



Imam Khomeini International University
Vol. 10, No. 2, Summer 2025



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Geophysical Modeling of Electrical Resistivity and Induced Polarization Data to Determine the Potential of Gold Mineralization in East Azerbaijan

Mohammadi A.¹, Abedi M.^{2*}, MirMohammadi M.S.³, Zarean A.⁴

1- M.Sc Student, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University of Shabestar, Tabriz, Iran

Received: 04 Jul. 2024

Accepted: 15 Oct. 2024

Abstract: The exploratory region, covering an area of 20 square kilometers, is located in the northern part of East Azerbaijan. This region is characterized by diverse geological formations such as marl, sandstone, limestone, sedimentary volcanic rocks, tuff, and sheared tuff from the Cretaceous period, quartzdiorite and granite intrusive masses from the Oligocene period, and quaternary basalts. A geoelectrical survey was conducted using the pole-dipole method along 9 parallel profiles, each 200 meters in length, perpendicular to a silica dyke visible in some parts of the region. Following data acquisition and processing, 2D inversion modelling of electrical resistivity and induced polarization data was carried out, and the inversion sections were displayed in both 2D and 3D formats. By having drilling information aligned with the geoelectrical profiles, the correlation between gold grade, electrical resistivity, and induced polarization was examined. The results of this research demonstrated that the geoelectrical method can be useful for exploring low-sulphide epithermal gold deposits. Additionally, a 3D representation of the inversion modelling results for all 9 profiles was prepared. Finally, by analyzing and comparing anomalies in electrical resistivity and induced polarization and utilizing drilling data, it was found that the gold veins in the exploratory region exhibit relatively predictable behavior in terms of geophysical parameters. The sulphide-rich sections of the gold vein exhibited low electrical resistivity and high induced polarization, while sections of the vein with lower sulphide content, located within the silica, displayed higher resistivity and polarization.

Keywords: Electrical resistivity, Induced polarization, Inverse modeling, Geological interpretation, Gold deposit.

How to cite this article

Mohammadi, A., Abedi, M., MirMohammadi, M. S., and Zarean, A. (2025). "Geophysical modeling of electrical resistivity and induced polarization data to determine the potential of gold mineralization in East Azerbaijan". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(2): 1-20.

DOI: 10.30479/jmre.2025.20557.1704

*Corresponding Author Email: maysamabedi@ut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Geophysics has evolved into a well-established discipline capable of precisely assessing various physical properties of the Earth, including its electrical characteristics. Among the key techniques utilized in mineral exploration are geoelectrical methods, particularly resistivity and induced polarization (IP), with the IP method being especially prevalent in the search for metallic and sulfide deposits. The inception of geoelectrical studies in Iran can be traced back to 1946, and these methods have since been employed across nearly all identified metallic deposits in the country, encompassing polymetallic and gold deposits. By synthesizing the acquired geoelectrical data with geological, mineralization, alteration, and geochemical insights, optimal drilling sites can be identified [1]. Geoelectrical methods are recognized as effective techniques for the identification of metallic minerals such as pyrite, chalcopyrite, and pyrrhotite. Additionally, in the context of gold exploration within the Alta Floresta Gold Province in Mato Grosso, Brazil, an integrated approach combining magnetic and geoelectrical data was utilized to pinpoint promising gold exploration targets. This multifaceted interpretation of geophysical data has the potential to greatly advance the understanding and effectiveness of gold exploration initiatives [2]. Gold is an exceptionally valuable metal that finds applications across multiple sectors, such as jewellery, electronics, and finance. It functions not only as a store of value and a safeguard against inflation but also as collateral for loans. Recently, there has been a surge in demand for gold in developing nations, where it is viewed as a tool for wealth enhancement and economic advancement. This growing interest has prompted a rise in global gold exploration and extraction efforts, alongside the innovation of new technologies aimed at improving the efficiency and sustainability of these processes [3].

The northern region of East Azerbaijan province exhibits significant lithological diversity, featuring various geological units such as marl, sandstone, limestone, and volcano sedimentary rocks. This area also contains aplite veins and silica veins, both characterized by white coloration and iron oxide staining, which indicate the presence of iron oxide and sulfide mineralization. Notably, it is identified as a gold mineralization zone associated with low-sulfidation epithermal deposits, suggesting that gold formation occurs predominantly in low-temperature, low-sulfidation conditions. The study employed a range of tools to develop comprehensive geoelectrical and geological models of gold deposits in the region. These models were assessed using drilling data, and significant correlations between the geophysical models and findings from other exploration efforts were analyzed. Ultimately, the objective was to enhance the accuracy and utility of geological models for generating gold maps in the investigated area.

MATERIAL AND METHODS

In this research, nine geoelectrical profiles were executed in a NE-SW orientation to gather resistivity and electrical chargeability data. This was achieved using a pole-dipole array with a length of 200 meters and an electrode spacing of 10 meters across 16 intervals per reading in NE Azerbaijan. The data collected often includes various noise types, making direct interpretation unreliable for accurately understanding subsurface layer behavior. Consequently, it is essential to establish the connection between field data and the physical properties of the earth, which involves modelling the data to interpret subsurface behavior effectively. In numerical modelling, physical relationships are articulated through differential and integral equations, and solving these equations enables the determination of parameters and the distribution of the model's physical properties [4]. Geophysicists have historically acknowledged the significance of data inversion; however, past limitations in computational resources restricted even the most advanced inversion algorithms to estimating only a few parameters. As a result, subsurface structures were typically represented as multilayered or simplistic prismatic forms, with parameters fine-tuned to align the modelled data with observed results. Given the often-intricate geometries of geological formations, such simplifications in numerical inversion modelling frequently led to misleading interpretations. In recent years, substantial improvements in computational capabilities and inversion methodologies have facilitated the creation of more accurate inversion models, underscoring the critical role of geophysics in addressing real-world challenges [5]. In this study, the drilling of 11 exploratory boreholes across the profiles has enabled the analysis of geophysical modelling in conjunction with assay data, leading to the discovery of notable correlations. The 3D visualization of resistivity and chargeability data, paired with gold assay charts, has effectively highlighted geophysical anomalies and demonstrated the connection between assay values and

geolectric parameters.

FINDINGS AND ARGUMENTS

Iran hosts a remarkable array of gold deposits, encompassing orogenic, epithermal, Carlin-type, intrusion-related systems, and gold-rich volcanic sulfides. Each type is uniquely situated across various regions, showcasing distinct characteristics and properties. This geological diversity highlights Iran's prominence in gold mining, emphasizing its vital role in the exploration and extraction of precious gold resources [6]. The thorough analyses and investigations reveal that the northern region of East Azerbaijan is distinguished as a rich zone of gold mineralization, characterized by a vein-type system within a host rock of rhyodacite and tuff. Moreover, the findings from mineralization temperature and fluid inclusion studies indicate that this area corresponds to low-sulfidation epithermal deposits. Beyond gold, the presence of additional elements in this region further elevates its economic and exploratory significance. Inversion modelling of resistivity and induced polarization data was meticulously conducted for each of the nine profiles. The resulting observed and predicted resistivity and induced polarization sections are presented. Each section consists of 215 measurement points employed for the inversion process. The analysis of these inversion results indicates the promising identification of a silica vein infused with sulfides, potentially signalling gold mineralization. A comprehensive review of all 2D modeled sections reveals that anomalies have consistently emerged across the parallel profiles (Figure 1).

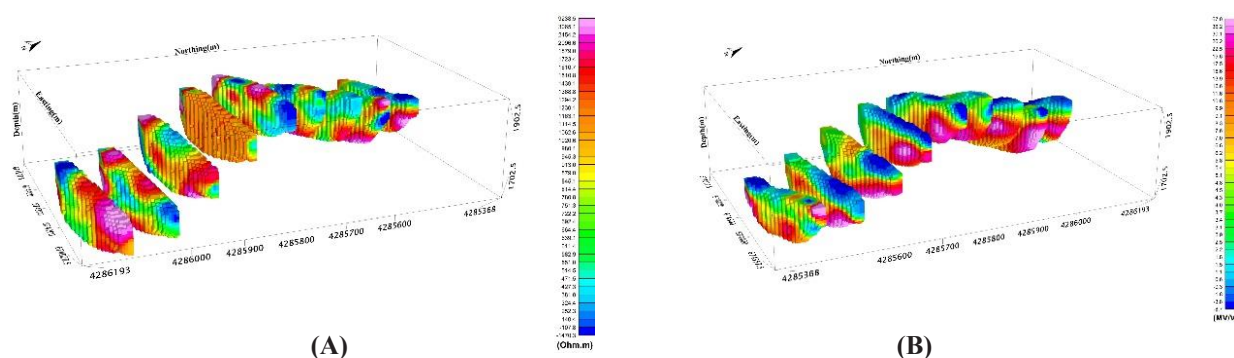


Figure 1. 3D visualization of the 2D inverse modelling of geoelectrical data: **A:** electrical resistivity and **B:** chargeability (Nine profiles have been collected in this area.)

Upon the meticulous processing and modelling of resistivity and induced polarization data, a thorough quantitative and qualitative analysis ensues. This process entails a sophisticated comparison with existing drilling data in the vicinity, aiming to uncover significant correlations between geoelectric and grade data. Generally, gold exploration is a challenging subject due to geological complexities, while interpreting and concluding about areas indicative of gold mineralization require significant precision and attention. The analysis of the results reveals two notable types of correlations. (1) Areas within the profiles exhibiting induced polarization and resistivity values above the background level suggest the existence of a siliceous vein at depths ranging from 25 to 35 meters. In these regions, the gold concentration is roughly 1 ppm, indicating that these sections predominantly reflect gold mineralization associated with the siliceous vein. (2) Depth intervals exhibit an enhancement in grade and electrical chargeability, alongside a reduction in electrical resistivity. The lithological columns suggest that these intervals are predominantly associated with rhyodacite and hornfels. The notable decline in resistivity in these zones points to an elevated concentration of sulfides relative to surrounding areas. Typically, the gold grade in these sections exceeds 1 ppm, indicating the presence of gold mineralization within the sulfide content. Analyzing Figure 2 reveals that the resistivity-grade diagrams show a clustering of high-grade points in regions characterized by low resistivity, indicative of gold mineralization within the sulfide section, while high-grade points are dispersed in areas of high resistivity associated with gold mineralization in the silica vein. Furthermore, the chargeability-grade diagram lacks a significant correlation. The interpretation of chargeability values is inconclusive when considered in isolation due to the influence of the sulfide zone; thus, a combined

analysis with electrical resistivity is recommended for enhanced understanding.

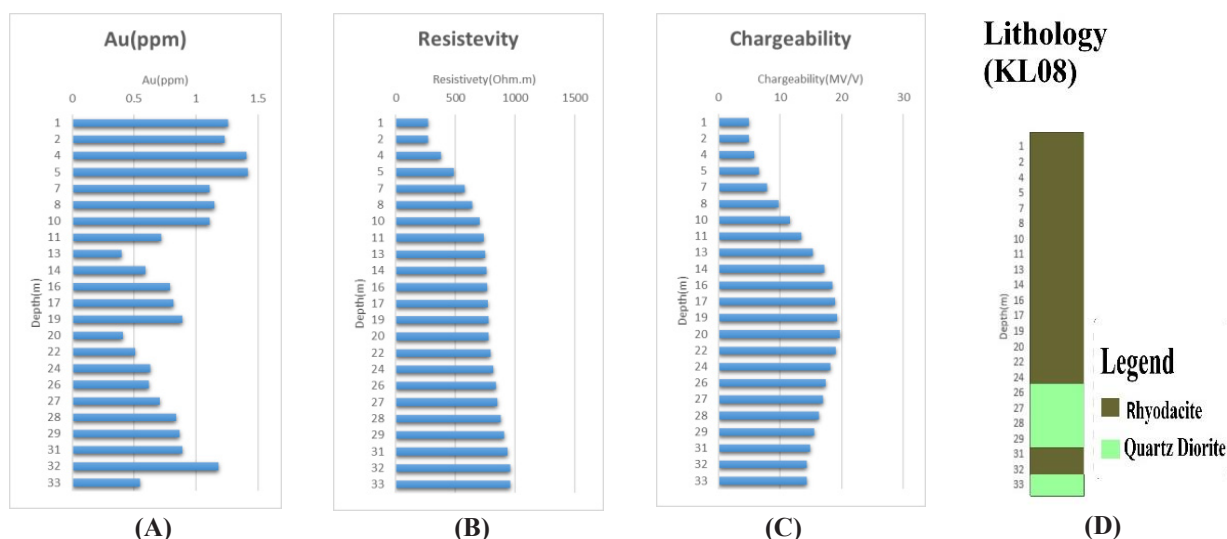


Figure 2. A: Variations in gold grade, **B:** electrical resistivity, and **C:** chargeability **D:** at borehole KL08

CONCLUSIONS

In this research, a 2D analysis of electrical resistivity and chargeability data across nine profiles was conducted, revealing the presence of silica veins enriched with sulfides, potentially indicating gold mineralization. The anomalies identified through modelling imply the existence of low-sulfidation gold veins associated with silica. The consistent occurrence of these anomalies in parallel profiles, along with their strong correlation to gold mineralization characteristics, represents a noteworthy outcome of this investigation. The analysis of geoelectrical data in conjunction with drilling data has identified two distinct relationships in the region: one where gold mineralization occurs in the host silica vein, characterized by elevated resistivity and chargeability, and another where gold mineralization is found in the sulfide zone, marked by reduced resistivity and heightened chargeability. These findings are valuable for enhancing the interpretation and identification of regions that are conducive to gold mineralization. The alignment of the 3D models of resistivity and chargeability data with the silica dyke, as established through geological and lithological data obtained from drilling, represents a crucial finding of this research. A vital component of this study is the interpretation of resistivity and chargeability results, which enhances the utility of this method in the exploration of gold mineralization, alongside the strategic application of drilling data to mitigate uncertainties in the findings. Certain areas do not conform to the established relationships, although these relationships generally apply in most locations. Various factors contribute to these discrepancies, including geological complexities related to gold mineralization, uncertainties in geoelectrical data, errors in data acquisition, and the presence of noise within the data. Naturally, with the completion of exploratory layers in this area and their integration, many ambiguities will be resolved.

REFERENCES

- [1] Dasht-e Ban Khor, B., Hafizi, M., and Jafari, F. (2020). "Exploration of Gold in Silica Veins in Bajestan County Using the IP/RS Method". Second National Congress on New Technologies in Iran.
- [2] Agnoletto, E., and Leite, E. P. (2015). "Identification of exploration gold targets in the Alta Floresta Gold Province, Mato Grosso state, Brazil, based on an integrated interpretation of magnetic and geoelectrical data". Brazilian Journal of Geophysics, 33(02): 305.
- [3] Chisambi, J., and Chisambi, J. (2023). "Structural interpretation of the Mangochi-Makanjira area (Southern Malawi) from an aeromagnetic analysis: Implications for gold exploration". Journal of Mining and Geo-Engineering, 57(3): 275-281.

- [4] Farahani, N., Mirzaei, M., Javadipour, Sh., and Moradi, A. (2018). "*Exploration of Gold-Bearing Barite Veins Using IP/RS Methods*". Eighteenth Conference on Geophysics of Iran.
- [5] Oldenburg, D. W., and Li, Y. (2005). "*Inversion for Applied Geophysics: A Tutorial. Near Surface Geophysics*". University of British Columbia.
- [6] Aliyari F., Rastad E., and Mohajjel M. (2012). "*Gold Deposits in the Sanandaj–Sirjan Zone: Orogenic Gold Deposits or Intrusion-Related Gold Systems?*". Resource Geology, 62(3): 296-315.



مدل سازی ژئوفیزیکی داده مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت پتانسیل یابی کانه زایی طلا در آذربایجان شرقی

علی محمدی^۱، میثم عابدی^{۲*}، میر صالح میر محمدی^۳، احمد زارعان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی اکتشاف معدن و نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، گروه مهندسی اکتشاف معدن و نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، گروه مهندسی اکتشاف معدن و نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، تبریز

بذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

چکیده

محدوده اکتشافی به وسعت ۲۰ کیلومترمربع در شمال آذربایجان شرقی واقع شده است. در این منطقه، واحدهای زمین شناسی شامل مارن، ماسه سنگ، آهک، سنگ های آتشفشانی رسوبی، توف و توف برشی مربوط به کرتاسه، توده های نفوذی کوارتز دیوریت و گرانیتی از دوره الیگوسن و بازالت های کواترنری رخنمون دارند. برداشت ژئوالکتریک با روش قطبی- دوقطبی و طراحی ۹ پروفیل موازی با طول های ۲۰۰ متر و عمود بر دایک سیلیسی که در برخی از قسمت های محدوده رخنمون دارد، انجام شد. پس از برداشت و پردازش داده ها، مدل سازی وارون دوبعدی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی انجام شد و مقاطع وارون به صورت دوبعدی و سه بعدی نشان داده شدند. با در اختیار داشتن اطلاعات حفاری منطبق بر پروفیل های ژئوالکتریک، ارتباط میان عیار طلا، مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش ژئوالکتریک برای اکتشاف کانی طلا از نوع اپی ترمال کم سولفید مفید است. همچنین نمایش سه بعدی نتیجه مدل سازی وارون برای هر ۹ پروفیل تهیه شد. در نهایت با بررسی و مقایسه بی هنجاری های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی و با استفاده از اطلاعات حفاری دریافتیم که رگه های طلا در محدوده اکتشافی، از نظر پارامترهای ژئوفیزیک رفتارهای نسبتاً قابل پیش بینی دارند. بخش های سولفیدی رگه طلا، مقاومت ویژه پایین و بارپذیری بالا و بخش هایی از رگه که دارای مواد سولفیدی کمتری هستند و در درون سیلیس قرار دارند، دارای مقاومت ویژه و بارپذیری بالاتری هستند.

کلمات کلیدی

مقاومت ویژه الکتریکی، بارپذیری الکتریکی، مدل سازی وارون، تفسیر زمین شناسی، کانسار طلا.

استناد به این مقاله

محمدی، ع.، عابدی، م.، میر محمدی، م.، ص.، زارعان، ا.؛ ۱۴۰۴؛ "مدل سازی ژئوفیزیکی داده مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی جهت پتانسیل یابی کانه زایی طلا در آذربایجان شرقی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۲، ص ۲۰-۱.

DOI: 10.30479/jmre.2025.20557.1704



۱- مقدمه

امروزه، ژئوفیزیک به عنوان یک علم شناخته شده، قادر است برخی از خصوصیات فیزیکی زمین، از جمله خواص الکتریکی را به خوبی تعیین کند. روش‌های ژئوالکتریکی، از جمله مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، از مهم‌ترین روش‌ها در اکتشافات معادن است. روش بارپذیری الکتریکی به ویژه در اکتشافات معادن فلزی و سولفیدی کاربرد زیادی دارد. اولین مطالعات ژئوالکتریک در ایران به سال ۱۹۴۶ برمی‌گردد و تقریباً بر روی تمامی معادن فلزی شناخته شده در ایران، از جمله معادن پلی‌متال و طلا، از روش ژئوالکتریک استفاده شده است. با استفاده از داده‌های برداشت شده و ترکیب آن با اطلاعات زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون و ژئوشیمی، می‌توان نقاط مناسب برای حفاری را پیشنهاد داد [۱].

روش‌های اکتشاف مواد معدنی باتوجه به نوع ذخایر و ویژگی‌های آن تنظیم می‌شود. درک فرآیندهای کانی‌سازی و شناسایی عواملی که بر تشکیل و حفظ ذخایر معدنی حاکم هستند، در اکتشافات معدنی بسیار مهم هستند [۲].

ژئوفیزیک نقش مهم خود را در کشف توده‌های معدنی اثبات کرده است و به همین دلیل در سال‌های گذشته در صنعت تغییری به سوی استفاده از روش‌های ژئوفیزیک برای اکتشاف معادن و پیشرفت‌های فناوری رخ داده است [۳].

مبنای هر روش ژئوفیزیک، شناسایی صحیح تباین‌های ناشی از خصوصیات مختلف ژئوفیزیک اهداف مورد نظر است. این اصل به عنوان اصل اساسی و بنیادی در انجام تحقیقات ژئوفیزیک و تفسیر داده‌ها استفاده می‌شود. باتوجه به اهمیت این اصل، تلاش بر این است تا با بهره‌گیری از مفاهیم اصولی ژئوفیزیک و با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته تحقیقاتی، تحلیل دقیق و صحیحی از اطلاعات ژئوفیزیک صورت گیرد [۴].

روش‌های ژئوالکتریکی مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی به عنوان روش‌های کارآمدی برای شناسایی کانی‌های فلزی از جمله پیریت، کالکوپیریت و پیرویت شناخته شده‌اند. مطالعات انجام شده توسط اولدنبرگ و همکاران (۱۹۹۷) نشان می‌دهند که این روش‌ها مناسب برای شناسایی کانسارهای مستعد طلا مانند معدن Mt. Milligan هستند. آنها اطلاعات مربوط به مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی را از معدن بررسی کرده و باتوجه به داده‌های موجود نتایج وارون‌سازی را مورد تفسیر قرار دادند. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از این اطلاعات به وسیله این روش‌های ژئوالکتریکی مقاومت ویژه و

بارپذیری الکتریکی، به بهبود شناخت و تفسیر کانسارها کمک می‌کند. به علاوه، با تمرکز بر اکتشاف طلا در استان طلای آلتا فلورستا، ایالت ماتو گروسو، برزیل، می‌توان از یک تفسیر یکپارچه داده‌های مغناطیسی و ژئوالکتریک برای شناسایی اهداف طلای اکتشافی استفاده کرد. این تفسیر ترکیبی از داده‌های ژئوفیزیک مختلف بهبود قابل توجهی در شناخت و تفسیر اکتشافات طلا ایجاد می‌کند [۵].

استفاده از روش‌های ژئوفیزیک به دلیل سرعت، هزینه و طبیعت غیرمخرب آنها، برای اکتشاف معدن اساسی است [۶]. اخیراً، استفاده از بررسی‌های ژئوفیزیک به ویژه روش‌های الکتریکی در برنامه‌های اکتشاف مواد معدنی برای کاهش هزینه و زمان به طور چشمگیری افزایش یافته است. هدف اصلی این روش‌ها از جمله روش‌های الکتریکی، انتخاب بهترین نقاط برای حفاری به منظور اهداف اکتشافی با کارایی بالا و هزینه کمتر است. با استفاده از این روش‌های پیشرفته، می‌توان به بهترین شکل مکان‌یابی انجام داد و نقاط مناسب برای اکتشاف مواد معدنی را تعیین کرد. این اقدامات به بهبود و بهینه‌سازی برنامه‌های اکتشافی منجر می‌شود که در نتیجه باعث افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها می‌شود [۹-۵].

مواد سازنده زمین، مقاومت ویژه الکتریکی و بارپذیری الکتریکی متفاوتی دارند. این ویژگی‌ها به مهندسی علوم زمین کمک می‌کنند تا با استفاده از اندازه‌گیری مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی در سطح زمین، به ساختار درونی آن پی ببرند. شناخت لایه‌های زیرسطحی با استفاده از تکنیک ژئوالکتریک، نیازمند یک معیار است که بر اساس آن، نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری مقاومت ویژه به لایه‌های زمین‌شناسی موجود تعمیم داده شود. به طور کلی، مقاومت ویژه الکتریکی واحدهای زمین‌شناسی یک عدد مطلق نیستند و به صورت یک بازه ارایه می‌شوند. علت این امر، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و خصوصیات منحصر به فرد هر واحد زمین‌شناسی در مناطق مختلف است. ذخایر طلا از نظر ژنتیکی به دلیل اینکه در بیشتر مواقع در سیستم‌های زمین‌شناسی همراه با سولفیدها هستند، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی بسیار پایین و بارپذیری الکتریکی بالا دارند [۸].

وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیک، ابزاری بسیار قدرتمند و تعیین‌کننده در عملیات اکتشاف ذخایر معدنی است. با استفاده از بازیابی هندسه و خصوصیات فیزیکی ساختار مورد تجسس، این روش اطلاعات قابل‌اعتمادی را برای هدایت برنامه حفاری فراهم می‌کند. دقت مدل‌سازی عددی و وارون‌سازی

در اواخر دهه ۱۹۸۰، علاقه گسترده به طلا، به کشف و بررسی بیشتر این ماده معدنی منجر شد. این علاقه، تاثیرات ژرفی بر روش های ژئوفیزیکی برای اکتشاف طلا را تحت تاثیر قرار داد. در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، روش های ژئوفیزیکی به طور گسترده برای جستجوی فلزات پایه در سولفیدها استفاده می شدند. در سال های اخیر، استفاده از روش های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی برای اکتشاف طلا بسیار موثر بوده است. در مناطقی که غنی از کانی های فلزی یا سولفیدی هستند، اثرات IP به دلیل جریان الکتریکی که به زمین تزریق می شود، بسیار مشهود خواهد بود. این اصل به عنوان اساس کار اکتشافی استفاده می شود [۱۵].

تولید طلا در ایران اندک است (حدود ۶۰۰ کیلوگرم در سال) و ذخایر طلا و چشم اندازهای شناسایی شده تاکنون از نظر اندازه نسبتاً کوچک هستند و تنها تعداد کمی از آنها مورد مطالعه و توصیف قرار گرفته است. بسیاری از ذخایر طلای کوهزایی ایران که در سنگ های دگرگونی کربنفر تا کرتاسه قرار دارند، در امتداد مناطق برشی شکل پذیر و شکننده وجود دارند. به طور کلی، ساختارهای معدنی تغییر شکل پذیری را نشان می دهند که به وسیله گسل های شکننده بعدی ایجاد می شود. به نظر می رسد که هر دوی آنها به طلا مرتبط هستند. پیریت رایج ترین کانی سولفیدی است که مقادیر کمتری از پیرویت،

آرسنوپیریت، کالکوپیریت و اسفالریت دارد. طلا هم به صورت بومی و هم به صورت اذخال در پیریت و پیرویت آرسنیت در بیشتر ذخایر وجود دارد [۱۶].

بسیاری از معادن و ذخایر طلا با مناطق یا مواد معدنی سولفیدی مرتبط هستند. در جستجوی سولفیدها، طلا نیز ممکن است یافت شود [۱۷].

در زمینه اکتشاف طلا، مطالعات ژئوفیزیکی متعددی انجام شده است. به عنوان مثال، در روستای تیندیکالا- بوتو در زیربخش نگورا در کامرون شرقی، کانال های سنگ معدن با استفاده از روش های ژئوالکتریکی توسط گوئت و همکاران در سال ۲۰۱۲ شناسایی شدند. همچنین، در ایالات گائو چین، وان وو ژو و همکاران در سال ۱۹۹۹ با استفاده از مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، رگه های سیلیسی طلا دار را شناسایی کردند. در منطقه جولیتا در روسیه، گورین و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش بارپذیری الکتریکی در حوزه زمان، کانسار طلا و نقره را کشف کردند. در این زمینه، مطالعات متعددی در ایران از جمله تفسیر داده های

ژئوفیزیکی می تواند با بررسی میزان تطبیق داده های پیش بینی شده و مشاهده واقعی، بهبود یابد. علاوه بر این، با اعمال قیود متنوع ژئوفیزیکی، ریاضیاتی و زمین شناسی، امکان ارتقاء کیفیت و دقت این روش فراهم می شود. این رویکرد تشریحی به برجستگی های علمی و کاربردی وارون سازی داده های ژئوفیزیکی اشاره و بهبودهای ممکن در این زمینه را بررسی می کند [۱۰].

طلا به عنوان فلزی بسیار ارزشمند و مورد توجه، در صنایع مختلف از جمله جواهرات، الکترونیک و امور مالی به کار می رود. این فلز نه تنها به عنوان ذخیره ارزش و مقابله با تورم عمل می کند، بلکه به عنوان وثیقه برای استقراض پول نیز استفاده می شود. در سال های اخیر، افزایش تقاضا برای طلا در کشورهای در حال توسعه افزایش یافته است که به عنوان وسیله ای برای کمک به تقویت ثروت و رشد اقتصادی در نظر گرفته می شود. این افزایش تقاضا به افزایش فعالیت های اکتشافی و استخراجی طلا در سطح جهان و توسعه فناوری های جدید برای استخراج و اکتشاف به صورت کارآمد و پایدار منجر شده است [۱۱].

باتوجه به نقش حیاتی و ضرورت تامین طلا در زندگی امروزی انسان، اکتشاف این عنصر ارزشمند بدیهی به نظر می رسد، اما برای اکتشاف طلا، اطلاعات زمین شناسی به تنهایی کافی نیست. استفاده از برداشت های سطحی و حتی برخی از روش های ژئوفیزیکی همواره قادر به ارایه یک توصیف دقیق از وضعیت ساختارها و کیفیت توده سنگ در عمق زمین نیست. برای شناسایی محل های احتمالی کانسارهای طلا و کانی های فلزی، اندازه گیری های ژئوالکتریکی در سطح زمین می تواند راهبردی بسیار موثر باشد [۱۲].

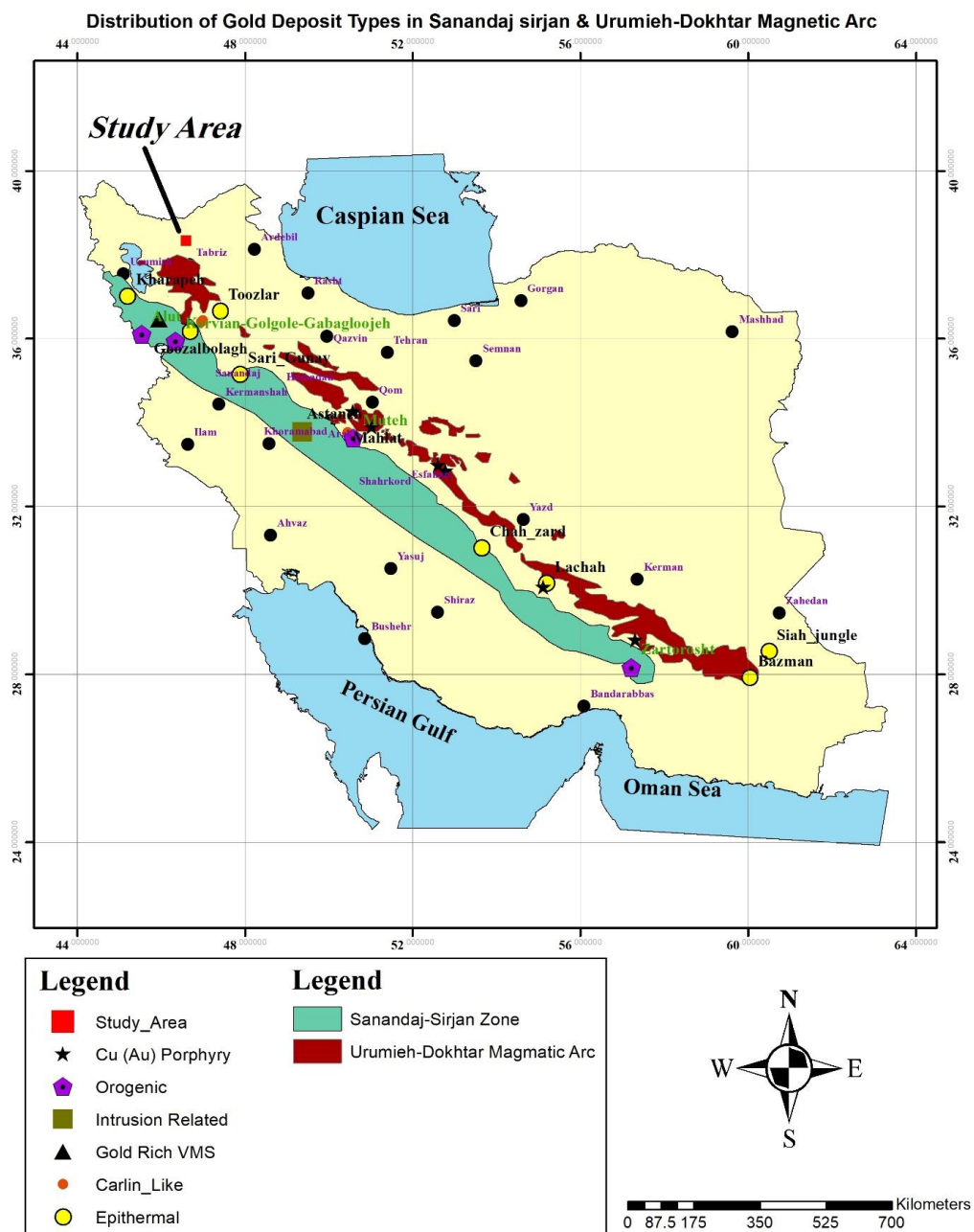
با پیشرفت فناوری در دهه های گذشته، پیشرفت های قابل توجهی در بهبود کیفیت تفسیر ساختارهای زمین شناسی مرتبط با مناطق معدنی از طریق استفاده از روش های الکتریکی صورت گرفته است [۱۳].

طلا به عنوان یک سرمایه ملی و پشتوانه اقتصادی کشور، اهمیت ویژه ای دارد، بنابراین انتخاب روش های مناسب برای اکتشاف آن بسیار حائز اهمیت است. با در نظر گرفتن وضعیت زمین شناسی و همراهی کانی های سیلیسی و سولفیدی با طلا، می توان با استفاده از عملیات ژئوفیزیکی به روش مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، مدل سازی و در نهایت تفسیر آن را برای یافتن محل های دقیق کانی سازی طلا در محدوده های مستعد وجود طلا استفاده کرد [۱۴].

کانی‌سازی طلا و آنتیموان در منطقه حسن‌آباد در شهرستان نیشابور در شمال شرق ایران توسط اعلمی‌نیا و همکاران انجام شد. نقشه پراکندگی معادن طلا در زون‌های سندج سیرجان و ارومیه دختر و همچنین محدوده مورد مطالعه بر روی شکل ۱ قابل مشاهده است.

منطقه اکتشافی شمال شهرستان آذربایجان شرقی از نظر تنوع لیتولوژیکی شامل واحدهای رخنمونی گوناگونی از جمله

ژئوفیزیکی در محدوده معدنی طلای هیرد بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌زایی توسط عسکری و همکاران در سال ۱۳۹۱، نیز انجام شده است. همچنین، در سال ۱۳۸۸، مطالعات اکتشاف کانی‌سازی مس-طلا پورفیری ماهرآباد در شرق ایران توسط ملک‌زاده شفاوردی و همکاران انجام شد. همچنین، در سال ۱۳۸۹، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی برای شناسایی زون

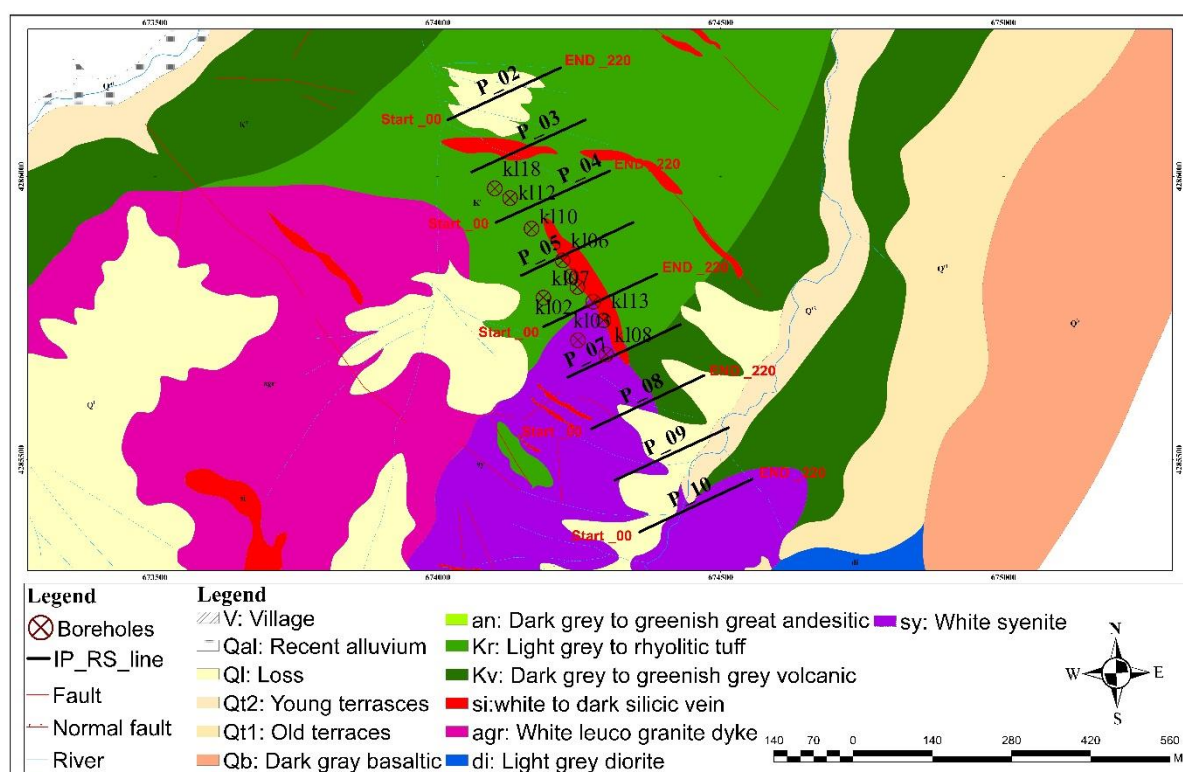


شکل ۱: پراکندگی طلا در زون سندج-سیرجان و ارومیه دختر

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، ۹ پروفیل ژئوالکتریک به صورت موازی و در امتداد شمال شرقی- جنوب غربی، با هدف جمع آوری داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی و با استفاده از آرایه قطبی- دوقطبی به طول ۲۰۰ متر و فاصله الکترودی ۱۰ متر در ۱۶ پرش برای هر قرائت، در شمال شرقی آذربایجان برداشت شده اند. در شکل ۳-الف، نمایی از عملیات برداشت و شکل های ۳-ب و ۳-ج رخنمون های موجود در محدوده نشان داده شده است. پس از برداشت داده ها تصحیح و پردازش آنها باید انجام شود تا بتوان تفسیر مناسبی از داده ها به دست آورد. داده های برداشت شده معمولاً حاوی نوفه های مختلفی هستند و تفسیر مستقیم آن ها نتایج دقیقی به همراه ندارد. به عبارت دیگر، داده های خام حاصل از عملیات صحرایی به طور مستقیم نمی توانند رفتار دقیق لایه های زیرسطحی را توضیح دهند، بنابراین تعیین رابطه بین داده های صحرایی و توزیع خواص فیزیکی زمین و به عبارت دیگر، مدل سازی این داده ها برای تفسیر رفتار لایه های زیرسطحی ضروری است. در مدل سازی عددی، روابط فیزیکی با استفاده از معادلات

مارن، ماسه سنگ، آهک و سنگ های ولکانوسدیمتری است (شکل ۲). همچنین، در این منطقه رگه های آپلیتی با رنگ سفید و رگه های سیلیسی با رنگ سفید و آغستگی اکسید آهن مشاهده می شوند که کانی های زایی اکسید آهن و سولفیدی دارند. به علاوه، این منطقه به عنوان یک منطقه کانی سازی طلا شناخته می شود که با ذخایر تیپ اپی ترمال کم سولفید مطابقت دارد، به این معنا که طلا به طور اصلی در محیط های دمایی کم سولفیدی شکل گرفته است. تلاش های انجام شده در این تحقیق، با بهره گیری از ابزارهای مختلف از جمله نرم افزارها، و منابع معتبر، برای ایجاد مدل های ژئوالکتریکی متنوع و مدل های زمین شناسی نهشته طلا در این منطقه متمرکز شده اند. این مدل ها بر اساس داده های حفاری ارزیابی شده و ارتباطات معناداری بین مدل های ژئوفیزیکی و اطلاعات به دست آمده از مطالعات اکتشافی دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی، این تلاش ها با هدف آرایه مدل های زمین شناسی دقیق تر و مفیدتر برای تهیه نقشه های طلا در منطقه مورد مطالعه انجام شد.



شکل ۲: نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده مورد مطالعه به همراه پروفیل های ژئوالکتریک و نقاط حفاری



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳: (الف) نمایی از محدوده مورد نظر حین برداشت داده‌های ژئوالکتریک، (ب) رخنمون دایک آپلیتی از نمای دور، (ج) رخنمون رگه سیلیسی، (د) نمایی از سطوح گسل‌های امتدادلغز با روند شرقی-غربی

اکتشافات معدنی، مطالعات مهندسی (به عنوان مثال، شناسایی فصل مشترک رسوب و سنگ‌بستر، مناطق خرد شده و گسل‌ها) استفاده می‌شود [۲۰].

روش‌های ژئوالکتریک بر اساس تفاوت‌های توزیع مقاومت ویژه الکتریکی مواد در زیر سطح زمین استوار هستند. این تفاوت‌ها به تغییرات در پدیده‌های الکتریکی منجر می‌شود که در سطح زمین قابل اندازه‌گیری است. استفاده از مدل‌سازی عددی به دلیل توانایی آن در شبیه‌سازی دقیق و تحلیل جامع داده‌ها، اجتناب‌ناپذیر است [۲۱].

ژئوفیزیک‌دانان از دیرباز به اهمیت وارون‌سازی داده‌ها پی برده‌اند، اما منابع محاسباتی محدود در گذشته تنها اجازه می‌داد که حتی بهترین الگوریتم‌های وارون‌سازی نیز تخمین‌هایی برای

دیفرانسیلی و انتگرالی بیان می‌شوند؛ به گونه‌ای که می‌توان با حل این معادلات، پارامترها و با توزیع خواص فیزیکی مدل را تعیین کرد [۱۸].

با پیشرفت فناوری کامپیوتری، از جمله پردازش داده و انتقال دیجیتال، روش‌های ژئوفیزیکی به سرعت در حال تکامل هستند، زیرا امکان تشخیص سریع و مداوم مناطق نسبتاً گسترده را بجای تشخیص مقاطع یا حفاری فراهم می‌کنند. این تکنولوژی‌ها موفق‌اند، زیرا به تشخیص نقاط محلی محدود نمی‌شوند [۱۹].

اندازه‌گیری مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، به عنوان یک روش ژئوفیزیکی نزدیک به سطح، اطلاعاتی در مورد میزان شارژپذیری مواد زیرسطحی ارائه می‌دهد و معمولاً در

خاص خود را دارند. این تنوع نشان از غنای زیست زمینه‌ای ایران در زمینه معادن طلا است و اهمیت این منطقه برای اکتشاف و استخراج معادن طلا را نشان می‌دهد [۱۶].

محدوده اکتشافی در مجاورت کمر بند ماگمایی ارومیه دختر و نزدیکی زون سنندج سیرجان قرار گرفته است. زون سنندج- سیرجان و کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر به عنوان دو منطقه مهم کانی‌زایی طلا در ایران شناخته می‌شوند که واقع در بخش‌های داخلی کوهزایی زاگرس و بخشی از کمر بند کوهزایی آلپ- هیمالیا قرار گرفته‌اند. انتظار می‌رود که ذخایر مختلف طلا در ارتباط با تکاملات نفوذتیس در هر مرحله وجود داشته باشد و با حضور یا عدم حضور انواع خاصی از توده‌ها شرایط تشکیل توده‌ها در آن زمان مشخص می‌شود. شناسایی فازهای معدنی و موقعیت زمین‌شناسی آن‌ها نقش اساسی در تعیین فازهای کانی‌زایی طلا در این مناطق ایفا می‌کند. از جمله کانسارهای استراتی‌بند حاوی طلا و ذخایر طلای کوهزایی و توده‌های طلا مرتبط با فعالیت ماگمایی در این مناطق شامل اپی‌ترمال، پورفیری Cu-Mo (Au) و پورفیری Cu-Au هستند [۲۲].

به دلیل سن و عمق کم و شرایط مختلف اقلیمی ذخایر اپی‌ترمال طلا در کمر بند ماگمایی ارومیه دختر این سازند به طور یکنواخت فرسایش نیافته است. بیش از ۸۰ درصد ذخایر طلای اپی‌ترمال موجود در این کمر بند دارای ذخایر کمتر از یک تن، حدود ۱۵ درصد دارای ذخایر بین ۱ تا ۱/۵ تن و حدود ۵ درصد از آنها بیش از ۱/۵ تن ذخایر را در بردارند. با توجه به سن کانی‌سازی، تمامی نهشته‌های اپی‌ترمال این کمر بند در زمان الیگوسن- میوسن تشکیل شده‌اند. سنگ‌های میزبان این نهشته‌ها غالباً قوس‌های نفوذی- آتشفشانی شامل بازالت‌های آندزیتی تا آندزیت، داسیت‌ها و ریولیت‌ها در قسمت‌های بالایی زون فرورانس هستند [۲۲].

محدوده اکتشافی این منطقه حدود ۲۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. با مطالعات زمین‌شناسی مشخص شد که در جنوب غربی محدوده معدنی، رگه‌های آپلیتی با رنگ سفید رخنمون دارند و امتداد آن‌ها شمال غربی- جنوب شرقی است که در شکل ۳-ب قابل مشاهده است. تحلیل تیغه‌های نازک واحدها نشان می‌دهد که این رگه‌ها، بافت گروئولار و پرتیتی با کانی‌های فلدسپات آلکالن پرتیتی و پلاژیوکلاز دارند که فضای بین آن‌ها به وسیله کوارتز و میکا از نوع مسکویت پر شده است [۲۳].

تعداد محدودی از پارامترها ارائه دهند. به همین دلیل، ساختار زیرسطحی اغلب به صورت چندلایه یا به شکل اشیاء منشوری ساده مدل سازی می‌شود و پارامترها به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که داده‌های مدل سازی شده تا حد امکان با مشاهدات مطابقت داشته باشند. از آنجا که ساختارهای زمین‌شناسی اغلب هندسه پیچیده‌ای دارند، این نوع ساده‌سازی‌ها در مدل سازی عددی وارون، به نتیجه‌گیری‌های نادرستی منجر می‌شود. در سال‌های بعد، با پیشرفت‌های چشمگیر در قدرت محاسباتی و ریاضیات وارون سازی، مدل‌های وارون سازی واقع‌بینانه‌تری ارائه شد که نشان‌دهنده اهمیت ژئوفیزیک در حل مسایل کاربردی بود [۱۲]. پس از برداشت داده‌ها و پردازش آن‌ها برای حذف نوفه‌ها، مدل سازی وارون دوبعدی داده‌ها با استفاده از نرم افزار Res2dinv انجام شد.

در این منطقه، به دلیل وجود رگه‌های طلا کم سولفید در دایک‌های سیلیسی، امکان ردیابی بی‌هنجاری‌ها با استفاده از مدل‌های وارون مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی وجود دارد. رفتار سولفیدها در برابر پارامترهای ژئوالکتریک معمولاً با مقاومت ویژه پایین و بارپذیری الکتریکی بالا مشخص می‌شود. همچنین، به دلیل وجود بخش‌هایی از رگه طلا در دایک‌های سیلیسی، مقاومت ویژه در این بخش‌ها ممکن است بالاتر باشد. حفاری ۱۱ حلقه چاه اکتشافی در بین پروفیل‌ها، امکان بررسی مدل سازی‌های ژئوفیزیکی با داده‌های عیاری و یافتن ارتباط معنادار بین آن‌ها را فراهم کرده است که محل قرارگیری این حفاری‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده است و همچنین در شکل‌های ۹-د و ۱۰-د، ستون زمین‌شناسی و در شکل‌های ۹-الف و ۱۰-الف، نمودار تغییرات عیار دوتا از حفاری‌ها (kl08 و kl06) نشان داده شده است. نمایش سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری در جهت یافتن بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و همچنین نمودارهای عیار طلا، مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، در نمایش ارتباط بین عیار و پارامترهای ژئوالکتریک موثر بوده است.

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

در ایران انواع مختلفی از تیپ‌های طلا وجود دارد. این انواع شامل توده‌های طلا اوروژنی، طلاهای اپی‌ترمال، نوع کارلین، سیستم‌های طلا مرتبط با نفوذ و توده‌های غنی از طلا در سولفیدهای حاوی آتشفشانی هستند. این تیپ‌ها در مناطق مختلف ایران پراکنده شده‌اند و هر کدام ویژگی‌ها و خصوصیات

و کانی‌سازی شده‌اند. در شکل ۳-د نمایی از گسل امتدادلغز با روند شرقی- غربی قابل مشاهده است [۲۳].

بر اساس بررسی‌های انجام شده، محدوده اکتشافی در شمال شهرستان آذربایجان شرقی، به عنوان یک منطقه کانی‌سازی طلا با سیستم کانی‌سازی رگه‌ای و سنگ میزبانی از نوع ریوداسیت و توف شناخته می‌شود. همچنین، باتوجه به دمای کانی‌سازی و مطالعات انکلوژن سیال، این کانی‌سازی با ذخایر تیپ اپی‌ترمال کم سولفید مطابقت دارد. علاوه بر طلا، عناصر دیگری نیز در این منطقه مورد توجه قرار گرفته‌اند که می‌توانند به ارزش اقتصادی و اکتشافی بیشتر منطقه کمک کنند [۲۳].

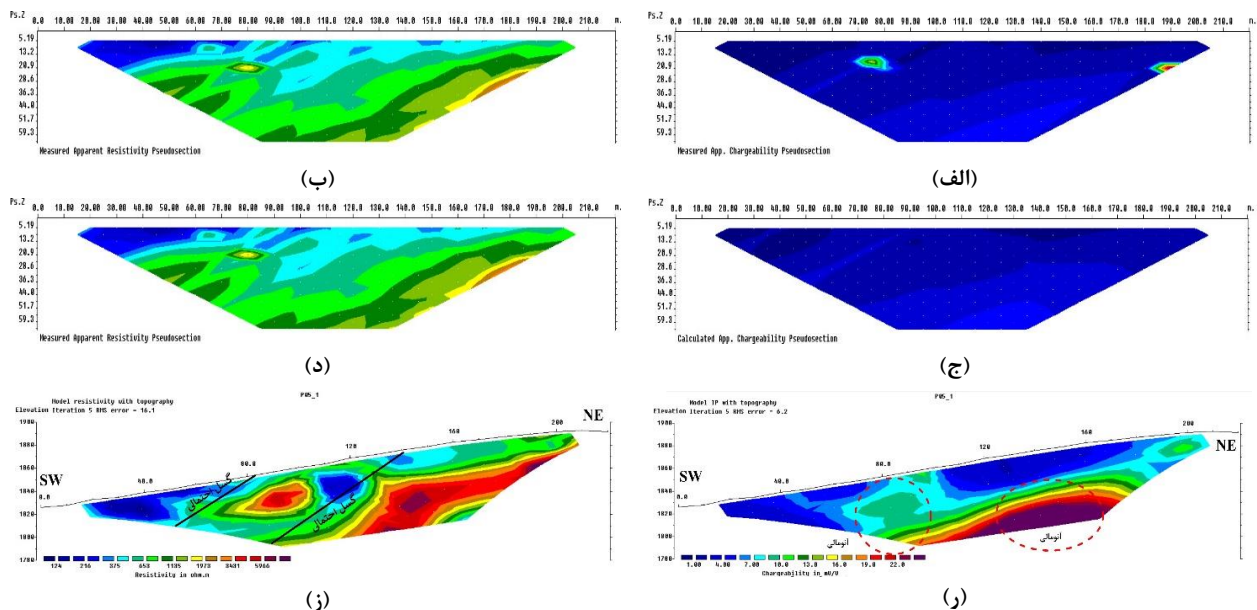
۴- مدل‌سازی وارون داده ژئوالکتریکی

مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی برای هر ۹ پروفیل انجام شد. در شکل‌های ۴ و ۵ مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی مشاهده‌ای، پیش‌بینی شده و وارون مقاطع P05 و P07 به عنوان نمونه، نشان داده شده است. تعداد نقاط اندازه‌گیری در هر مقطع ۲۱۵ نقطه است که جهت مدل‌سازی وارون مورد استفاده قرار گرفت. با بررسی نتایج این وارون‌سازی‌ها، ردیابی یک رگه سیلیسی با آغشتگی‌های سولفیدی که می‌تواند معرف

طبق نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناس ورزقان واحدهای رخنمون یافته در محدوده شامل مارن، ماسه‌سنگ، آهک، سنگ‌های ولکانو سدیمنتاری، توف، توف برشی کرتاسه، توده نفوذی کوارتز دیوریت و گرانیتی الیگوسن و بازالت کوارترنری وجود دارند [۲۴].

در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده مورد مطالعه، نشان داده شده است. این نقشه به مساحت ۳۵۰ هکتار شامل برونزد سنگ‌های موجود در محدوده معدنی از قدیم به جدید شامل واحدهای سنگی ولکانیکی (kv) کرتاسه، گدازه‌های آندزیتی کرتاسه (an)، توف ریولیت (kr) کرتاسه، توده نفوذی دیوریت (di)، سینیت (sy)، آلکالی گرانیت (agr) و واحدهای سنگی کوارترنری شامل گدازه‌های بازالتی (Qb)، رسوبات یخچالی (Q1) و تراست رودخانه‌ای (Qt1 و Qt2) و رسوبات سیلاب رودخانه‌ای (Qal) است.

سیالات کانه‌دار در محدوده معدنی احتمالاً به دلیل نفوذ توده‌های نیمه‌عمیق دیوریتی و داسیتی و در امتداد گسل‌های موجود در منطقه به سمت مجموعه‌های سنگ میزبان حرکت کرده‌اند. این سیالات باعث دگرسانی و تشکیل کانی‌های زایی سولفیدی شده‌اند. همچنین، گسل‌های راستگرد با امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و گاه شرقی- غربی در این محدوده به وفور دیده می‌شوند و زون‌های برشی در آن‌ها دچار دگرسانی



شکل ۴: پروفیل P05: الف) مدل مشاهده‌ای داده‌های شارژبیلته، ب) مدل مشاهده‌ای داده‌های مقاومت ویژه، ج) مدل پیش‌بینی شده داده‌های شارژبیلته، د) مدل پیش‌بینی شده داده‌های مقاومت ویژه، ر) مدل‌سازی وارون شارژبیلته، ز) مدل‌سازی وارون مقاومت ویژه

از مدل سازی وارون قابل مشاهده است، تفاوت کم و جزئی در این دو نمایش کیفیت مدل سازی وارون را نمایان می کند. با نمایش سه بعدی داده ها در شکل ۷ ارتباط معنادار بین بی هنجاری های ردیابی شده در هر مقطع که وجود آنومالی به صورت رگه ای را نشان می دهد، قابل مشاهده است. در شکل ۸ نمایش سه بعدی و بلوکی مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی با حد آستانه ۱۳ میلی ولت بر ولت و ۱۰۰۰ اهم متر انجام شده است. در شکل ۸-الف برخی از مقادیر بالای بارپذیری الکتریکی، می تواند به کانی زایی طلا مرتبط باشد و در شکل ۸-ب بخش های با مقاومت ویژه بالا با بسترهای میزبان کانی زایی با مقاومت ویژه بالا مرتبط است. همان طور که در نقشه زمین شناسی محدوده (شکل ۲) قابل مشاهده است، یک دایک سیلیسی عمود بر جهت برداشت پروفیل ها قابل مشاهده است که این مقادیر نشان داده شده با این اطلاعات تطابق نسبتاً خوبی دارد.

۵- ارزیابی نتایج و تفسیر زمین شناسی

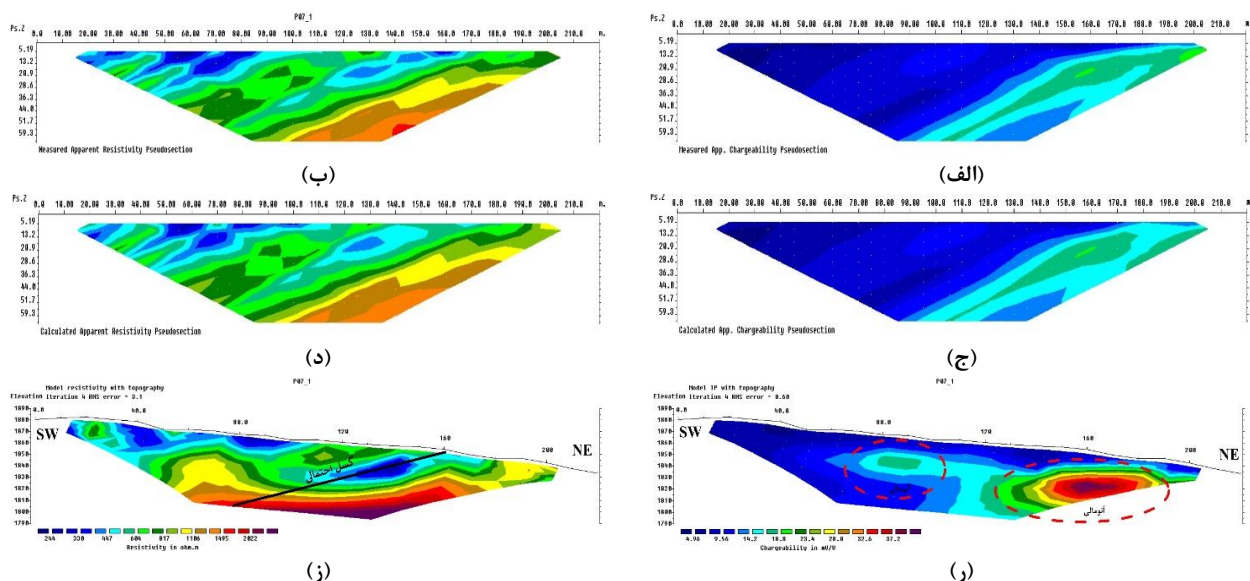
پس از پردازش و مدل سازی داده های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، تفسیر و بررسی کمی و کیفی داده ها، مقایسه و ارزیابی آن ها با استفاده از داده های حفاری موجود در محدوده و پیدا کردن ارتباط معنادار بین داده های از جنس ژئوالکتریک و داده های عیاری انجام می شود. به طور کلی

کانی زایی طلا باشد، محتمل است.

در شکل ۴ که مد سازی های دوبعدی مقطع P05 در آن قابل مشاهده است در عمق ۲۰ الی ۴۰ متری دو بی هنجاری در فواصل ۸۰ و ۱۴۰ متری از ابتدای مقطع با مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی بالا ردیابی شده است. رفتار این بی هنجاری مبین وجود رگه طلا کم سولفید درون واحد سیلیسی است. همین طور در شکل ۵ که مدل سازی های دوبعدی مقطع P07 قابل مشاهده است، در عمق های ۲۵ تا ۳۵ متری دو بی هنجاری در فواصل ۸۰ و ۱۶۰ متری از ابتدای مقطع قابل ردیابی است. این بی هنجاری ها با مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی بالاتر از حد زمینه قابل مشاهده است که باتوجه به رفتار کانی زایی طلا در رگه سیلیسی، این تطابق قابل بحث و بررسی است. از آنجایی که می دانیم گسل ها در محدوده کنترل کننده کانی زایی طلا هستند، بر روی مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی شکل های ۴-ز و ۵-ز، گسل های احتمالی ترسیم شده اند که با بی هنجاری های مشخص شده بر روی مقاطع بارپذیری الکتریکی شکل های ۴-ر و ۵-ر، تطابق نسبی خوبی دارند.

از بررسی همه مقاطع مدل سازی شده دوبعدی، می توان نتیجه گرفت که بی هنجاری به صورت مکرر در پروفیل های موازی تکرار شده اند.

در شکل ۶ که نمایش همزمان داده های ظاهری مشاهده ای و پیش بینی شده مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی حاصل

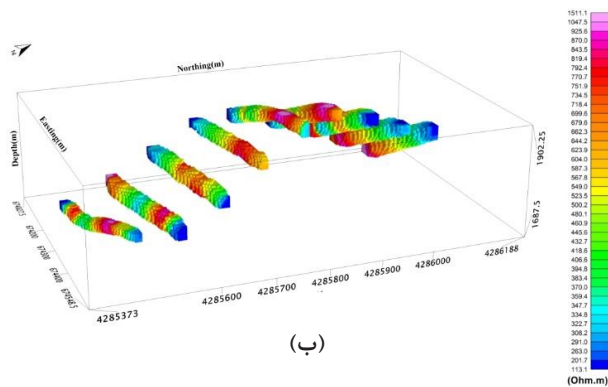


شکل ۵: پروفیل P07: الف) مدل مشاهده ای داده های شارژبیلته، ب) مدل مشاهده ای داده های مقاومت ویژه، ج) مدل پیش بینی شده داده های شارژبیلته، د) مدل پیش بینی شده داده های مقاومت ویژه، ز) مدل سازی وارون شارژبیلته، ر) مدل سازی وارون مقاومت ویژه

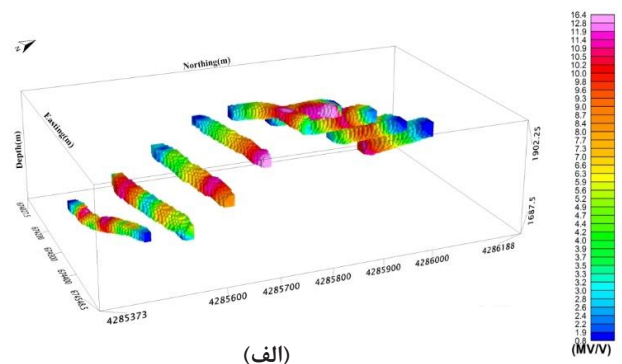
شد عمدتاً با مشخصه‌های بارپذیری الکتریکی بالا و مقاومت ویژه الکتریکی بالا شناسایی شدند، به همین دلیل می‌توان این آنومالی‌ها را در تطابق با دایک سیلیسی که در شکل ۲ نشان داده شده است، دانست. مدل‌سازی وارون دوبعدی مقاطع P05 و P07 که در آن مقاطع بارپذیری و مقاومت ویژه که نمایانگر مطالب گفته شده هستند در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.

اکتشاف طلا، به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی موضوعی دشوار است و تفسیر و نتیجه‌گیری درباره محدوده‌های معرف کانی‌زایی طلا نیازمند دقت و توجه بسیار زیادی است.

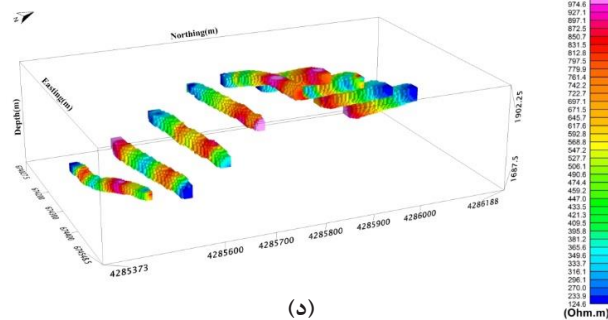
با بررسی هر ۹ پروفیل مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی در مقاطع ردیابی شدند که با توجه به تکرارپذیری آنها، احتمالاً به صورت رگه‌ای وجود دارد. این بی‌هنجاری‌ها همانگونه که بررسی



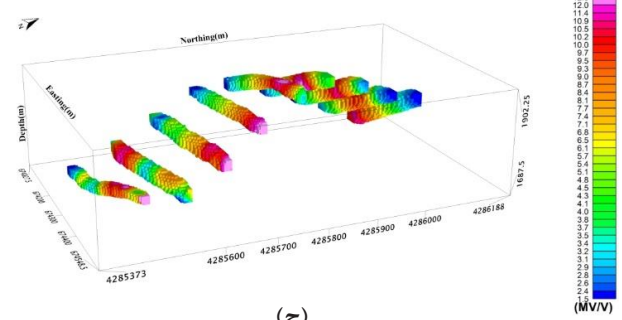
(ب)



(الف)

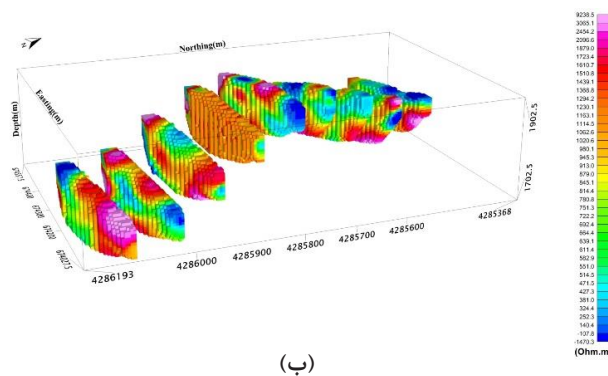


(د)

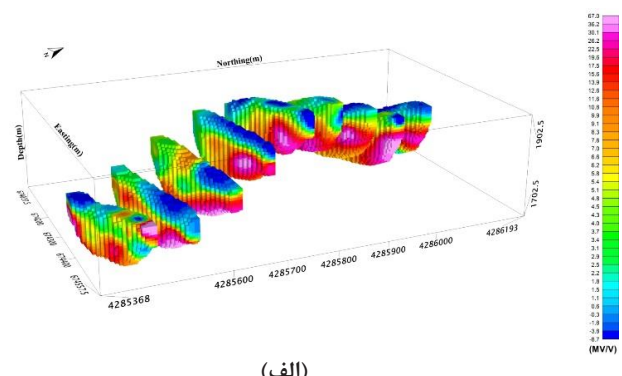


(ج)

شکل ۶: نمایش سه بعدی (الف) بارپذیری ظاهری مشاهده شده، (ب) مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری مشاهده شده، (ج) بارپذیری الکتریکی ظاهری پیش‌بینی شده و (د) مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری پیش‌بینی شده حاصل از وارون‌سازی دوبعدی در امتداد ۹ پروفیل طراحی شده

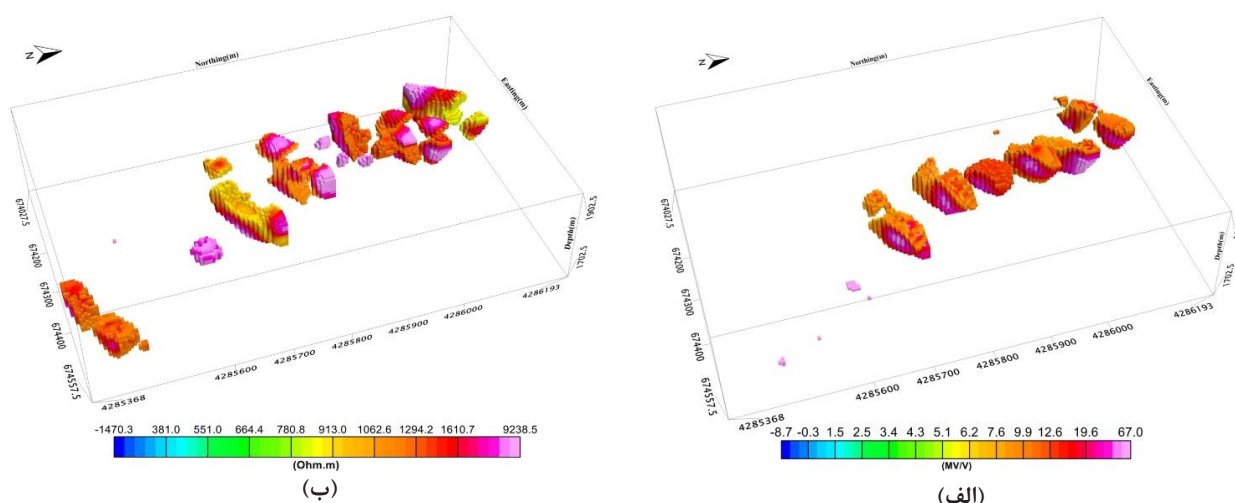


(ب)



(الف)

شکل ۷: نمایش سه بعدی مدل‌سازی وارون دوبعدی داده ژئوالکتریکی؛ (الف) بارپذیری الکتریکی، (ب) مقاومت ویژه الکتریکی (۹ پروفیل در این محدوده برداشت شده است).



شکل ۸: نمایش سه بعدی و بلوکی مدل (الف) بارپذیری الکتریکی، (ب) مقاومت ویژه الکتریکی برای حد آستانه 1000 (Ohm.m) و 13 (MV/V)

این بخش افزایش یافته که به نظر به دلیل وجود کانی‌های با خاصیت بارپذیری الکتریکی بالا ولی غیرمرتبط به کانی‌زایی طلا است.

در بخش پایانی مقاطع (عمق ۲۷ تا ۳۳)، وارد رگه سیلیسی شده‌ایم که همان‌طور که قابل ملاحظه است، این بخش عیار طلا قابل قبول، مقادیر مقاومت ویژه و مقادیر بارپذیری الکتریکی هر دو بالا است.

با بررسی شکل ۱۰، ۳۰ متر ابتدای مقاطع، مقاومت ویژه بالا و بارپذیری الکتریکی قابل توجهی دارد؛ همچنین مقادیر عیار طلا در حدود ۱ ppm است که البته این مقادیر در بخش‌های ناپیوستگی دارد (۱۵ تا ۲۰ متر). با افزایش عمق از ۳۰ متری تا حدود ۵۰ متری افت شدید مقدار مقاومت ویژه احتمالاً به دلیل ورود به زون سولفیدی محدوده و وجود مقادیر بالا بارپذیری الکتریکی و عیار طلا تاییدی بر این فرضیه است. همچنین در این بخش دو رگه سیلیسی با ضخامت حدود ۴ متر ردیابی شده است که بخش‌هایی از آن حاوی کانی‌زایی طلا است.

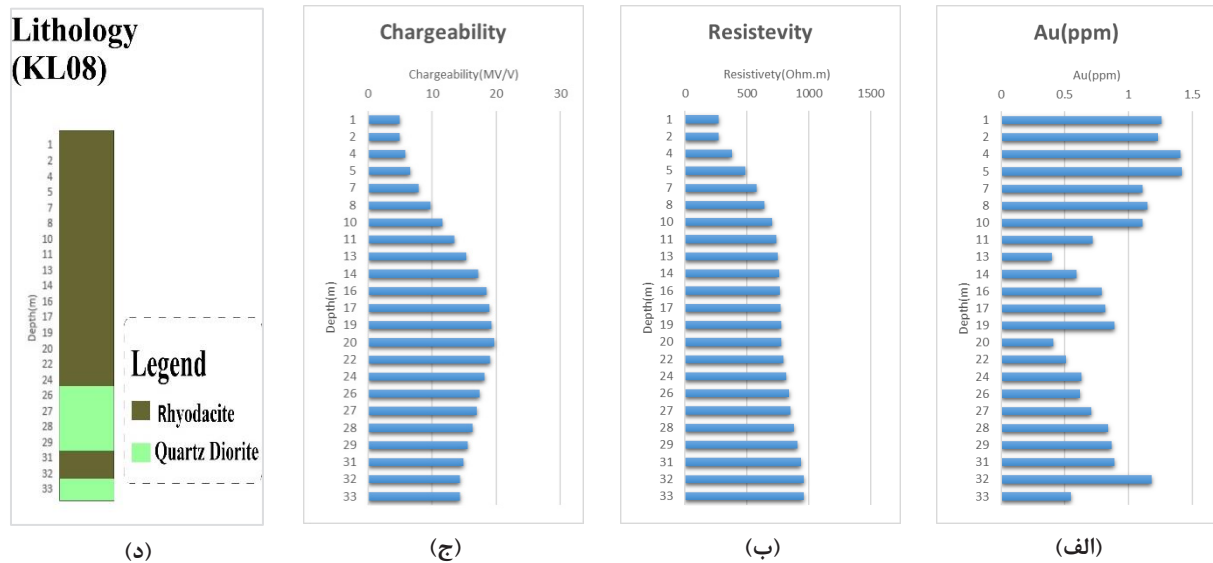
در انتهای این مقطع (۵۰ تا ۶۵)، مقادیر مقاومت ویژه اندکی بیشتر شده، همچنین مقادیر عیار طلا به ۰/۵ ppm رسیده است، اما مقادیر بارپذیری الکتریکی در این بخش بالاتر از حد زمینه است که به نظر با کانی‌زایی مرتبط نباشد.

با بررسی نتایج شکل‌های ۹ و ۱۰ دو نوع ارتباط مشهود است. (۱) بخش‌هایی از مقاطع که مقدار بارپذیری الکتریکی و مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از حد زمینه است، معرف وجود رگه سیلیسی است (عمق ۲۵ تا ۳۵). در این بخش‌ها عیار طلا

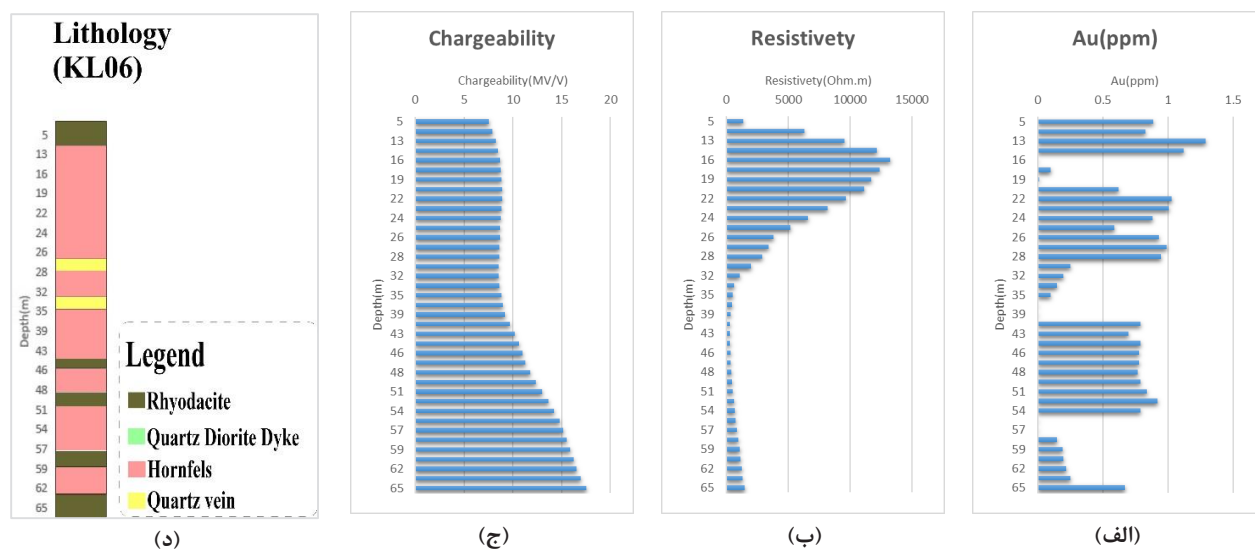
شکل ۷ نمایش سه بعدی مدل‌سازی‌های وارون هر ۹ پروفیل با ایجاد حد آستانه ۱۳ (MV/V) برای مدل بارپذیری و ۱۰۰۰ (Ohm.m) برای مدل مقاومت ویژه است که می‌تواند ارتباط معنادار بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی در بین مقاطع را به خوبی نشان دهد. با توجه به آنچه گفته شد، با تلفیق نتایج زمین‌شناسی و ژئوالکتریک بی‌هنجاری‌های ردیابی شده معرف وجود رگه سیلیسی آغشته به طلا است.

در نزدیکی این مقطع یاد شده (P05 و P07)، حفاری‌های kl06 و kl08 انجام شده است که با مقایسه داده‌های خروجی از داده‌های ژئوالکتریک و داده‌های حفاری می‌توان اطلاعات بیشتری را استخراج کرد. همچنین ستون لیتولوژی داده‌های حفاری ترسیم شد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ این بررسی‌ها قابل نمایش هستند. لازم به ذکر است هر ۱۱ حفاری انجام شده در محدوده مورد بررسی قرار گرفت و دو حفاری kl06 و kl08 به عنوان نمونه نشان داده شدند (شکل‌های ۱۰ و ۹).

با بررسی شکل ۹، به نظر در بخش‌های سطحی (تا عمق ۱۱ متری) مقدار مقاومت ویژه الکتریکی بسیار پایین است و با توجه به اینکه مقادیر عیار طلا بالاتر از ۱ ppm است، ممکن است به بخش کانی‌زایی از نوع سولفیدی مرتبط باشد، البته مقادیر بارپذیری الکتریکی در این بخش قابل توجه نیست و نزدیک به مقدار زمینه است، اما این موضوع ممکن است به دلیل عدم وجود پیریت و کانی‌های با رفتار مشابه، در این بخش باشد. در ادامه با افزایش عمق (۱۱ تا ۲۷) مقادیر مقاومت ویژه افزایش یافته و مقادیر عیار طلا با نرخ نزولی تا نزدیک ۰/۵ ppm می‌رسد و مقادیر بارپذیری الکتریکی در



شکل ۹: الف) تغییرات عیار طلا، ب) مقاومت ویژه الکتریکی، ج) بارپذیری الکتریکی و د) در محل گمانه KL08 به همراه ستون زمین‌شناسی آن



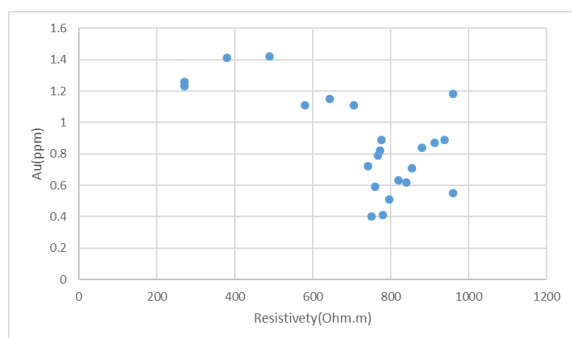
شکل ۱۰: الف) تغییرات عیار طلا، ب) مقاومت ویژه الکتریکی، ج) بارپذیری الکتریکی و د) در محل گمانه KL06 به همراه ستون زمین‌شناسی آن

است. عیار طلا در این مناطق عمدتاً بیش از ۱ ppm است. این بخش‌ها معرف وجود کانی‌زایی طلا در سولفیدها است. هورنفلس‌هایی که در مناطق اپی‌ترمال وجود دارند، معمولاً دارای اندکی سولفید و مستعد وجود کانی‌زایی طلا هستند [۲۵].

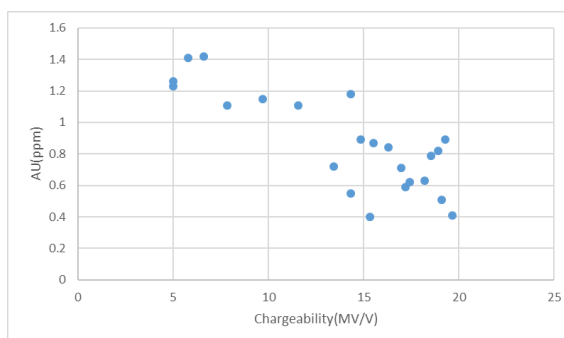
در برخی مناطق معدنی، ممکن است وجود طلا همراه با سولفیدها، به کاهش و یا افزایش مقاومت الکتریکی منجر شود.

در حدود ۱ ppm است که عمدتاً معرف کانی‌زایی طلا در رگه سیلیسی است.

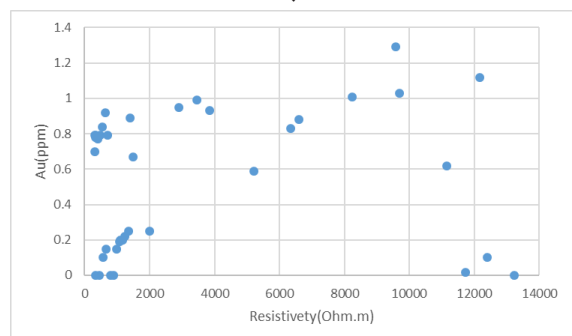
بخش‌هایی از عمق که با افزایش عیار و بارپذیری الکتریکی و کاهش مقاومت ویژه الکتریکی همراه است. این بخش‌ها با توجه به ستون‌های لیتولوژی نشان داده شده عمدتاً مربوط به ریوداسیت و هورنفلس است. با توجه به کاهش شدید مقاومت ویژه در این مناطق مقدار سولفید بالاتر از بقیه مناطق



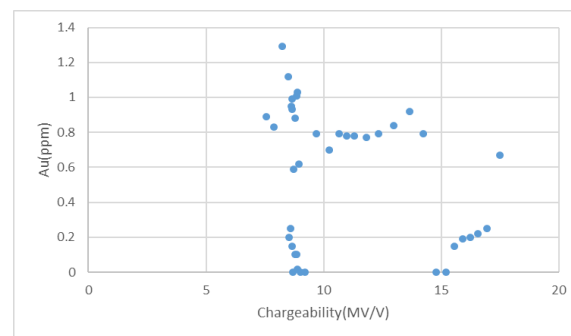
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱: نمودار پراکندگی تغییرات عیار طلا نسبت به (الف) بارپذیری الکتریکی، (ب) مقاومت ویژه الکتریکی (داده‌ها در محل گمانه k108 فرض شده است.) و نمودار پراکندگی عیار طلا نسبت به (ج) بارپذیری الکتریکی، (د) مقاومت ویژه الکتریکی (داده‌ها در محل گمانه k106 فرض شده است).

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی برای ۹ پروفیل انجام شده و نتایج حاکی از ردیابی رگه‌های سیلیسی با آغستگی‌های سولفیدی است که می‌تواند نشانگر کانی‌زایی طلا باشد. بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در مدل‌سازی‌های وارون دوبعدی نشان‌دهنده وجود رگه‌های طلا کم سولفید در سیلیس است. تکرار بی‌هنجاری‌ها در پروفیل‌های موازی و تطابق خوب آن‌ها با ویژگی‌های کانی‌زایی طلا از جمله نتایج مهم این مطالعه است. مقایسه داده‌های ژئوالکتریک با داده‌های حفاری نشان داد که در محدوده دو نوع ارتباط (کانی‌زایی طلا در بستر رگه سیلیسی که با افزایش مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی همراه است و کانی‌زایی طلا در زون سولفیدی که با کاهش مقاومت ویژه و افزایش بارپذیری الکتریکی همراه است) قابل ردیابی است. این نتایج می‌تواند در تفسیر و شناسایی مناطق مستعد کانی‌زایی طلا مفید باشد.

تطابق نمایش سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری

این امر عمدتاً به میزان محتوای سولفید، ترکیب کانی‌شناسی سنگ معدنی و تخلخل متوسط سنگ معدنی (درجه برشی) بستگی دارد [۲۶].

در نهایت برای رهیافت ارتباطی موثر بین عیار طلا، مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی، نمودارهای عیار طلا- مقاومت ویژه الکتریکی و عیار طلا- بارپذیری الکتریکی برای حفاری‌های k108 و k106 ترسیم شد (شکل ۱۱).

با بررسی شکل ۱۱، نمودارهای مقاومت ویژه- طلا نشان‌دهنده وجود تراکم نقاط با عیار بالا در مناطق با مقاومت ویژه پایین (کانی‌زایی طلا در بخش سولفیدی) و همچنین پراکندگی نقاطی با عیار بالا در مناطق با مقاومت ویژه بالا (کانی‌زایی طلا در رگه سیلیس) است. همچنین نمودارهای بارپذیری الکتریکی- عیار طلا نشان‌دهنده عدم تمرکز نقاط با عیار مشخص نسبت به مقادیر بارپذیری الکتریکی است. به نظر می‌رسد به دلیل وجود زون سولفیدی در محدوده تفسیر مقادیر بارپذیری به تنهایی راه‌گشا نبوده و بهتر است این پارمتر در کنار مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شود.

- data". Brazilian Journal of Geophysics, 33(2): 305. DOI: <https://doi.org/10.22564/rbfg.v33i2.722>.
- [6] Olomo, K. O., Olayanju, G. M., Bayode, S., Alagbe, O. A., and Olaleye, O. K. (2024). "Electrical and electromagnetic geophysical signature associated with geological frame of polyminerale deposit within hydrothermal alteration zones". Journal of Applied Geophysics, 222: 105315.
- [7] Mostafaie, K., and Ramazi, H. (2015). "Application of electrical resistivity method in sodium sulfate deposits exploration, case study: Garmab, Iran". Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 6(2): 2220-6663.
- [۸] ابراهیم، ح.، حاجی زاده، ف.؛ ۱۴۰۰؛ "اکتشاف طلا به روش مغناطیس سنجی، قطبش القایی (Ip) و مقاومت ویژه در محدوده کرداحمد، غرب اهر". دهمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ۹ صفحه.
- [9] Talebi, M. A., Hosseini, S. H., Abedi, M., and Moradzadeh, A. (2023). "3D inverse modeling of electrical resistivity and chargeability data through unstructured meshing, a case study for travertine exploration". Journal of Mining and Geo-Engineering, 57(2): 131-140.
- [10] 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, 299: 106604.
- [11] Chisambi, J., and Chisambi, J. (2023). "Structural interpretation of the Mangochi-Makanjira area (Southern Malawi) from an aeromagnetic analysis: Implications for gold exploration". Journal of Mining and Geo-Engineering, 57(3): 275-281.
- [12] Oldenburg, D. W., and Li, Y. (2005). "Inversion for Applied Geophysics: A Tutorial". In: Butler, D. K. (Ed.), Near-Surface Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, 89-150. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.9781560801719.ch5>.
- [13] Sono, P., Nthaba, B., Shemang, E. M., Kgosidintsi, B., and Seane, T. (2021). "An integrated use of induced polarization and electrical resistivity imaging methods to delineate zones of potential gold mineralization in the Phitshane Molopo area, Southeast Botswana". Journal of African Earth Sciences, 174: 104060.
- [۱۴] راکعی، م. ب.، حاجی زاده، ف.، نظری، ح.؛ ۱۴۰۰؛ "مطالعات زمین شناسی و ژئوفیزیکی به منظور اکتشاف طلا و نقره در منطقه باریکای سردشت". کنفرانس مهندسی معدن ایران، دوره دهم.
- [15] Paterson, N. R., and Hallof, P. G. (1991). "Geophysical الکتریکی با دایک سیلیسی که از اطلاعات زمین شناسی و لیتولوژی حفاری ها به دست آمد از مهم ترین نتایج این پژوهش است. از نکات حائز اهمیت در این پژوهش، اهمیت تفسیر نتایج مقاومت ویژه و بارپذیری الکتریکی در راهگشا بودن این روش برای اکتشاف کانی زایی طلا و همچنین استفاده موثر اطلاعات حفاری به جهت کاهش عدم قطعیت نتایج است.
- با توجه به مطالب گفته شده، بخش هایی در محدوده وجود دارد که از ارتباطات یاد شده پیروی نمی کنند، اما به صورت کلی در بیشتر نقاط صادق است. از عوامل موثر در ایجاد این مسایل، پیچیدگی های زمین شناسی به ویژه درباره کانی زایی طلا، میزان عدم قطعیت داده های ژئوالکتریک، خطای برداشت داده ها، وجود نویز در داده ها و موارد این چنینی است. طبیعتاً با تکمیل شدن لایه های اکتشافی در این محدوده و تلفیق آن ها ابهامات زیادی رفع خواهد شد.
- ## ۷- سپاس گذاری
- نویسندگان از شرکت کیهان زمین فیزیک برای حمایت و در اختیار قراردادن اطلاعات مورد نیاز و همچنین از داوران و سردبیر نشریه مهندسی منابع معدنی برای کمک در بهبود کیفیت این مقاله قدردانی می نمایند.
- ## ۸- مراجع
- [۱] دشت بان خور، ب.، حفیظی، م.، جعفری، ف.؛ ۱۳۹۴؛ "اکتشاف طلا در رگه های سیلیس در شهرستان بجستان به روش Ip/Rs". دومین کنگره سراسری فناوری های نوین ایران با هدف دستیابی به توسعه پایدار، ۷ صفحه.
- [2] Bahroudi, A., Ferdowsi, H., Moradzadeh, A., and Abedi, M. (2023). "TOPSIS vs MIO: Applications to gold prospectivity mapping; a case study of the Basiran-Mokhtaran Area- Eastern Iran". International Journal of Mining and Geo-Environmental Engineering, 58(1): 69-87.
- [3] Witherly, K. (2020). "Exploration geophysics: Past performance and future opportunities". Preview, 2020(207): 11-14. DOI: <https://doi.org/10.1080/14432471.2020.1800389>.
- [4] Dentith, M., and Mudge, S. T. (2014). "Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist". Cambridge University Press, pp. 516.
- [5] Agnoletto, E., and Leite, E. P. (2015). "Identification of exploration gold targets in the Alta Floresta Gold Province, Mato Grosso state, Brazil, based on an integrated interpretation of magnetic and geoelectrical

وارون یک بعدی داده های ژئوالکتریک با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی". فصلنامه تخصصی زمین و منابع، دوره اول، شماره سوم، ص ۸۳-۹۵.

[22] Heidari, S. M., Moosavi Makooi, S. A., Mirzakhani, M., Rasoli, F., Ghaderi, M., and Abadi, A. R. (2016). "A review of tectono-magmatic evolution and gold metallogeny in the inner parts of Zagros orogeny: a tectonic model for the major gold deposits, western Iran". Eurasian Mining, 1: 3-20. DOI: <https://doi.org/10.17580/em.2016.01.01>.

[۲۳] گزارش؛ ۱۴۰۲؛ "گزارش پایانی اکتشاف محدوده طلا آذربایجان شرقی در شمال شهرستان اهر". ۴۷۶ صفحه.

[۲۴] مهرپرتو، م.، خان نظر، ن.؛ ۱۳۷۸؛ "گزارش زمین شناسی نقشه ی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان و کلیبر". سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره برگه ۵۴۶۷.

[25] Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Robert, F., and Hart, C. J. R. (2003). "Gold Deposits in Metamorphic Belts: Overview of Current Understanding, Outstanding Problems, Future Research, and Exploration Significance". Economic Geology, 98(1): 1-29. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.1.1>.

[26] Seimetz, E. X., Jerônimo da Costa, A. S., Borges, W., and Ianniruberto, M. (2023). "Geoelectric Signature of Gold Mineralization in the Alta Floresta Gold Province, Mato Grosso State, Brazil". Minerals, 13(2): 203. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13020203>.

exploration for gold". In: Gold Metallogeny and Exploration (Eds.), Home, Chapter, 360-398.

[16] Aliyari, F., Rastad, E., and Mohajjel, M. (2012). "Gold Deposits in the Sanandaj-Sirjan Zone: Orogenic Gold Deposits or Intrusion-Related Gold Systems?". Resource Geology, 62(3): 296-315. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00196.x>.

[17] Najafi Ghoshebolagh, S., Kamkar-Rouhani, A., Arab Amiri, A., and Bizhani, H. (2021). "An Exploration Model for A Gold Deposit in Kervian Area, Kurdistan Province, Iran, using a Combination of Geophysical Results with Geological Information and Other Exploratory Data". Journal of Mining and Environment, 12(2): 413-424. DOI: <https://doi.org/10.22044/jme.2021.10403.1989>.

[۱۸] فراهانی، ن.، میرزایی، م.، جوادی پور، ش.، مرادی، ع.؛ ۱۳۹۷؛ "اکتشاف رگه های باریتی طلا دار با روش های Ip/Rs". کنفرانس ژئوفیزیک ایران، دوره هجدهم.

[19] Damavandi, K., Abedi, M., Norouzi, G.-H., and Mojarab, M. (2022). "Geoelectrical modelling of a landslide surface through an unstructured mesh". Journal of Earth Science, 63(2): 337-356.

[20] Pourhashemi, S. S., Ghanati, R., and Aliheidari, A. (2024). "Time-Domain Induced Polarization Tomography Inversion. International". Journal of Mining and Geo-Engineering, 58(2): 153-160.

[۲۱] کریمی، الف.، مرادزاده، ع.، کامکارروحانی، الف.؛ ۱۳۸۸؛ "مدل سازی