



Reserve Modeling and Estimation of Chahmusa Copper Mine (Northwest of Troud, Semnan Province)

Reza Moezzi Nasab¹, Ali Reza Arab-Amiri^{2*}, Abolghasem Kamkar-Rouhani³

¹ Ph.D. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
reza.m1371@yahoo.com

² Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
alirezaarabamiri@yahoo.com

³ Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
kamkarr@yahoo.com

Received: 2024/09/07 - Accepted: 2025/04/12

ABSTRACT

Chahmusa area, with a surface area of 28.54 square kilometers, is located in Semnan Province. Chahmusa mine is located in the south of Shahrood city and the northwest of Troud village. This research aims to do mineral Reserve modeling and estimation in the Chahmusa area. Additional exploration studies have been carried out in a limited area with a surface of 56 hectares northwest of the area. These exploration studies in the area include 1:1000 topographic mapping, preparation of 1:1000 mineralogical and tectonic maps, core drilling, logging, sampling, and reserve estimation. From the geological point of view, this area includes all types of volcanic rocks, such as pyroclastic and volcanoclastic rocks, with intermediate to acidic compositions that can be seen in some parts of the dike that occurred in the area. Economic and geological studies of mineralization type in the Chahmusa area place the mineralization in the category of copper deposits of manto type. In order to obtain the geometry of the deposit and estimate the reserve, 66 cored boreholes with a total length of 13360.50 meters, of which 22 cored boreholes with a total length of 3826 meters, have been used in reserve evaluation. In addition to lithological and mineralogical logging. Were carried out in the area. In this study, the estimation space of the grade-structural model based on the information on mineralization-controlling fault in the area was constructed, and the grade information of boreholes with a copper grade of more than 0.1% was obtained using different software packages. Reserve estimation was made using search ellipse specifications, optimized estimation parameters, block model, and ordinary kriging and inverse distance square methods. Due to the better results of the ordinary kriging method, these results were presented in this paper. In order to control the calculated reserve estimation, vertical sections were also used to calculate reserve estimation. The results imply that the estimation accuracy was achieved using the ordinary kriging geostatistical method. The oxide zone was separated based on the grade of copper oxide and considering the oxide ratio of 30%. The amount of geological resources with a copper grade of 0.1% is 4.4 million tons with an average copper grade of 0.74%. From this amount, 1.3 million tons with an average grade of copper of 0.75% are the reserves of copper oxide type, and 1.3 million tons with an average grade of copper of 0.73% are the reserves of copper sulfide type. The measured resource (i.e., definite reserve) is 2.3 million tons with an average copper grade of 0.77% (the copper oxide reserve part is 2.2 million tons with a copper grade of 0.78%, and the copper sulfide reserve part is 950 thousand tons with a copper grade of 0.75%).

Keywords

Exploration, Reserve estimation, Chahmusa, Shahrood, Modeling, Copper.

* Corresponding author and correspondent



1- INTRODUCTION

Chahmusa area, with a surface area of 28.45 square kilometers, is located in the geographical longitude of $52/54^{\circ}$ and latitude of $29/35^{\circ}$ is one of the complex copper mines of Chahmusa in Semnan Province. This mine is distanced 135 km southwest of Shahrood, accessible from the main Shahrood-Troud road and 15 km from the main Shahrood-Troud. There are two ways to access the Chahmusa area: One access route is via the Shahrood asphalt road to Troud, which is the main Shahrood-Troud road, and the second route is via the Damghan road to Hosseinan.

The study area is located in the Troud-Chah Shirin volcanic belt on the northern edge of the central Iran zone. This area is located in the 1:250,000 Troud and 1:100,000 Moalleman geologic maps.

Regarding the area's morphology, three peaks, Chahmusa, Qhoaleh Sokhteh, and Chaft, are among the highest, with heights of 1500, 1480, and 1350 meters, respectively. Most parts of the area with medium heights are composed of pyroclastic units. The alluvial deposits of the present era are seen in the lowest heights of the area.

2- METHODS

The Troud-Chah Shirin belt is about 100 km long and has a variety of stratigraphy. The eastern half mainly consists of Cenozoic volcanic units, and in the western half, sedimentary units related to geological periods have significantly expanded. The study area is located east of this belt in the Eocene volcanic area.

Generally, the main stratigraphic units in the study area with a northeast-southwest trend include lavas with a porphyry to mega porphyry andesite composition accompanied by red tuffs (sometimes lithic tuffs) and andesite tuffs.

The results of surface evidence and geological and magnetometric surveys of the study area led to the determination of drilling points with a 50×50 m grid design. In this grid, 66 coring boreholes with a total core drilling of 13360.50 meters were drilled.

Modeling the deposit grade in three-dimensional (3D) space using borehole data can be considered a reconstruction of a subsurface in 3D space. This subsurface consists of zones that need to be estimated locally.

The estimation space was built from the geological information and the grade information of the boreholes with a cut-off grade of 0.1% copper (acceptable grade in the Chahmusa area) using Leapfrog and StudioRM software packages.

After determining the parameters and estimation range, the tasks remaining for reserve evaluation are to determine the dimensions of the blocks, prepare the deposit's block model, and determine the specific weight.

Determining the block dimensions is one of the critical stages of estimating a deposit's reserves. The dimensions of the blocks depend on various factors, such as the distance of the drilling grid, the dimensions of the steps, the dimensions of the selected mining blocks, and the resolution required in the geological boundaries.

The grade-tonnage information of the deposit is considered vital as it helps mine managers obtain the correct parameters for future planning.

Vertical sections also carried out the reserve estimation to verify the estimation space and reserve evaluation calculations. In this method, the horizontal or vertical sections of the deposit area are drawn at different levels or profiles. Then, the area covered by the mineral substance is

calculated in each section. Having the area in each section and the distance between two adjacent sections and assuming that the changes in the thickness of the mineral material between two adjacent sections are linear, the volume of the space between the two sections (i.e., the volume of the mineral material that is copper ore) is calculated.

After calculating the ore's volume, the average grade between sections is calculated using the weighted average method. Then, the specific weight corresponding to the desired grade is calculated. Finally, the product of the particular weight multiplied by the volume will increase the ore's tonnage.

3- CONCLUSION

Additional exploration studies have been carried out in a limit with a surface area of 56 hectares northwest of the region, including topographic mapping, preparation of a 1:1000 mineralogical and tectonic map, core drilling, logging, sampling, and reserve estimation.

From the lithological point of view, the Chahmusa area includes all types of volcanic rocks, such as pyroclastic and volcanoclastic rocks, with intermediate to acidic compositions.

In order to obtain the geometry of the deposit and estimate the reserve, 66 coring boreholes with a total length of 13360.50 meters, drilling, and lithological and mineralogical logging were carried out in the area; of these, 22 cored boreholes with a total length of 3826 meters have been used in reserve evaluation. In general, 4099 original and 355 duplicate samples were obtained and tested for ICP and CuO analyses. Based on the results of lithological, alteration, and mineralization investigations in the Chahmusa copper deposit, it is inferred that this deposit is placed in the category of copper deposits of manto type.

To build the model's estimation space, grade structure was used based on information on mineralization-controlling faults. The grade information of boreholes with a copper grade of more than 0.1% was obtained using the Leapfrog and StudioRM software packages.

Classical statistical studies were first conducted to estimate the reserve, and based on that, the grade distribution of the studied elements, such as copper and silver, was checked through the grade histogram. Then, the related statistical parameters were calculated. There was a significant correlation between copper and silver; as a result, due to the low grade of silver, further studies were conducted only on copper, and the grade trend was investigated in the x, y, and z directions. Consequently, no trend was observed in this section. The out-of-order values were checked to reduce the estimation's relevant effects. As a result, no out-of-order data was found. Considering that most of the samples were 1 meter long, in order not to take average and make the quality of the samples unrealistic, no composite was created. Geostatistical studies were carried out by drawing unidirectional variograms. Using a fixed ellipse to estimate the blocks is wrong due to the presence of slope changes and local extensions in the veins. In this deposit, due to the extreme changes in the grade of the samples and to separate the boundaries of ore and waste better, the dimensions of the estimated blocks were considered equal to 1 meter in each direction.

Reserve estimation was carried out using search ellipse specifications, optimized estimation parameters, and block model, as well as by applying the geostatistical ordinary kriging and inverse distance square methods. The related results were presented based on the appropriate results of the ordinary kriging method. From the specific weight tests on the taken ore samples, the average specific weight of 2.7 tons per cubic meter was obtained for the ore. In order to check the reserve estimation results, vertical sections were also used to calculate the reserve estimation. Consequently, its results confirm the estimation accuracy using the geostatistical ordinary kriging method. The oxide zone was separated based on the copper oxide grade, considering the oxide ratio of 30%. The estimated geological reserve is 4.4 million tons, with an average copper content of

0.74%. Of this amount, 1.3 million tons with an average copper grade of 0.75% are the reserves of copper oxide type, and 1.3 million tons with an average copper grade of 0.73% are the reserves of copper sulfide type.

The measured reserve (definite reserve) is 3.2 million tons with an average copper grade of 0.77% (the copper oxide part is 2.2 million tons with a copper grade of 0.78%, and the copper sulfide part is 950 thousand tons with a copper grade of 0.75%).

REFERENCES

1. Abedian, N., and Dari, M., 1996, review of copper mines of Semnan Province, Organization of Industries and Mines of Semnan Province [In Persian]
2. Ahmadi Shad, A., 1997, Mineralogical, Alteration and Litho-geochemical Study of Gold in Bago Area (Damghan KohZar), Master Thesis in Economic Geology, Shahid Beheshti University, Tehran [In Persian]
3. Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East. Geological Survey of Iran.
4. Borna, B., and Eshgabadi, M., 1997, evaluation and exploration report of lead and zinc deposits and indices of Semnan Province, Semnan Province Industries and Mines Organization [In Persian]
5. Eshraghi, S., A. and Jalali, A., 2006, geological report and map 1/100,000 Moalleman, The Geological Survey and Mineral Exploration of Iran [In Persian]
6. Fard, M., Rastad, A., Mehrparto, M., and Qadri, M., 2000, Gandi epithermal gold deposit (base metals), southeast of Damghan, 5th conference of the Geological Society of Iran, University of Tehran [In Persian]
7. Geological map of Chahmusa area with the scale 1:1000, 2021, MEMRADCO and MEMSCO company .
8. Golpaei, S., 2008, Preliminary explorations of the mine of metallic elements in the northeast of Moalleman-Semnan with a unique attitude to gold, Master thesis in Economic Geology, Islamic Azad University, North Tehran Branch [In Persian]
9. Houshmandzadeh, A., Alavi Naini, M., and Haqi-pour, A., 1998, Evolution of Geological Phenomena in Troud Region, from the Precambrian to the present era, The Geological Survey and Mineral Exploration of Iran [In Persian]
10. Huber, H. Stocklin, J., 1956. Geological report of the Troud-Moalleman area, N. I. O. C., 40 p.
11. Imam Juma, A., 2006, Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Chahmusa copper deposit (northwest of Turud, Semnan province), Master thesis, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University [In Persian]
12. Jafarian, A., 2007, review of the petrology of the volcano-plutonic arc of the Koh-Zar-Troud mountain range and associated mineralization complexes, Bachelor's-Master thesis, Faculty of Geology, University of Tehran Science Campus [In Persian]
13. Karim-Nejad Tari, S., 2003, Economic Geology of Ahan Rabai Mine (South of Damghan), Master Thesis in Economic Geology, Islamic Azad University, North Tehran Branch [In Persian]
14. Kohansal, R., 1998, Investigation of semi-deep intrusive masses in the range of 1:100,000 Moalleman Damghan, Master thesis, Islamic Azad University, North Branch [In Persian]
15. Mehri, B., 1998, geology, mineralogy, geochemistry, facies analysis and genesis of Khanjar lead-silver deposit (south of Damghan), Master thesis in economic geology, Tarbiat Modares University, Tehran [In Persian]
16. Pirozfar, P., 2006, Mineralogy, Geochemistry and Origin of Panjkoh Iron Deposit, South East of Damghan, Master Thesis in Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran [In Persian]
17. Rashidenjad Omran, N., 1992, investigation of lithological and magmatic evolutions and its relationship with gold mineralization in Bago area, master Thesis in petrology, Tarbiat Moalem University, Tehran [In Persian]
18. Road maps of Iran with the scale of 1:2500000, 2021, National Cartographic Center.
19. Sadeghi Falakdehi, p., 2003, Economic Geology of Chahmusa mine, Northwest of Troud, Semnan Province, Islamic Azad University, North Tehran Branch [In Persian]
20. Shamanian Isfahani, G. H., 2003, study of hydrothermal alteration and mineralization of basic and precious metals in Moalleman region, Ph.D. thesis in economic geology, Shahid Beheshti University, Tehran [In Persian]
21. Sheibi, M., 2004, petrological and geochemical investigation of Panjkoh iron deposit (south of Damghan), Master Thesis, University of Tehran. [In Persian]
22. Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran, A review: Amer, Assoc, Petrol Geologists 52, pp 1229-1258.
23. Tajuddin, H. AD, 1998, Geology, Mineralogy, Geochemistry and Mineral Genesis of Daristan Gold, Master Thesis in Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran [In Persian.]
24. The Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 1996, Geochemical Exploration Project of Semnan-Kashmar River Sediments [In Persian]
25. Zulfaqari, p., 1998, petrology of Eocene volcanic rocks in Moalleman Damghan, Master Thesis, Islamic Azad University, Tehran Branch [In Persian]



مقاله پژوهشی

مدل سازی و تخمین ذخیره معدن مس چاه موسی (شمال غرب ترود، استان سمنان)

رضا معزی نسب^۱، علی رضا عرب امیری^{۲*}، ابوالقاسم کامکار روحانی^۳

^۱ دانشجوی، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران reza.m1371@yahoo.com
^۲ دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران alirezaarabamiri@yahoo.com
^۳ استاد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران kamkarr@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

چکیده

محدوده چاه موسی به مساحت ۲۸۵۴ کیلومترمربع در استان سمنان قرار دارد. این معدن در جنوب شهر شاهرود و در شمال غرب روستای ترود قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش مدل سازی و تخمین ذخیره معدن چاه موسی است. مطالعات اکتشاف تکمیلی در ۵۶ هکتار از شمال غرب محدوده شامل نقشه برداری توپوگرافی ۱:۱۰۰۰، تهیه نقشه ۱:۱۰۰۰ زمین شناسی، حفاری های مغزه گیری، لاگ نگاری، نمونه گیری و تخمین ذخیره انجام شده است. از دیدگاه زمین شناسی این محدوده به لحاظ مشخصات سنگ شناختی شامل انواع سنگ های آتشفشانی تا آذرآواری و آتشفشانی - تخریبی با ترکیب های حدواسط تا اسیدی است؛ که در بخش هایی دایک مشاهده می شود. بر اساس مطالعات زمین شناسی اقتصادی، ذخیره مس محدوده چاه موسی در رده ذخایر تیپ مانتو طبقه بندی می شود. برای دستیابی به هندسه کانسار و تخمین ذخیره تعداد ۶۶ گمانه مغزه گیری به متر اژ کل ۱۳۳۶۰۵۰ متر حفاری، مغزه گیری، لاگ نگاری در محدوده انجام شد که از این میان تعداد ۲۲ گمانه و ۳۸۲۶ متر در ارزیابی ذخیره مورد استفاده قرار گرفته است. برای ساخت فضای تخمین مدل عیاری - ساختاری بر اساس اطلاعات گسل های کنترل کننده کانی زایی و اطلاعات عیار گمانه ها با عیار مس بیش از ۰/۱ درصد و با استفاده از نرم افزارهای مختلف استفاده شد. تخمین ذخیره با استفاده از مشخصات بیضوی جستجو، پارامترهای بهینه سازی شده تخمین و مدل بلوکی ساخته شده و با روش های کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله انجام شد. نتایج روش کریجینگ معمولی، در مقاله ارایه شده است. تفکیک زون اکسیدی بر اساس عیار مس اکسیدی و در نظر گرفتن نسبت اکسیدی ۳۰ درصد انجام شد که بیشترین عیار مس اکسید ۳/۷۱ درصد است. میزان ذخیره زمین شناسی با عیار حد ۰/۱ درصد مس ۴/۴ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۴ درصد است که از این مقدار ۳/۱ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۵ درصد ذخیره اکسیدی و ۱/۳ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۳ درصد سولفیدی است. ذخیره اندازه گیری شده (ذخیره قطعی) ۳/۲ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۷ درصد (بخش اکسیدی: ۲/۲ میلیون تن با عیار مس ۰/۷۸ درصد، بخش سولفیدی: ۹۵۰ هزار تن با عیار مس ۰/۷۵ درصد) است.

کلمات کلیدی:

اکتشاف، تخمین ذخیره، چاه موسی، شاهرود، ترود، مدل سازی، مس



۱- مقدمه

دسترسی به تروود و در فاصله ۱۵ کیلومتری آن قرار گرفته است (شکل ۱).

دو راه دسترسی به محدوده چاه موسی وجود دارد که یک راه دسترسی از طریق جاده آسفالتیته شاهرود به تروود و مسیر دوم جاده دامغان به حسینان است.

محدوده چاه موسی با طول جغرافیایی ۵۴/۵۲ و عرض جغرافیایی ۳۵/۲۹ از مجموعه معادن مجتمع مس چاه موسی در استان سمنان است که ۲۸/۴۵ کیلومترمربع وسعت دارد. این معدن در ۱۳۵ کیلومتری جنوب غرب شاهرود، در مسیر



شکل ۱- موقعیت و راه‌های دسترسی به محدوده چاه موسی (نقشه راه‌های ایران مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، ۱۴۰۰) و (Google Earth)

ناحیه ترود- چاه‌شیرین به دلیل فعالیت‌های معدنی و لرزه‌خیزی از دیرباز مورد توجه محققان بوده است.

اطلاعات ثبت‌شده در وزارت صنعت، معدن و تجارت حکایت از اولین بهره‌برداری در سال ۱۳۴۰ کانسار چاه‌موسی با ذخیره ۱۲۰۰۰ تن می‌کند. البته بیشتر فعالیت‌ها اکتشافی بوده و بهره‌برداری آنچنانی از معدن نشده است. هابر و استوک‌کلین^۱ در سال ۱۹۵۶ زمین‌شناسی ناحیه ترود- معلمان را در قالب برنامه‌های شرکت ملی نفت ایران بررسی کردند که نتایج آن پایه و اساس مطالعات این ناحیه است. در سال ۱۹۶۸ مطالعات مبسوطی توسط گروه مجارستانی انجام شد و اطلاعات جدیدی در مورد زمین‌شناسی ناحیه پدید آمد، این گروه برای بررسی استعداد ذخیره این ناحیه از دو روش پتانسیل خودزا و مقاومت ویژه بهره گرفت و وجود سولفید مس را تایید کردند. در سال ۱۳۵۴ گزارشات پراکنده‌ای از منطقه به وسیله شرکت باریت فلات ایران با انجام حفاری‌های کم‌عمق و پودری انتشار یافت که نتایج آن اعلام ذخایری برای بخش اکسیدی نواحی امیدبخش بوده است. هوشمندزاده و همکاران (۱۳۵۷) نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ ترود و گزارش آن را تهیه کردند. از لحاظ سنی، کانسار چاه‌موسی به اوایل ائوسن- الیگوسن نسبت داده می‌شود. جعفریان (۱۳۶۸) سنگ‌های آذرین محور ترود- باغو را مورد مطالعه قرار داده است که نتیجه آن بررسی سنگ‌شناسی قوس ولکانوپلوتونیک رشته‌کوه کوه‌زر- ترود و مجموعه‌های کانه‌زایی وابسته است. رشیدنژاد عمران (۱۳۷۱) در رساله دکتری خود تحولات سنگ‌شناسی و ماگمایی و ارتباط آن با کانی‌سازی طلا در منطقه باغو و کانی‌زایی‌های اطراف را مورد بررسی قرار داد. ژئوشیمی آبراه‌های ناحیه در پروژه اکتشافات ژئوشیمی محور سمنان- کاشمر در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در سال ۱۹۹۶ مورد ارزیابی قرار گرفت. عابدیان و دری (۱۳۷۵) در گزارشات بررسی کانسارهای مس استان سمنان، کانسار چاه موسی را مورد ارزیابی قرار دادند و از آن به عنوان اولویت اول برای ادامه کارهای اکتشافی نام برده‌اند. برنا و عشق‌آبادی (۱۳۷۶) در گزارش ارزیابی و اکتشافی کانسارها و اندیس‌های سرب و روی استان سمنان، کانی‌زایی منطقه قله کفتران را مورد بررسی قرار داده‌اند که همجواری منطقه قله کفتران با معدن چاه‌موسی نشان‌دهنده ادامه روند کانی‌زایی بوده است. احمدی‌شاد (۱۳۷۶) کانی‌شناسی، دگرسانی‌ها و مطالعه لیتوژئوشیمیایی کانسار باغو در کوه‌زر دامغان را بررسی کرد. کهنسال (۱۳۷۷) و ذوالفقاری (۱۳۷۷) در بخشی از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خود

سنگ‌شناسی چاه‌موسی را مورد مطالعه قرار داده‌اند که به ترتیب نتایج آن‌ها منجر به بررسی توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف و بررسی سنگ‌شناسی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن بوده است. تاج‌الدین (۱۳۷۷) در پایان‌نامه خود زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز معدنی طلای دارستان در حوالی باغو را مورد بررسی قرار داد. مهری (۱۳۷۷) زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی، آنالیز رخساره و ژنز کانسار سرب- نقره خانجار در جنوب دامغان را در پایان‌نامه خود مورد بررسی قرار داده است. گلپایی (۱۳۷۸) در پایان‌نامه خویش اکتشافات مقدماتی عناصر فلزی در شمال‌شرق معلمان با نگرشی ویژه به طلا را مورد بررسی قرار داده است. فرد (۱۳۸۰) کانی‌زایی و تیپ کانسار سرب و روی طلای گندی را در پایان‌نامه خود بررسی قرار داده که نتیجه آن کانسار اپی‌ترمال طلا گندی بوده است. شمعیان اصفهانی (۱۳۸۲) در رساله دکتری خود کانی‌زایی در کانسار اپی‌ترمال سرب و روی و طلای گندی را به تفصیل مورد بحث قرار داده است که از نتایج آن می‌توان به مطالعه دگرسانی و کانی‌سازی گرمایی فلزات پایه و گرانبها اشاره کرد. صادقی فلکدهی (۱۳۸۲) زمین‌شناسی اقتصادی کانسار چاه‌موسی را بررسی کرد که نتیجه آن مطالعه روند کانی‌زایی و معرفی تعدادی نواحی امیدبخش بوده است. کریم‌نژاد (۱۳۸۲)، شیخی (۱۳۸۳) و پیروزفر (۱۳۸۵) به طور جداگانه در پایان‌نامه‌های خود کانی‌زایی آهن در کانسار آهن پنج‌کوه را مورد بررسی قرار داده‌اند که نتایج آن‌ها به ترتیب مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی، بررسی سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانسار است. امام‌جمعه در سال (۱۳۸۵) در پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خود در کانسار مس چاه‌موسی مطالعات مبسوطی انجام داده است که می‌توان به مطالعات زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار اشاره کرد.

در طی سال ۱۳۹۴ مطالعات اکتشافی تکمیلی در محدوده چاه‌موسی در قالب تهیه نقشه‌ها و گزارشات موضوعی مختلف انجام شد که عبارتند از:

- تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰
- برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی (۷۷۸۰ نقطه)
- حفر ۱۵ حلقه گمانه مغزه‌گیری و ۸۹ گمانه پودری
- تهیه لاگ سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و مطالعات میکروسکوپی مغزه‌های حفاری شده
- در نهایت تعیین ذخیره موجود محدوده چاه‌موسی

¹ Huber and Stocklin

۲- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

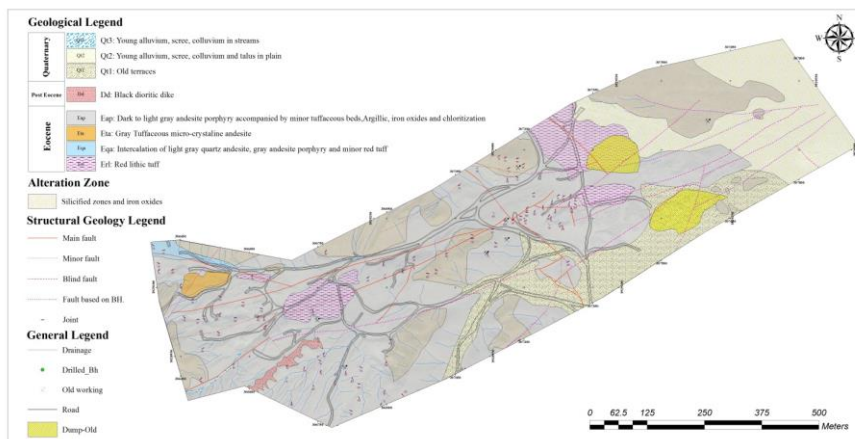
کمر بند ترود- چاه شیرین حدود ۱۰۰ کیلومتر طول و چینه‌شناسی متنوعی دارد. نیمه شرقی این کمر بند غالباً از واحدهای آتشفشانی سنوزوئیک تشکیل شده و در نیمه غربی آن واحدهای رسوبی مربوط به ادوار زمین‌شناسی گسترش قابل توجهی دارد. محدوده مورد مطالعه در شرق این کمر بند و در ولکانیک‌های ائوسن قرار گرفته است.

به طور کلی در منطقه ترود دو بخش آتشفشانی در شمال و جنوب آن قرار دارد؛ که به لحاظ سنگ‌شناسی، ترکیب کانی-شناسی و بافت با یکدیگر اختلاف دارند. محدوده مورد مطالعه که در شمال غرب منطقه ترود واقع شده است ادامه شرقی ولکانیک ترود- چاه شیرین است. این منطقه در یک نوار ماگمایی متشکل از سنگ‌های آتشفشانی و پلوتونیک واقع شده که حجم عمده آن را سنگ‌های آتشفشانی تشکیل داده است. هوشمندزاده و همکاران (۱۳۵۷) این زون را به نام باریک ترود- چاه شیرین نامگذاری نکرده‌اند که میان دو غسل اصلی ترود و انجیلو قرار گرفته است و در کناره شمالی فروافتادگی کویر بزرگ جای دارد.

در منطقه مورد بررسی قدیمی‌ترین سنگ‌ها از نوع دگرگونی و متعلق به پرکامبرین است که غالباً در شمال شرق ترود برونزدگی دارد. در رشته کوه‌های ترود- چاه شیرین، قدیمی‌ترین رخنمون‌ها را مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی- دگرگونی با سن سیلورین- دونین تشکیل می‌دهند که عموماً در نیمه جنوب غربی این رشته، در شمال غرب معلمان برونزد دارند. البته بخشی از برونزدگی‌های نیمه جنوب غربی رشته کوه‌های ترود- معلمان از رسوبات ژوراسیک و کرتاسه تشکیل شده و عمدتاً مجموعه آتشفشانی- نفوذی ائوسن و جوان تر را تشکیل می‌دهد.

محدوده چاه‌موسی در بخش شرقی کمر بند آتشفشانی- نفوذی ترود- چاه شیرین در چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ (هوشمندزاده و همکاران، ۱۳۵۷) و برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ (معلمان (اشراقی، ۱۳۸۵) قرار گرفته است. این کمر بند در مجموعه ماگماتیسیم شرق ایران در زون سبزوار قرار می‌گیرد (علوی، ۱۹۹۱). عمده تحولات زمین‌شناسی این ناحیه متأثر از عملکرد گسله‌هایی با روند شمال شرق- جنوب غرب است که این ناحیه را به نوارهایی در همین امتداد تقسیم می‌کند (هوشمندزاده و همکاران، ۱۳۵۷). سنگ‌های آتشفشانی مربوط به سیلورین، تریاس و ژوراسیک به صورت میان لایه با ضخامت کم مشاهده می‌شود. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن با توده‌های عمیق- نیمه عمیق با سن احتمالی ائوسن فوقانی تا الیگوسن، گنبد‌های آندزیتی- داسیتی و دایک‌های حد واسط تا بازیک قطع شده‌اند. نیمه شرقی این زون از واحدهای آتشفشانی، آتشفشانی- رسوبی، توده‌های نفوذی و دایک‌های سنوزوئیک تشکیل شده است. سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی در زون مورد بررسی ضخامت زیادی دارند که به شکل دگرشیب بر روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند. جنس سنگ‌های آتشفشانی متفاوت است و عمدتاً از تناوبی از فوران‌های گدازه و مواد آذرآواری با ترکیب اسیدی تا بازیک تشکیل شده‌اند.

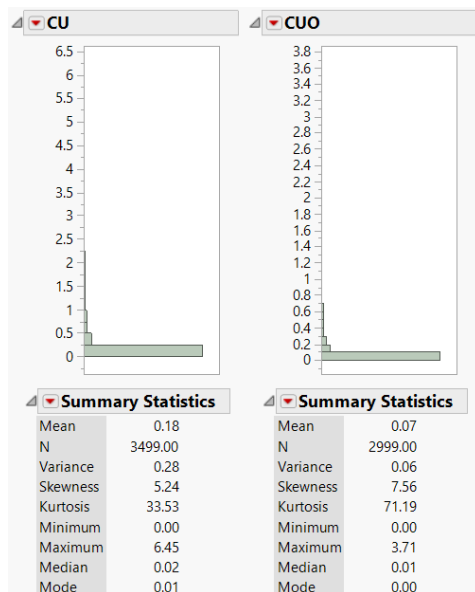
به طور کلی واحدهای سنگ‌چینه‌ای اصلی در منطقه مورد مطالعه با یک روند شمال شرقی- جنوب غربی شامل گدازه‌های با ترکیب آندزیت پورفیری تا مگاپورفیری است که در قسمت‌هایی با توف‌های قرمز رنگ (بعضاً لیتیک توف) و آندزیت توف همراه می‌شود. این مجموعه با دایک‌های دیوریتی سیاه رنگ که عمدتاً روند شمال شرقی- جنوب غربی دارند قطع می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده چاه‌موسی (شرکت ممرادکو و معیارصنعت، ۱۴۰۰)

مولیبدن، نقره، آهن، گوگرد، سرب و روی و نظایر آن، لاگ‌های زمین‌شناسی گمانه‌ها، اطلاعات مربوط به شاخص مغزه‌بازایی شده (CR) و شاخص کیفی سنگ (RQD) است (شکل ۳).

با استفاده از اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی ایجاد شده، موقعیت حفاری و راستای آزمون این گمانه‌ها تهیه شد (شکل ۴).



شکل ۳- هیستوگرام و اطلاعات آماری عیار کل نمونه‌ها مشخصات گمانه‌های یاد شده در جدول ۱ آمده است.

روند عمومی و غالب در زون ترود- چاه‌شیرین؛ شرق، شمال‌شرق، غرب، جنوب‌غرب است که در راستای گسل‌ها و محور چین‌ها نمایان است. ساختمان‌های بزرگ تاقدیسی و نادویسی به وسیله گسل‌های تراستی مایل، قطع شده‌اند. روند این گسل‌ها کم و بیش شمال‌شرقی است که در طول آن‌ها، مقادیر زیادی نمک تزریق شده است.

از نظر ساختاری ولکانیسم منطقه مورد مطالعه محصور در بین گسل‌های امتدادلغز با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی است و امتداد جایگزینی توده‌های نفوذی و آتشفشانی و روند غالب ساختاری موجود در آن‌ها، از جمله امتداد مجموعه دایک‌های موازی همخوان با آن‌ها در راستای گسل‌های اصلی منطقه است. شروع ولکانیسم با در نظر گرفتن ترادف آتشفشانی، با تشکیل سنگ‌های آتشفشانی ماهیت دوگانه کالک‌آلکان- آلکان شمال ترود بوده و به دنبال آن سنگ‌های الیوین بازالتی منطقه کاهوان (در جنوب ترود) با ماهیت آلکان به سطح رسیده‌اند (فرد و همکاران، ۱۳۸۰).

۳- مطالعات اکتشافی

نتایج حاصل از شواهد سطحی، برداشت‌های زمین‌شناسی و مطالعات مغناطیس‌سنجی محدوده مورد مطالعه سبب تعیین نقاط حفاری با ۶۶ حلقه گمانه به متر از کلی ۱۳۳۶۰.۵۰ متر در محدوده مورد بررسی حفر شد. از مغزه‌های حفاری ابتدا لاگ اولیه شده و سپس مطالعات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی بر روی آن‌ها انجام شد.

اهم اطلاعات این بخش شامل (نقشه توپوگرافی و زمین‌شناسی رقومی ۱:۱۰۰۰ محدوده) ۶۶ حلقه گمانه اکتشافی مغزه‌گیری با نتایج آنالیز ۳۵ عنصری (مس، اکسیدهای مس،

جدول ۱- مشخصات گمانه‌های اکتشافی محدوده چاه‌موسی

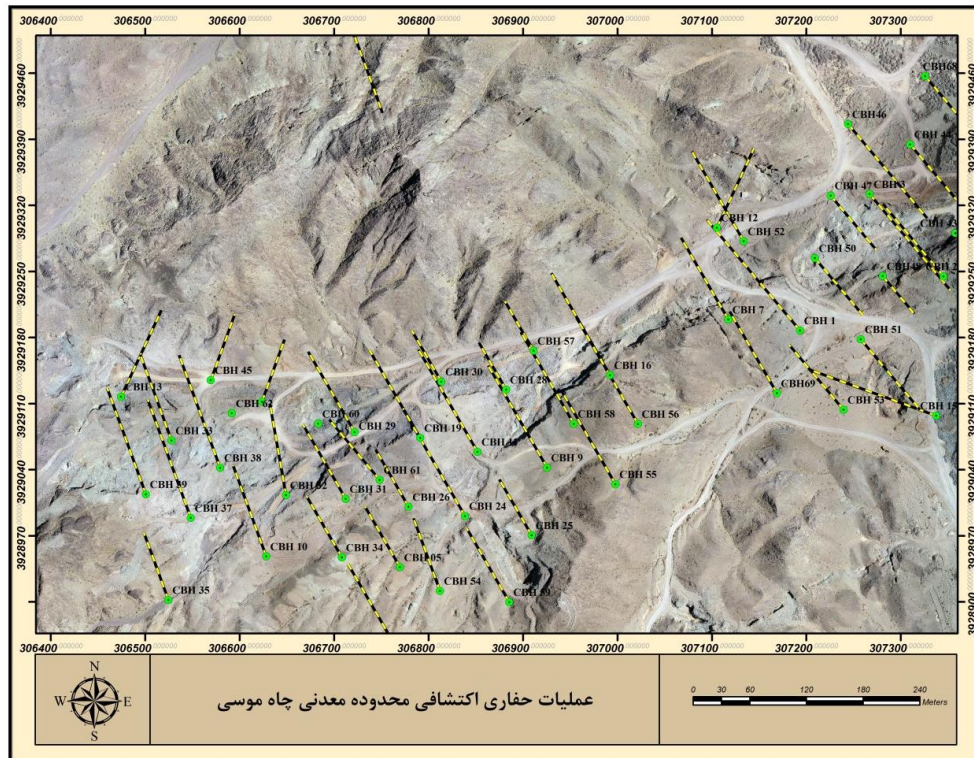
| BH_ID | X Collar | Y Collar | Z Collar | DIP | Azimuth | DEPTH (m) |
|--------|------------|-------------|----------|-----|---------|-----------|
| CBH 2 | 307345.544 | 3929244.866 | 1149.001 | 60 | 320 | 200.15 |
| CBH 1 | 307193.395 | 3929187.531 | 1155.055 | 60 | 320 | 306.95 |
| CBH 3 | 307267.263 | 3929332.053 | 1150.078 | 60 | 140 | 266.30 |
| CBH 4 | 306717.093 | 3929512.064 | 1176.398 | 60 | 160 | 200.00 |
| CBH 8 | 307650.332 | 3929417.765 | 1137.480 | 60 | 130 | 347.30 |
| CBH 6 | 307571.199 | 3929483.238 | 1139.549 | 60 | 140 | 485.65 |
| CBH 14 | 307694.988 | 3929511.94 | 1135.099 | 60 | 147 | 221.25 |
| CBH 15 | 307337.693 | 3929097.262 | 1150.752 | 60 | 290 | 287.15 |

ادامه جدول ۱

| BH_ID | X Collar | Y Collar | Z Collar | DIP | Azimuth | DEPTH (m) |
|--------|------------|-------------|----------|-----|---------|-----------|
| CBH 12 | 307105.462 | 3929296.515 | 1159.039 | 60 | 25 | 185.15 |
| CBH 17 | 308575.676 | 3928115.416 | 1098.322 | 60 | 190 | 170.15 |
| CBH 18 | 308652.601 | 3928143.571 | 1099.532 | 60 | 185 | 110.15 |
| CBH 9 | 306925.682 | 3929042.243 | 1167.793 | 60 | 330 | 250.00 |
| CBH 11 | 306851.833 | 3929059.013 | 1170.118 | 60 | 330 | 250.00 |
| CBH 19 | 306791.159 | 3929073.745 | 1174.77 | 60 | 330 | 215.10 |
| CBH 24 | 306838.664 | 3928990.917 | 1169.803 | 60 | 330 | 260.00 |
| CBH 20 | 307710.559 | 3929349.618 | 1134.731 | 60 | 140 | 170.05 |
| CBH 27 | 307568.79 | 3929420.536 | 1140.996 | 60 | 140 | 235.10 |
| CBH 23 | 307565.17 | 3929356.37 | 1144.98 | 60 | 140 | 221.10 |
| CBH 21 | 307638.854 | 3929347.373 | 1137.246 | 60 | 140 | 109.95 |
| CBH 31 | 306712.389 | 3929009.205 | 1176.468 | 60 | 330 | 182.10 |
| CBH 30 | 306813.604 | 3929133.284 | 1167.292 | 60 | 330 | 125.30 |
| CBH 26 | 306778.962 | 3929000.663 | 1175.374 | 60 | 330 | 140.15 |
| CBH 28 | 306882.176 | 3929124.779 | 1165.396 | 60 | 330 | 115.05 |
| CBH 32 | 306649.093 | 3929013.076 | 1179.189 | 60 | 350 | 197.15 |
| CBH 25 | 306909.205 | 3928970.526 | 1168.538 | 60 | 330 | 137.10 |
| CBH 10 | 306628.169 | 3928948.11 | 1181.527 | 60 | 340 | 205.80 |
| CBH 34 | 306708.341 | 3928947.138 | 1178.016 | 60 | 330 | 150.05 |
| CBH 37 | 306548.332 | 3928988.989 | 1183.314 | 60 | 340 | 267.10 |
| CBH 36 | 306761.723 | 3928858.81 | 1180.039 | 60 | 330 | 187.55 |
| CBH 39 | 306500.661 | 3929013.981 | 1182.688 | 60 | 340 | 240.40 |
| CBH 35 | 306524.570 | 3928901.992 | 1183.276 | 60 | 340 | 152.05 |
| CBH 38 | 306579.415 | 3929042.015 | 1170.701 | 60 | 340 | 254.15 |
| CBH 33 | 306527.873 | 3929070.998 | 1174.629 | 60 | 340 | 193.35 |
| CBH 29 | 306721.835 | 3929079.921 | 1171.600 | 60 | 330 | 196.75 |
| CBH 49 | 306623.527 | 3929112.113 | 1171.996 | 60 | 20 | 140.15 |
| CBH 45 | 306569.453 | 3929134.918 | 1180.685 | 60 | 20 | 149.10 |
| CBH 13 | 306474.313 | 3929117.404 | 1180.319 | 60 | 25 | 201.95 |
| CBH 54 | 306812.160 | 3928911.685 | 1176.579 | 60 | 340 | 163.50 |
| CBH 61 | 306748.376 | 3929029.284 | 1172.989 | 60 | 320 | 166.30 |
| CBH 5 | 306769.908 | 3928936.633 | 1175.537 | 60 | 330 | 149.15 |
| CBH 52 | 307133.873 | 3929282.04 | 1158.67 | 60 | 330 | 219.70 |

ادامه جدول ۱

| BH_ID | X Collar | Y Collar | Z Collar | DIP | Azimuth | DEPTH (m) |
|--------|------------|-------------|----------|-----|---------|-----------|
| CBH 51 | 307257.703 | 3929178.322 | 1152.168 | 60 | 140 | 195.10 |
| CBH 63 | 307959.428 | 3928013.044 | 1121.937 | 90 | - | 185.00 |
| CBH 64 | 308021.953 | 3927885.697 | 1121.307 | 90 | - | 122.40 |
| CBH 62 | 306591.847 | 3929099.917 | 1170.136 | 90 | - | 220.25 |
| CBH 41 | 307372.061 | 3929365.537 | 1148.083 | 60 | 140 | 250.45 |
| CBH 44 | 307310.125 | 3929384.687 | 1151.044 | 60 | 140 | 302.15 |
| CBH 47 | 307225.883 | 3929330.49 | 1152.547 | 60 | 140 | 150.10 |
| CBH 46 | 307244.407 | 3929406.153 | 1153.395 | 60 | 140 | 260.25 |
| CBH 43 | 307358.109 | 3929290.64 | 1134.863 | 60 | 140 | 229.30 |
| CBH 48 | 307281.014 | 3929245.131 | 1148.113 | 60 | 140 | 103.80 |
| CBH 65 | 307444.662 | 3929359.714 | 1145.899 | 60 | 140 | 206.05 |
| CBH 50 | 307209.227 | 3929264.208 | 1140.774 | 60 | 140 | 157.90 |
| CBH 66 | 307395.899 | 3929439.972 | 1146.533 | 60 | 140 | 218.20 |
| CBH 67 | 307491.575 | 3929438.582 | 1143.436 | 60 | 140 | 173.05 |
| CBH 68 | 307325.501 | 3929457.449 | 1148.787 | 60 | 140 | 194.05 |
| CBH 69 | 307168.376 | 3929122.344 | 1155.729 | 60 | 330 | 200.25 |



شکل ۴- نمایشی از موقعیت گمانه‌ها بر روی تصویر Orth

۴- مدل‌سازی ذخیره

تخمین عیار و ذخیره معدنی یک فرآیند بسیار مهم در یک پروژه معدنی در طول خط تولید برای کنترل عیار است و به دانشی دقیق از عیار و تناژ برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت نیاز دارد (افنی^۱ و دیگران، ۲۰۲۰).

اهمیت انتخاب روش‌های مناسب تخمین برای ارزیابی پروژه و برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت کانسارها ضروری است. در طول سال‌ها، روش‌های متعددی مانند روش‌های کلاسیک و روش زمین‌آماری برای تخمین ذخیره ماده معدنی تکامل یافته است (افراسته و دیگران، ۲۰۱۸).

روش‌های زمین‌آماری به میزان قابل ملاحظه‌ای در شناخت عیار، تناژ و رده‌بندی صحیح ذخیره کانسار به طراح کمک می‌کند. منشا چنین امری در قابلیت‌های ذاتی این روش‌ها همچون نازیب بودن خطای تخمین، ارایه واریانس تخمین، توجه به تداوم و پیوستگی ماهیت فضایی داده‌ها است. در مطالعات معدنی، روش‌های زمین‌آماری برای تخمین عیار و ذخیره قابل بازیابی در مقایسه با روش‌های دیگر ارجحیت داده شده است. چرا که روش‌های زمین‌آماری بسیار مناسب و قابل اعتماد برای مدل‌سازی و توزیع فضایی عیارهای ماده معدنی و ذخیره‌اند (عبدالستار^۲ و دیگران، ۲۰۱۹).

مدل‌های عمقی به مدل‌هایی گفته می‌شود که با استفاده از اطلاعات عمقی بدست آمده از حفاری ایجاد می‌شوند. این مدل‌ها با تعبیر و تفسیر موضوعات زمین‌شناسی مانند جنس سنگ، زون‌ها و نظایر آن ساخته می‌شوند و هدف نهایی از ساخت این مدل‌ها شناخت حجم و موقعیت ماده معدنی است.

مدل‌سازی عیار کانسار در یک فضای سه‌بعدی با بکارگیری داده‌های گمانه‌ها می‌تواند به شکل بازسازی یک ابرسطح در فضای سه‌بعدی تلقی شود. این ابرسطح از زون‌هایی تشکیل شده که نیاز است به صورت محلی تخمین زده شوند.

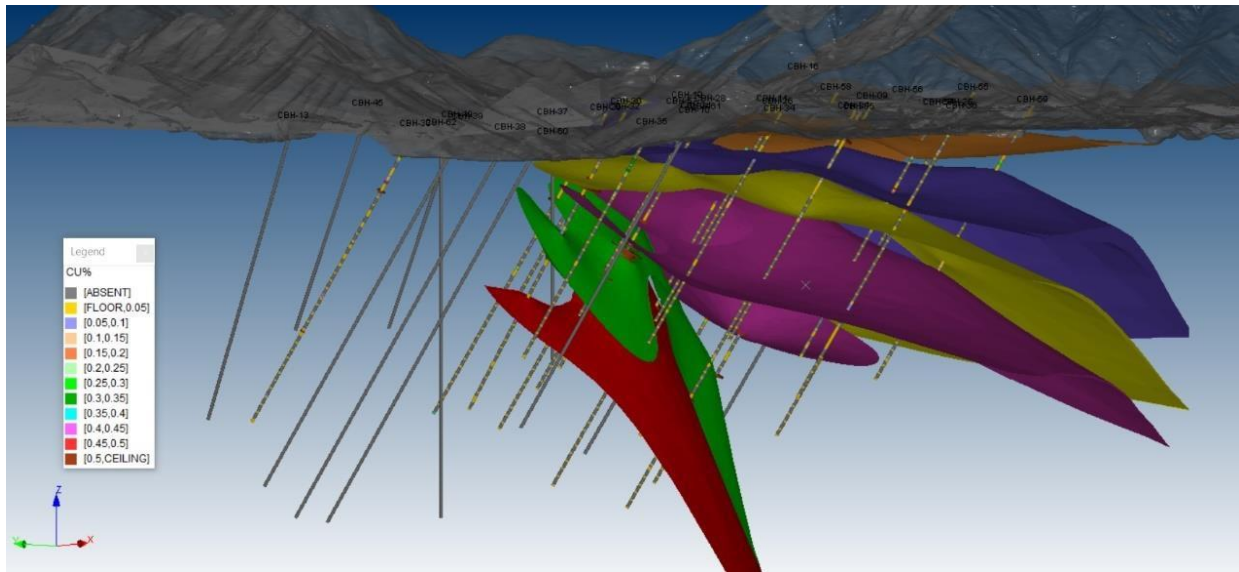
برای ساخت فضای تخمین مدل، عیاری- ساختاری بر اساس اطلاعات گسل‌های کنترل‌کننده کانی‌زایی و اطلاعات عیار گمانه‌ها با عیار مس بیش از ۰/۱ درصد و با استفاده از نرم‌افزارهای Leapfrog و Datamine RM استفاده شد. در شکل‌های ۵ و ۶ نماهای سه‌بعدی از مدل فضای تخمین آمده است. همچنین در شکل ۷ مقطعی از مدل فضای تخمین نشان داده شده است.

مدل‌سازی فضایی تغییرپذیری عیار در یک ذخیره به طور مستقیم به پارامترهای مهمی چون تناژ، مقدار فلز و میانگین عیاری در برابر عیار حد بستگی دارد (Battalgaazy & Madani, 2019).

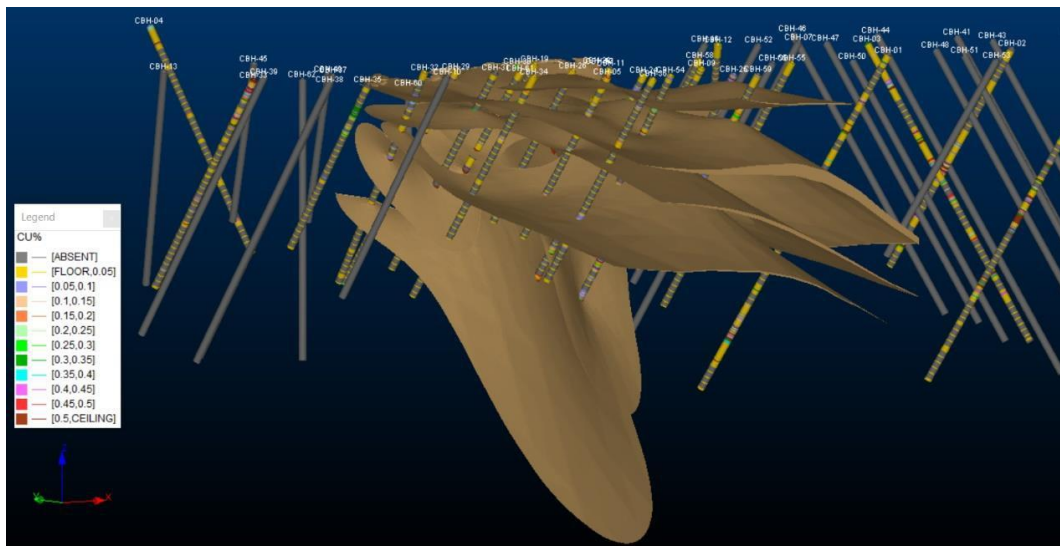
یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در عملیات معدنکاری عیارحد (پایین‌ترین عیار قابل استخراج) است. علت اینکه از عیارحد به عنوان یک شاخص حساس یاد می‌شود، وابستگی تعداد زیادی از دیگر پارامترهای معدنی به این کمیت است. تغییرات عیارحد روی عیار متوسط کانسار و تناژ ماده معدنی و باطله تاثیر گذاشته و در نتیجه پارامترهایی مانند جریان نقدینگی پروژه‌ها، عمر پروژه، ارزش خالص فعلی و محدوده نهایی نیز دستخوش تغییر و تحول می‌شوند. روش‌های متعددی برای تعیین عیارحد وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم Lane و یا تعیین عیارحد با استفاده از نمودار ارزش خالص فعلی- عیار اشاره کرد. این روش‌ها عمدتاً در مرحله طراحی معدن و با هدف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

¹- Afeni

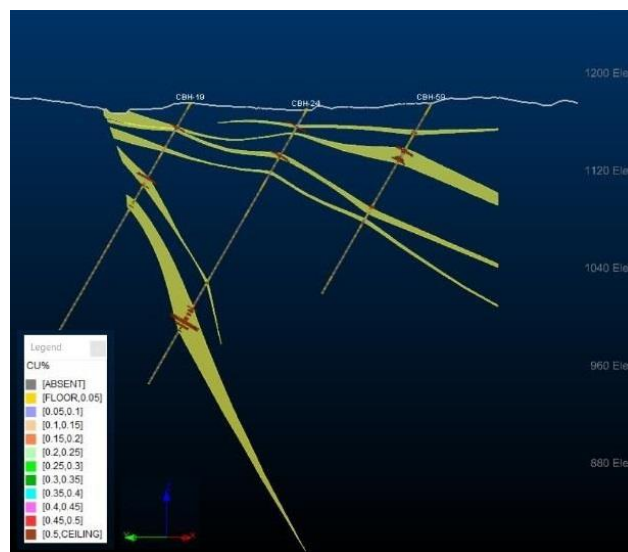
²- Abdessattar



شکل ۵- نمای سه بعدی از فضای تخمین



شکل ۶- نمای سه بعدی دیگر از فضای تخمین



شکل ۷- مقطعی از فضای تخمین

در تهیه مدل بلوکی کانسار از پارامترهای مندرج در جدول ۲ استفاده شد. در ادامه با استفاده از مدل سیمی سطح توپوگرافی و مدل سیمی کانسار دو ویژگی زیر برای مدل بلوکی تعیین شد:

- تمام بلوک‌ها زیر سطح توپوگرافی واقع‌اند.
- تمامی بلوک‌ها درون مدل سیمی تهیه شده برای کانسار قرار گرفته‌اند.

جدول ۲- پارامترهای استفاده شده در تهیه مدل بلوکی کانسار

| | | |
|-------------------------|----|---------|
| مختصات مبدا بلوک‌بندی | X | 306400 |
| | Y | 3928650 |
| | Z | 900 |
| ابعاد بلوک‌ها | Bx | 1 |
| | By | 1 |
| | Bz | 1 |
| تعداد بلوک‌ها در هر جهت | Nx | 85 |
| | Ny | 80 |
| | Nz | 40 |

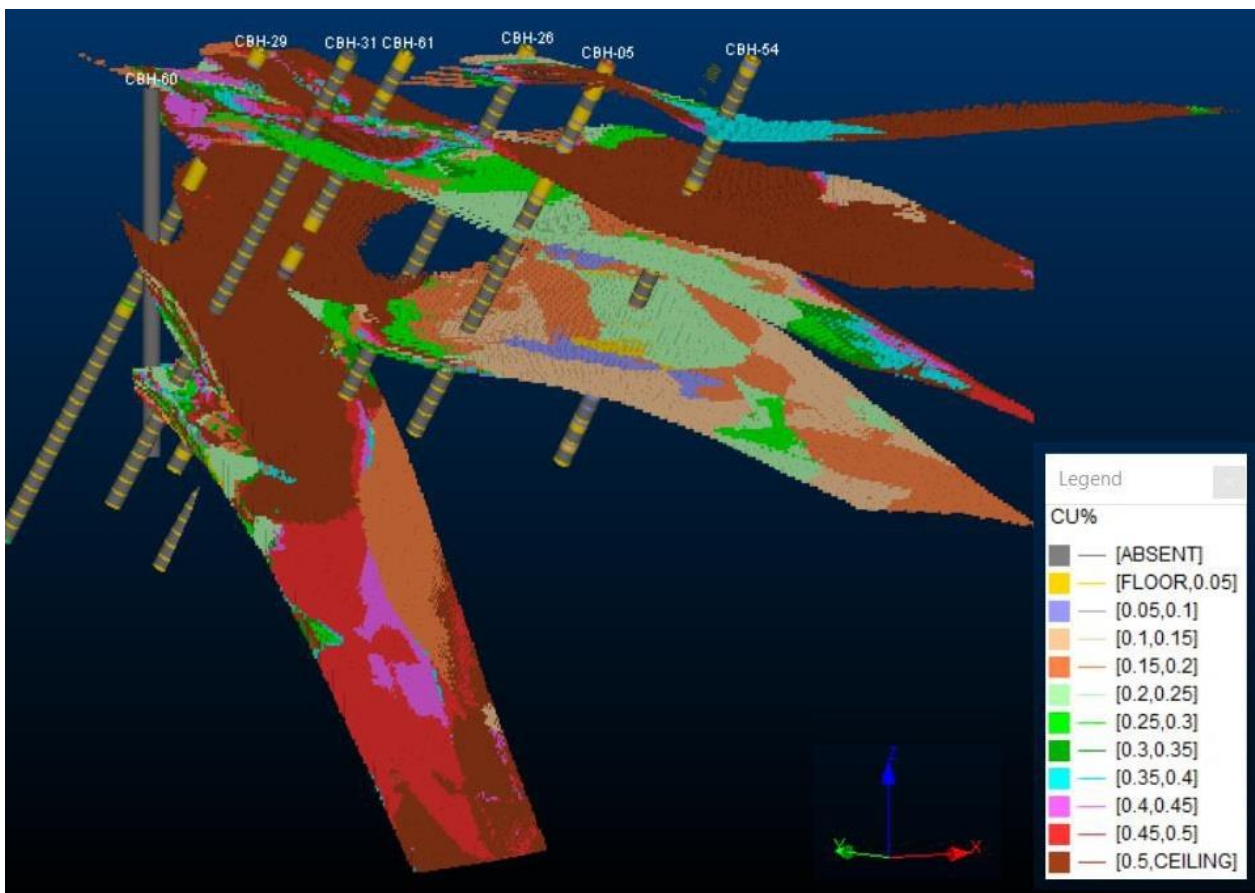
این مدل به عنوان مدل فضایی تخمین برای کانسار در نظر گرفته شده است (شکل ۸).

پس از مشخص کردن پارامترها و محدوده تخمین تنها نکته‌ای که برای ارزیابی ذخیره باقی می‌ماند، تعیین ابعاد بلوک، تهیه مدل بلوکی کانسار و تعیین وزن مخصوص است.

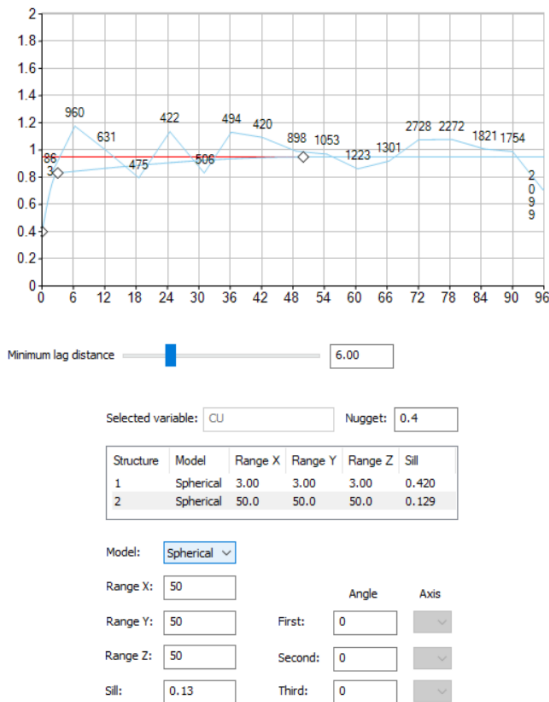
تعیین ابعاد بلوک از مراحل مهم تخمین ذخیره یک کانسار است. ابعاد بلوک به عوامل مختلفی مانند فاصله شبکه حفاری، ابعاد پله‌ها، ابعاد بلوک‌های معدن کاری انتخابی و وضوح مورد نیاز در مرزهای زمین‌شناسی بستگی دارد.

از دیدگاه زمین‌آماري بهترین ابعاد، نصف فاصله شبکه حفاری است؛ ولی این دیدگاه با لحاظ کردن سایر عوامل یاد شده قابل تغییر است. به‌طور تجربی بهترین ابعاد قابل قبول هم از نظر زمین‌آماري و هم از نظر وضوح در مرزهای معدنی، بین یک دوم تا یک چهارم فاصله گمانه‌ها است. در این مطالعه با توجه به تغییرات شدید عیار در نمونه‌ها و برای تفکیک بهتر مرزهای کانسنگ و باطله، ابعاد بلوک‌های تخمینی در هر جهت برابر ۱ متر در نظر گرفته شد.

براساس آزمایش‌های انجام گرفته، متوسط وزن مخصوص کانسنگ ۲٫۷ تن بر متر مکعب است.



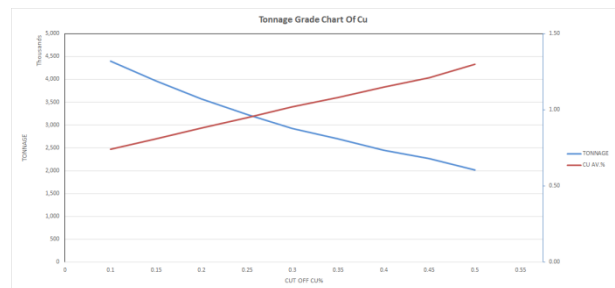
شکل ۸- نمایشی از مدل بلوکی تخمین نهایی مس



۵- منحنی عیار- تناژ و تخمین ذخیره کانسار

منحنی عیار- تناژ نمایشی از تاثیر عیارهای حد بر ذخایر معدنی است و این منحنی‌ها می‌توانند چندین عامل اصلاح-کننده را به طور هم‌زمان برای تخمین ذخایر معدنی در نظر بگیرند. منحنی عیار- تناژ یکی از ابزارهای بسیار مهم است که مدیران معدن را قادر می‌سازد تا برنامه صحیح بلندمدت، متوسط و کوتاه مدت را برای فرآیند تولید در ذخایر معدنی ارایه دهند. و این منحنی مورد نیاز است تا تناژ در عیارهای مختلف به دست آید. با توجه به داده‌های عیاری از هر بلوک، می‌توان ذخیره معدنی را بر اساس عیارحدهای مختلف محاسبه کرد (رضایی و دیگران، ۲۰۱۹).

شکل ۹ نتایج تغییرات عیار میانگین و تناژ در برابر تغییرات عیار حد را نشان می‌دهد.



شکل ۹- منحنی عیار- تناژ کانسار

در روش‌های زمین‌آماری، همبستگی فضایی داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. از این رو اساس این روش‌ها بر وجود ساختار فضایی داده‌هاست. واریوگرام مهم‌ترین ابزار برای بررسی همبستگی فضایی بین داده‌ها است. مهم‌ترین ویژگی واریوگرام نسبت به سایر ابزارهای آماری، ساده‌سازی ساختار تغییرپذیری است که موجب کاربرد بسیار وسیع آن در همه زمینه‌های وابسته به صنعت معدنی است.

واریوگرام و پارامترهای آن بر اساس واریوگرام تجربی تخمین زده می‌شوند. مدل دقیق واریوگرام برای هر متغیر ناحیه‌ای نامعلوم است اما بر اساس تعدادی نمونه یک واریوگرام تجربی به دست می‌آید و پس از برازش مدل مناسب به آن، پارامترهای مدل مانند آستانه، اثر قطعه‌ای و شعاع تاثیر برآورد می‌شود.

در این بخش واریوگرام‌های غیرجهتی برای مس مطابق شکل ۱۰ ترسیم و مدل کروی دو ساختاره مناسب بر آن برازش شد.

شکل ۱۰- واریوگرام غیرجهتی مس و مدل کروی دو ساختاره برازش یافته

ابعاد بیضوی بر اساس واریوگرام غیرجهتی و به اندازه دامنه واریوگرام انتخاب شد. به دلیل تغییرات شدید عیار در جهت Z بعد سوم بیضوی در این راستا ۱۰ متر انتخاب شد (جدول ۳).

جدول ۳- مشخصات بیضوی جستجوی مس

| | SDIST1 | SDIST2 | SDIST3 | SANGLE1 | SANGLE2 | SANGLE3 | SAXIS1 | SAXIS2 | SAXIS3 |
|----|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| CU | 50 | 50 | 10 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 3 |

برای محاسبه حجم کل یک کانسار، لازم است بین هر دو مقطع متوالی، حجم محاسبه شود و سپس همه حجم‌ها با هم جمع شوند.

پس از محاسبه حجم کانسنگ، عیار متوسط بین مقطع، به روش میانگین وزن‌دار محاسبه می‌شود. سپس وزن مخصوص متناظر با عیار مورد نظر محاسبه شده و حاصل ضرب وزن مخصوص در حجم، تناژ ماده معدنی را به دست می‌دهد.

نتیجه تخمین به روش کریجینگ، دو پارامتر عیار و واریانس کریجینگ برای هر بلوک است. با قراردادن این دو پارامتر میزان خطای تخمین هر بلوک به دست می‌آید.

بر اساس خطای به دست آمده، کانسار به بخش‌های اندازه-گیری شده، مشخص شده و استنباط شده به شرح زیر رده-بندی می‌شود:

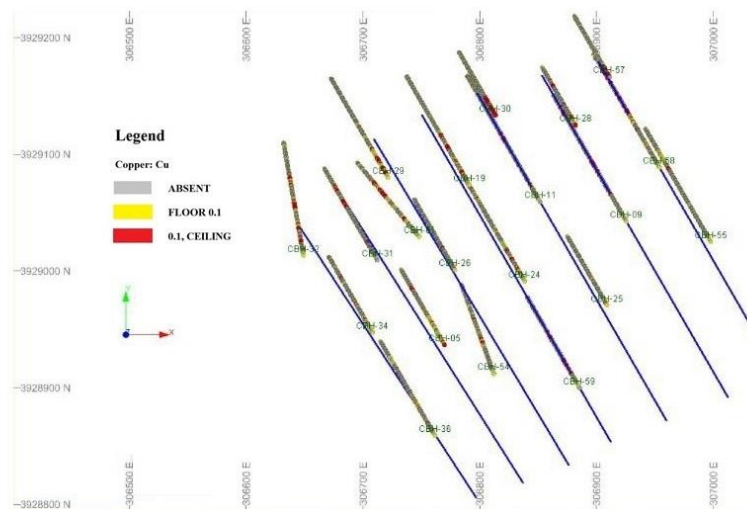
در شکل ۱۱ و ۱۲، نماهایی از مقاطع مختلف ترسیم شده برای این کانسار نشان داده شده است. در جدول ۴ نتیجه محاسبات مربوط به میزان ذخیره و عیار متوسط با روش مقاطع برای این کانسار آمده است.

- کلاس ذخایر قطعی یا اندازه‌گیری شده: بلوک‌هایی که خطای تخمین آن‌ها زیر ۲۰ درصد باشد.

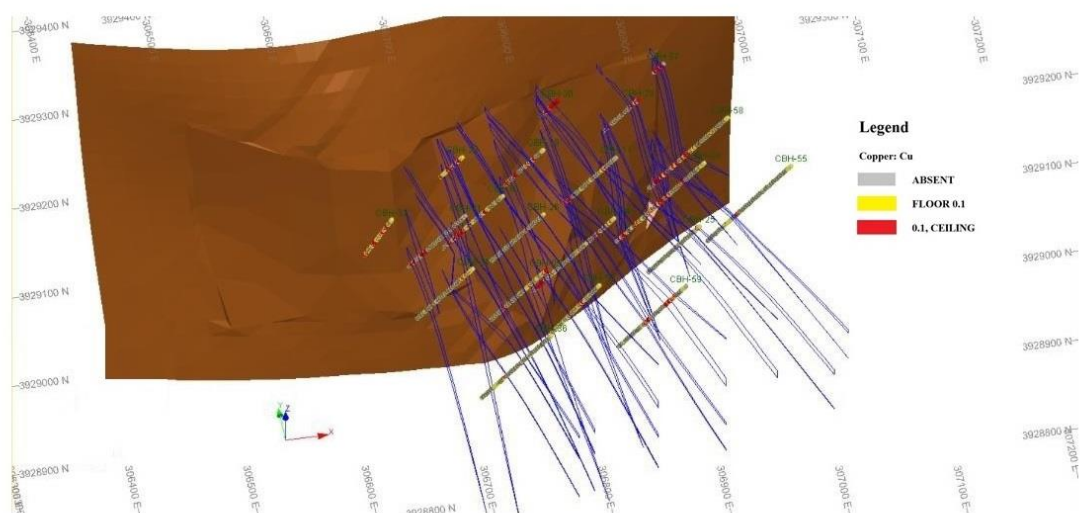
- کلاس ذخایر احتمالی یا شناسایی شده: بلوک‌هایی که خطای تخمین آن‌ها بین ۲۱ تا ۳۰ درصد باشد.

- کلاس ذخایر ممکن یا استنباط شده: بلوک‌هایی که خطای تخمین آن‌ها بیش از ۳۱ درصد باشد.

(الف)



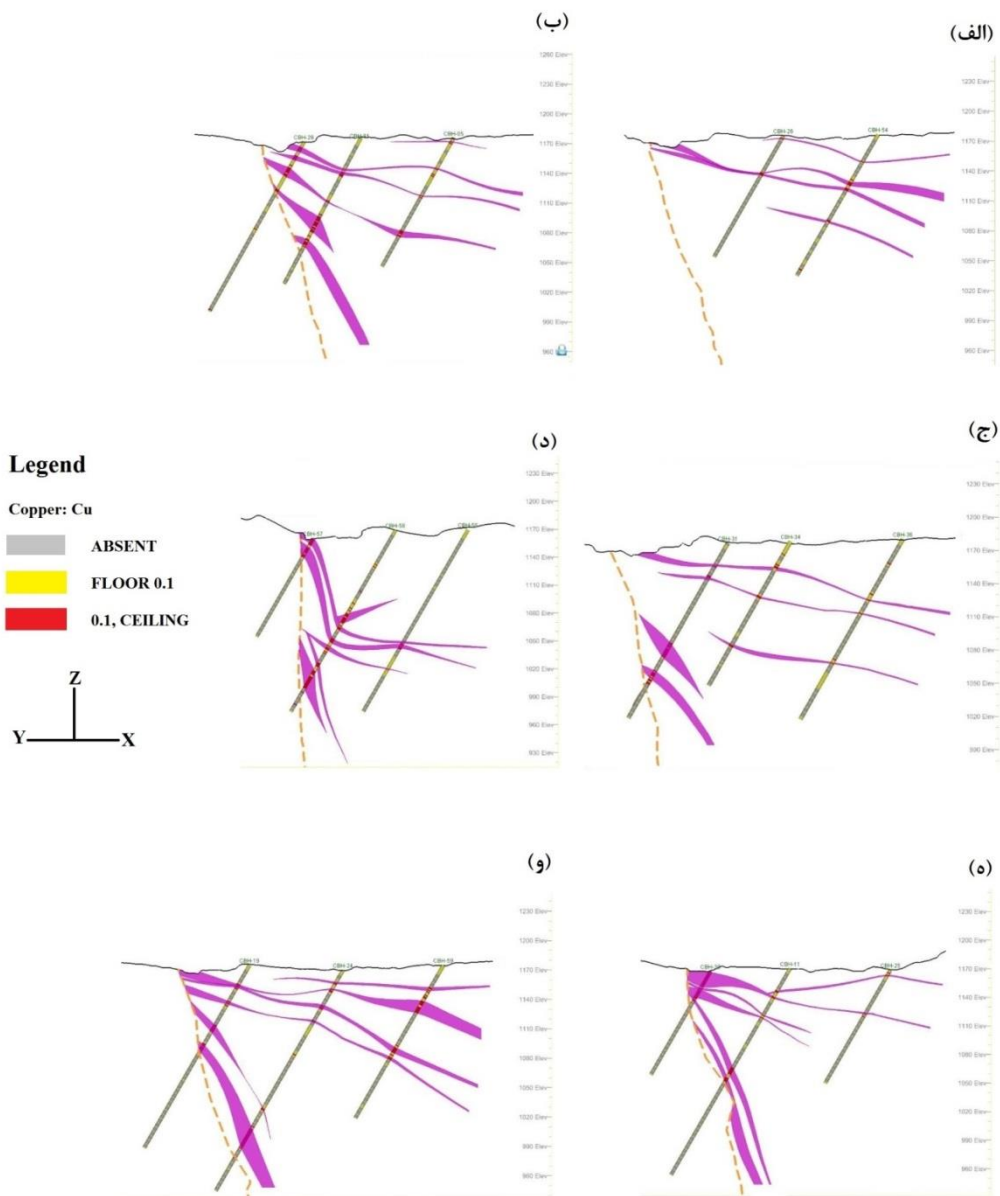
(ب)



شکل ۱۱- نماهایی از مقاطع قائم ترسیم شده برای کانسار

جدول ۴- حجم و عیار متوسط کل ذخیره به روش مقاطع قائم

| SECTION | VOLUME | DENSITY | TONNES | CU% | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|---------|-----------|---|-------|---------|-----|---------|------|-------|---------|-----|---------|-----|---|-----------|---|-----------|------|
| S1-S2 | 181,982 | 2.7 | 491,351 | 0.65 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S2-S3 | 107,396 | 2.7 | 289,969 | 0.8 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S3-S4 | 136,618 | 2.7 | 368,869 | 0.75 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S4-S5 | 256,244 | 2.7 | 691,859 | 0.82 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S5-S6 | 142,578 | 2.7 | 384,961 | 0.73 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S6-S7 | 362,850 | 2.7 | 979,695 | 0.68 </tr <tr> <td>S7-S8</td> <td>276,348</td> <td>2.7</td> <td>746,140</td> <td>0.66</td> </tr> <tr> <td>S8-S9</td> <td>198,752</td> <td>2.7</td> <td>536,630</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>1,662,768</td> <td>-</td> <td>4,489,474</td> <td>0.72</td> </tr> | S7-S8 | 276,348 | 2.7 | 746,140 | 0.66 | S8-S9 | 198,752 | 2.7 | 536,630 | 0.7 | - | 1,662,768 | - | 4,489,474 | 0.72 |
| S7-S8 | 276,348 | 2.7 | 746,140 | 0.66 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S8-S9 | 198,752 | 2.7 | 536,630 | 0.7 | | | | | | | | | | | | | | | |
| - | 1,662,768 | - | 4,489,474 | 0.72 | | | | | | | | | | | | | | | |



شکل ۱۲- نماهایی از مقاطع ترسیم شده برای کانسار

۶- نتیجه گیری

مطالعات اکتشاف تکمیلی در ۵۶ هکتار از شمال غرب محدوده شامل فعالیت‌های نقشه برداری توپوگرافی، تهیه نقشه ۱:۱۰۰۰ زمین‌شناسی، حفاری‌های مغزه‌گیری، لاگ‌نگاری، نمونه‌گیری و تخمین ذخیره انجام شده است.

از دیدگاه زمین‌شناسی محدوده چاه‌موسی به لحاظ مشخصات سنگ‌شناختی شامل انواع سنگ‌های آتشفشانی تا آذرآوری و آتشفشانی-تخریبی با ترکیب‌های حدواسط تا اسیدی است.

برای دستیابی به هندسه کانسار و تخمین ذخیره ۶۶ حلقه گمانه مغزه‌گیری به متر اژ کل ۱۳۳۶۰.۵۰ متر حفاری، لاگ نگاری در محدوده انجام شد که از این میان تعداد ۲۲ گمانه و ۳۸۲۶ متر در ارزیابی ذخیره مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی تعداد ۴۰۹۹ نمونه اصلی و ۳۵۵ نمونه تکراری برای آنالیزهای ICP و CuO اخذ و مورد آزمایش قرار گرفت. آنچه که از مطالعه سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی در کانسار مس چاه‌موسی ارایه شد، آن را در رده ذخایر مس تیپ مانتو قرار می‌دهد. در این دسته از کانسارها، کانی‌های اصلی شامل کالکوسیت و بورنیت بوده و در گدازه‌های بازالتی و آندزیتی جای دارند. کانی‌زایی عموماً در لایه‌های آتشفشانی روی داده که با دایک نفوذی تنوره‌ای و سیل دارای ترکیب گابرو دیوریت همراه‌اند و برخلاف سایر انواع کانسارها نبود یا اندک بودن پدیده‌های گرمایی سنگ میزبان از وجوه بارز آن‌هاست. معمولاً بر حسب شرایط رخنمون، درجات متفاوتی از اکسیداسیون در آن‌ها روی می‌دهد که کانی‌های حاصل از فراگرد هوازدگی شامل آتاکامیت و به مقدار کمتر بروکانتیت، مالاکیت و کریزوکلا است. در مواردی کوپریت و مس خالص نیز در آن‌ها وجود دارد. کانی‌زایی چینه‌ای شکل از کالکوسیت و بورنیت حفرات و فضاهای خالی را در بخش فوقانی گدازه‌ها پر کرده و برش‌های گرمایی با کانی‌زایی سولفید و کانی‌زایی از نوع پرشدگی رگه‌ای دیده می‌شود. گاهی حتی فضاهای متخلخل طبقات رسوبی را نیز پر می‌کند. کانی‌زایی چینه‌ای شکل در بخش‌های فوقانی جریان‌های گدازه‌ای از شاخص‌ترین وجوه این تیپ است. در این کانسارها بادامک‌های حاوی کلریت، کوارتز و هماتیت فراوان وجود دارد، کانی‌زایی اقتصادی شامل کالکوسیت، بورنیت و کالکوپریت است و در بخش اکسیدان کانسار، بادامک‌های دارای آتاکامیت یا کریزوکلا مشاهده می‌شود. نفوذی‌های نیمه‌عمیق گابرو یا میکرودیوریت در

بخش‌های مرکزی کانسار جای دارد و برش‌های گرمایی با این نفوذی‌ها وابستگی نشان می‌دهد.

برای ساخت فضای تخمین مدل، عیاری-ساختاری بر اساس اطلاعات گسل‌های کنترل‌کننده کانی‌زایی و اطلاعات عیار گمانه‌ها با عیار مس بیش از ۰/۱ درصد و با استفاده از نرم‌افزارهای Leapfrog و Datamine RM استفاده شد.

برای تخمین ذخیره ابتدا مطالعات آمار کلاسیک انجام شد و بر آن اساس توزیع عیار عناصر مورد مطالعه از طریق هیستوگرام عیاری بررسی و پارامترهای آماری مربوط به آن‌ها محاسبه شد. بین مس و نقره همبستگی قابل توجهی وجود داشت؛ منتهی به دلیل پایین بودن عیار نقره ادامه مطالعات تنها بر روی مس انجام گرفته و روند عیاری در جهات z-y-x بررسی شده و هیچگونه روندی در این بخش مشاهده نشد. مقادیر خارج از ردیف برای کاهش اثرات مربوطه در تخمین بررسی و مقدار خارج از ردیف بررسی شد که داده‌ای خارج از ردیف مشاهده نشد. مطالعات زمین‌آماری از طریق رسم واریوگرام‌های غیرجهتی انجام شد که به دلیل وجود تغییر شیب و امتدادهای موضعی در رگه‌ها استفاده از یک بیضوی ثابت برای تخمین بلوک‌ها اشتباه است. در این کانسار با توجه به تغییرات شدید عیار در نمونه‌ها و برای تفکیک بهتر مرزهای کانسنگ و باطله ابعاد بلوک‌های تخمینی در هر جهت برابر ۱ متر در نظر گرفته شد.

تخمین ذخیره با استفاده از مشخصات بیضوی جستجو، پارامترهای بهینه‌سازی شده تخمین و مدل بلوکی ساخته شده و با روش‌های کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله انجام شد. با توجه به نتایج مناسب روش کریجینگ معمولی نتایج مربوط به آن ارایه شد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده وزن مخصوص متوسط کانسنگ ۲/۷ تن بر متر مکعب است. تفکیک زون اکسیدی بر اساس عیار مس اکسیدی و در نظر گرفتن نسبت اکسیدی ۳۰ درصد انجام شد. میزان ذخیره زمین-شناسی ۴/۴ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۴ درصد است که از این مقدار ۳/۱ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۵ درصد ذخیره اکسیدی و ۱/۳ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۳ درصد سولفیدی است.

ذخیره اندازه‌گیری شده (ذخیره قطعی) ۳/۲ میلیون تن با عیار متوسط مس ۰/۷۷ درصد (بخش اکسیدی ۲/۲ میلیون تن با عیار مس ۰/۷۸ درصد، بخش سولفیدی ۹۵۰ هزار تن با عیار مس ۰/۷۵ درصد) است.

سپاسگزاری

نگارندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از مدیرعامل محترم شرکت گسترش و نوسازی معادن خاورمیانه آقای مهندس الیاس ایران‌نژاد، مدیر اکتشافات آقای مهندس امیر بهرامی، مدیر مجتمع مس چاه‌موسی آقای مهندس محمدحسین پولاد، رئیس اکتشاف چاه موسی آقای مهندس حمیدرضا محبی و رئیس بخش عملیات معدن چاه موسی آقای مهندس سیروان رستمی ابراز می‌دارند.

منابع

اشراقی، ص.، ع. و جلالی، ا.، ۱۳۸۵، گزارش و نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ معلمان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

احمدی شاد، ا.، ۱۳۷۶، مطالعه کانی‌شناسی، آلتراسیون و لیتوژئوشیمیایی طلای منطقه باغو (کوه‌زر دامغان)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

امام‌جمعه، ا.، ۱۳۸۵، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز کانسار مس چاه‌موسی (شمال غرب ترو، استان سمنان)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس.

برنا، ب.، و عشق‌آبادی، م.، ۱۳۷۶، گزارش ارزیابی و اکتشافی کانسارها و اندیس‌های سرب و روی استان سمنان، سازمان صنایع و معادن استان سمنان.

پیروزفر، پ.، ۱۳۸۵، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و خاستگاه کانسار آهن پنج‌کوه، جنوب‌شرق دامغان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

تاج‌الدین، ح. ع.، ۱۳۷۷، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز معدنی طلای دارستان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

جعفریان، ع.، ۱۳۸۶، بررسی پترولوژی قوس ولکانوپلوتونیک رشته‌کوه کوه‌زر-ترو و مجموعه‌های کانه‌زایی وابسته، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم دانشگاه تهران.

رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۷۱، بررسی تحولات سنگ‌شناسی و ماگمایی و ارتباط آن با کانی‌سازی طلا در منطقه باغو، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد پترولوژی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

ذوالفقاری، ص.، ۱۳۷۷، بررسی پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی اتوسن در محدوده معلمان دامغان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۹۹۶، پروژه اکتشاف ژئوشیمیایی ناحیه‌ای رسوبات رودخانه‌ای سمنان - کاشمر.

شرکت گسترش و نوسازی معادن خاورمیانه، ۱۴۰۰، گزارش پایان عملیات اکتشاف تکمیلی معدن مس چاه موسی.

شمعانیان اصفهانی، غ. ح.، ۱۳۸۲، مطالعه دگرسانی و کانی‌سازی گرمایی فلزات پایه و گرانبها در منطقه معلمان، رساله دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

شیبی، م.، ۱۳۸۳، بررسی پترولوژیکی و ژئوشیمیایی کانسار آهن پنج‌کوه (جنوب دامغان)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه تهران.

عابدیان، ن.، و دری، م.، ۱۳۷۵، بررسی معادن مس استان سمنان، سازمان صنایع و معادن استان سمنان.

صادقی فلکدهی، ص.، ۱۳۸۲، زمین‌شناسی اقتصادی کانسار چاه‌موسی، شمال غرب ترو، استان سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.

کریم‌نژاد طاری، س.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی اقتصادی کانسار آهن رباعی (جنوب دامغان)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.

کهنسال، ر.، ۱۳۷۷، بررسی توده‌های نفوذی نیمه ژرف در محدوده برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان دامغان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شمال.

گلپایی، ش.، ۱۳۷۸، اکتشافات مقدماتی عناصر فلزی در شمال شرق معلمان - سمنان با نگرشی ویژه به طلا، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال.

فرد، م.، راستاد، ا.، مهرپرتو، م.، و قادری، م.، ۱۳۸۰، کانسار اپی‌ترمال طلا (فلزات پایه) گندی، جنوب‌شرق دامغان، پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تهران.

مهری، ب.، ۱۳۷۷، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی، آنالیز رخساره و ژئز کانسار سرب-نقره خانجار (جنوب دامغان)،

پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

نقشه راه های ایران مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰۰، ۱۴۰۰، سازمان نقشه برداری کشور.

نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ محدوده چاه موسی، ۱۴۰۰، شرکت ممرادکو و معیار صنعت.

هوشمندزاده، ع.، علوی نائینی، م.، و حقی پور، ع.، ۱۳۵۷، تحول پدیده های زمین شناسی ناحیه تروود، از پرکامبرین تا عهد حاضر، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Abdessattar, L., Dimitriy, N., and Messaoud, M., 2019. *Geostatistical Modeling by the Ordinary Kriging in the Estimation of Mineral Resources on the Kieselguhr Mine, Algeria*. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 362(1): 012051.

Afeni, T. B., Akeju, V. O., and Aladejare, A. E., 2020. *A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit*. Geoscience Frontiers, 12(1): 243-253.

Alavi, M., 1991. *Tectonic map of the Middle East*. Geological survey of Iran.

Battalgazy, N., and Madani, N., 2019. *Categorization of mineral resources based on different geostatistical simulation algorithms: a case study from an iron ore deposit*. Natural Resources Research, 28(4): 1329- 1351.

Rezaei, A., Hassani, H., Moarefvand, P., and Golmohammadi, A., 2019. *Grade 3D Block Modeling and Reserve Estimation of the C-North Iron Skarn Ore Deposit, Sangam, NE Iran*. Global Journal of Earth Science and Engineering, 6: 23-37.

Jafrasteh, B., Fathianpour, N., and Suarez, A., 2018. *Comparison of machine learning methods for copper ore grade estimation*. Computers & Geosciences, 22: 1371-1388.

Huber, H. Stocklin, J., 1956. *Geological Report of the Troud-Moallemann Area*, N. I. O. C. unpublished report Unpublished. 40 p.