iran.

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.

مقاله پژوهشی

کاربرد داده های ژئوفیزیکی (مغناطیس سنجی و ژئوالکتریک) در شناسایی کانی سازی طلا در کانسار اپی‌ترمال بزمان ۳ (جنوب شرق ایران)

احمد بهاروندی
گروه زمین‌شناسی، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران
فرهاد احیاء
گروه زمین‌شناسی، واحد بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی، بهبهان، ایران
محمدعلی علی آبادی
گروه زمین‌شناسی، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران
ehya.farhad@iau.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

چکیده

محدوده طلای بزمان ۳ در جنوب شرق ایران، در شمال غربی پهنه آتشفشانی بزمان قرار گرفته است. این محدوده از توابع استان سیستان و بلوچستان می‌باشد. در این پژوهش، با هدف شناسایی مناطق پتانسیل دار کانی‌سازی طلا در کانسار اپی‌ترمال بزمان، داده‌های ژئوفیزیکی شامل مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی (IP) مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام مطالعات ژئوالکتریک، ۵ پروفیل طراحی شده برداشت گردید. برداشت‌ها با آرایه قطبی– دوقطبی با فواصل الکترودی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر تا عمق ۲۰۰ متر انجام شد. تفسیر نقشه‌های بی هنجاری و پروفیل‌های ژئوالکتریک، منجر به شناسایی پنج زون بی هنجاری (ZI تا ZV) شد که هم پوشانی قابل توجهی با نواحی دگرسانی سیلیسی و آرژیلیک دارند. زون‌های بی هنجاری ZIII وZV به عنوان مناطق دارای بیشترین پتانسیل کانی‌سازی طلا معرفی شد. نتایج این مطالعه می تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی حفاری‌های اکتشافی و مدل سازی‌های سه بعدی دقیق‌تر در آینده باشد.

واژه‌های کلیدی: *بزمان ۳، مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، اپی‌ترمال*

۱- مقدمه

محدوده اکتشافی بزمان ۳ در جنوب شرق ایران یکی از نواحی مستعد کانی‌سازی طلا در چارچوب کانسارهای اپی‌ترمال محسوب می‌شود، نبود اطلاعات دقیق از ساختارهای زیر سطحی و پراکندگی‌ای دگرسانی، مانعی جدی در مسیر اکتشاف هدفمند منابع معدنی ایجاد کرده است. در سال های اخیر، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مانند مغناطیس سنجی،مقاومت ویژه و IP به عنوان ابزارهای موثر در شناسایی زون‌های کانی سازی مطرح شده‌اند. در چند دهه اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی و IP در پی‌جویی کانسارهای طلای اپی- ترمال 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 اپی ترمال منطقه آتشفشانی کورومندل واقع در جزیره شمالی (Locke et al., 2007)، مطالعه داده‌های در کانسار طلا – نقره اپی‌ترمال هیشیکاری در جنوب باختر ژاپن (Okada, 2000)، کانسار مس وادی الرجیتا در صحرای سینای مصر (et al., Salem 2013) مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی و RS/ IP با هدف اکتشاف کانسار شمالی مس – طلای پورفیری دالی (Mushtaghian et al., 2022)، برداشت ژئوفیزیک به روش RS/ IP در منطقه طلای بزمان ۳ در جنوب شرق ایران اشاره داشت. در مطالعه حاضر ، به بررسی داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در محدوده اکتشافی طلای بزمان۳ در جنوب

شرق ایران 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 مدل وارون دو بعدی و سه بعدی داده‌های ژئو فیزیکی می‌باشد. در این راستا، پس از انجام وارون سازی داده‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، ارتباط فضایی بین کانی-سازی طلا با تغییرات خودپذیری مغناطیسی، مقاومت ویژه 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 کانی-سازی طلا با تغییرات کمیت ژئوفیزیکی یاد شده نشان داده می‌شود.

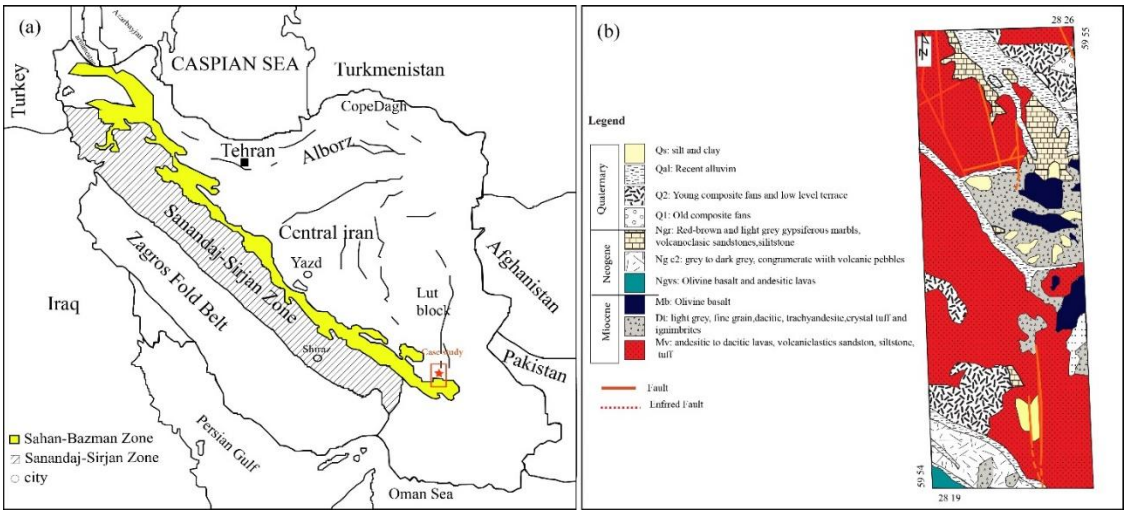
۲- زمین‌شناسی

کانسار طلای بزمان ۳ به وسعت تقریبی ۴۳ کیلومتر مربع در فاصله حدود ۱۶۰ کیلومتری شمال باختری شهرستان ایرانشهر، در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه حد فاصل پهنه‌های لوت، حوضه فلیشی مکران و فرونشست جازموریان و در بخش انتهایی جنوب شرقی کمان ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است (شکل ۱ a).

مهمترین واحدهای زمین‌شناسی منطقه، شامل سنگ‌های آتشفشانی، آذرآواری و نهشته‌های آواری است (شکل ۱ b). این واحدها به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول که قدیمی‌تر هستند شامل واحدهای داسیتی و آندزیتی بوده و متحمل دگرسانی آرژیلیک و پروپلیتیک شده‌اند. گروه دوم شامل گدازه-های آندزیتی، آندزیت بازالتی و اولیوین بازالت است که بسیار جوان بوده و مربوط به فوران‌های جوان بزمان می‌باشند. آتشفشان بزمان با ارتفاع ۳۴۹۰ متر از سطح دریا در ۲۰ کیلومتری جنوب این محدوده قرار دارد. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه بزمان واحدهای رسوبی-تخریبی کربونیفر و سازند کربناته جمال با سن پرمین هستند که توسط توده گرانیتی بزمان با سن کرتاسه قطع شده‌اند. واحدهای رسوبی-تخریبی ائوسن و میوسن به گونه کمربند چین‌خورده- گسلیده با روند شمال- شمال‌خاوری، جنوب-جنوب‌خاوری در بخش شرقی آتشفشان بزمان رخنمون دارند. در بخش جنوبی آتشفشان، سنگ‌های آتشفشانی نئوژن و کواترنری گسترش دارند. سنگ-های آتشفشانی جوان به حالت افقی یا با شیب کم روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند. آتشفشان بزمان به گونه یک آتشفشان استراتوولکان است که در زمان کواترنری فورآن‌های انفجاری و غیرانفجاری داشته است. بدین ترتیب و برپایه مطالعات صحرایی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه در دو گروه سنگ‌های آتشفشانی نئوژن و سنگ‌های آتشفشانی کواترنری تقسیم می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی کواترنری از دهانه اصلی آتشفشان یا دهانه‌های جانبی آن فوران کرده‌اند. بیشتر دهانه-های جانبی آتشفشان در بخش شمالی و شمال‌شرقی آن تشکیل شده‌اند. سنگ‌ایی که از دهانه اصلی آتشفشان فوران کرده‌اند پیرامون آن پراکنده شده و مساحتی بیش از ۳۰۰ کیلومتر مربع را پوشانده‌اند. ایـن واحدهای سنگی (کواترنری) از قدیم به جدید شامل توف و برش‌های آتشفشانی، گدازه آندزیتی پورفیری صورتی- خاکستری و گدازه آندزیتی خاکستری تیره تا سبز تیره هستند. مجموعه یاد شده توسط افقی از پومیس پوشیده شده است که به ویژه در دامنه‌های شرقی و جنوبی راس قله رخنمون دارد. جوان‌ترین افق‌های آتشفشانی بزمان گدازه-هایی هستند که از دهانه‌های جانبی فوران کرده‌اند (Kav Mining Engineering Company, 2018) (شکل ۱ b).

اختلاف ارتفاع در محدوده مطالعاتی حدودا به ۱۰۰ متر می‌رسد. برجستگی عمومی در بخش‌های جنوبی، همانند ارتفاعات خاص منطقه بوده و هر چقدر به شمال‌شرق منطقه نزدیک می‌شویم از ارتفاعات منطقه کاسته می‌شود. رگه‌ها و تپه‌های سیلیسی شده توده‌ای، متراکم و ستیغ‌ساز هستند. مورفولوژی کانسار به سمت شمال به صورت تپه ماهوری است و در دشت سمسور در شمال‌شرق مورفولوژی ویژه مناطق بیابانی دیده می‌شود (شکل ۲). توپوگرافی منطقه غالباً شامل تپه‌هایی با ارتفاع کم می‌باشد. رودهای فصلی و آب سطحی در بستری پهن در جهت شیب عمومی منطقه جریان دارند. ماسه-های بادی در سراسر منطقه گسترش دارند (Kav Mining Engineering Company, 2018).

دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک، همراه با شکستگی‌های پر شده با کوارتز نشان دهنده فعالیت‌های گرمابی مرتبط با کانی‌سازی طلا هستند (Kav Mining Engineering Company, 2018).



شکل۱- (a) موقعیت محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه ساختاری ایران با تغییرات از (Sahandi et al., 2014)، (b) نقشه زمین‌شناسی محدوده بزمان۳ با مقیاس (۱/۱۰۰۰) (Kav Mining Engineering Company, 2018)

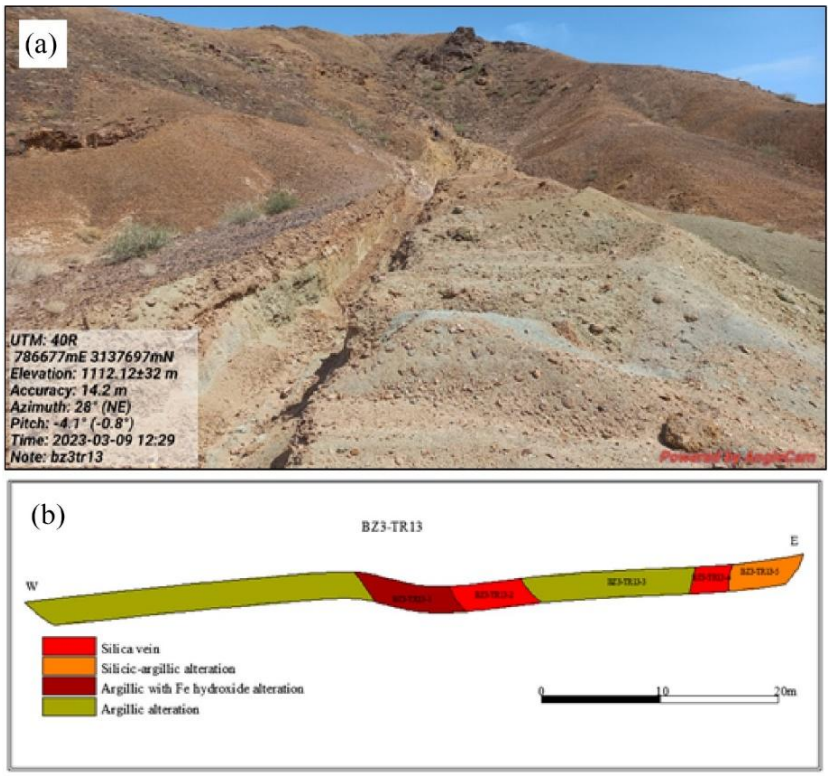
Fig 1. (a) The location of the range on the Iran Structure Map (Sahandi et al., 2014), (b) Geological map of the Bazman3 (scale:1/1000)) (Kav Mining Engineering Company, 2018)



شکل ۲- نمایی از توف‌های داسیتی همراه با رگه‌های سیلیسی در جنوب خاوری محدوده بزمان ۳ و نمایی از رگه‌های سیلیسی-کربناته.

Fig 2. View of dacite tuffs with silica veins in the southeast of the Bazman 3 area and a view of silica-carbonate veins.

ترانشه BZ3-TR13 (شکل ۳) در محل نمونه‌ای با عیار طلای ۱۳ گرم در تن طراحی شده است. این ترانشه به طول ۶۶ متر با راستای باختری-خاوری حفر شده به طوریکه بخش اصلی این ترانشه زون دگرسانی آرژیلیک بوده و زون سیلیسی برشی شده در بخش میانی و انتهای ترانشه توسعه یافته است. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که عیار طلا در زون سیلیسی انتهای ترانشه بالغ بر ۹ گرم در تن گزارش شده و در برخی نمونه‌ها غنی‌شدگی دارد (جدول ۱). به همین دلیل بر روی این زون ۴ ترانشه بزرگ با راستای شمالی-جنوبی به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر حفر شده است (BZ3TR-11,BZ3TR-12, BZ3TR-13, BZ3TR-14). بر روی این زون تعداد ۴۸ گمانه اکتشافی حفر شده و از این تعداد ۴۱ گمانه به روش RC و۵ گمانه به روش مغزه‌گیری، با شبکه ۸۰ تا ۴۰ متری حفاری شده است. بیشترین عمق گمانه حفاری‌های مغزه‌گیری ۳۱۱ متر بوده و گمانه‌های RC اغلب تا ۱۰۰ متر حفاری شده‌اند.



شکل۳- (a) تصویر صحرایی از ترانشه BZ3TR-13 و (b) مقطع زمین‌شناسی ترانشه BZ3TR-13.

Fig 3. (a) Field image of trench BZ3TR-13 and (b) Geological section of BZ3TR-13 trench

جدول ۱- نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده از ترانشه TR13 بزمان ۳

Table 1. Results of analysis of samples taken from trench TR13 at time 3

Sample	Au(ppb)	Ag(ppm)	Al(ppm)	As(ppm)	Ba(ppm)	Bi(ppm)	Cd(ppm)	Cu(ppm)	Fe(ppm)	Mn(ppm)	Mo(ppm)	Pb(ppm)	S(ppm)	Sb(ppm)	Sn(ppm)	W(ppm)	Zn(ppm)
BZ3-TR13-1	59	0.075	64994	20.7	1747	0.075	0.4	7	27658	1007	0.375	6	6971	1.2	0.6	1.6	57
BZ3-TR13-2	32	0.075	62262	30.7	1843	0.075	0.4	7	33895	117	1.5	4	3794	1.5	0.9	1.5	31
BZ3-TR13-3	144	0.075	63248	21.1	1302	0.075	0.2	17	21507	756	0.8	0.75	5295	0.8	0.7	1.7	300
BZ3-TR13-4	9767	13.2	31798	26.3	898	0.8	0.5	252	13648	287	2	166	3238	6.5	1.3	1.4	178
BZ3-TR13-5	179	0.075	67855	133	1394	0.075	0.9	13	13704	76	1.3	0.75	1520	3.5	0.3	2.5	32

۳- مواد و روش‌ها

در پیگیری انجام مطالعات در محدوده بزمان، سه اکیپ ژئوفیزیک، از شرکت معدن کاو برداشت داده‌های مغناطیسی را از تاریخ ۱۴۰۱/۰۹/۲۳ تا ۱۴۰۱/۱۰/۰۹ انجام دادند. در طی دوره برداشت داده‌ها، با برپایی ایستگاه ثابت، تغییرات روزانه هر ۲ دقیقه جهت انجام تصحیحات روزانه و بررسی وجود احتمالی طوفان‌های مغناطیسی ثبت می‌گردید. در مجموع در این محدوده، ۱۳۴۷۴ ایستگاه مورد برداشت شدت کل میدان مغناطیسی قرار گرفته است. برای پوشش این محدوده شبکه ۴۰ × ۸۰ (فاصله پروفیل‌ها ۸۰ متر و فاصله نقاط برداشت ۴۰ متر) به صورت شناسایی انتخاب گردید. با توجه به مینرالیزاسیون منطقه و نتایج مطالعات زمین‌شناسی، امتداد پروفیل‌ها شمالی-جنوبی انتخاب شده تا به طور تقریبی بر امتداد مینرالیزاسیون عمود باشد و تمامی نقاط بر روی پروفیل-هایی با این راستا برداشت شده است. در مجموع برداشت‌ها بر روی ۵۱ پروفیل انجام شده است. کلیه ایستگاه‌ها با دستگاه‌های G.P.S برداشت شده است. داده‌های صحرایی برداشت شده IP/RS، با استفاده از نرم افزارهای پردازشی، اصلاح و مدل سازی شده و مقاطع ژئوفیزیکی تهیه می‌شوند که شامل دو مقطع دوبعدی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون‌القایی هستند. هنگام

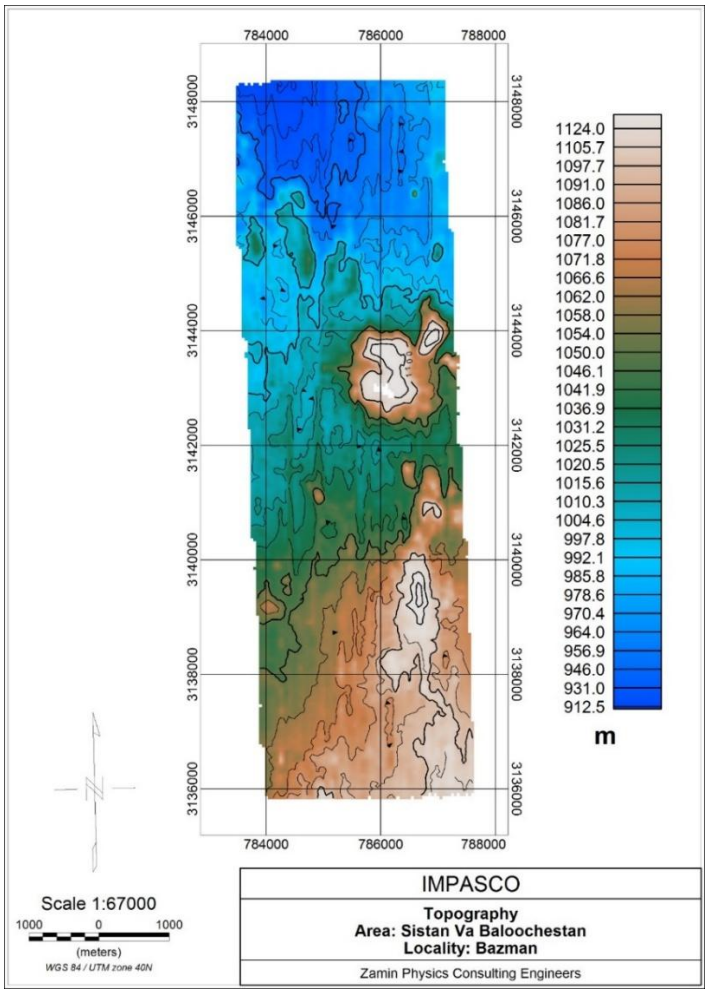
مدل‌سازی از ارتفاع نقاط خط برداشت برای تصحیحات توپوگرافی استفاده شده تا تاثیر توپوگرافی بر روی موقعیت و مقدار پارامترهای اندازه گیری شده محاسبه و اعمال شود.

در این مطالعه از نرم افزار Res2Dinv برای پردازش داده-های توموگرافی الکتریکی استفاده شد. دامنه تغییرات مقادیر مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی از کوچک به بزرگ با طیف رنگی آبی تا بنفش رنگ نمایش داده شده است.

مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی تغییرات جانبی و عمقی این پارامترهای فیزیکی را نشان می‌دهند و صرفاً استفاده از این تغییرات منجر به شناسایی نوع لیتولوژی نمی-شود. بنابراین جهت کاهش عدم قطعیت در شناسایی نوع لیتولوژی در زمان تفسیر مقاطع ژئوالکتریکی، نیاز به استفاده از داده‌های زمین‌شناسی منطقه و نیز اطلاعات گمانه های حفاری موجود می‌باشد.

۴-مطالعات مغناطیس سنجی

برای پوشش محدوده بزمان ۳، ۵۱ پروفیل با راستای شمالی – جنوبی با برداشت داده‌ها شبکه ۴۰ × ۸۰ (فاصله پروفیل‌ها ۸۰ متر و فاصله نقاط برداشت ۴۰ متر) به صورت شناسایی انتخاب گردید و با توجه به کانی‌زایی منطقه و نتایج مطالعات زمین-شناسی، امتداد پروفیل‌ها شمالی - جنوبی انتخاب شده تا امتداد پروفیل شمالی – جنوبی به طور تقریبی بر امتداد کانی-زایی عمود باشد و تمامی نقاط بر روی پروفیل‌هایی با این راستا برداشت شده است (شکل ۴).



شکل ۴- نقشه توپوگرافی محدوده به همراه موقعیت پروفیل‌ها و نقاط اندازه‌گیری شده ونتایج تفسیرهای انجام شده شامل محدوده‌های بی‌هنجاری، همبری‌ها ،گسل‌ها ومحل حفاری‌های اکتشافی پیشنهادی.

Fig 4. 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

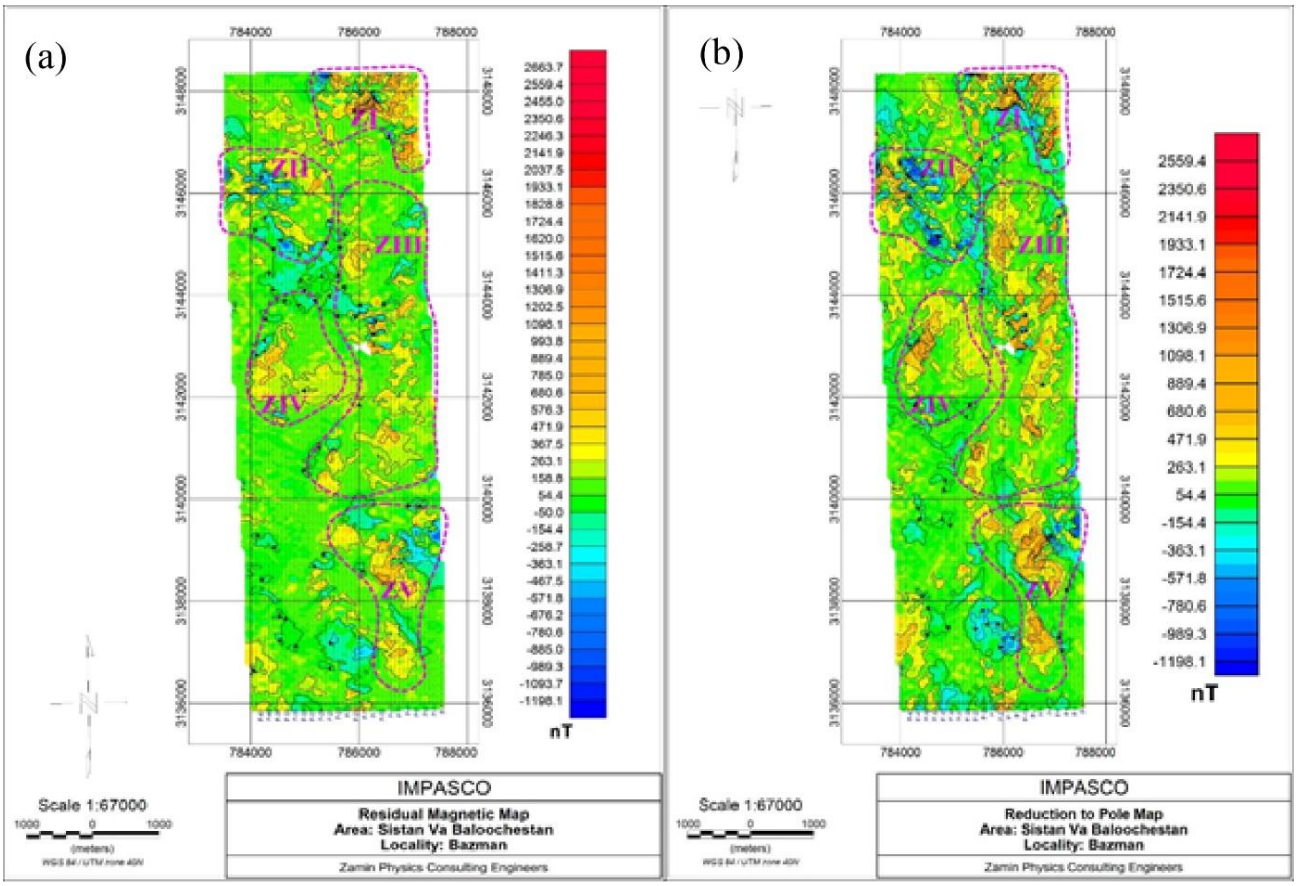
در زمان برداشت، شدت میدان مغناطیسی مرجع زمین (IGRF) در منطقه مورد مطالعه ۴۶۴۱۵ نانو تسلا می‌باشد (شکل ۵). نقشه شدت میدان مغناطیسی منطقه را قبل و پس از اعمال تصحیحات روزانه و حذف میدان مرجع ژئومغناطیسی زمین نشان می‌دهد. در مرحله بعد، با هدف جداسازی بی‌هنجاری ناشی از منبع مغناطیسی محلی از آثار مغناطیسی 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 ۶) به ترتیب نقشه ادامه فراسوی۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ 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 ZIII و ZV در عمق به یکدیگر می‌پیوندد و در نهایت به صورت یک منشاء ظاهر می‌گردند. با توجه به این که زاویه میل 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 حفاری‌های اکتشافی را با دقت بیشتری پیشنهاد داد. به منظور حذف آنومالی‌های ناحیه‌ای در تعبیر و تفسیر، نقشه برگردان قطب (RTP) از نقشه شدت میدان باقیمانده تهیه گردیده و با این نقشه مقایسه می‌شود (شکلd۷). از پردازش‌هایی مانند فیلترها و تبدیل به قطب اطلاعی در مورد ژرفای توده‌های منبع مغناطیسی به دست نمی‌آید. برای تخمین ژرفای منابع بی‌هنجاری مغناطیسی، روش‌هایی بدون نیاز به وارون‌سازی داده‌ها ابداع شده است که از میان آنها می‌توان به روش واهمامیخت اویلر اشاره نمود. از مزیت‌های استفاده از روش اویلر این است که نیازی به اطلاعاتی درباره جهت مغناطیس‌شدگی نمی‌باشد و حضور مغناطیس پسماند نیز تأثیری بر نتایج به دست آمده ندارد (Ravat, 1996). این روش با فرض این که میدان‌های گرانی و مغناطیسی در هر پنجره مختصاتی از داده‌ها همگن هستند اعمال می‌شود زیرا با وجود این فرض این میدان‌ها از رابطه اویلر پیروی خواهند کرد (Nik Farjam et al., 2015). در روش یاد شده از گرادیان‌های قائم مغناطیسی استفاده می‌شود (Saif et al., 2018). رابطه اویلر در مختصات کارتزین به صورت زیر نوشته می‌شود:

(رابطه ۱)

$$(\mathbf{x}-x_0)\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}}+(y-y_0)\frac{\partial T}{\partial z}+(z-z0)\frac{\partial T}{\partial z}=N(B-T)$$

براساس معادله ۱، X،Y و Z مختصات نقاط برداشتی، X0، Y0 وZ0 ، مختصات منبع، T میدان کل، N اندیس ساختاری می‌باشند که مقدار آن از برای همبری‌های افقی تا ۳ مورد منابع مغناطیسی کروی شکل تغییر می‌کند (Thompson, 1982). (شکل۶ e) نتایج ژرفاسنجی به روش و اهمامیخت اویلر را با فرض کروی بودن توده‌های مغناطیسی و استفاده از اندیس ساختاری ۳ نشان می‌دهد. روش تخمین عمق اویلر یک روش اتوماتیک تخمین عمق می‌باشد که بر روی داده‌های مغناطیسی عمل می‌کند تا عمق منبع مغناطیسی را تعیین کند. در این روش یک پنجره مربعی کوچک بر روی تمام داده‌ها حرکت می‌کند و در هر پنجره بهترین تطبیق عمق (best - fit) برای یک مدل با هندسه خاص محاسبه می‌شود. نتایج بدست آمده بر روی نقشه رسم شده و متناسب با عمق محاسبه شده با مقیاس رنگ نشان داده می‌شوند و در مجموع یک نقشه اویلر سه بعدی ایجاد می‌شود. این روش داده‌های میدان مغناطیسی کل و نیز مشتقات افقی x و y و مشتق قائم را بکار می‌برد. یک

مزیت مهم معادله اویلر این است که نسبت به زاویه میل، انحراف و مغناطیس باقیمانده حساس نمی‌باشد. 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 شده است. همانگونه که در (شکل ۶ e) مشاهده می‌شود، عمق مشخص شده بی-هنجاری‌های ردیابی شده در محدوده مورد مطالعه، از عمق حدود ۴۰ متر تا عمق حدود ۵۰ متر و با مقدار متوسط ۳۵ متر تخمین زده شده است و انطباق نسبی با عمق‌های به دست آمده از روش‌های دیگر را دارد.

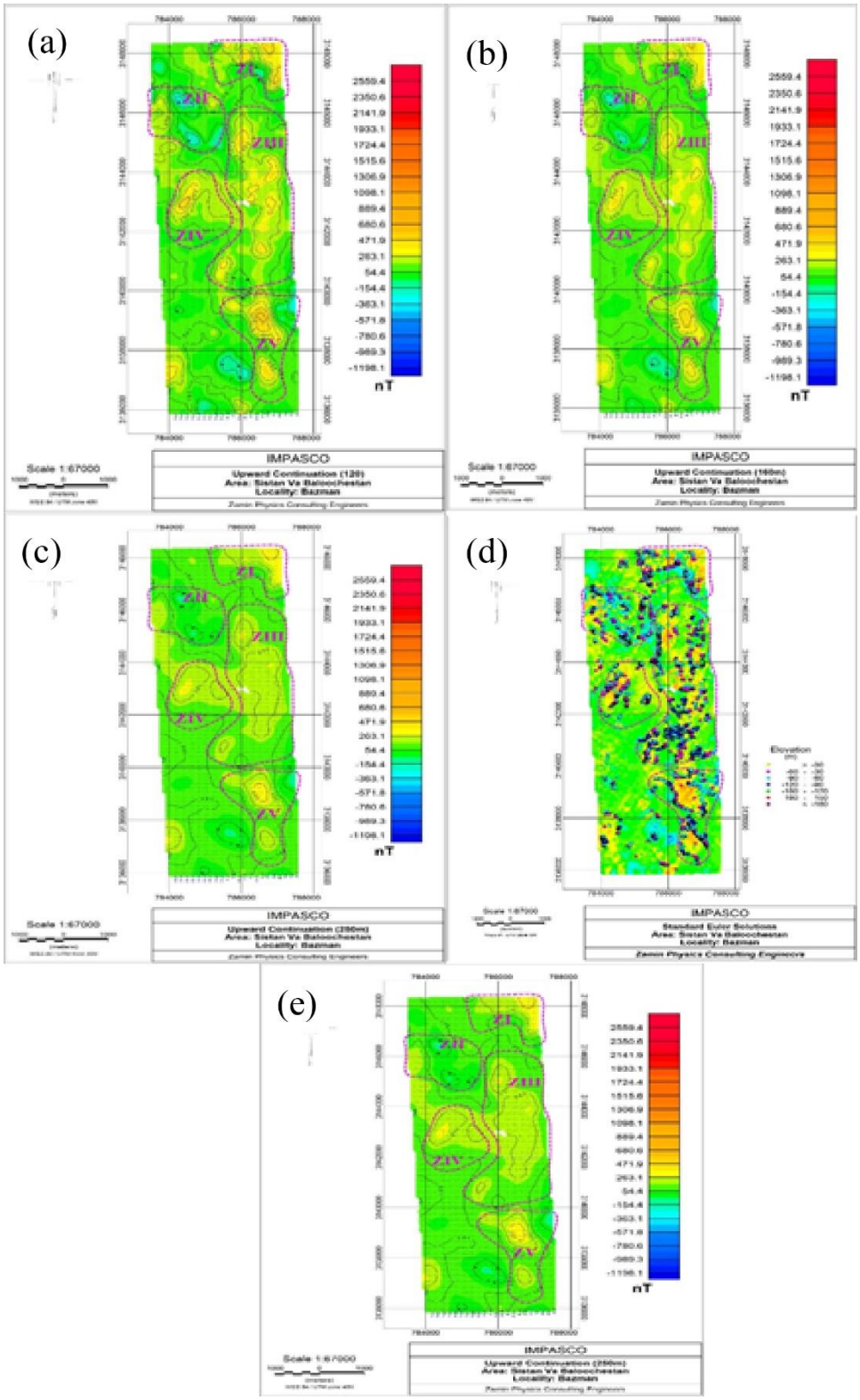


شکل ۵- (a) نقشه تغییرات شدت میدان کل محدوده و (b) نقشه شدت میدان مغناطیسی کل محدوده پس تصحیحات روزانه و حذف IGRF

Fig 5. (a) The map of changes in the field intensity of the entire bazman 3 area, and (b) The map of the magnetic field intensity of the entire bazman3area after applying daily corrections and removing IGRF.

۵ - مطالعات ژئوفیزیک به روش مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی

افزون بر برداشت مغناطیس‌سنجی، برداشت IP/RS در محدوده بزمان ۳ به تعداد ۵ پروفیل با آزیموت ۸۸ تا ۱۳۴درجه و طول ۱۱۸۰ تا ۲۵۲۰ متری پیشنهاد شده بود (جدول ۲) و لذا در این محدوده تعداد ۵ پروفیل برداشت گردید (شکل ۷). 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 (جدول ۳).



شکل ۶- (a) نقشه فراسو در ارتفاع ۴۰ متر، (b) نقشه فراسو در ارتفاع ۸۰ متر و (c) نقشه فراسو در ارتفاع ۱۶۰ متر، (d) نقشه بر گردان قطب (RTP) و (e) نقشه تخمین ژرفای منابع مغناطیسی کروی با استفاده از واهمامیخت اویلر بر داده‌های نمایش داده شده.

Fig 6. Regional magnetic field intensity map by continuing beyond to a height of (a)40 meters, (b) 80 meters and (c) 160 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.

جدول ۲- مشخصات پروفیل‌های برداشت شده در محدوده بزمان۳
Table 2. Characteristics of profiles collected in Bazman 3 area

Profile name	Azimuth (degrees)	Length (m)	Coordinates (UTM)	
			First	The end
BZ 01	88	2520	415285- 3694371	415626- 3694791
BZ 05	134	1180	414048- 3693090	414248- 3693312
BZ 06	138	1180	413894- 3693232	414109- 3693439
BZ 07	142	1180	413798- 3693525	414023- 3693713
BZ 08	149	1180	413488- 3693675	413699- 3693893

جدول ۳- تعداد نقاط برداشت شده در محدوده بزمان۳
Table 3. Number of points collected in Bazman3 area

profile number	array Harvest	Electrode spacing	of data retrieved The number
BZ01	bipolar - Polar	20	135
BZ05	bipolar - bipolar	10 - 20	268
BZ06	bipolar - bipolar	10 - 20	280
BZ07	bipolar - bipolar	10 - 20	281
BZ08	bipolar - bipolar	10 - 20	281
Total			1245

۶- مبانی مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی

هرچند با اعمال پردازش‌های معمول بر داده‌های مغناطیسی می‌توان به حدود محل قرارگیری توده‌های مغناطیسی پی‌برد و یا با روش واهامیخت اویلر 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 مقاومت ویژه 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 اندازه گیری 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 اندازه‌گری شده توسط دستگاه، محاسبه مقادیر مجهول پارامترهای فیزیکی توده‌های مدفون محدوده مورد مطالعه، امکان پذیر 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).

$$d=G(m) \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

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 مد m هستند که با استفاده از رابطه ۲ با داده‌های اندازه‌گیری شده ارتباط دارد. بنابراین تعداد المان‌های بردار مدل m با تعداد بلوک‌های پیش‌بینی 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.

$$\emptyset_d = \|w_d = (d - d^{obs})\|_2^2 \quad \text{(رابطه۳)}$$

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 dobs داده‌های اندازه‌گیری شده است. هرچند می‌توان با کمینه‌سازی $\emptyset_d$ 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.

$$\emptyset_m(m) = \|w_m = (m - m_0)\|2 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

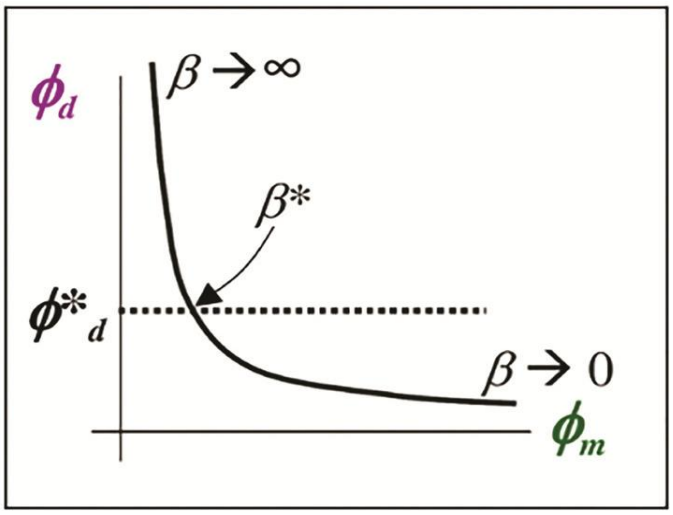
که در آن، m_0 مدل اولیه و w_m ماتریس کوواریانس و یا ارتباط فضایی اجزای مدل می‌باشد. معمولا برای ایجاد یک مدل هموار، w_m به صورت ماتریس حاوی ضرایب مشتقات مرتبه اول مدل تعریف می‌شود. اکنون با ترکیب معادلات ۳ و ۴، تابع جدیدی به نام تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود که با کمینه‌سازی آن، هم مقدار خطای تخمین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

$$\emptyset(m) = \emptyset m(m) + \beta(\emptyset_d - \emptyset_d^*) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

در معادله ۵، در معادله ۵، β ضریب لاگرانژ و $\emptyset_d^*$ نیز مقدار خطای تخمین داده می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار بهینه ضرایب لاگرانژ، از ارتباط بین مقدار طول مدل و خطای داده‌ها در شکل ۸ 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. در حالی که اگر خطای مدل‌سازی 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 طول مدل و خطای داده قابل قبول باشد (Oldenburg and Pratt, 2007; Ren and Kalscheuer, 2020).

در پژوهش حاضر، مدل خودپذیری مغناطیسی محدوده مورد مطالعه با استفاده از وارون‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی به دست آمده است، بدین منظور از نرم افزار UBC Mag3D 4.0 استفاده شد. همچنین تخمینی از مدل مقاومت ویژه و شارژپذیری الکتریکی با استفاده از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی برداشت شده به دست آمد. مدل‌سازی یاد شده در امتداد پروفیل‌های نشان داده شده در شکل ۷ و با استفاده از نرم افزار UBC DCIP2D 3.2صورت گرفت. پارامترهای موجود در معادلات ۳، ۴ و ۵ برای وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی با استفاده از روش ارائه شده توسط اولدنبرگ و لی (Oldenburg and Li, 1994) محاسبه شده‌اند.



شکل ۷ - منحنی Trade-Off ؛ رابطه بین مدل و طول خطا را نشان می‌دهد (Oldenburg and Pratt, 2007).

Fig 7. Trade-off curve; It shows the relationship between the model and the error length (Oldenburg and Pratt, 2007).

۶-۱- نتایج مدل‌سازی وارون سه بعدی داده‌های مغناطیسی

به منظور وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی از نرم‌افزار Mag3D 4.0 استفاده شده است. روش مدل‌سازی وارون مورد استفاده در این نرم افزار را لی و الدنبرگ ارائه داده‌اند. در این مدل‌سازی، 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 وارون‌سازی داده‌ها به دست آوردن مدل مناسب با استفاده از این داده‌های نوفه‌دار است. به منظور وارون‌سازی داده‌ها با استفاده از این الگوریتم ابتدا لازم است که مقدار نوفه تخمینی موجود در داده‌ها به نرم‌افزار 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 وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی در محدوده بزمان۳، مقدار نوفه گوسی برابر با انحراف معیار یک درصد (۱ ٪) به علاوه ۱ نانوتسلا اختصاص داده شد. سپس محدوده مدل‌سازی به توری‌هایی با ابعاد ۱۵×۳۰×۳۰ متر تقسیم و مقدار مغناطیس پذیری بیشینه ۰/۰۰۳ و کمینه صفر به صورت قید به مدل اضافه شد. لازم به ذکر است مقدار مغناطیس پذیری بیشینه محدوده‌های بی‌هنجاری SI ۰/۰۰۳ به دست آمده است ولی برای نمایش بهتر در مدل‌سازی مقدار بیشینه SI ۰/۰۰۳ در نظر گرفته شده است. سپس وارون‌سازی سه بعدی بر روی داده‌های مغناطیس منطقه بزمان۳ انجام گرفت. با توجه به ماکزیمم مقدار مغناطیس‌پذیری به دست آمده در مدل‌سازی و مقایسه با نقشه زمین‌شناسی و نیز مقدار مغناطیس‌پذیری شیست می‌توان احتمال داد بی‌هنجاری ردیابی شده در اثر وجود شیست‌ها در محدوده مورد مطالعه باشد.

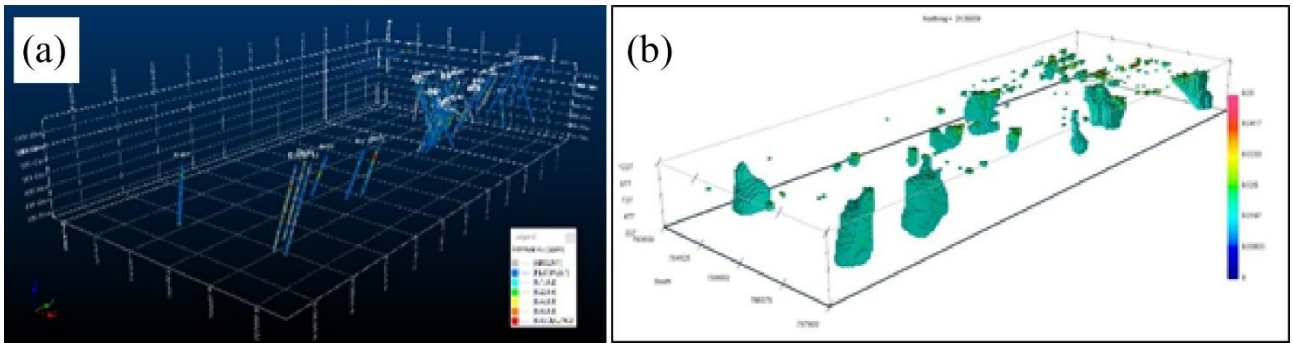
با توجه به اطلاعات بدست آمده در محدوده بزمان ۳، ارزیابی ذخیره بر روی زون سیلیسی شماره ۱ انجام شده است. بر روی این زون تعداد ۴۶ گمانه حفر شده است. از این تعداد ۴۱ گمانه به روش RC و ۵ گمانه به روش مغزه‌گیری، با شبکه ۸۰ تا ۴۰ متری حفاری شده است. بیشترین عمق گمانه حفاری‌های مغزه‌گیری ۳۱۱ متر بوده و گمانه‌های 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 لیتوژئوشیمی 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 زمین‌شناسی گمانه‌ها (سنگ‌شناسی، ساخت، بافت، رنگ و نوع و شدت دگرسانی‌ها)، لایه اطلاعاتی توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰پس از جمع‌بندی و مرتب‌سازی کلیه داده‌های مربوط به گمانه‌ها و آنالیز عنصر طلا در قالب اکسل و تبدیل آن به فرمت اجرایی نرم افزار دیتاماین (فرمت متنی TEXT)، داده‌ها وارد نرم‌افزار دیتاماین شده و پردازش‌های تحلیلی بر روی آن‌ها اعمال شده است. در ادامه با استفاده از روش‌های کلاسیک مقاطع، کرجینگ و عکس مجذور فاصله IDW تخمین ذخیره کانسار اصلی بزمان۳ انجام پذیرفت و نهایتا ذخیره کانسار با توجه به رده‌بندی‌های استاندارد موجود طبقه‌بندی 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، Yو Z باید به چند بخش موسوم به زیربلوک تقسیم شوند و در مورد هر یک 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 زمین‌آماری 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 ، Yو 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 نظرگرفته 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، Yو Z از شعاع جستجوی 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 همه زون‌ها ۲ برابر شعاع جستجوی اولیه در نظر گرفته شده است (شکل ۸).

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 میلی‌گرم در تن، میزان ذخیره در حدود ۲۶۹۶۵۹۵ تن با عیار متوسط طلای ۱۶۴۴ میلی‌گرم در تن، محاسبه شده است (جدول ۴).

۷-مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی سه بعدی با نتایج تجزیه‌های ژئوشیمیایی گمانه‌های موجود در منطقه

در محدوده بزمان۳، حفاری‌های بر روی پنج رگه انجام شده است. این رگه‌ها به ترتیب شامل رگه‌های Bz3p2, Bz3p3, Bz3p4, Bz3p5, Bz3p8 است که در آن مقادیر طلا بالا گزارش شده است. این حفاری‌ها با دو روش مغزه‌گیری و RC انجام شده و نتایج مناسبی بدست آمده است (شکل۹). عملیات حفاری این محدوده در سال ۱۴۰۱ انجام شد. برنامه حفاری به دو صورت شناسایی و سیستماتیک برنامه‌ریزی شده بود. حفاری‌های شناسایی به روش مغزه‌گیری حفاری شده و حفاری‌های سیستماتیک به صورت ترکیبی از حفاری‌های مغزه-گیری و RC انجام شده است. این حفاری‌ها شامل ۲۰ گمانه RC به طول ۱۳۰۵ متر و ۱۸ گمانه مغزه‌گیری به طول ۱۵۷۰ متر است. به منظور یافتن رابطه فضایی بین نواحی کانی‌سازی و مدل خودپذیری مغناطیسی، نتایج مدل سه بعدی تخمین زده شده خودپذیری مغناطیسی با نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی گمانه‌های موجود در منطقه مقایسه شد نتایج حاصل از مقایسه اطلاعات مربوط به آنالیز ژئوشیمیایی گمانه‌ها با مقطع مدل‌خودپذیری مغناطیسی در امتداد گمانه‌های یاد شده در شکل‌های ۱۰تا۱۳ نشان داده شده است.



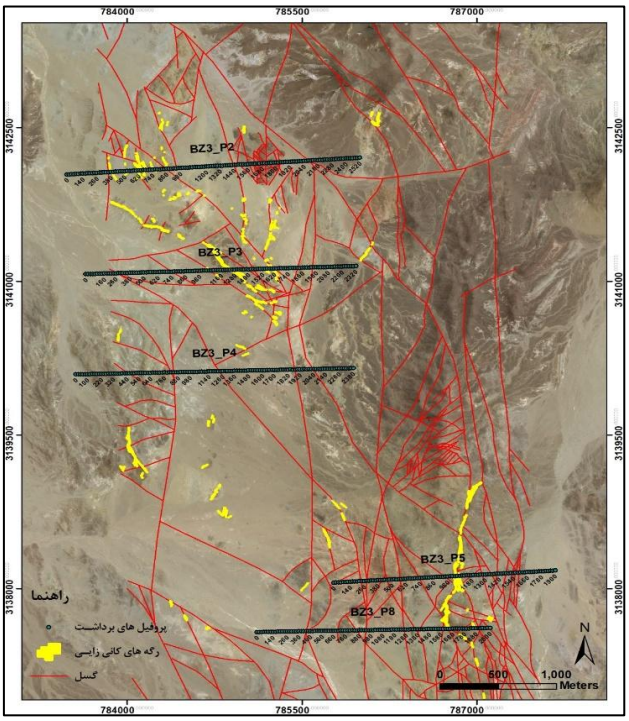
شکل ۸- (a) نمایی از وضعیت گمانه‌های حفاری شده در محیط دیتاماین و (b) مدل سه بعدی کانسار طلای بزمان۳ با تخمین به روش کریجینگ.

Fig 8. (a) A view of the condition of drilled boreholes in the data mine environment and (b) 3D model of Bazman3 gold mine with kriging estimation.

جدول ۴- ارزیابی ذخیره زون شماره ۱ در رده قطعی به روش کریجینگ.

Table 4. 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

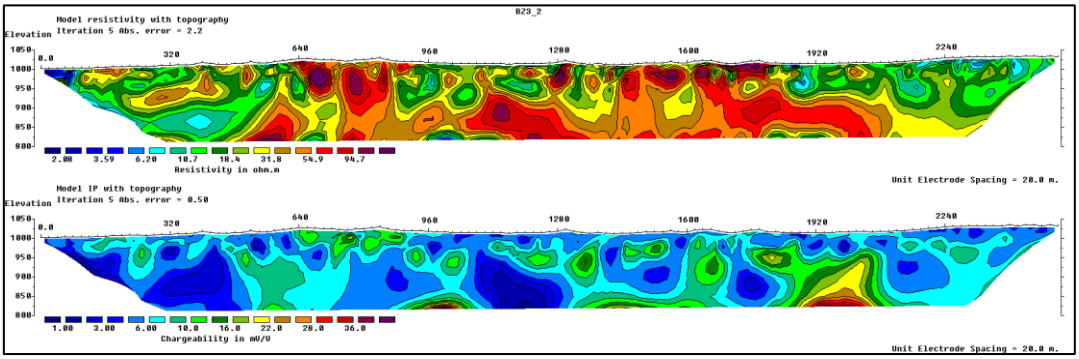


شکل۹- موقعیت نقاط حفاری مغزه‌گیری بر روی زون‌های کانه‌دار بخش باختری محدوده بزمان۳

Fig 9. The location of the core drilling points on the mineralized zones of the western part of the Bazman3 range

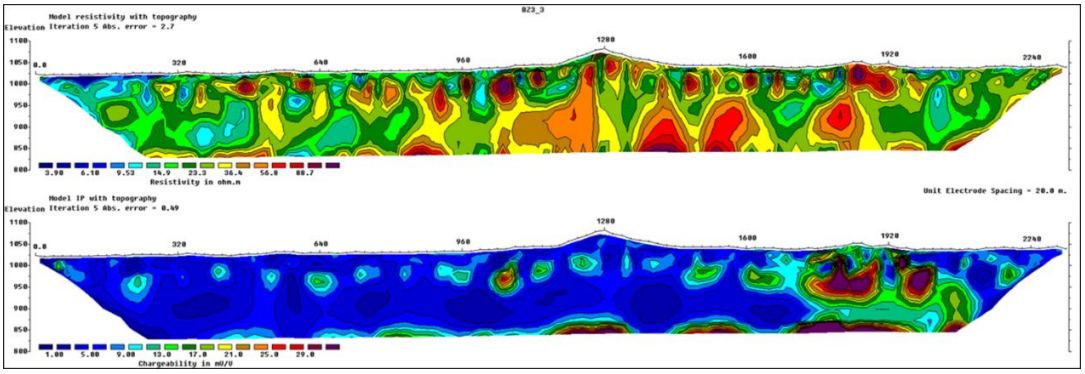
نمونه‌برداری از حفاری‌های RC از متراژهایی صورت پذیرفت که قطعات سیلیسی مشاهده گردید و رنگ کاتینگ حفاری سفید تا زرد تغییر می‌کرد. اما بخش‌های تیره که حاوی سنگ دربرگیرنده شیست و ماسه‌سنگ دگرگونی بوده نمونه‌ای برداشت نگردید. در نهایت نمونه‌ای از تمام متراژهای حفاری به صورت همگن نیز برداشت شده و به آزمایشگاه ارسال گردید. نمونه‌ها به روش ICP-MS و Fire assay آنالیز گردید. در بخش میانی رگه شماره ۱، به طور سیستماتیک تعداد ۱۱ گمانه RC با فواصل ۲۰ تا ۴۰ متر حفر شده است. عمق این گمانه‌ها اغلب ۱۰۰ متر بوده و نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده از آنها نشان می‌دهد عیار طلا در نمونه‌ها بسیار بالا بوده و گاهی بیش از ۲۰ گرم در تن گزارش شده است. در برخی از این گمانه‌ها نمونه معرفی از سراسر گمانه برداشت شده که نشان می‌دهد میانگین عیار طلا در برخی از گمانه‌ها بالا است. بعنوان مثال در ۱۰۰ متر گمانه BZRC-5، میانیگن عیار طلا ۱۱۸۲ میلی‌گرم در تن اندازه‌گیری شده است. در کل گمانه BZARC-8 میانگین عیار طلا ۱۹۳۵ میلی‌گرم در تن، در کل گمانه BZARC-6، ۵۶۱ میلی‌گرم در تن، در کل گمانه BZARC-9، ۶۱۰ میلی‌گرم در تن و در کل گمانه ۷، مقدار میانگین عیار طلا، ۴۰۰ میلی‌گرم در تن گزارش شده که این مقادیر میانگین طلا برای این زون کانه‌دار بی‌نظیر است. هرچند انتخاب نمونه از کاتینگ حفاری به صورت بصری انجام شده و سعی شده نمونه‌گیری از زون‌هایی باشد که دارای رنگ روشن بوده و از سنگ دربرگیرنده شیستی تیره رنگ نمونه برداری نشود، با این حال نمونه‌ها همگی همگن بوده و معرف متراژی است که به وسیله آن نمونه نامگذاری شده است. بعنوان مثال در گمانه BZRC-8، عیار طلا در متراژ ۱۱ تا ۱۲ بیش از ۱۲ گرم در تن و در متراژ ۱۲ تا ۱۳ بیش از ۱۳ گرم در تن اندازه‌گیری شده است. نتایج آنالیز نمونه‌ها همچنین نشان می‌دهد همبستگی معنی‌داری بین مقادیر بالای طلا، آرسنیک، بیسموت و تنگستن وجود دارد و عناصر مذکور دارای غنی‌شدگی مشخصی هستند. هرچند مقادیر آرسنیک واقعی نبوده و در نتایج آنالیز بعنوان حد بالای تشخیص دستگاه (>100ppm) گزارش شده است. همبستگی بالای این عناصر نشان می‌دهد که طلا احتمالاً به صورت کمپلکس‌های آرسناته، بیسموتیتی و ولفرامیتی حمل شده است. در گمانه BZARC-1 مقادیر بالای طلا در عمق ۱۱ تا ۱۳ متر گزارش شده است. در حالیکه در برخی عمق‌ها نظیر عمق ۱، ۱۸ و ۷۹ مقادیر طلا در حد غنی‌شدگی گزارش شده

است. توسعه کانه‌زایی طلا در گمانه BZRC-9 به‌خوبی مشهود است به طوریکه عیار طلا در عمق ۱ تا ۳، ۲۴ تا ۲۵، ۸ تا ۱۲ متر بالا بوده و عناصر، تنگستن، بیسموت و نقره نیز غنی‌شدگی نشان می‌دهد.



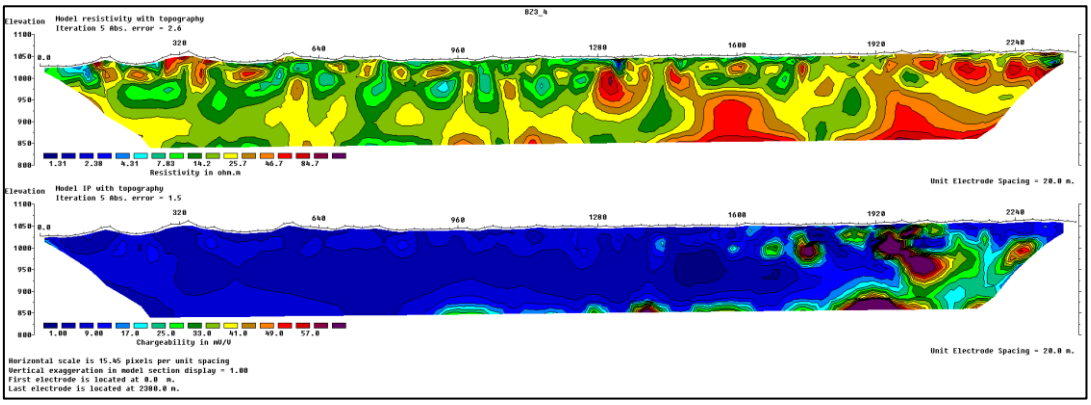
شکل ۱۰- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p2

Fig 10. Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and inducedpolarization (bottom) with topographical correction applied on BZ3p2 profile



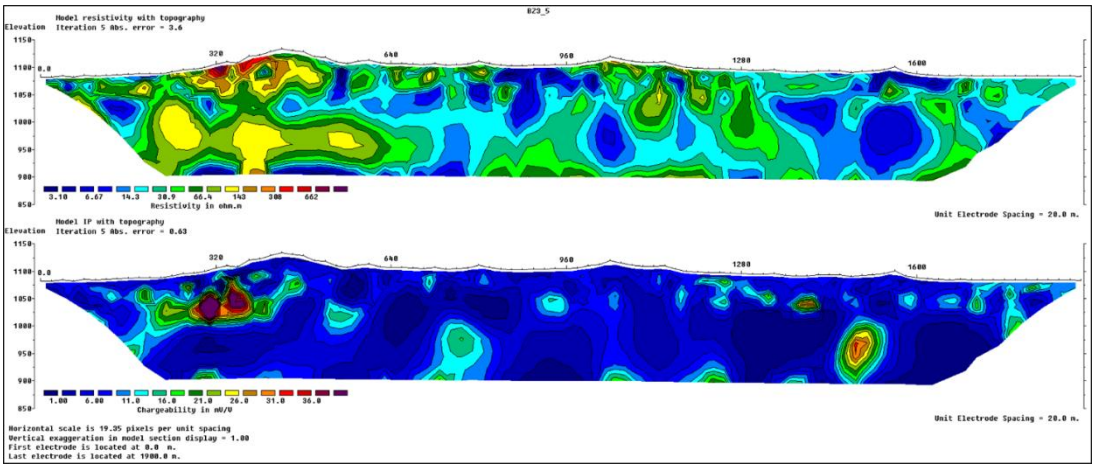
شکل۱۱- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p3

Fig 11. Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on BZ3p3 profile.



شکل ۱۲- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p4

Fig 12. Models resulting from two-dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied on BZ3p4 and BZ06 profiles,



شکل ۱۳- مدل‌های حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه (بالا) و پلاریزاسیون القایی (پایین) با اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی پروفیل BZ3p8.

Fig 13. Models resulting from two dimensional inversion of specific resistance data (top) and induced polarization (bottom) with topographical correction applied BZ3p8 profiles.

۸- نتایج حاصل از بررسی‌های مغناطیسی

در محدوده بزمان۳ واقع در استان سیستان و بلوچستان با توجه به شرایط زمین‌شناسی و نتایج مطالعات شناسایی اولیه انجام شده وجود شواهدی بر احتمال کانی‌سازی پلی‌متال، مطالعات مغناطیس‌سنجی انجام گرفت. برای پوشش محدوده اکتشافی و بر مبنای اهداف مطالعات ژئوفیزیک مورد نظر، ۵۱ پروفیل با راستای شمالی- جنوبی با شبکه برداشت داده‌ها ۴۰ × ۸۰ متر به صورت شناسایی انتخاب گردید. پس از برداشت مغناطیس-سنجی و اعمال تصحیحات لازم و تهیه نقشه‌های مختلف، نتایج تفسیر داده مشروحاً بیان گردید. نتیجه‌گیری کلی زیر برای محدوده بزمان۳ با در نظر گرفتن اهداف مطالعات ارایه می‌گردد.

تغییرات شدت میدان کل محدوده بین ۴۵۱۰۰ تا۴۹۲۰۰ نانوتسلا متغیر است. با تهیه نقشه بی‌هنجاری باقیمانده و حذف بی‌هنجاری ناحیه‌ای، پنج زون بی‌هنجاری با مشخصات زیر در این محدوده ردیابی گردیده است:

۱- زون بی‌هنجاری ZI در شمال‌شرقی محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۹۰۰۰ نانوتسلا می‌باشد.

بی‌هنجاری در واحد Md (گدازه آندزیت-داسیت و توف) و واحد Ngvs (مارل، ماسه‌سنگ ولکانوکلاستیک، سیلت و کنگلومرا) واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی و اکسید آهن و نیز بی‌هنجاری ژئوشیمی طلا و مس ردیابی شده است.

۲-زون بی‌هنجاری ZII، در قسمت شمال غربی محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۷۸۰۰ نانوتسلا می‌باشد همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی و اکسید آهن ردیابی شده است.

۳-زون بی‌هنجاری ZIII، در قسمت شرقی محدوده با امتداد تقریبی شمالی - جنوبی ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۸۰۰۰ نانوتسلا می‌باشد. این زون بی‌هنجاری در واحدهای Md (گدازه آندزیت-داسیت و توف)، Ma (واریزه‌های به شدت آلتره شده)، Ngvs (مارل، ماسه‌سنگ ولکانوکلاستیک، سیلت و کنگلومرا) و آبرفت واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی، اکسید آهن، سیلیس و نیز بی‌هنجاری ژئوشیمی مس ردیابی شده است.

۴-زون بی‌هنجاری ZIV، در غرب محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود ۴۷۳۰۰ نانوتسلا می‌باشد. دراین زون بی‌هنجاری در واحدهای Md (گدازه آندزیت-داسیت و توف)، Ma (واریزه‌های به شدت آلتره شده) و آبرفت واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون اکسید آهن و سیلیس ردیابی شده است.

۵-زون بی‌هنجاری ZV، در جنوب محدوده ردیابی شده است. حداکثر شدت میدان در این زون بی‌هنجاری حدود

۴۷۴۰۰ نانوتسلا می‌باشد. در این زون بی‌هنجاری در واحدهای Md (گدازه آندزیت- داسیت و توف)، Ma (واریزه‌های به شدت آلتره شده) و آبرفت واقع شده است. همچنین در قسمت‌هایی از این زون بی‌هنجاری، آلتراسیون آرژیلیکی، اکسید آهن، سیلیس و نیز بی‌هنجاری ژئوشیمی طلا ردیابی شده است.

با توجه به نقشه‌های فراسو، اثر منشاء زون بی‌هنجاری ZII حداکثر تا عمق حدود ۱۰۰ متر، اثر منشاء زون‌های بی‌هنجاری ZIII و ZIV حداکثر تا عمق حدود ۲۵۰ متر و اثر منشا زون‌های بی‌هنجاری ZI و ZV حداکثر تا عمق حدود ۳۰۰ متر مشاهده می گردد.

با توجه به نقشه‌های فروسو و سیگنال تحلیلی، می‌توان احتمال داد مراکز زون‌های بی‌هنجاری از عمق کمتر از ۳۰ متر شروع شده‌اند.

با انجام مدل‌سازی سه بعدی، وضعیت و گسترش عمقی زون‌های بی‌هنجاری مشخص گردید .همچنین با توجه به مدل-سازی سه بعدی، مقدار بیشینه مغناطیس‌پذیری حدود 0.05 SI برآورد شده است.

با انجام مدل‌سازی دو بعدی، وضعیت و گسترش عمقی زون‌های بی‌هنجاری در راستای پنج مقطع مشخص گردید.

با توجه به نقشه زمین‌شناسی محدوده و مقادیر مغناطیس-پذیری برآورد شده در مدل‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیس‌سنجی، احتمال دارد بی‌هنجاری‌های ردیابی شده در محدوده زون‌های بی‌هنجاری ZIII و ZV مربوط به توده‌های نفوذی احتمالی باشد.

۹- نتیجه‌گیری

در محدوده بزمان ۳، ۵ پروفیل طراحی شده برداشت گردیده است. برداشت‌ها با آرایه قطبی – دوقطبی با فواصل الکترودی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر تا عمق ۲۰۰ متر، انجام شده است. از آنجاییکه برای اکتشاف ذخایر طلای اپی‌ترمال، بهترین راه استفاده از مدل‌های تکتونیکی و مدل‌های آلتراسیونی است و با توجه به اینکه این ذخایر بیشتر به صورت رگه‌ای در زون‌های گسله تشکیل می‌شوند، لذا در مقاطع مدل‌سازی شده مقاومت ویژه، تعیین گسل‌ها و بی‌هنجاری‌های این نواحی یا اطراف آن مهم می‌باشد. 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 داده-های 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 بزمان۳، مقدار بارپذیری بالا بوده لذا وجود درصد کانی‌زایی سولفیدی در محدوده بزمان۳ 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 بی-هنجاری‌ها 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 مقاله حاصل بخشی از فعالیت‌های پژوهشی لازم برای اخذ درجه دکتری زمین‌شناسی اقتصادی نویسنده اول از دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات می‌باشد. از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران بخاطر همکاری در دسترسی به داده‌های معدنی و ژئوفیزیکی و ارائه پشتیبانی فنی، و شرکت مهندسین مشاور زمین آب پی به دلیل ارائه خدمات تخصصی زمین‌شناسی، مشاوره‌های فنی و همکاری در تحلیل داده‌ها صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. از داوران محترم مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته که با ارائهٔ پیشنهادات سازنده موجب ارتقا کیفیت مقاله شدند، سپاسگزاریم.

مراجع

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.

Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., 2022. 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.

Irvine, R.J. and Smith, M.J. 1990. Geophysical Exploration for Epithermal Gold Deposits. Journal of Geochemical Exploration 36, 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.

Kav Mining Engineering Company., 2018. Geological-Mining Map Report 1:10000, Time 3, Minerals Procurement and Production Company.

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 and 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. 237pp

Modriniak, N., Marsden, E., 1938. Experiments in geophysical survey in New Zealand. Department of Scientific and Industrial Research.

Mushtaghian, K., Abtahi Forushani, M., AsadiHaruni, H., Haj Heydari, M., Janghorban, G., 2022. 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., 2015, depth estimation by Euler deconvolution method in the eastern part of Hanar Anomaly, Birjand, Iran. Geophysics Conference 17. https://sid.ir/paper/849892/fa.

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., Pratt, D.A., 2007. Geophysical inversion for mineral exploration: a decade of progress in theory and practice. Proceedings of exploration 7(5), 61-95.

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.

Sahandi, M., Soheili, M., 2014. Geological Map of Iran, scale 1:1000000. Geological Survey of Iran.

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.