

*Research Article***3-D geophysical modeling using 2-D acquisition data and geostatistics for Yazd, Ali-Abad copper deposit to propose optimal drilling location****Reza Ahmadi*¹ , Javad Ehsannejad¹**

1-Department of Mining Engineering, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Received: 14 Aug 2023 Accepted: 07 Feb 2024

Extended Abstract**Introduction**

Geophysical modeling is divided into one-dimensional (1D), two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) types in terms of dimensions. In some cases, especially in areas with inherent complications, performing 1D or even 2D modeling is not enough to achieve exploration goals, whereas 3D modeling is needed. One of the advantages of 3D modeling compared to the other two types is the more realistic responses and higher accuracy of the results. However, 3D modeling requires 3D data collection, while in many cases, geophysical surveys are done in 2D along a series of profiles, therefore, the related modeling will also be 2D. In such cases, in order to achieve a more realistic 3D model, it should be resort to a series of logical mathematical-computational tricks while based on physical principles. Magnetometric and geoelectrical methods, including resistivity and induced polarization, are the most suitable geophysical methods for discovery of copper deposits. In the present research, the processing, comparison and analysis of geophysical data of magnetometry, resistivity and induced polarization have been carried out along the profiles surveyed in the Yazd, Aliabad copper deposit and their relationship with mineralization has been determined. Then, 3D modeling of 2D geophysical data containing resistivity and induced polarization surveyed at the deposit has been done through geostatistical processes and employing RockWorks16 software. Aliabad copper deposit is located in the Taft city in Yazd province in the middle part of Urmia-Dokhtar zone between eastern longitude of 768000 to 771000 and northern latitude of 3503000 to 3507000. According to the report of copper deposits in Iran, the lithological diversity in this region is very high and the ancient rocks of the region are the Shirkoh mountain range with granite and granodiorite rocks. The oldest rock outcrops in the Ali-Abad area are conglomerate and sandstone (Sangestan Formation) from the late Jurassic and early Cretaceous. Copper mineralization in Ali-Abad deposit mainly occurred into granitoid intrusive stock and with less extent in conglomerates and metamorphosed sandstones around it.

Citation: Ahmadi, R. and Ehsannejad, J., 2024. 3-D geophysical modeling using 2-D acquisition data and geostatistics for Yazd, *Res. Earth. Sci.* 15(2), (77-95) DOI: 10.48308/esrj.2023.103818

* Corresponding author E-mail address: R_ahmadi@Arakut.ac.ir





Materials and Methods

In Aliabad copper deposit, 1666 magnetic data-points with 20-meter interspacing as well as resistivity and induced polarization have been surveyed through rectangular configuration along four profiles called DD-1 (with dipole-dipole array), PD-2, PD-3 and PD-4 by pole-dipole array with the length of 1320, 1240, 600 and 640 meter, respectively. In this study, first, 2-D smooth inverse modeling of resistivity and chargeability data for four profiles was carried out by the least squares error method using Res2dinv software. Afterward, the operations of processing, comparison and analysis of magnetic, resistivity and chargeability data from the geophysical profiles was performed and their relationship with mineralization was determined. To achieve the goal, magnetic surveyed corresponding to four inverted resistivity and induced polarization sections from geoelectrical profiles, were drawn and analyzed.

Results and Discussion

The results of the research show that in general, there is a good accordance between magnetic and geoelectrical data whereas the anomalies in the area are often related to metallic mineralization. Afterward, the primary statistical analysis was performed for the inverted data in the common range of four geophysical profiles and rectangular array. Based on these studies, the distribution of induced polarization and resistivity data are normal and log-normal, respectively which was transformed into a normal distribution with a two-parametric logarithmic transformation. Then, to achieve the spatial structure governing on resistivity and chargeability data of the region, strike variograms were drawn in two horizontal directions of north-south and east-west as well as vertical (depth) direction. The results revealed that all theoretical variogram models according to experimental variograms are spherical type and the region has geometric anisotropy. In the next step, based on the results of variography operation, 3-D models of resistivity and chargeability data were produced using Rockworks software through interpolation algorithm of advanced inverse distance weighted. At the end, on the basis of 3-D performed modeling the position of the most promising and appropriate mineralization area was determined as well as proposing a vertical borehole with the length of 80 m in this location.

Conclusion

On the basis of the findings, drilling a borehole in the proposed location, carefully drawing of the borehole strip-log, comparing the results of drilling cores assay, lithology and alteration with the results of 3D geophysical modeling in this place are necessary. Drilling of the proposed borehole will lead to more recognition of the deposit, possibility of evaluating the effectiveness of the carried out geophysical operation and 3D modeling in the Aliabad copper deposit.

Keywords: Yazd Ali-Abad copper deposit, Smooth inverse modeling, Magnetometry, RockWorks, Variography.



مدلسازی ژئوفیزیکی سه بعدی با استفاده از داده‌های برداشت دوبعدی و زمین آمار در کانسار مس علی آباد یزد به منظور پیشنهاد موقعیت بهینه حفاری

رضا احمدی*^۱ , جواد احسان نژاد^۱

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۳ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸

چکیده گسترده

مقدمه

مدلسازی‌های ژئوفیزیکی از نظر ابعادی به انواع یک بعدی (1D)، دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) تقسیم می‌شوند. در برخی موارد بویژه مناطق دارای پیچیدگی‌های ذاتی، انجام مدلسازی‌های یک‌بعدی و یا حتی دوبعدی برای نیل به مقاصد اکتشافی کافی نبوده و نیاز به انجام مدلسازی سه‌بعدی به خوبی احساس می‌شود. از مزایای مدلسازی سه‌بعدی نسبت به دو نوع دیگر، واقع‌گرایانه‌تر بودن پاسخ‌ها و دقت بالاتر نتایج می‌باشد. به هر جهت مدلسازی سه بعدی نیاز به برداشت داده‌های سه بعدی دارد حال آنکه در بسیاری از موارد، برداشت‌های ژئوفیزیکی در راستای یک سری پروفیل‌ها، به صورت دوبعدی صورت می‌گیرد و مدلسازی‌های مربوطه نیز دوبعدی خواهد بود. در چنین مواردی برای دست یابی به مدل سه بعدی واقع‌گرایانه تر باید به یک سری ترفندهای ریاضیاتی- محاسباتی منطقی و در عین حال مبتنی بر اصول فیزیکی متوسل شد. روش‌های مغناطیس سنجی و ژئوالکتریک شامل مقاومت ویژه و قطبش القایی، مناسب‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی برای اکتشاف کانسارهای مس هستند. در پژوهش حاضر عملیات پردازش، مقایسه و تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی در راستای پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در کانسار مس علی آباد یزد صورت گرفته و ارتباط آنها با کانی‌زایی تعیین شده است. سپس مدلسازی سه بعدی داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و قطبش القایی دوبعدی برداشت شده در کانسار به کمک پردازش‌های زمین آماری و با استفاده از نرم افزار RockWorks16 صورت گرفته است. کانسار مس علی آباد در شهر تفت در استان یزد در بخش میانی زون ارومیه- دختر بین طول جغرافیایی ۷۶۸۰۰۰ تا ۷۷۱۰۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵۰۳۰۰۰ تا ۳۵۰۷۰۰۰ شمالی قرار دارد. براساس گزارش کانسارهای مس در ایران، تنوع لیتولوژیکی در این منطقه بسیار زیاد بوده و سنگ‌های قدیمی منطقه، سلسله جبال شیرکوه با سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی هستند. قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی در منطقه علی آباد از نوع کنگلومرا و ماسه سنگ (سازند سنگستان) مربوط به اواخر ژوراسیک و اوایل کرتاسه می‌باشند. سازند سنگستان از سازندهای اصلی منطقه به شمار می‌رود و مرز زیرین این سازند به‌طور دگرشیب بر روی گرانیت‌های شیرکوه قرار گرفته است. کانی‌سازی مس در کانسار علی آباد به‌طور عمده درون استوک نفوذی گرانیتوئیدی و به مقدار کمتر درون کنگلومراها و ماسه سنگ‌های دگرگون شده اطراف آن رخ داده است.

استناد: احمدی، ر. و احسان نژاد، ج.، ۱۴۰۳. مدلسازی ژئوفیزیکی سه بعدی با استفاده از داده‌های برداشت دوبعدی و زمین آمار در کانسار مس علی آباد یزد، پژوهشهای دانش زمین: ۱۵(۲)، (۷۷-۹۵)، DOI: 10.48308/esrj.2023.103818

E-mail: R_ahmadi@Arakut.ac.ir

* نویسنده مسئول:



مواد و روش‌ها

در کانسار مس علی آباد تعداد ۱۶۶۶ ایستگاه مغناطیسی با فواصل ۲۰ متر از یکدیگر، مقاومت ویژه ظاهری و قطبش القایی توسط آرایه مستطیلی و چهار شبه‌مقطع بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری به نام‌های DD-1 (با آرایه دوقطبی - دوقطبی)، PD-2، PD-3 و PD-4 با آرایه قطبی - دوقطبی با طول‌های به ترتیب ۱۳۲۰، ۱۲۴۰، ۶۰۰ و ۶۴۰ متر برداشت شده است. در این پژوهش ابتدا مدلسازی وارون هموار دوبعدی داده‌های بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری چهار پروفیل به روش کمترین مربعات خطا با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV صورت گرفت. بعد عملیات پردازش، مقایسه و تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی در راستای پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در کانسار، صورت گرفت و ارتباط آنها با کانی‌زایی تعیین شد. برای این منظور پروفیل‌های برداشت مغناطیسی منطبق بر مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری وارون سازی شده چهار پروفیل ژئوالکتریک، ترسیم شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در مجموع تطابق و انطباق خوبی بین داده‌های مغناطیس‌سنجی و ژئوالکتریک وجود دارد و این امر نشان دهنده آن است که بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه اغلب در ارتباط با کانی‌سازی‌های فلزی هستند. سپس تجزیه و تحلیل آماری اولیه برای داده‌های وارون‌سازی شده در محدوده مشترک چهار پروفیل ژئوفیزیکی و آرایه مستطیلی انجام شد. براساس این مطالعات توزیع داده‌های بارپذیری از نوع نرمال و برای داده‌های مقاومت ویژه از نوع لاگ نرمال است که با یک تبدیل لگاریتمی دوپارامتری به توزیع نرمال تبدیل شد. در ادامه برای تشخیص ساختار فضایی حاکم بر داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری در منطقه، واریوگرام‌های امتدادی در دو راستای افقی شمالی - جنوبی و شرقی - غربی و نیز راستای قائم (عمقی) ترسیم گردید. نتایج نشان داد که تمامی مدل‌های تئوری واریوگرام منطبق بر واریوگرام‌های تجربی، از نوع کروی بوده و منطقه دارای ناهمسانگردی از نوع هندسی است. در مرحله بعد براساس نتایج عملیات واریوگرافی، مدل سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری با استفاده از نرم‌افزار RockWorks و به کمک الگوریتم درونیایی عکس فاصله وزن دار پیشرفته انجام شد. در نهایت براساس مدلسازی سه بعدی صورت گرفته، موقعیت امیدبخش‌ترین و مناسب‌ترین محدوده کانی‌سازی مشخص گردید و حفر یک گمانه اکتشافی قائم با طول ۸۰ متر در این موقعیت پیشنهاد شد.

نتیجه‌گیری

براساس یافته‌ها، حفاری گمانه در موقعیت پیشنهادی، ترسیم دقیق چاه نگار گمانه، مقایسه نتایج عیارسنجی مغزه‌های حفاری، سنگ‌شناسی و دگرسانی با نتایج مدل‌سازی ژئوفیزیکی سه‌بعدی در این محل، ضروری است. حفر گمانه اکتشافی پیشنهادی منجر به شناخت بیشتر کانسار، امکان ارزیابی کارایی عملیات ژئوفیزیکی برداشت شده و مدلسازی سه بعدی انجام گرفته در کانسار مس علی آباد خواهد شد.

واژگان کلیدی: کانسار مس علی آباد یزد، مدلسازی وارون هموار، مغناطیس‌سنجی، نرم افزار RockeWorks، واریوگرافی.

مقدمه

حفاری، معمولاً از روش‌های غیرمستقیم ژئوفیزیکی استفاده می‌شود. در واقع براساس نتایج عملیات ژئوفیزیکی، موقعیت بهینه برای عملیات حفاری گمانه اکتشافی پیشنهاد می‌شود (Ahmadi and Rezapour, 2019). به‌طور

به‌منظور تعیین محدوده‌های امیدبخش در مورد اکتشاف کانسارهای فلزی، برای صرفه جویی در زمان و هزینه قبل از انجام روش‌های اکتشاف مستقیم (همانند عملیات

نیز دوبعدی خواهد بود. البته یکی از مزایای مدلسازی دوبعدی، امکان انجام فرایند مدلسازی بلافاصله بعد از برداشت دوبعدی داده‌های مربوط به هر یک از پروفیل‌هاست (Mohammadi et al, 2016). در اینگونه موارد براساس نتایج مدلسازی دوبعدی یک سری گمانه‌های اکتشافی بر روی پروفیل‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد می‌شود که به دلیل تاثیر عوامل مختلف در ایجاد بی‌هنجاری، در اغلب موارد گمانه‌های حفاری شده فاقد ماده معدنی هستند. در چنین مواردی برای دست‌یابی به مدل سه بعدی واقع‌گرایانه‌تر باید به یک سری ترفندهای ریاضیاتی-محاسباتی منطقی و در عین حال مبتنی بر اصول فیزیکی متوسل شد. روش‌های مغناطیس‌سنجی و ژئوالکتریک شامل مقاومت ویژه و قطبش القایی، مناسب‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی برای اکتشاف کانسارهای مس هستند (Ahmadi and Baharlooei, 2021; Ahmadi and Rezapour, 2019). در پژوهش حاضر عملیات پردازش، مقایسه و تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی در راستای پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در کانسار مس علی‌آباد یزد صورت گرفته و ارتباط آنها با کانی‌زایی تعیین شده است. سپس مدلسازی سه بعدی داده‌های ژئوفیزیکی مقاومت ویژه و قطبش القایی دوبعدی برداشت شده در کانسار به کمک پردازش‌های زمین‌آماری و با استفاده از نرم‌افزار RockWorks 16 صورت گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کانسار مس علی‌آباد یزد در حاشیه غربی زون ایران مرکزی، در فاصله ۵۵ کیلومتری جنوب غرب شهرستان یزد، ۳۵ کیلومتری جنوب غرب شهر تفت و ۲ کیلومتری روستای دامک علی‌آباد در جنوب غربی چهارگوش توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ علی‌آباد و نیمه جنوبی برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد بین طول جغرافیایی ۷۶۸۰۰۰ تا ۷۷۱۰۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵۰۳۰۰۰ تا ۳۵۰۷۰۰۰ شمالی قرار دارد. راه اصلی دسترسی به این کانسار، جاده آسفالتی یزد-تفت-علی‌آباد می‌باشد. براساس گزارش کانسارهای مس در ایران، تنوع لیتولوژیکی در این منطقه بسیار زیاد بوده و سنگ‌های قدیمی منطقه، سلسله

کلی تعیین موقعیت منبع بی‌هنجاری و هرگونه اطلاعات دیگری که در مطالعات اکتشافی مطرح است، هدف مطالعات ژئوفیزیک اکتشافی است. مهم‌ترین ویژگی این روش‌ها، توانایی بالقوه آنها برای ارائه اطلاعاتی در مورد تغییرات خصوصیات فیزیکی نهشته‌های زیرسطحی با محیط دربرگیرنده آنهاست. اگر ویژگی فیزیکی مورد نظر در هدف، بیشتر از سنگ میزبان باشد، اهداف ژئوفیزیکی می‌توانند به‌طور مطلوب شناسایی شوند. روش‌های ژئوفیزیکی اکتشافی زیادی وجود دارند که متناسب با نوع هدف مورد کاوش، استفاده می‌شوند و خواص فیزیکی مربوط به یک هدف، تعیین کننده نوع روش یا روش‌هایی است که بایستی انتخاب شوند. از آنجایی که عوامل زیادی از جمله انواع نوفه‌ها و شرایط و پیچیدگی‌های زمین‌شناسی منطقه بر روی داده‌ها و نتایج ژئوفیزیکی تاثیرگذارند، در نتیجه همواره داده‌های ژئوفیزیکی با مقداری نوفه آلوده بوده و نتایج نیز با مقداری خطا همراه است (Ahmadi, 2014). بدیهی است که هرچه تعداد روش‌های ژئوفیزیکی متناسب مورد استفاده بیشتر باشد، به دلیل دریافت داده‌های اکتشافی بیشتر و همپوشانی اطلاعات، نتایج حاصل نیز مطلوب‌تر و دقیق‌تر خواهد بود (Reynolds, 2011; Kalagari, 2010; Keary and Brooks, 2002; Telford et al, 1990). از آنجایی که داده‌های ژئوفیزیکی اغلب حجیم بوده و نیز طیف تغییرات خصوصیات فیزیکی توده‌های زیرسطحی، بسیار گسترده است، بنابراین همواره این داده‌ها نیازمند انجام یکسری عملیات پردازش، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل هستند. به‌طور کلی تمام روش‌های ژئوفیزیکی به سطحی از پردازش، تصحیح و مدلسازی داده‌ها نیاز دارند. مدلسازی‌های ژئوفیزیکی از نظر ابعادی به انواع یک بعدی (1D)، دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) تقسیم می‌شوند. در برخی موارد به‌ویژه مناطق دارای پیچیدگی‌های ذاتی، انجام مدلسازی‌های یک‌بعدی و یا حتی دوبعدی برای نیل به مقاصد اکتشافی کافی نبوده و نیاز به انجام مدلسازی سه‌بعدی به‌خوبی احساس می‌شود. از مزایای مدلسازی سه بعدی نسبت به دو نوع دیگر، واقع‌گرایانه‌تر بودن پاسخ‌ها و دقت بالاتر نتایج می‌باشد (Ahmadi and Shariati Zarch, 2020). به هرجهت مدلسازی سه بعدی نیاز به برداشت داده‌های سه بعدی دارد حال آنکه در بسیاری از موارد، برداشت‌های ژئوفیزیکی در راستای یک سری پروفیل‌ها، به صورت دوبعدی صورت می‌گیرد و مدلسازی‌های مربوطه

مختلف صورت گرفته است. در سال ۱۳۷۸ مطالعات ژئوفیزیک به روش‌های قطبش القایی و مغناطیس سنجی در محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۱/۷ کیلومتر مربع، توسط شرکت مهندسی مشاور صمان کاو انجام شده است. در این مرحله تعداد کل برداشت‌های مغناطیسی ۱۶۶۶ ایستگاه با فواصل ۲۰ متر بوده که در امتداد ۳۵ پروفیل با فواصل ۵۰ متر از یکدیگر برداشت شده‌اند. به منظور تکمیل اکتشافات ژئوفیزیکی قبلی، تعیین شکل، محدوده گسترش و عمق بی‌هنجاری‌ها، محدوده مورد مطالعه در آبان ماه سال ۱۳۸۵ توسط همان شرکت با استفاده از روش قطبش القایی و مقاومت ویژه ظاهری، مجدداً تحت پوشش عملیات ژئوفیزیکی قرار گرفته که مساحت ۲/۵۶ کیلومتر مربع را تحت پوشش قرار داده است (Saman-kav, 2006). در این مرحله ابتدا برداشت ژئوفیزیکی با روش‌های قطبش القایی و مقاومت ویژه ظاهری توسط آرایه مستطیلی با طول خط جریان AB مساوی با ۱۰۰۰ متر و فواصل الکترودی MN برابر با ۲۰ متر صورت گرفته است. سپس براساس نتایج برداشت‌های مغناطیسی و مستطیلی، دو زون بی‌هنجاری به طول‌های ۱۶۰۰ و ۱۴۰۰ متر در راستای شمالی-جنوبی در محدوده کانی‌سازی شناسایی شد. در مرحله بعد برای بررسی بیشتر بی‌هنجاری‌های حاصل در عمق، دست‌یابی به اطلاعات بیشتر در مورد شکل و عمق بی‌هنجاری‌ها و تعیین ابعاد آنها، چهار شبه‌مقطع بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری به نام‌های DD-1 (با آرایه دوقطبی - دوقطبی)، PD-2، PD-3 و PD-4 با آرایه قطبی - دوقطبی برداشت شده و تا عمق حدود ۲۵۰ متری از سطح زمین مطالعه شده است. در مجموع تعداد نقاط اندازه‌گیری شده برای بارپذیری و مقاومت ویژه ظاهری بالغ بر ۱۰۰۰ نقطه می‌باشد. شکل ۲ برداشت‌های ژئوفیزیکی انجام شده در محدوده کانسار مس علی آباد شامل موقعیت نقاط مغناطیس سنجی، برداشت‌های مقاومت ویژه و بارپذیری با آرایه مستطیلی و نیز موقعیت چهار پروفیل ژئوفیزیکی را نشان می‌دهد.

جبال شیرکوه با سنگ‌های گرانیتی و گرانودیوریتی می‌باشند که در شرق منطقه مورد مطالعه واقع شده‌اند (Khoeye et al, 2000).

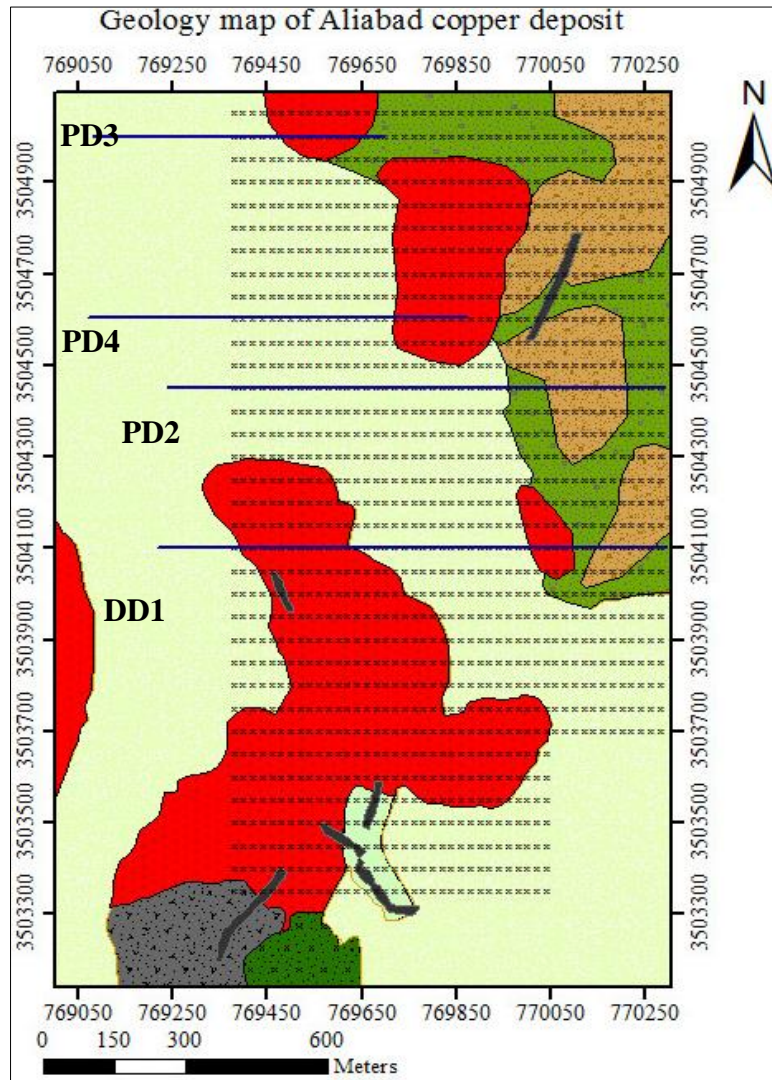
سنگ‌های نفوذی شیرکوه در وسعت زیادی مشاهده شده که دارای ترکیب گرانودیوریت تا گرانیت هستند. براساس مطالعات انجام شده به نظر می‌رسد که سنگ‌های نفوذی شیرکوه با گرانودیوریت‌های بیوتیت دار آغاز و سپس در مراحل بعدی، دارای ترکیبات اسیدی شده‌اند. قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی در منطقه علی آباد از نوع کنگلومرا و ماسه سنگ (سازند سنگستان) مربوط به اواخر ژوراسیک و اوایل کرتاسه هستند. سازند سنگستان از سازندهای اصلی منطقه به شمار می‌رود و مرز زیرین این سازند به‌طور دگرشیب بر روی گرانیت‌های شیرکوه قرار گرفته است. کانی‌سازی مس در کانسار علی آباد به‌طور عمده درون استوک نفوذی گرانیتوئیدی و به مقدار کمتر درون کنگلومراها و ماسه سنگ‌های دگرگون شده اطراف آن رخ داده است (Zarasvandi et al, 2006). دگرسانی غالب در منطقه از نوع فیلیک است و سنگ‌های گرانیتوئیدی و برخی از سنگ‌های آتشفشانی به شدت تحت‌تاثیر این نوع دگرسانی قرار گرفته‌اند.

به‌طور کلی در منطقه علی آباد چند ده متر اول مربوط به روباره آبرفتی، زون‌های اکسیدشده و سوپرژن و بعد از آنها به زون هیپوژن تعلق دارد. پرعبارترین قسمت‌ها در زون هیپوژن به مناطقی مربوط می‌شود که شدت دگرسانی فیلیک در آنها بالاتر است (Zarasvandi et al, 2006). شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

برداشت‌های ژئوفیزیکی انجام شده در محدوده

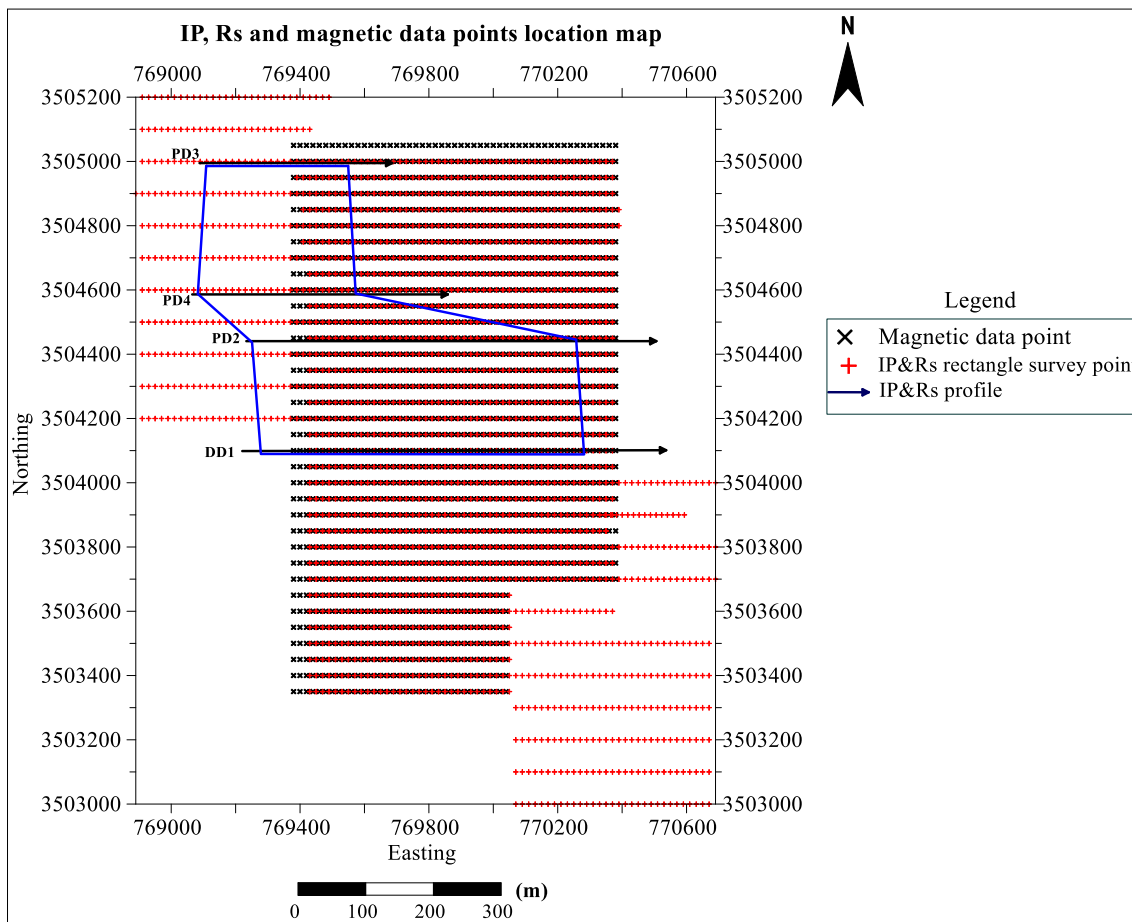
در محدوده مورد مطالعه برداشت‌های ژئوفیزیکی با روش‌های مختلف و با استفاده از آرایه‌های گوناگون در زمان‌های



Quaternary		Alluvium
Miocene		Quartz monzodiorite- Granodiorite
Oligo- Miocene		Granite
Eocene		Dark grey rhyodacite with porphyritic texture
		Light green rhyodacite tuffs as littic- crystal tuff
Upper Jurassic- Lower		Grey- green alteration of conglomerate and sandstone
		Dark grey greenish alteration of conglomerate and sandstone
Cretaceous		Dark brown quartzitic conglomerate and sandstone, well bedded
Symbols		Magnetic data point
		IP&Rs profile

شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی محدوده کانسار مس علی آباد همراه با نمایش موقعیت نقاط برداشت مغناطیسی و چهار پروفیل ژئوفیزیکی IP

و Rs.



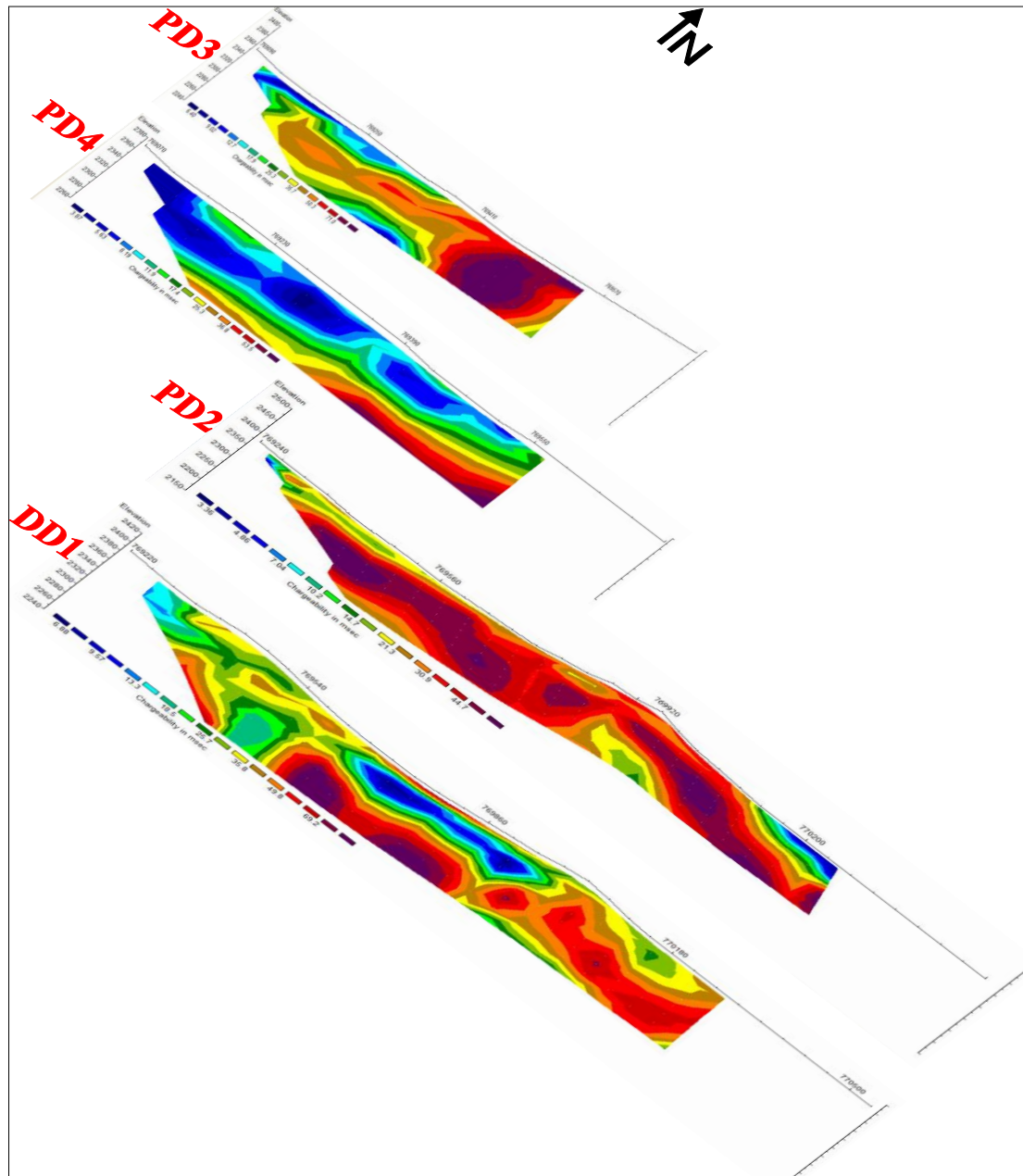
شکل ۲: نقشه موقعیت برداشت‌های ژئوفیزیکی در محدوده کانسار مس علی آباد. چندضلعی آبی رنگ موقعیت محدوده مشترک مدلسازی شده است.

برای داده‌های مقاومت ویژه (Afzali, 2017; Loke, 1999) PD4 و PD3، PD2، DD1 و بارپذیری چهار پروفیل به ترتیب با طول‌های ۱۳۲۰، ۱۲۴۰، ۶۰۰ و ۶۴۰ متر مدل‌سازی وارون هموار به روش کمترین مربعات خطا با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV (Loke and Lane, 2002; Loke and Barker, 1996; Loke, 1999, 2000) انجام شد و مدل‌های دوبعدی مقاومت ویژه و بارپذیری در راستای هر یک از پروفیل‌ها تولید گردید. در شکل ۳ مقاطع بارپذیری مدل‌سازی وارون شده نظیر پروفیل‌های ژئوفیزیکی PD3، PD4، PD2 و DD1 به ترتیب از بالا به پایین در مجاورت یکدیگر نشان داده شده است. علاوه بر این، داده‌های وارون سازی شده نیز برای استفاده‌های بعدی، ذخیره شد.

بحث و نتایج

مدلسازی وارون داده‌های ژئوفیزیکی

شبه‌مقطع، نمایشی خیلی تقریبی از توزیع مقاومت ویژه توده‌های زیرسطحی و مقدار بارپذیری این توده‌ها می‌باشد (Milson, 2003; Griffiths and King, 1983). شبه‌مقاطع به عنوان ابزاری برای نمایش مقدار مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری ظاهری توده‌های زیرسطحی به صورت تصاویر و نقشه‌ها مفید بوده و راهنمای اولیه برای تعبیر و تفسیر کمی می‌باشند ولی استفاده از آنها به عنوان تصویر نهایی از مقاومت ویژه و قطبش القایی زیرسطحی درست نیست، بنابراین برای دستیابی به مقادیر ذاتی خواص فیزیکی زیرسطحی و به دست آوردن تصویری واقعی از توده‌های زیرسطحی، بایستی روی داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری، مدل‌سازی وارون صورت گیرد (Ahmadi and



شکل ۳: مقاطع بارپذیری پروفیل‌های ژئوفیزیکی PD3، PD4، PD2 و DD1 در مجاورت یکدیگر به ترتیب از بالا به پایین.

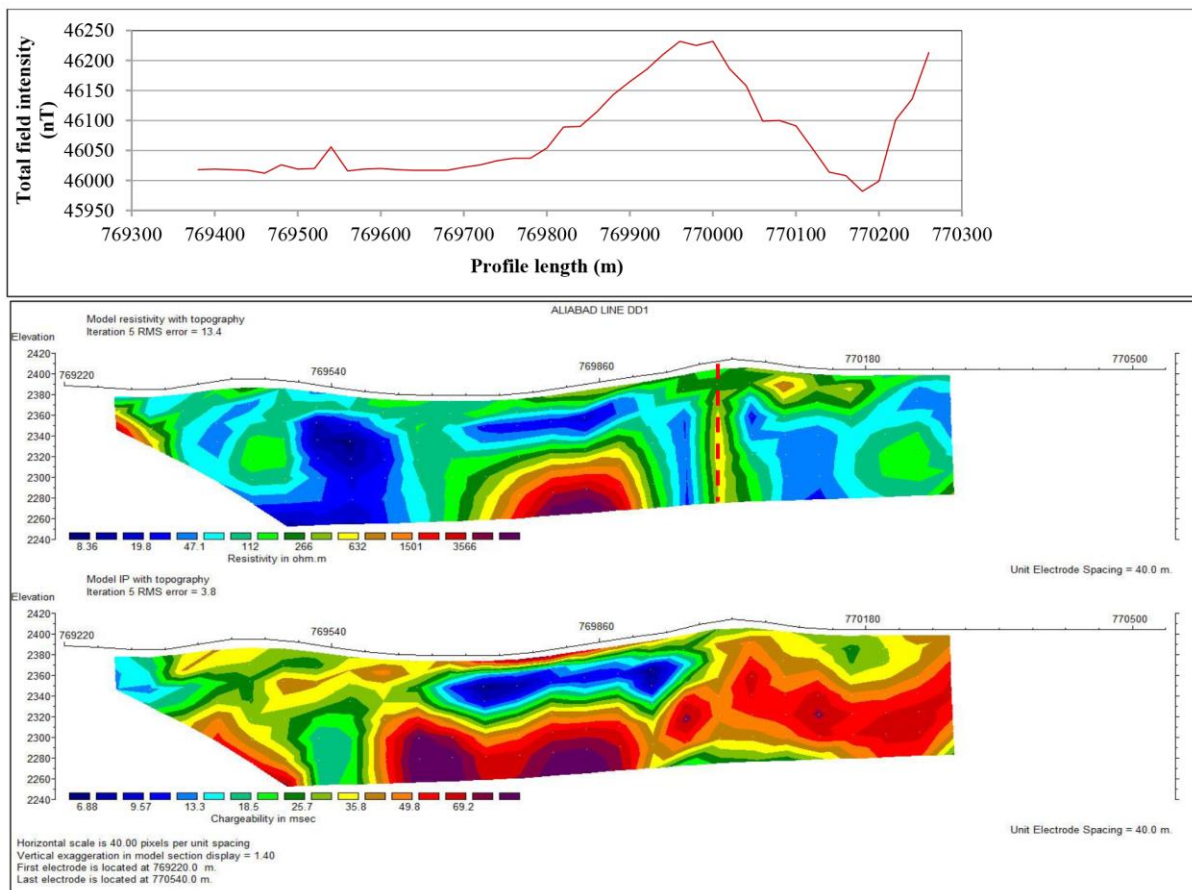
مختلف منطبق بر هر پروفیل، طول مشترک مورد تحلیل قرار گرفت. در شکل ۴ پروفیل بی‌هنجاری داده‌های برداشت شدت میدان مغناطیسی به همراه مقاطع وارون سازی شده مقاومت ویژه و بارپذیری منطبق بر پروفیل ژئوالکتریکی DD1 ترسیم شده است. افزودنی است که در مقطع مقاومت ویژه، خطچین قرمز رنگ نشان دهنده موقعیت یک گسل احتمالی می‌باشد. با توجه به این شکل، در محدوده با طول جغرافیایی ۷۶۹۷۰۰ تا ۷۷۰۱۵۰ از طول پروفیل، مقدار شدت میدان مغناطیسی بالاست. مطابق نقشه زمین‌شناسی محدوده (شکل ۱)، در این بخش

بررسی میزان انطباق داده‌های مغناطیسی با داده‌های ژئوالکتریک

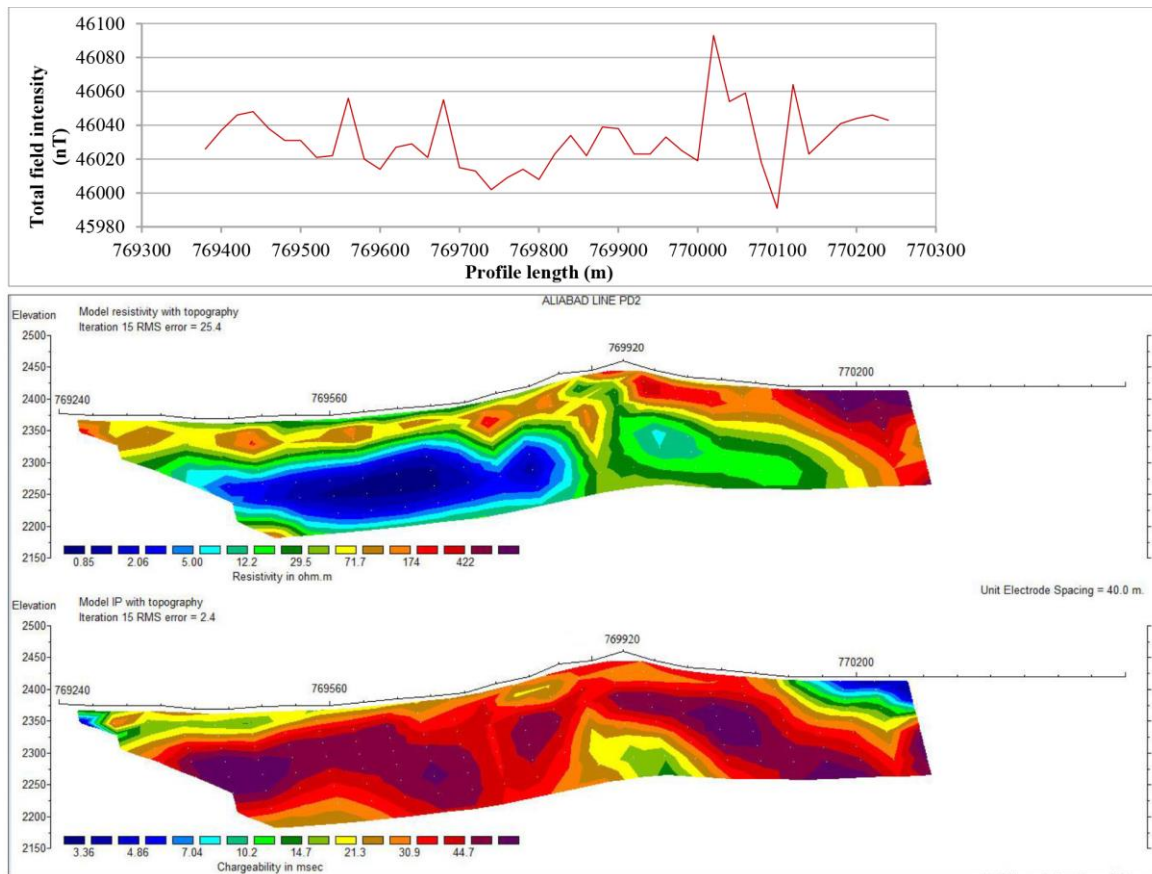
به منظور بررسی دقیق‌تر و تفسیر بهتر داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده در منطقه و بررسی میزان انطباق داده‌های مغناطیسی با داده‌های ژئوالکتریک، پروفیل‌های برداشت مغناطیسی منطبق بر پروفیل‌های برداشت ژئوالکتریک، ترسیم شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از آنجایی که طول پروفیل‌های برداشت ژئوالکتریک با طول پروفیل‌های مغناطیسی منطبق بر آنها دقیقاً با یکدیگر برابر نیستند، به منظور مقایسه داده‌های برداشت ژئوفیزیکی با روش‌های

شناسی محدوده (شکل ۱) در این بخش یک دایک آذرین حضور دارد که بالا بودن میزان خودپذیری مغناطیسی در این بخش از طول پروفیل نیز با حضور این دایک مرتبط است. مقادیر مقاومت ویژه و شدت میدان مغناطیسی بالا و بارپذیری متوسط، نشان می‌دهند که این دایک شامل کانی‌های آهن‌دار و کانی‌سازی سولفیدی پراکنده می‌باشد. در بخش‌هایی از طول پروفیل‌های ژئوالکتریکی PD3 و PD4 که شدت میدان مغناطیسی پایین است، میزان بارپذیری بالاست. در این خصوص می‌توان گفت که کانی‌سازی ارتباط چندانی با دگرسانی از نوع پتاسیک ندارد، به عبارت دیگر دگرسانی از نوع پتاسیک وجود ندارد و یا اینکه اصلاً در این محدوده‌ها کانی‌های آهن‌دار وجود نداشته و یا حضور آنها کم‌رنگ است.

یک توده نفوذی آذرین حضور دارد که بالا بودن میزان خودپذیری مغناطیسی در این بخش از طول پروفیل نیز با حضور این توده نفوذی آذرین ارتباط دارد. در بخش‌های عمقی قسمت میانی این مقطع، مقدار مقاومت ویژه و بارپذیری بسیار بالاست و تغییرات شدت میدان مغناطیسی، هم با تغییرات مقاومت ویژه و هم با تغییرات بارپذیری ارتباط دارد. وجود کانی‌های آهن‌دار همراه با توده کانسار در این بخش، دلیل بالا بودن میزان خودپذیری مغناطیسی است. شکل ۵ نیز پروفیل بی‌هنجاری داده‌های برداشت شدت میدان مغناطیسی به همراه مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری وارون‌سازی شده منطبق بر پروفیل ژئوالکتریکی PD2 را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در محدوده با طول جغرافیایی ۷۷۰۰۰۰ تا ۷۷۰۱۰۰ از طول پروفیل، مقدار شدت میدان مغناطیسی بالاست. براساس اطلاعات زمین



شکل ۴: پروفیل مغناطیسی و مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری وارون‌سازی شده منطبق بر پروفیل DD1 (به ترتیب از بالا به پایین).



شکل ۵: پروفیل مغناطیسی و مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری وارون سازی شده منطبق بر پروفیل PD2 (به ترتیب از بالا به پایین).

مدلسازی سه بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری

به منظور تهیه مدل سه بعدی تغییرات مقاومت ویژه و بارپذیری منطقه مورد مطالعه، ابتدا مطابق شکل ۲ یک محدوده مشترک (چندضلعی آبی رنگ) برای داده‌های وارون سازی شده شبه مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری در راستای چهار پروفیل DD1، PD2، PD3 و PD4 و نقاط برداشت آرایه مستطیلی، تعیین شد. سپس مقادیر مقاومت ویژه و بارپذیری واقع در محدوده مشترک، مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

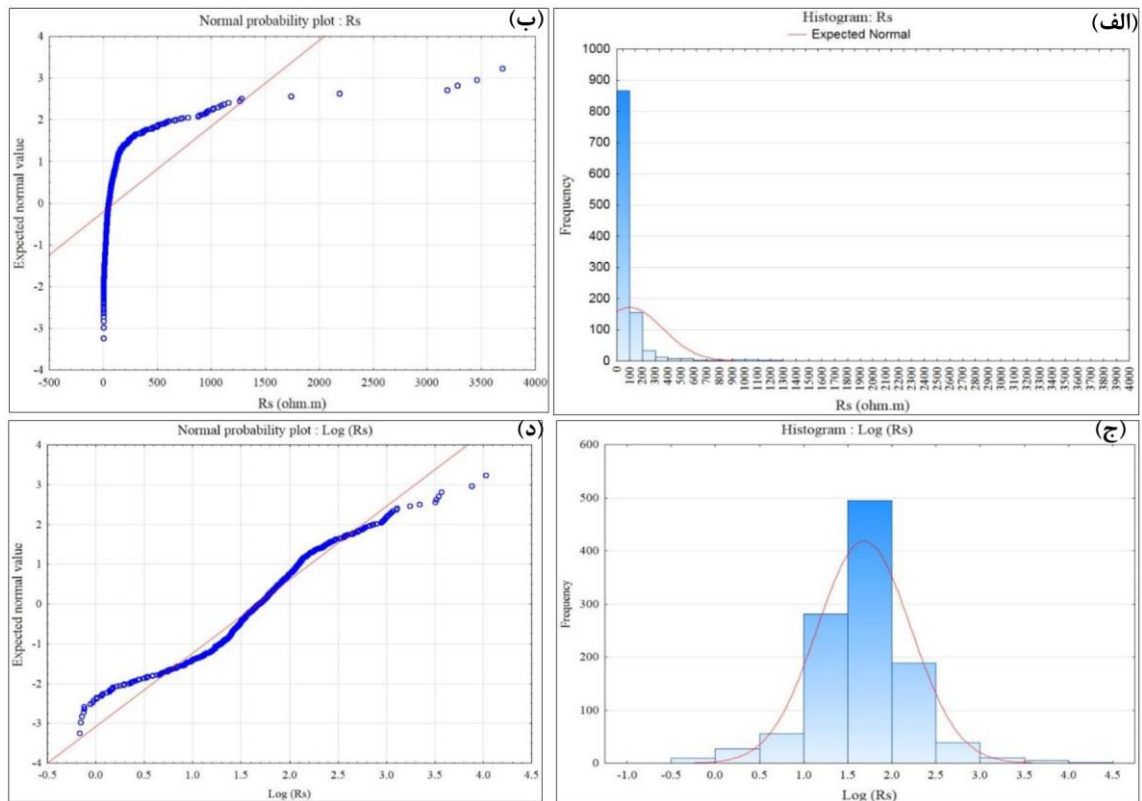
پردازش آماری اولیه داده‌های ژئوفیزیکی

به منظور بررسی ویژگی‌های آماری و تعیین نحوه توزیع داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری وارون سازی شده، تجزیه

و تحلیل آماری روی این متغیرها صورت گرفت. آماره‌های توصیفی داده‌های مقاومت ویژه در جدول ۱ خلاصه شده و در شکل ۶ نیز هیستوگرام و نمودار توزیع احتمال این داده‌ها نشان داده شده است. براساس داده‌های جدول ۱ و نمودارهای شکل ۶ توزیع داده‌های مقاومت ویژه از نوع نرمال نبوده، بلکه از نوع لاگ نرمال است که با استفاده از یک تبدیل لگاریتمی دومتغیره (دو پارامتری) به صورت مناسبی به توزیع نرمال تبدیل شدند. آماره‌های توصیفی مقادیر بارپذیری در جدول ۲ و هیستوگرام و نمودار توزیع احتمال این داده‌ها نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول ۲ و نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود که توزیع داده‌های بارپذیری از نوع نرمال است.

جدول ۱: پارامترهای آماری داده‌های خام و تبدیل یافته مقاومت ویژه.

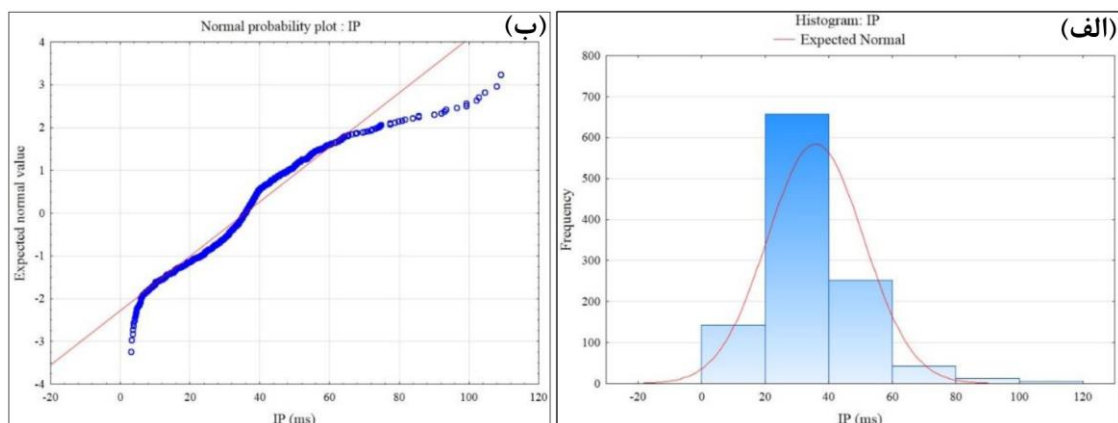
نوع داده	تعداد	کمینه (ohm.m)	بیشینه (ohm.m)	میانگین (ohm.m)	میانه (ohm.m)	مد (ohm.m)	واریانس (ohm.m) ²	انحراف معیار (ohm.m)	چولگی	کشیدگی
خام	۱۱۰۹	۰/۶۸	۳۶۹۵	۱۰۲	۴۸	۵۰	۶۶۸۳۳	۲۵۸	۹	۱۰۳
تبدیل یافته	۱۱۰۹	-۰/۱۶	۳/۵۶	۱/۶	۱/۶	۱/۷	۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۲۸	۲



شکل ۶: الف: هیستوگرام و ب: نمودار توزیع احتمال داده‌های خام مقاومت ویژه؛ ج: هیستوگرام و د: نمودار توزیع احتمال داده‌های لگاریتمی مقاومت ویژه.

جدول ۲: پارامترهای آماری داده‌های خام بارپذیری.

تعداد	کمینه (ms)	بیشینه (ms)	دامنه تغییرات (ms)	میانگین (ms)	میانه (ms)	مد (ms)	واریانس $(ms)^2$	انحراف معیار (ms)	ضریب تغییرات (%)	چولگی	کشیدگی
۱۱۱۱	۳	۱۰۹	۱۰۶	۳۵	۳۵	۳۶	۲۳۰	۱۵	۴۲	۰/۸۷	۳



شکل ۷: الف: هیستوگرام، ب: نمودار توزیع احتمال داده‌های خام بارپذیری.

تجزیه و تحلیل ساختار فضایی داده‌های ژئوفیزیکی در زمین آمار به بررسی آن دسته از متغیرها پرداخته می‌شود که ساختار فضایی از خود بروز می‌دهند؛ به عبارت دیگر ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین

داده‌ها پرداخته می‌شود و سپس در صورت وجود ساختار فضایی، تحلیل داده‌ها صورت می‌گیرد (Ahmadi, 2019; Hassani-pak, 1998; Madani, 1995). گام نخست در تحلیل‌های زمین آماری، انجام عملیات واریوگرافی درست

با توجه به وضعیت و موقعیت پروفیل‌های برداشت، ترسیم واریوگرام در راستاهای مذکور، لازم و کافی به نظر می‌رسد. انتخاب پارامترهای مربوط به محاسبه واریوگرام‌ها نیز براساس هندسه شبکه برداشت داده‌ها صورت گرفت.

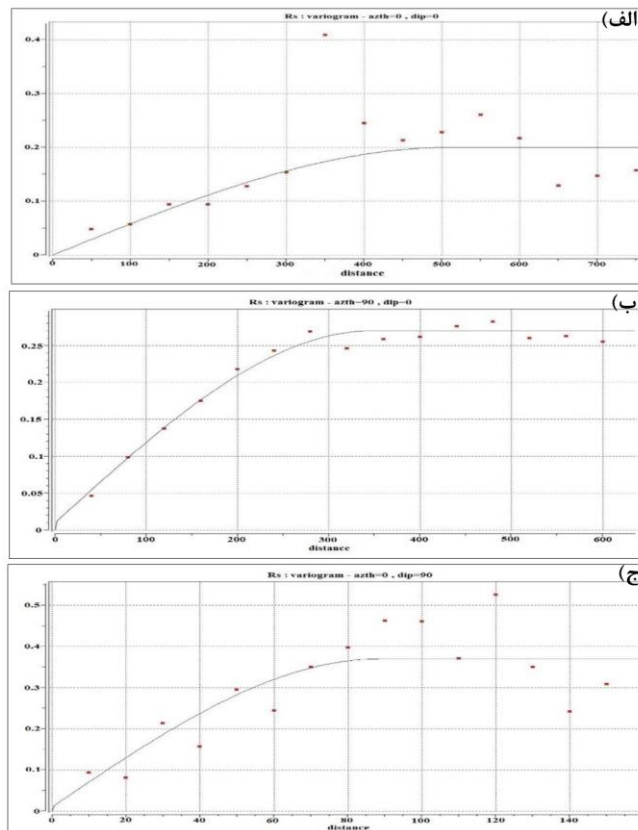
واریوگرافی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری

با توجه به لاگ‌نرمال بودن توزیع مقادیر مقاومت ویژه، به منظور اجتناب از پیدایش ناهمسانگردی دروغین، واریوگرافی مقادیر تبدیل یافته مقاومت ویژه صورت گرفت. در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای واریوگرام مقاومت ویژه و بارپذیری در جهات مختلف و در جدول ۳ نیز مشخصات این واریوگرام‌ها آورده شده است.

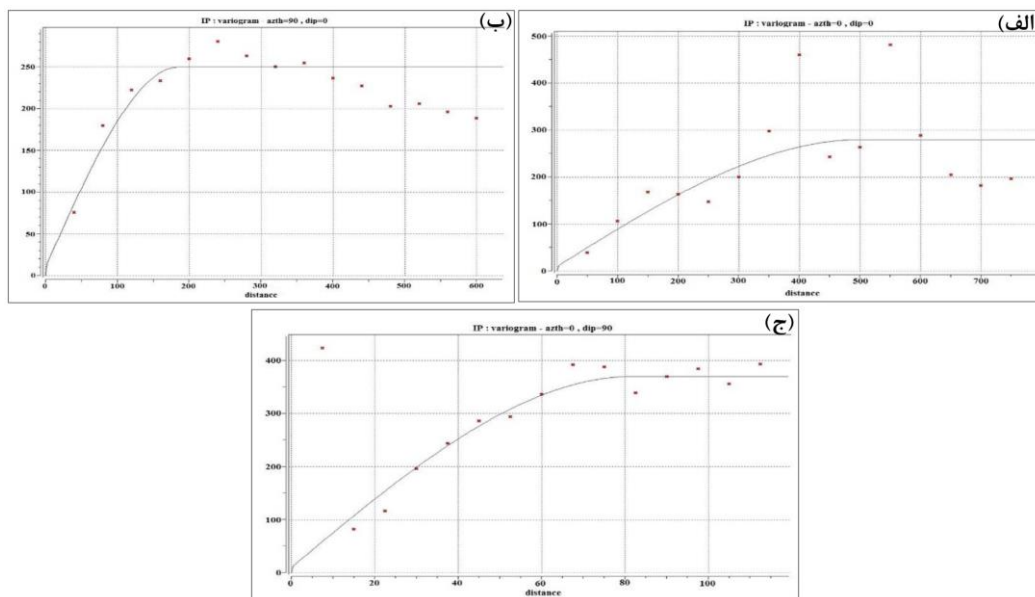
و تجزیه و تحلیل ساختار فضایی کانسار براساس آن است. تجزیه و تحلیل ساختار فضایی کانسار به وسیله ابزار ترسیمی بسیار سودمندی به نام واریوگرام صورت می‌گیرد (Ahmadi, 2020; Madani, 1995). برای تشخیص ساختار فضایی حاکم بر داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری در منطقه، اقدام به ترسیم واریوگرام‌های امتدادی در جهات مختلف شد. با توجه به اینکه گسترش عمومی بی‌هنجاری‌های احتمالی در منطقه در راستای شمالی - جنوبی است، بنابراین دو راستای افقی شمالی - جنوبی یعنی موازی با امتداد عمومی کانسار و شرقی - غربی یعنی عمود بر امتداد عمومی کانسار، و نیز راستای قائم (عمقی) برای ترسیم واریوگرام انتخاب شد. برای شناخت ساختار فضایی ممکنه

جدول ۳. ویژگی‌های واریوگرام‌های امتدادی داده‌های ژئوفیزیکی در جهات مختلف.

نوع داده	آزیموت (degree)	شیب (degree)	مدل واریوگرام	تلائس زاویه‌ای (degree)	اثر قطعه‌ای (ohm.m) ²	دامنه تاثیر (m)	سقف (ohm.m) ²
مقاومت ویژه	۰	۰	کروی	۲۰	۰/۰۱	۶۰۰	۰/۳
	۹۰	۰	کروی	۲۰	۰/۰۱	۳۵۰	۰/۲۶
	۰	۹۰	کروی	۲۰	۰/۰۱	۹۰	۰/۳۶
بارپذیری	۰	۰	کروی	۲۰	۱۰	۵۰۰	۲۷۰
	۹۰	۰	کروی	۲۰	۱۰	۲۰۰	۲۴۰
	۰	۹۰	کروی	۲۰	۱۰	۸۰	۳۶۰



شکل ۸: واریوگرام‌های امتدادی مقاومت ویژه در راستای الف: شمالی - جنوبی، ب: شرقی - غربی، ج: عمقی.



شکل ۹: واریوگرام‌های امتدادی بارپذیری در راستای الف: شمالی - جنوبی، ب: شرقی - غربی، ج: عمقی.

ابزارهای مورد نیاز برای تصویرسازی، مدلسازی و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی است (Ahmadi and Sadat Koodehi, 2018) و انجام مدلسازی‌های مختلف و نیز تهیه برش‌های مختلف از درون ساختارها را براساس نوع و میزان داده‌ها و اطلاعات اکتشافی در دسترس برای کاربران امکان‌پذیر می‌سازد (www.rockware.com). هندسه مدل‌های بلوکی سه بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری بر پایه ابعاد منطقه و هندسه شبکه برداشت انتخاب شد. بر این اساس ابعاد مدل‌ها $300 \times 950 \times 1200$ متر با تعداد 17385 بلوک به ابعاد $20 \times 20 \times 50$ متر طراحی گردید. سپس تخمین بلوکی به روش درون‌یابی عکس فاصله وزن دار پیشرفته^۲ (AIDW) انجام شد. روش عکس فاصله وزن دار (IDW) یکی از دقیق‌ترین الگوریتم‌های تخمین بلوک‌های مجهول از طریق نمونه‌های معلوم مجاور بلوک‌هاست. در این روش مقدار هر بلوک مجهول از طریق میانگین وزن دار نمونه‌های معلوم اطراف آن تعیین می‌شود و تاثیر هر نمونه در تعیین مقدار بلوک مجهول متناسب با توانی از عکس فاصله آن است. در الگوریتم عکس فاصله وزن دار پیشرفته، امکان وزن دهی فاصله با توان متفاوت در جهات مختلف، وجود دارد. به دلیل وجود ناهمسانگردی هندسی در منطقه، تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین هر بلوک براساس شعاع‌های بیضوی تجسس حاصل از واریوگرافی، انتخاب شد. بر این اساس تعداد 40 نقطه برای مشارکت در تخمین پارامتر مقاومت ویژه و 25 نقطه برای مشارکت در تخمین

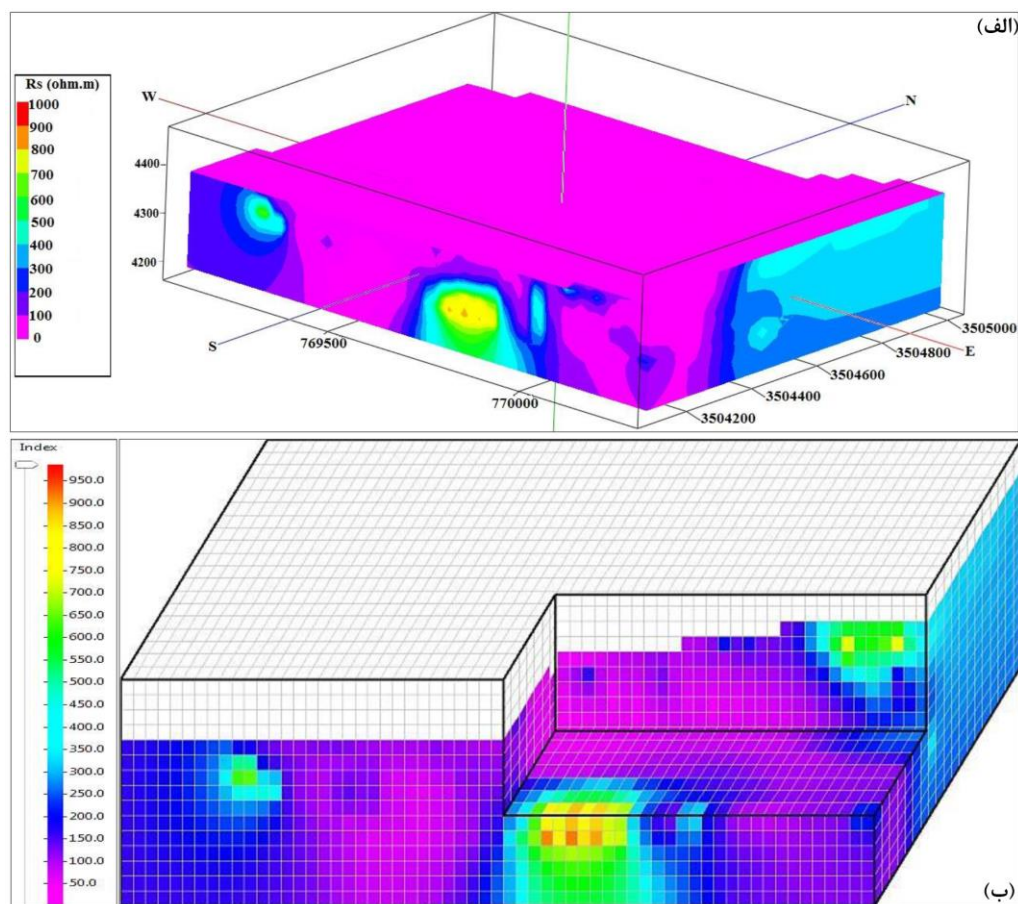
مطابق داده‌های جدول ۳ تمامی مدل‌های تئوری واریوگرام منطبق بر واریوگرام‌های تجربی، از نوع کروی بوده به گونه‌ای که واریوگرام‌های امتدادی در جهات مختلف دارای سقف یکسان ولی شعاع تاثیر متفاوت هستند؛ بنابراین منطقه دارای ناهمسانگردی از نوع هندسی می‌باشد. مقدار شعاع تاثیر واریوگرام در راستای عمق نسبت به جهات افقی کوچکتر است که حاکی از تغییرپذیری بیشتر ویژگی‌های فیزیکی در راستای عمق می‌باشد. نسبت واریانس تصادفی (اثر قطعه‌ای) به سقف در تمام واریوگرام‌ها کمتر از 10% درصد است که می‌توان نتیجه گرفت ساختار فضایی قوی بر داده‌ها حاکم است و به کارگیری روش‌های زمین‌آماري نتایج مطلوبی به دنبال خواهد داشت. با توجه به کروی بودن واریوگرام‌های امتدادی، دوسوم دامنه تاثیر واریوگرام‌ها به عنوان شعاع جستجو انتخاب می‌شود (Hassani-pak, 1998). بنابراین شعاع‌های بیضوی ناهمسانگردی برای مقاومت ویژه به طول 450 متر در راستای شمالی - جنوبی، 250 متر در راستای شرقی - غربی و 65 متر در راستای قائم و برای بارپذیری به طول 350 متر در راستای شمالی - جنوبی، 170 متر در راستای شرقی - غربی و 50 متر در راستای قائم خواهد بود. این پارامترها در تخمین با روش‌های درونیابی پیشرفته به کار گرفته می‌شوند.

مدل سه بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری

برای انجام مدلسازی سه بعدی از نرم‌افزار RockWorks16 استفاده شد. نرم‌افزار Rockworks مجموعه کاملی از

بی هنجاری به صورت پیوسته در میانه مدل با راستای عمومی شمالی- جنوبی قرار دارد. بررسی بی هنجاری‌های موجود در مدل‌های سه بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری تولید شده در مقایسه با مقاطع دوبعدی نشان می‌دهد که بین آنها به‌طور کیفی انطباق خوبی وجود دارد. همچنین در مدل بارپذیری یک محل بی هنجاری قوی (خط چین مشکی رنگ در شکل ۱۱ ب) قابل مشاهده است؛ بنابراین در این موقعیت با مختصات (۳۵۰۴۲۰۰، ۷۶۹۶۷۰) به عنوان مناسب‌ترین و امیدبخش‌ترین محل، حفر یک گمانه اکتشافی قائم با طول ۸۰ متر پیشنهاد شد.

بارپذیری هر بلوک انتخاب شد. مدل‌های سه بعدی مقاومت ویژه و بارپذیری به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها همچنین مدل‌ها در جهات مشخصی برش داده شده‌اند تا مشاهده تغییرات مقاومت ویژه و بارپذیری درون آنها امکان پذیر شود. با بررسی مدل سه بعدی مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که بخش عمده‌ای از مدل بویژه در بخش مرکزی، دارای مقاومت ویژه پایینی است، اما به سمت بیرون در تمام جهات افزایش می‌یابد. محدوده‌های دارای مقاومت ویژه زیاد عمدتاً در جنوب، شرق و شمال غرب مدل قرار دارند. در مدل بارپذیری نیز



شکل ۱۰: الف: مدل سه‌بعدی مقاومت ویژه به روش درون یابی عکس فاصله وزن‌دار پیشرفته، ب: نمایش برشی از مدل.

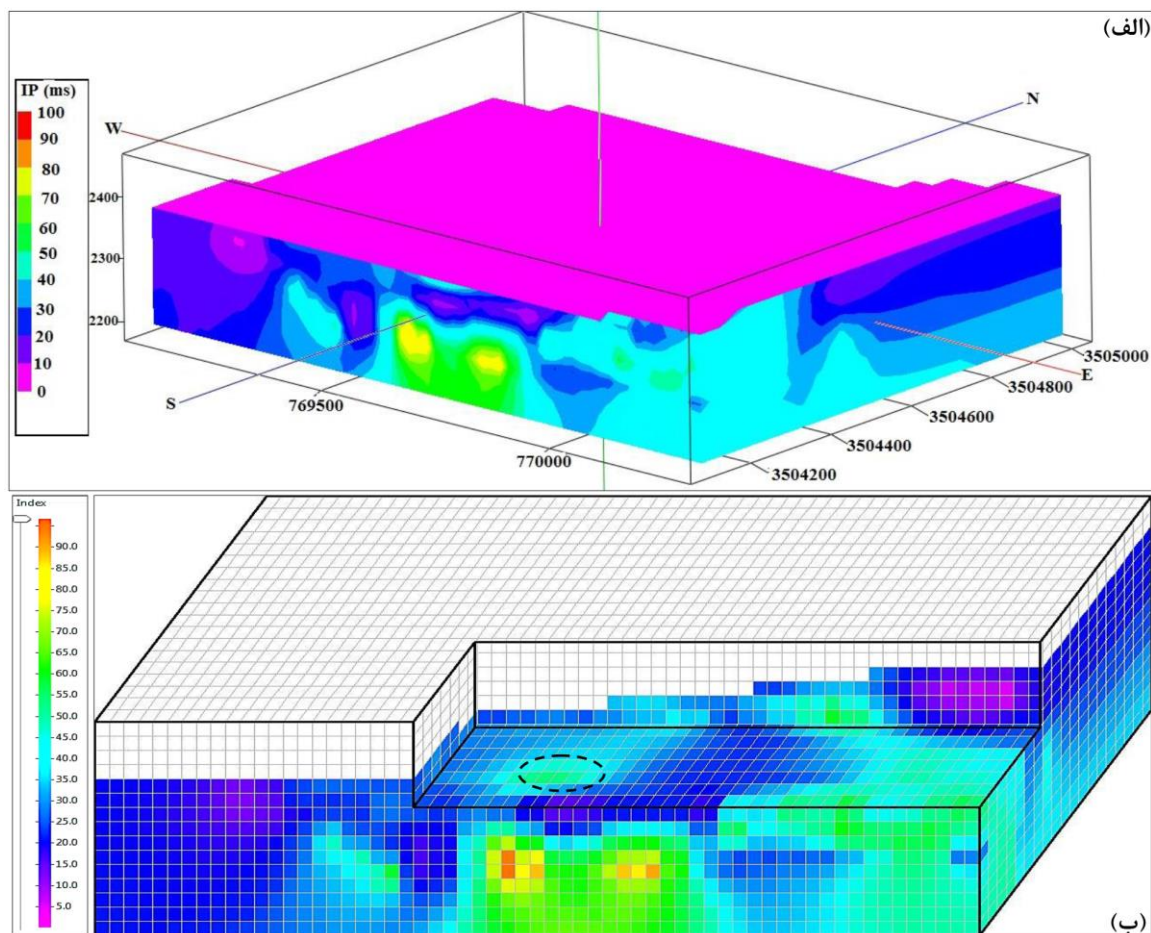
است. گمانه F28 به طول ۱۰۰ متر در موقعیت با مختصات (۳۵۰۴۱۶۵، ۷۶۹۵۷۳)، گمانه G28 به طول ۱۰۰ متر در موقعیت با مختصات (۳۵۰۴۱۵۸، ۷۶۹۶۷۴) و گمانه H28 به طول ۱۲۰ متر در موقعیت با مختصات (۳۵۰۴۱۵۲، ۷۶۹۷۸۴) حفاری شده است. میزان تطابق کیفی و کمی نتایج عملیات حفاری (داده‌های عیارسنجی) در این سه گمانه با برداشت‌های ژئوفیزیکی مدلسازی شده در ادامه

اعتبارسنجی نتایج

در محدوده مورد مطالعه، همزمان و بعد از انجام عملیات ژئوفیزیکی، به‌طور پراکنده تعدادی گمانه اکتشافی حفاری شده است که بعضی از آنها براساس نتایج عملیات ژئوفیزیکی بوده و برخی دیگر نیز بر پایه اصول خاصی نمی‌باشند. ازجمله در محدوده بی هنجاری حاصل از مدلسازی سه بعدی ژئوفیزیکی، سه گمانه اکتشافی قائم حفاری شده

عمق روباره آبرفتی و نوع زون‌های کانی‌سازی گمانه‌ها (فروشست شده، سوپرژن اکسیدی، سوپرژن سولفیدی و هیپوژن) نیز در جدول ۴ آورده شده است. گمانه‌های F-28 و G-28 عمدتاً در سنگ گرانیت حفر شده‌اند و سنگ شناختی مشابهی دارند اما از نظر مقاومت ویژه، رفتار کاملاً متفاوتی نشان می‌دهند. گمانه H-28 یا در سنگی غیر از گرانیت حفر شده و یا دیگر واحدهای سنگی، همراه گرانیت حضور دارند.

آورده شده است. در شکل ۱۲ چاه نگار دوبعدی مجزای این گمانه‌های اکتشافی، نمایش داده شده است. در این شکل چاه‌نگار گمانه‌ها از چپ به راست شامل ستون‌های لیتولوژی (سنگ‌شناختی)، دگرسانی، هیستوگرام تغییرات عمقی عیارسنجی مس (با رنگ زرد یا قرمز و افزایش از چپ به راست)، منحنی تغییرات عمقی مقاومت ویژه (با رنگ سبز و افزایش از چپ به راست)، و منحنی تغییرات عمقی بارپذیری (با رنگ آبی و افزایش از چپ به راست) می‌باشد.



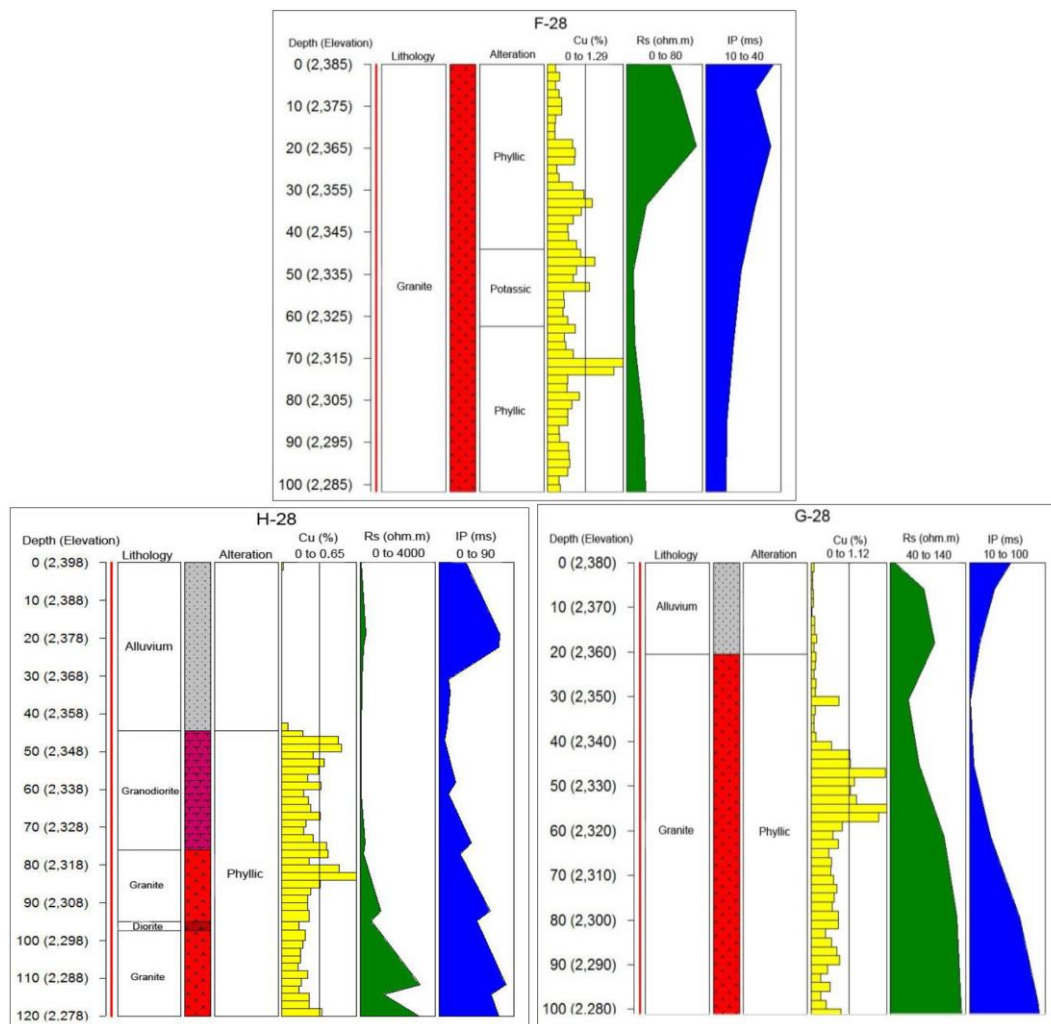
شکل ۱۱: الف: مدل سه‌بعدی بارپذیری به روش درون یابی عکس فاصله وزن‌دار پیشرفته، ب: نمایش برشی از مدل.

مناطق هیپوژن و سوپرژن سولفیدی بدلیل تمرکز سولفیدهای فلزی، مقدار بارپذیری بالاست. مقدار بارپذیری در نواحی سطحی فاقد عیار در گمانه‌های G-28 و H-28 بالاتر از حد مورد انتظار است ولی با افزایش عمق، روند کاهشی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نواحی سطحی و نزدیک به سطح عمدتاً از روباره آبرفتی و زون فروشست شده تشکیل شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت منشأ ایجاد بارپذیری در این نواحی، غیرفلزی است. مقدار مقاومت ویژه در نواحی سطحی در گمانه H-28 پایین و در گمانه‌های F-

در دو گمانه F-28 و G-28 به نظر می‌رسد، مقدار مقاومت ویژه با شدت و ضعف دگرسانی ارتباط داشته باشد اما در گمانه H-28 علاوه بر عامل دگرسانی، نوع لیتولوژی نیز در تغییرات مقاومت ویژه موثر است؛ به‌گونه‌ای که در این گمانه مقاومت ویژه در سنگ گرانیت بالاست اما در سایر واحدهای سنگی از مقدار آن کاسته شده است. به‌طور کلی چنین به نظر می‌رسد که تغییرات مقاومت ویژه در زون هیپوژن به دو عامل دگرسانی و نوع سنگ درون‌گیر بستگی دارد. مقدار بارپذیری در تمام گمانه‌ها با مقدار عیار تطابق دارد و در

سطحی ناشی شده است. تغییرات عیار در تمام گمانه‌ها در ارتباط با زون‌های کانی‌سازی است.

28 و G-28 بالاست که این موضوع از تغییر در میزان رطوبت، نوع سیالات، میزان تخلخل و غیره در رسوبات



شکل ۱۲: نمایش چاه نگار (سنگ شناختی، دگرسانی، عیارسنجی مس، مقاومت ویژه و بارپذیری) سه گمانه اکتشافی حفاری شده در محدوده بی‌هنجاری.

جدول ۴: عمق روباره آبرفتی و نوع زون‌های کانی‌سازی در سه گمانه حفاری شده در محدوده بی‌هنجاری.

نام گمانه	عمق روباره آبرفتی (متر)	عمق زون فروشست شده (متر)	عمق زون سوپرژن اکسیدی (متر)	عمق زون سوپرژن سولفیدی (متر)	عمق زون هیپوزن (متر)
F-28	-	۰-۱۲	-	۱۲-۵۰	۵۰-۱۰۲
G-28	۰-۲۰	۲۰-۴۰	-	۴۰-۶۰	۶۰-۱۰۱
H-28	۰-۴۴	۴۴-۴۸	-	-	۴۸-۱۲۰

وجود دارد. این امر نشان دهنده آن است که بی‌هنجاری-های موجود در نمودارهای پروفیلی مغناطیسی و مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری منطبق بر چهار پروفیل ژئوفیزیکی برداشت شده در منطقه، در ارتباط با کانی‌سازی‌های فلزی هستند. در بخش‌هایی از طول این پروفیل‌ها که شدت میدان مغناطیسی پایین ولی مقدار بارپذیری بالاست، می

نتیجه‌گیری

عملیات پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، مقاومت ویژه و قطبش القایی برداشت شده در راستای چهار پروفیل ژئوفیزیکی در کانسار مس علی‌آباد یزد در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در مجموع تطابق، هماهنگی و انطباق خوبی بین داده‌های ژئوفیزیکی

حاضر نشان داد که با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی-محاسباتی دقیق می‌توان برای داده‌های برداشت دوبعدی، مدلسازی سه بعدی انجام داد که در عمل واقع‌گرایانه‌تر بوده و قدرت تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد. در نهایت لازم است که در موقعیت پیشنهادی، گمانه اکتشافی حفر شود، چاه نگار آن با دقت ترسیم گردد و نتایج عیارسنجی مغزه-های حفاری همراه با چاه نگار لیتولوژی و دگرسانی، با نتایج عملیات مدلسازی سه بعدی ژئوفیزیکی در این محل تطبیق داده شود تا علاوه بر شناخت بیشتر کانسار، میزان کارایی عملیات برداشت ژئوفیزیکی انجام شده و فرآیند مدلسازی سه بعدی صورت گرفته نیز تعیین گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده‌اند.

توان چنین تعبیر کرد که یا اصلاً کانی‌سازی به‌ویژه از نوع فلزی آهن‌دار وجود ندارد و یا کانی‌سازی احتمالی موجود، ارتباط چندانی با دگرسانی از نوع پتاسیک ندارد. مرحله نهایی و بحرانی هر عملیات اکتشاف، حفر بهینه گمانه‌های اکتشافی است پیشنهاد موقعیت بهینه گمانه‌های اکتشافی که معمولاً براساس نتایج عملیات ژئوفیزیک صورت می‌گیرد، در مورد کانسارهای فلزی کم عیار همانند طلا، نقره و مس، بحرانی‌تر است. در پژوهش حاضر فرآیند پیشنهاد موقعیت بهینه حفر گمانه اکتشافی از طریق انجام مدلسازی سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه و بارپذیری در کانسار مس علی‌آباد یزد با استفاده از نرم‌افزار RockWorks و از طریق عملیات واریوگرافی دقیق زمین آماری به کمک نرم‌افزار SGeMS صورت گرفت. برای این منظور از الگوریتم عکس فاصله وزن‌دار پیشرفته استفاده شد که از دقیق‌ترین الگوریتم‌های محاسباتی درونیابی است و در نتیجه فرآیند تخمین از اعتبار مطلوبی برخوردار است. نتایج پژوهش

پانویس

1-Big data

2-Advanced Inverse Distance Weighted

References

- Ahmadi, R., 2014. Developing an intelligent algorithm to detect geometrical and physical parameters of geotechnical targets using GPR responses, Ph. D thesis, University of Tehran (in Persian).
- Ahmadi, R., 2020. Employing support vector machine, statistical and geostatistical methods to design the detailed exploration grid of Khomein-Robat Pb-Zn deposit, Journal of Advanced Applied Geology, v. 10(2), p. 121-136.
- Ahmadi, R. and Afzali, N., 2017. Smooth inversion of geophysical exploration data for Khomein-Hosseini Abad lead-zinc deposit, 10th National Geology Conference of PNU, Payame Noor University, Tabriz, Iran (in Persian).
- Ahmadi, R. and Baharlooei, Z., 2021. Qualitative and quantitative evaluation of geophysical data accordance with assay data in Yazd Darreh-Zereshk copper deposit to propose optimal location for new exploration boreholes, Journal of Engineering Geology, v. 15(1), 1-34 (in Persian).
- Ahmadi, R. and Shariati Zarch, S.M., 2020. Investigating the effect of various parameters on the response of magnetic targets in magnetometry method using 2D and 3D forward modeling, Iranian Journal of Engineering Geology, v. 13(3), p. 15-34 (in Persian).
- Ahmadi, R., 2019. Ore reserve evaluation: digital textbook. Arak University of Technology, Arak, 250 p (in Persian).
- Ahmadi, R. and Sadat Koodehi, S.M., 2018. Classification and reserve estimation of Robat Arregije Pb-Zn deposit, Khomein Township, Markazi Province, using geostatistical methods. New Findings in Applied Geology, v. 12(24), p. 39-53 (in Persian).
- Ahmadi, R. and Rezapour, M.R., 2019. Proposing the optimum locations for drilling in Saveh North-Narbaghi porphyry copper deposit on the basis of geophysical data modeling. Scientific Quarterly of Iranian Association of Engineering Geology, v. 12(4), p. 95-121.
- Griffiths, D.H. and King, R.F., 1983. Applied geophysics for geologists and engineers:

- The Elements of Geophysical Prospecting, Second Edition, Pergamon Press, 206 p.
- Hassani-pak, A.A., 1998. Geostatistics. Tehran University Press, 314 p (in Persian).
- Kalagari, A.A., 2010. Principles of geophysical explorations, Publication: Tabriz, 485 p (in Persian).
- Khoyee, N., Ghorbani, M., Tajbakhsh, P., 2000. Copper deposits in Iran, Geological survey and mineral exploration of Iran, 421 p (in Persian).
- Keary, PH., Brooks, M. and Hill, I., 2002. An introduction to geophysical exploration, Third edition, Blackwell Science, 281 p.
- Loke, M.H., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A Practical guide to 2-D and 3-D surveys, 66 p.
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method, Geophysical Prospecting, v. 44, p. 131-152.
- Loke, M.H., 2000. Topographic modelling in resistivity imaging inversion, 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, Glasgow, Scotland, 29 May, 2 June.
- Loke, M.H. and Lane, J., 2002. The use of constraints in 2D and 3D resistivity modeling, The 8th EEGS-ES Meeting, Portugal.
- Madani, H., 1995. Basics of Geostatistics. Amirkabir University of Technology-Tafresh branch, Tafresh, 659 p (in Persian).
- Milson, J., 2003. Field geophysics, Third edition, John Wiley & Sons, New York, 249 p.
- Mohammadi, S., Namaki, L. and Hamedpour Darabi, M., 2016. Presenting a computer program in MATLAB language for forward modeling of magnetometric data, 17th National Iranian Geophysics Conference.
- Mohammadi, S., Namaki, L. and Hamedpour Darabi, M., 2016. Presenting a computer program in MATLAB language for forward modeling of magnetometric data, 17th National Iranian Geophysics Conference.
- Reynolds, J.M., 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2nd Edition, A John Wiley & Sons, 712 p.
- Saman-kav, Consulting engineers Co. 2006. Final report of exploration geophysics by induced polarization (IP/Rs) method in the region of Aliabad copper deposit, Yazd province (in Persian).
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. Applied geophysics, 792 p. www.rockware.com
- Zarasvandi, A.R., Liaghat, S. and Carranza, E.J.M., 2006. The Ali-Abad porphyry copper mineralization in Central Iran, Journal of Geological Society of Iran, JGSOI, v. 1(1), p. 73-84.