



Estimation and evaluation of iron reserves in the eastern area of Eileh1 mine, Razavi Khorasan province

Hamid Esmati Daroneh ¹, Maryam Gholamzadeh ^{2*}

¹ Extraction Unit Expert of Atta Metal Group of Industrial and Mining Companies, Mashhad, Iran

² Exploration Unit Expert of Atta Metal Group of Industrial and Mining Companies, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 14 March 2024
Revised: 17 November 2024
Accepted: 19 November 2024

Keywords

Reserve estimation
Kriging
Inverse distance weighting (IDW)
Eileh 1 iron deposit

*Corresponding author

Maryam Gholamzadeh
✉ mary_ghh@yahoo.com

ABSTRACT

In the present study, we aimed to gain a comprehensive understanding of the Eileh 1 iron ore deposit located in Taybad City, Razavi Khorasan Province. A three-dimensional (3D) model was developed using specialized software, which incorporated lithological logs from boreholes, cross-sectional lithological profiles, and assay estimations covering the entire ore deposit area. The dominant lithology of the region consists of altered limestone and dolomite, as well as altered sediments, including sandstone, siltstone, and shale. To estimate the reserves, we employed both the classical inverse distance weighting (IDW) method and the geostatistical kriging method, tailored to the specific conditions of the ore deposit. Variogram analysis indicated that data values varied with distance and direction, revealing geometric anisotropy within the deposit. The maximum search radius in the direction of 0° azimuth was 42.6 meters, the average search radius at 90° azimuth was 10.6 meters, and the minimum search radius in the vertical direction (0° azimuth) was 32 meters. The dataset included topographic information and data from 177 boreholes, totaling 6,936 meters deep. Following geometric modeling and constructing a block model for the deposit, we estimated reserves for various iron-grade thresholds and compared the results of both methods. The findings indicate that the reserve estimates from the two methods were quite similar. While the inverse distance weighting method is recognized as one of the most accurate classical techniques for reserve estimation, the kriging method demonstrated greater precision and reliability. This is attributed to Kriging's ability to account for the spatial structure of the deposit, its unbiased nature, and its lower estimation variance. The findings indicate that the reserve estimates from the two methods were quite similar. While the inverse distance weighting method is recognized as one of the most accurate classical techniques for reserve estimation, the kriging method demonstrated greater precision and reliability. This is attributed to Kriging's ability to account for the spatial structure of the deposit, its unbiased nature, and its lower estimation variance.

How to cite this article

Esmati Daroneh, H. and Gholamzadeh, M., 2024. Estimation and evaluation of iron reserves in the eastern area of Eileh1 mine, Razavi Khorasan province. *Journal of Economic Geology*, 16(4): 101–124. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2024.1103>



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The evaluation of mineral reserves is conducted using various methods, which differ in calculation algorithms, accuracy, speed, the state of the mineral, and the characteristics of exploration activities (Madani, 1997; Ahmadi, 2010). All estimation methods require exploratory data analysis, and numerous statistical techniques can be employed to analyze this data. However, due to the detrimental effects of uncertainty on investment risk, it is essential to utilize the most effective estimation method grounded in precise data analysis techniques to minimize estimation error. Mineral reserve estimation methods can generally be categorized into two groups: classical (geometric) methods and geostatistical (statistical weighting) methods (Madani, 1997; Hassani Pak and Sharafodin, 2001; Ahmadi, 2010). Classical reserve estimation methods rely on traditional statistics and geometric calculations, while geostatistical methods, such as those based on regional variables, are grounded in spatial structure analysis and utilize the Kriging method. Among classical estimation techniques, the inverse distance weighting (IDW) method is recognized for its accuracy. For this study, both the ordinary Kriging method and the classical estimation method, specifically inverse distance weighting, were employed using two reserve estimation software programs: Surpac and Rockwork. The choice of methods is influenced by the state of the mineral, the extent and nature of exploratory work, and the available exploratory information, with estimation parameters selected through appropriate filtering techniques. In these methods, the deposit is divided into blocks with a square base, and mineral characteristics in each block are calculated based on the data distance within and surrounding it. Blocks must be designed to ensure that data is present within them. The statistical weight of each data point is considered in proportion to the inverse of its distance from the center of the block; thus, data closer to the center carry more statistical weight than those further away. The power of the distance typically varies from 1 to 3, with a common consideration of 2, which is why the method is termed inverse distance weighting.

The studied area is part of the Eileh 1 iron ore mine complex, located 49 km southwest of Taibad city in

Razavi Khorasan province, covering an area of 240 hectares. The area is defined by longitudes ranging from 60° 22' 40" to 60° 31' 24" and latitudes from 34° 36' 40" to 34° 41' 45" (Figure 1). In the study area, a total of 177 exploratory boreholes were conducted using various methods, including reverse circulation (RC) (35 boreholes) and coring (12 boreholes), with an overall length of 6,936 meters.

Material and methods

The final step in the reserve evaluation process involves estimating the grade throughout the entire estimation space in three dimensions and calculating the reserve amount. The principles underlying reserve calculation methods are consistent; however, the primary differences among various methods lie in how the area is divided into segments and how their thickness and average grade are calculated. A comprehensive understanding of a deposit necessitates a series of processing and modeling operations (Hassani Pak, 2000). Due to the complexities involved and the lengthy, time-consuming calculations, this work is typically performed using specialized software, which offers greater accuracy, speed, and ease of use. Grade estimation methods can be categorized into two types: geometric and distance-based. Each of these methods has its advantages and disadvantages, and the selection of a suitable estimation method should be based on the underlying assumptions. In geometric methods, assumptions regarding the spatial distribution of grade within the deposit are taken into account; for instance, the variability of grade or thickness may be assumed to be linear. The software utilized in this research includes Rockworks and Surpac, both of which are comprehensive and powerful tools for imaging, modeling, and analyzing geological information and exploratory data, as well as for performing various modeling tasks based on the type and amount of data available. Additionally, the preparation of different sections from the mineral material was conducted by geologists and engineers. By employing these software programs, and through the drawing of boreholes, creation of cross-sectional profiles of lithology and grade, and development of a three-dimensional model of lithology, a thorough understanding of both the surface and depth of the deposit has been achieved. Furthermore, to calculate the mineral material reserve, the average density of

the mineral material was considered to be 3.8 g/cm³. The data investigated for modeling and reserve estimation are purely hypothetical and cover an area of 2.4 square kilometers. The existing drilling network in the region is based on local outcrops, with varying distances and trends. These distances have been minimized when addressing mineral matter and conducting more detailed investigations. A total of 177 boreholes have been drilled, of which 164 have encountered minerals, resulting in a cumulative borehole length of 6,936 meters. Among all drilled boreholes, the maximum depth is 96 meters, attributed to reverse circulation (RC) boreholes No. E1-RC-BH-9.2 and E1-RC-BH-27, while the minimum depth is 9 meters, associated with Rasol borehole No. E1-R-BH-57. The sampling intervals for iron are set at 50 meters.

Discussion and conclusion

The process of reserve estimation and the preparation of a block model for a mineral deposit involves distinct steps that must be executed deliberately and precisely. This approach ensures an accurate assessment and a suitable model, utilizing default values for reserve calculations within the software. However, certain applications may yield suboptimal results. Consequently, this research considers the mineral's shape as a series of correct hollow shells, determining the maximum exploration radius, the minimum and maximum number of points used in block estimation, and the method of point exploration through range division.

In this study, three-dimensional quantitative modeling of mineralization (grading) and mineral reserves of the Eileh 1 iron deposit was conducted, utilizing data from well logs of exploratory boreholes and the grading of their drilling cores to evaluate the results. The estimation accuracy was assessed by comparing the results of reserve estimation using two classical methods: inverse distance weighting (IDW) with Rockwork software and kriging geostatistics with Surpac software. Figure 17 illustrates the grade-tonnage curve of the Eileh 1 iron deposit derived from these two methods. As anticipated, the figure demonstrates that as the limit grade increases, the

deposit amount decreases while the average grade rises.

The findings of this research in the field of grading data modeling and reserve estimation for the Eileh 1 iron deposit, utilizing distance squared and kriging methods in Surpac and Rock Works software for a grade limit of 17% (as shown in Table 2), indicate that the calculated reserve amounts derived from different methods and software show no significant differences overall. As illustrated in Figure 17, the graph of the average grade calculated by both methods and across the two software platforms aligns closely, with variations in tonnage charts primarily reflected in the slope of the graph line at specific grades. Although the results from these two methods are largely consistent, the inverse distance weighting method is recognized as one of the most accurate classical reserve estimation techniques. While this method offers numerous advantages, such as high accuracy due to the blocking of the deposit, it does have a drawback: in the case of low-grade deposits, the mixing of ore and tailings within the blocks tends to be high, leading to reserves being estimated slightly above their actual value. Conversely, the geostatistical method of kriging, which considers the spatial structure of the region, is more precise and boasts a higher degree of reliability due to its unbiased nature and minimal estimation variance. Variographic studies, conducted by plotting longitudinal variograms in various directions, revealed that the deposit exhibits geometric anisotropy, with the highest elongation observed along the X-axis and the lowest along the Y-axis (Figures 9c and 10).

Based on the results obtained from the modeling of the Eileh 1 deposit and the available information regarding areas that were inaccessible during the initial excavation but will be accessible in the future, it is recommended to drill new boreholes in a regular grid pattern. This approach will facilitate a more accurate determination of the mine reserves. The design and implementation of this drilling strategy should be carefully planned to optimize resource assessment.



تخمین و ارزیابی ذخیره آهن محدوده شرق معدن ایله ۱، خراسان رضوی

حمید عصمتی درونه^۱، مریم غلامزاده^{۲*}^۱ کارشناس واحد استخراج، گروه صنعتی و معدنی عطامتال، مشهد، ایران^۲ کارشناس واحد اکتشاف، گروه صنعتی و معدنی عطامتال، مشهد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش به منظور شناخت کامل کانسار آهن ایله ۱ واقع در شهرستان تایباد، استان خراسان رضوی، مدل سه‌بعدی چاه‌نگار واحدهای زمین‌شناسی گمانه‌ها، نیم‌رخ‌های عرضی لیتولوژی و عیارسنجی منطبق بر پروفیل‌های پوشش دهنده کل محدوده و مدل سه‌بعدی لیتولوژی کانسار به کمک نرم‌افزار ترسیم شد. بر این اساس لیتولوژی غالب منطقه را سنگ آهک، دولومیت دگرگون‌شده و رسوبات دگرگون‌شده شامل ماسه سنگ، سیلت و شیل تشکیل می‌دهند. برای تخمین ذخیره بسته به شرایط کانسار از روش کلاسیک عکس مجذور فاصله و روش زمین‌آماری کریجینگ استفاده شد. نمودار واریوگرام نشان داد که مقادیر داده‌ها در فاصله و جهت تغییر کرده و کانسار دارای ناهمسان‌گردی هندسی است؛ به طوری که مقدار شعاع کاوش بیشینه در راستای با آزیموت صفر درجه برابر با ۴۲/۶ متر، شعاع کاوش متوسط در راستای با آزیموت ۹۰ درجه برابر با ۱۰/۶ متر و شعاع کاوش کمینه در راستای قائم با آزیموت صفر درجه برابر با ۳۲ متر به دست آمد. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های توپوگرافی و اطلاعات ۱۷۷ حلقه گمانه به متر از کلی ۶۹۳۶ متر است که بعد از مدل‌سازی هندسی و ساخت مدل بلوکی کانسار، تخمین ذخیره کانسار به ازای عیارحدهای مختلف درصد آهن انجام شد و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج محاسبه ذخیره نشان می‌دهد که میزان ذخیره محاسبه شده با روش‌های یادشده اختلاف زیادی نداشتند. روش عکس مجذور فاصله از دقیق‌ترین روش‌های کلاسیک تخمین ذخیره است؛ اما روش زمین‌آماري کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار فضایی منطقه، به دلیل ناریب بودن و داشتن کمترین واریانس تخمین، دقیق‌تر بوده و از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

واژه‌های کلیدی

تخمین ذخیره

کریجینگ

عکس مجذور فاصله

کانسار آهن ایله ۱

نویسنده مسئول

مریم غلامزاده

mary_ghh@yahoo.com ✉

استناد به این مقاله

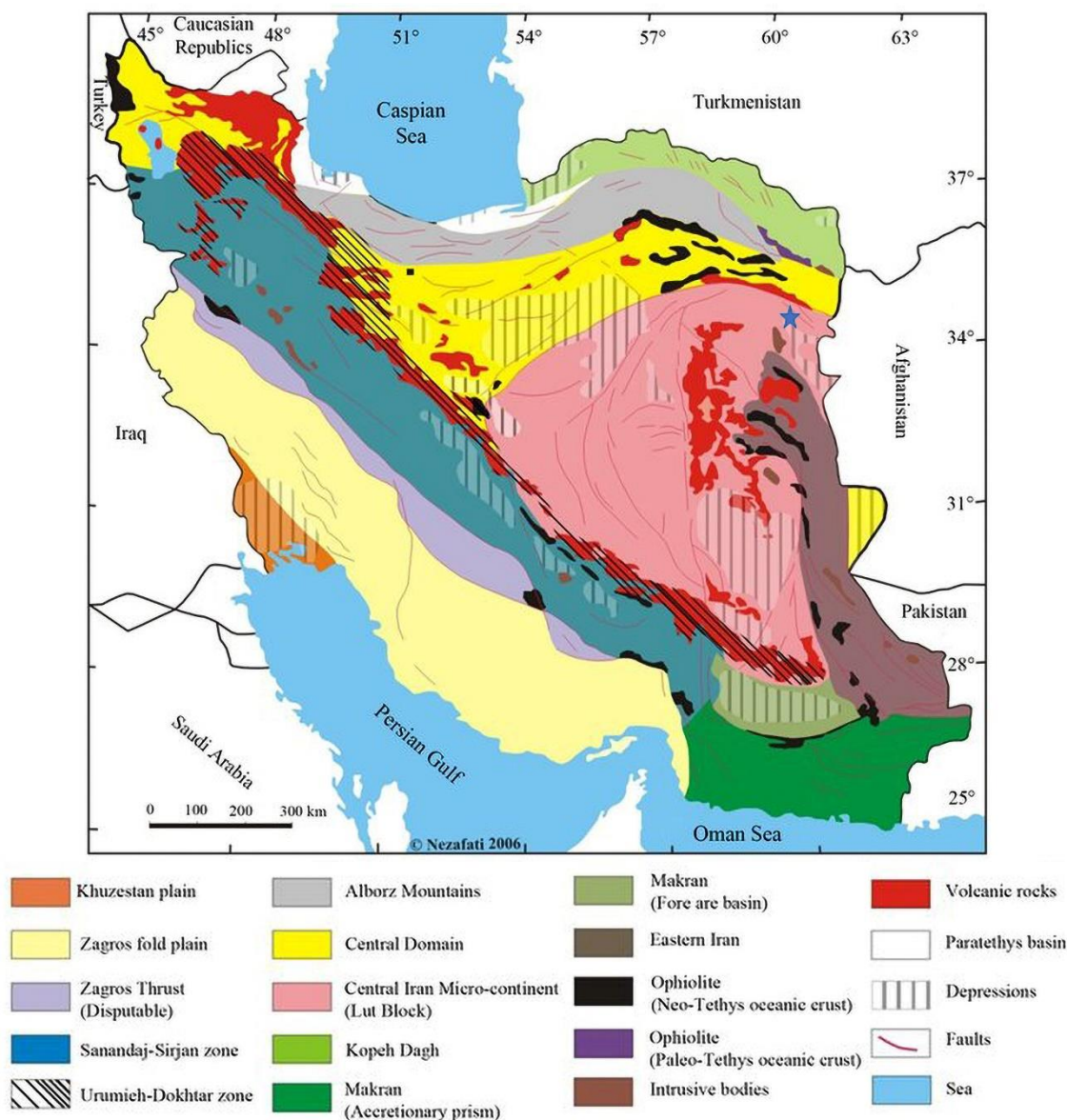
عصمتی درونه، حمید و غلامزاده، مریم، ۱۴۰۳. تخمین و ارزیابی ذخیره آهن محدوده شرق معدن ایله ۱، خراسان رضوی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۴): ۱۰۱-۱۲۴.

<https://doi.org/10.22067/econg.2024.1103>

مقدمه

سنگ آهن یکی از کالاهای راهبردی جهان است و ماده اولیه اصلی مورد استفاده در تولید فولاد به شمار می‌رود. به عبارتی حدود ۹۸ تا ۹۹ درصد کل مصرف سنگ آهن مربوط به صنایع تولید فولاد و چدن است؛ بنابراین ماده جایگزینی برای آن در سطوح مصرف فعلی وجود ندارد (Rooki et al., 2022). در مسایل معدنی به کارگیری روش‌های توانمند در تخمین ذخیره ماده معدنی نقش مهمی را در ارزیابی، طراحی و برنامه‌ریزی‌های معادن ایفا می‌کند. برای حل مسائل مرتبط با کانسار، برای مثال طراحی شبکه حفاری، تخمین ذخیره و رسم منحنی‌های عیار ذخیره و طراحی معدن، لازم است بر اساس داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها و با استفاده از روش‌های آماری، با درون‌یابی و برون‌یابی داده‌های معلوم و تخمین مقدار یک گروه مؤلفه‌ها مانند ضخامت در نقطه یا نقاط مجهول، ذخیره کل تخمین زده شود. ارزیابی ذخایر معدنی با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که تفاوت این روش‌ها در الگوریتم محاسبه، دقت، سرعت، وضعیت ماده معدنی و ویژگی‌های کارهای اکتشافی است (Madani, 1997, Ahmadi, 2010). تمام روش‌های تخمین به نحوی نیازمند تحلیل داده‌های اکتشافی هستند و برای تحلیل داده‌های اکتشافی نیز می‌توان از روش‌های آماری متعددی استفاده کرد؛ اما به دلیل آثار نامطلوب عدم قطعیت در افزایش خطر سرمایه‌گذاری، لازم است بهترین روش تخمین، متکی بر دقیق‌ترین روش تحلیل داده‌ها به کار گرفته شود تا بتواند کمترین خطای تخمین را تضمین کند. به طور کلی، روش‌های تخمین ذخایر معدنی را می‌توان به دو دسته روش‌های کلاسیک (هندسی) و زمین‌آماري (وزن‌دهی آماری) طبقه‌بندی کرد (Madani, 1997; Hassani, 2010; Pak and Sharafodin, 2001; Ahmadi, 2010). پایه و اساس روش‌های کلاسیک تخمین ذخایر، آمار کلاسیک و هندسه روش محاسبه است؛ در حالی که اساس روش‌های زمین‌آماري متغیر ناحیه‌ای، تجزیه و تحلیل ساختار فضایی و انجام تخمین‌هاست. هر یک از این روش‌ها دارای پیچیدگی‌های خاص خود بوده و

برای یک گروه داده، بسته به شرایط، یک یا چند روش به طور متناسب، قابل استفاده خواهند بود. به هر جهت در تمام این روش‌ها انتخاب بهینه مؤلفه‌های تخمین، نقشی مهم در دقت محاسبات دارد. با توجه به اینکه روند خاصی در راستاهای مختلف توزیع عیار سنگ آهن مشاهده نشد؛ بنابراین برای بررسی‌های آماری از روش کریجینگ معمولی و روش تخمین کلاسیک، عکس مجذور فاصله (یکی از دقیق‌ترین روش‌ها) استفاده شد. نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش Surpac و Rockwork است. روش‌های یادشده بر اساس وضعیت ماده معدنی، میزان و نحوه کارهای اکتشافی انجام‌شده و اطلاعات اکتشافی موجود تعیین شده و مؤلفه‌های تخمین نیز از طریق اعمال فیلترهای مناسبی انتخاب شده است که بتوان با وجود الگوریتمی با کمترین پیچیدگی محاسبات ریاضی و در کمترین زمان به مقدار بهینه رسید. منطقه مورد بررسی، بخشی از معدن سنگ آهن ایله ۱ از مجموعه معدن ایله ۱ و ۲ در ۱ کیلومتری شمال روستای ایله، ۴۹ کیلومتری جنوب غرب شهرستان تایباد در استان خراسان رضوی در محدوده‌ای به مساحت ۲۴۰ هکتار و در طول جغرافیایی ۴۰" ۲۲' ۶۰° تا ۳۱' ۲۴' ۶۰° و عرض جغرافیایی ۳۶' ۴۰' ۳۴° تا ۴۵' ۴۱' ۳۴° واقع شده است. راه دسترسی به محدوده از طریق جاده آسفالت‌شده تربت‌جام- تایباد (پیمایش حدود ۲۱۰ کیلومتر) امکان‌پذیر است. محدوده اکتشافی در حاشیه جاده کرات به ایله و پشته قرار دارد و یکی از مزیت‌های مهم محدوده نزدیکی به جاده آسفالت‌شده و دسترسی مناسب است. در کانسار مورد بررسی، تعداد ۱۷۷ حلقه گمانه اکتشافی به روش پودری با راسول (۶۷ حلقه E1-R-BH1 تا E1-R-BH38 و E1-R-BH44 تا E1-R-BH73) و دریل واگن (۶۳ حلقه E1-A-BH.1 تا E1-P4- (R-BH.22))، گردش معکوس (RC) (۳۵ حلقه E1-RC-BH1 تا E1-R-BH9) و (E1-R-BH17 تا E1-R-BH48) و مغزه-گیری (۱۲ حلقه BH-2 تا BH-16) به طول کلی ۶۹۳۶ متر انجام شده است.



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد بررسی (معدن ایله ۱) در نقشه ساختاری ایران (بر اساس آقناباتی (Aghanabati, 2016))

Fig. 1. Location of the studied area (Eileh 1 mine) in the structural map of Iran (based on Aghanabati, 2016)

بلوکی کانسار با استفاده از تخمین گر کریجینگ و واریوگرافی برای ۱۰ متغیر صورت گرفت و در نهایت میزان ذخیره سنگ آهن آنومالی شماره ۳ این معدن محاسبه شد. سلسیلیان (Salsabilian, 2006) در پژوهش خود با استفاده از روش کریجینگ شاخص به بررسی فضای تخمین در توده مرکزی کانسار آهن آنومالی شمالی

در راستای این پژوهش تعدادی فعالیت پژوهشی انجام شده است که به برخی از مهم ترین آنها اشاره می شود. زاخاری و همکاران (Zakary et al., 2005) با استفاده از نرم افزار Surpac به مدل سازی زمین آماری و تخمین ذخیره آهن آنومالی شماره ۹ معدن گل گهر سیرجان پرداختند. در پژوهش آنها مدل سازی

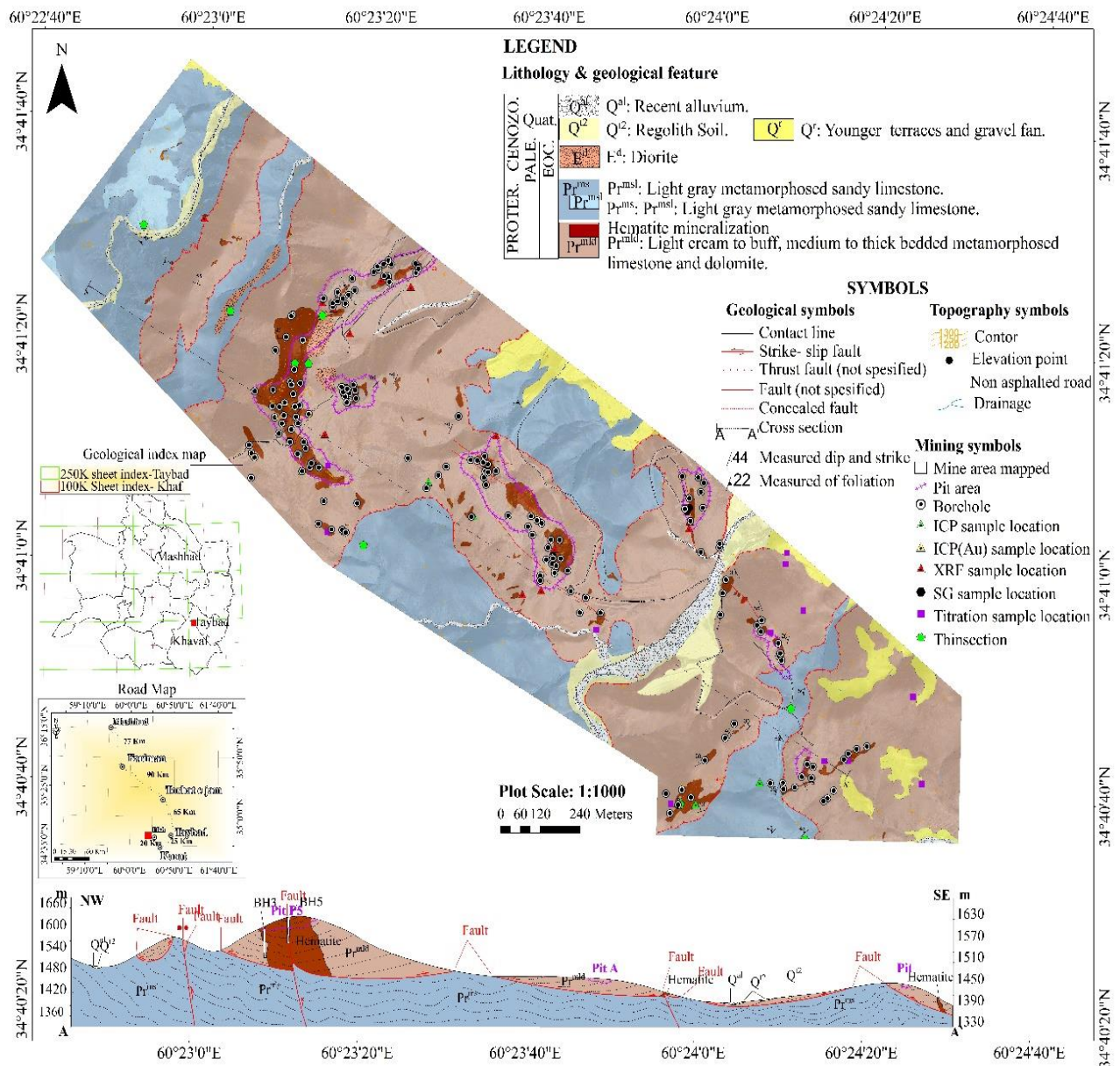
باقی، با مشخص کردن مرز کانسنگ و باطله پرداخت. تصویرسازی سه بعدی مقطعی از تونل **تونبرگ** و زون‌های شکستگی مهم با ترکیب سطح توپوگرافی، اندازه‌گیری‌هایی در سطح صفحه‌های شکستگی همراه با سطوح دایک‌های دلریتی، نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مغناطیسی دایک‌های دلریتی و داده‌های نقشه‌برداری تونل توسط شرر (Surur, 2008) انجام شد. وی از نرم‌افزارهای RockWorks و ArcGIS برای پردازش داده‌ها و تصویرسازی سه‌بعدی ارتباط هندسی میان ساختارهای زمین‌شناسی هدف، دایک‌های دلریتی و تونل استفاده کرد. دایا (Daya, 2012) به تخمین ذخیره قسمت مرکزی آنومالی شمال چگارت با استفاده از روش کریجینگ معمولی پرداخت. در این پژوهش ۲۹۲۹ داده به دست آمده از ۲۲ گمانه جهت تخمین ذخیره استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده بیانگر تک جامعه بودن داده‌های عیاری بوده و برای استفاده از کریجینگ معمولی نیز از برازش مدل کروی بر واریوگرام تجربی استفاده شده است. قاجار و سلطانی محمدی (Ghajar and Soltani-Mohammadi, 2015) به مدل‌سازی آماری و زمین‌آمارای عیار آهن، گوگرد و فسفر در معدن سننگ آهن جلال‌آباد در استان کرمان پرداختند. پژوهش‌های آنها بر پایه ۸۲ گمانه اکتشافی بوده که تقسیم‌بندی ذخیره در چهار طبقه بر اساس عیار مورد نیاز برای کارخانه فراوری انجام شده است. شریف و کریم‌زاده (Sharif and Karim-Zadeh, 2015) به واریوگرافی داده‌های اکتشافی ذخیره آهن کورکورا ۲ از محدوده معدنی شهرک واقع در استان کردستان و برآورد ذخیره این کانسار پرداختند. رازرا و همکاران (Rasera et al., 2015) الگوریتم‌های شبیه‌سازی متوالی را به صورت موازی اجرا کردند. آنها از راهبرد عدم اختلاط، سطح مسیر موازی برای شبیه‌سازی متوالی استفاده کردند و با توجه به ترتیبی که در گروه‌های شبیه‌سازی وجود دارد، یک فرایند طبقه‌بندی خودکار برای بررسی گروه‌های شبیه‌سازی شده به صورت موازی، طراحی کردند. مزیت روش آنها این است که نتایج با یکدیگر اختلاط ندارند و می‌توانند به صورت مستقل یک خروجی دقیق را به دست آورند. احمدی و بهارلو (Ahmadi

and Baharlo, 2021) مدل‌سازی هندسی سه بعدی و محاسبه ذخیره کانسار مس دره زرشک یزد با استفاده از روش‌های کلاسیک عکس مجذور فاصله و روش زمین‌آمارای کریجینگ و براساس مدل‌سازی ریاضی سه بعدی زمین‌شناسی و کانی‌زایی (عیارسنجی) را به کمک نرم‌افزار Surpac انجام دادند.

زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

محدوده اکتشافی مورد بررسی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خواف و بخش مرکزی نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ تا ییاد قرار گرفته است و از نظر تقسیم‌های زمین‌شناسی و ساختمانی جزو ایران مرکزی به شمار می‌رود. واحدهای سنگی برون‌زد یافته در منطقه شامل مجموعه آتشفشانی-رسوبی دگرگون‌شده، آهک، دولومیت و کنگلومرای پروتروژوئیک پسین است. این مجموعه، بیش از چندین هزار متر ضخامت دارد و در حد رخساره شیست سبز زیرین دگرگون‌شده است (Ternet et al., 1978) (شکل ۲).

واحد سنگی پروتروژوئیک پسین شامل مجموعه‌ای از آهک و دولومیت‌های به رنگ کرم روشن تا نخودی رنگ با لایه‌بندی متوسط تا ضخیم لایه و به شدت بلوری ناشی از دگرگونی ناحیه‌ای هستند که در قسمت‌هایی به مرمر نواری تبدیل شده‌اند و رسوبات دگرگون‌شده شامل ماسه سنگ، سیلت و شیل است که به صورت اسلیت و فیلیت رخنمون دارد. واحد آهکی دگرگون‌شده، به عنوان میزبان اصلی کانی‌سازی هماتیت، به صورت ورقه رورانده با ضخامت کمینه ۱۵ و بیشینه ۱۲۰ متر در کل محدوده گسترش داشته و همبری زیرین آن با ماسه سنگ‌های دگرگون‌شده به همراه اسلیت و فیلیت به صورت گسله است (شکل ۳). در قسمت‌هایی که واحد آهکی در اثر فرسایش از بین رفته، واحد دگرگونه در پنجره زمین‌ساختی رخنمون‌یافته است. در بعضی از نقاط این مجموعه اسلیت و فیلیت، مقداری رسوبات ولکانیکی دگرگون‌شده نیز قابل مشاهده است و در این مجموعه به ندرت کانی‌سازی هماتیت دیده می‌شود (Sharifi, 2023) (شکل ۴).



شکل ۲. موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی کانسار اکتشافی معدن ایله ۱ بر روی نقشه توپوگرافی- زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ منطقه (Sharifi, 2023)

Fig. 2. Distribution of the exploratory boreholes of the deposit of Eileh 1 mine on the topography-geological map with scale 1:1000 of the area (Sharifi, 2023)

شمال‌غرب با افزایش ضخامت لایه رورانده عمق و گسترش سطحی ماده معدنی بیشتر می‌شود.

بررسی زمین‌شناسی نشان می‌دهد، به محض رسیدن به زون خرد شده در برخورد زیرین ورقه رورانده با ترکیب آهک دگرگون شده ماده معدنی خاتمه می‌یابد. به طور کلی، از جنوب‌شرق به سمت



شکل ۳. رخمون راندگی واحد آهک دگرگونه بر روی واحد اسلیت و فیلیتی در محدوده معدن ایله ۱
Fig. 3. Thrust outcrop of metamorphic limestone unit on slate and phyllite unit in Eileh 1 mine



شکل ۴. نمایی از پنجره زمین‌ساختی ایجاد شده در اثر فرسایش بخشی ورقه رورانده آهک دگرگونه؛ دید به سمت غرب در محدوده معدن ایله ۱
Fig. 4. view of the tectonic window created by the partial erosion of the metamorphic limestone sheet in Eileh 1 mine; view to the west

هندسی هستند و تغییرپذیری عیار و ضخامت در تعیین هندسه کانسار دخالت ندارد، استفاده شد. این روش تخمین، روشی درون‌یابی است که در آن اوزان تخمین بر اساس عکس مجذور فاصله نقاط شرکت کننده در تخمین نسبت به مرکز بلوک مورد تخمین تعیین می‌شوند. **وزن‌دهی عکس فاصله**، یک روش آمار مکانی بوده که بر خلاف روش کریجینگ وابسته به مدل نیست؛ اما در این روش همانند روش کریجینگ مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که نمونه‌برداری نشده است، از روی نقاط مجاور با استفاده از رابطه (۱) تخمین زده می‌شود. پایه روش وزن‌دادن عکس فاصله، وزن‌دهی بر اساس عکس فاصله تا نقطه تخمین است. به عبارتی اختصاص وزن بیشتر به نزدیک‌ترین نمونه‌ها و اختصاص وزن کمتر به نمونه‌هایی که در فاصله دورتر قرار دارند. رابطه ۱:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^m}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^m}}$$

Z_i مقدار برآورد شده متغیر در منطقه نمونه‌برداری نشده، d_i فاصله نقطه نمونه‌برداری شده تا نقطه تخمین، n تعداد کل نمونه‌ها و مؤلفه m توان فاصله است که تغییرات آن باعث انعطاف روش عکس مجذور فاصله می‌شود.

به دلیل آثار نامطلوب خطای تخمین با استفاده از روش‌های هندسی، لازم است دقیق‌ترین روش تخمین ذخیره به کار گرفته شود که بتواند کمترین خطای تخمین را تضمین کند. منظور از خطای تخمین، میانگین آن نیست؛ بلکه توزیع خطا مطرح است. به عبارت دیگر، خطای تخمین در هر نقطه از کانسار باید معلوم باشد. در این صورت لازم است کل کانسار به صورت بلوک به بلوک با ابعاد بلوک‌های متناسب با پله‌های استخراجی یا واحدهای استخراجی تخمین زده شود. در این حالت می‌توان به ازای هر عیار حد مطلوبی، محدوده استخراج را مشخص کرد. در واقع، کل ذخیره باید به نوعی شبیه‌سازی شود که انجام برآوردهای اقتصادی به ازای شرایط مختلف انتخاب شده، امکان‌پذیر باشد. هیچ‌یک از

رسوبات منسوب به خاک‌های برجناشی از هوازدگی سنگ بستر تحت عنوان واحد Q^f و تراست‌های آبرفتی جدید Q^{l2} و رسوبات سخت‌نشده رودخانه‌ای عهد حاضر Q^{al} است. در این محدوده غالب گسل‌های منطقه مورد بررسی روند شمال‌شرقی - جنوب‌غربی و سازوکار راندگی ناشی از حرکت ورقه رورانده به عنوان میزبان کانی‌سازی را دارند. وجود دگرگونی ناحیه‌ای و فشارهای ایجاد شده ناشی از آن، سبب دگرگون‌شدن کلیه واحدهای لیتولوژیکی محدوده به همراه ایجاد ساختارهای فراوان راندگی در محدوده شده است؛ به طوری که این خردشدگی در بخش‌های نزدیک به زون‌های گسلی بسیار شدید است.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی عیاری ماده معدنی

مرحله نهایی عملیات ارزیابی ذخیره، تخمین عیار در کل فضای تخمین به صورت سه بعدی و محاسبه میزان ذخیره است. اصول روش‌های محاسبه ذخیره یکسان است و در واقع اختلاف اساسی روش‌های مختلف، در چگونگی تقسیم‌بندی منطقه به قطعه‌ها و محاسبه ضخامت و عیار متوسط آنهاست. شناخت کامل یک کانسار، مستلزم انجام یک دسته عملیات پردازشی و مدل‌سازی است (Hassani Pak, 2000) که این کار به دلیل پیچیدگی‌های موجود، طولانی و زمان‌بر بودن و مشکل بودن محاسبات مربوطه، معمولاً با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، دقیق‌تر، سریع‌تر و راحت‌تر انجام می‌شود. روش‌های تخمین عیار به دو دسته هندسی و مبتنی بر فاصله تقسیم می‌شوند. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند که بر اساس فرضیه‌هایی که برای آنها در نظر گرفته شده است، باید روشی مناسب برای تخمین انتخاب شود. در روش‌های هندسی، فرضیه‌هایی در مورد توزیع فضایی عیار در کانسار در نظر گرفته می‌شود. برای مثال، تغییرپذیری عیار یا ضخامت در آنها خطی در نظر گرفته می‌شود.

برای تخمین ذخیره محدوده از روش عکس مجذور فاصله، به عنوان یکی از روش‌های کلاسیک که مبتنی بر هندسه و قضایای

یکدیگر، $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌ها با فاصله h از هم و $Z(u)$ مقدار کمیت مورد نظر در موقعیت مکانی u هستند. $\gamma(h)$ را سمی واریوگرام می‌نامند؛ اما به دلیل اینکه در عمل از $\gamma(h)$ بیشتر استفاده می‌شود، به صورت قرارداد $\gamma(h)$ واریوگرام نامیده می‌شود. پس از رسم واریوگرام تجربی در جهت‌های مختلف برای به دست آوردن مقادیر بیضوی همسان‌گردی، یک مدل به واریوگرام برازش می‌شود (Yousefi, and Khaloukakai, 2015). پس از محاسبه مقادیر واریوگرام و به دست آوردن شعاع همسان‌گردی، با استفاده از روابط کریجینگ، تخمین زمین‌آماری صورت می‌گیرد.

داده‌های مورد بررسی به منظور مدل‌سازی و تخمین ذخیره تنها داده‌های گمانه‌ای است که ناحیه‌ای به مساحت $2/4$ کیلومتر مربع را تحت پوشش قرار می‌دهند. شبکه حفاری موجود در منطقه با توجه به رخنمون‌های منطقه و با فواصل و روندهای مختلف است که این فواصل در برخورد به ماده معدنی و بررسی‌های دقیق‌تر به مقدار کمتر کاهش یافته است. تعداد گمانه‌های حفر شده ۱۷۷ حلقه گمانه است که تعداد ۱۶۴ حلقه آن با ماده معدنی برخورد داشته است و طول کل حفاری‌ها ۶۹۳۶ متر است. از میان کل گمانه‌های حفر شده، بیشترین عمق گمانه حفر شده ۹۶ متر است که متعلق به گمانه‌های RC شماره E1-RC-BH-9.2 و E1-RC-BH-27 است و کمترین عمق گمانه حفر شده ۹ متر بوده که متعلق به گمانه راسول شماره E1-R-BH-57 بوده و فواصل نمونه‌برداری برای آهن ۵۰ متری است.

نرم‌افزارهای مورد استفاده برای تخمین ذخیره محدوده مورد بررسی، Rockworks و Surpac هستند؛ این نرم‌افزارها، نرم‌افزارهای جامع و قوی برای تصویرسازی، مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های اکتشافی است و انجام مدل‌سازی‌های مختلف بر اساس نوع و میزان داده‌ها و اطلاعات اکتشافی در دسترس و نیز تهیه برش‌های مختلف از درون ماده معدنی را برای زمین‌شناسان و مهندسان امکان‌پذیر می‌سازد.

روش‌های تخمین ذخیره سنتی امکان چنین کاری را ندارند. یکی از روش‌های قدرتمند تخمین ذخیره، روش زمین‌آمار است که تقریباً تمام شرایط بیان‌شده را داراست. زمین‌آمار، نوعی آمار است که در آن همبستگی فضایی مقادیر در نظر گرفته می‌شود و به این دلیل متغیرهای ناحیه‌ای در آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی، تخمین زمین‌آمار، فرایندی است که در طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به دست آورد (Hassani Pak, 1998). تخمین زمین‌آمار ذخایر معدنی شامل دو مرحله بوده که شامل: ۱- شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی عیار و ضخامت ماده معدنی مورد تخمین و ۲- تخمین زمین‌آمار ذخایر معدنی به روش کریجینگ است (Hassani Pak, 1998). روش کریجینگ بهترین تخمین گر خطی نااریب با کمترین واریانس تخمین است که علاوه بر تخمین عیار، خطای تخمین را محاسبه می‌کند. در نتیجه برای هر تخمین می‌توان سطح اطمینان آن را محاسبه کرد. شرط نااریب بودن در روش عکس مجذور فاصله نیز لحاظ می‌شود؛ اما مزیت کریجینگ در این است که ضرایب وزنی به گونه‌ای تعیین می‌شود که در عین نااریب بودن، واریانس تخمین نیز کمتر باشد (Hassani Pak, 1998). خطای کریجینگ تابع مشخصات واریوگرام (ساختار فضایی)، هندسه بلوک‌های مورد تخمین، محل و موقعیت نمونه‌هایی که برای تخمین از آنها استفاده می‌شود، است؛ ولی تابع مقدار واقعی داده‌ها نیست. بنابراین در صورت معلوم بودن واریوگرام، قبل از حفر گمانه‌ها می‌توان واریانس تخمین را محاسبه کرد. در واقع علم زمین‌آمار ترکیبی از زمین‌شناسی، ریاضیات و آمار است. این روش بر اساس الگو کردن واریوگرام است. واریوگرام تجربی طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Hassani Pak and Sharofedin, 2001).

رابطه ۲:

$$2\gamma(h) = 1/N(h) \sum_{N(h)} [Z(u) - Z(u+h)]^2$$

در رابطه ۲، $2\gamma(h)$ مقدار واریوگرام برای دو نمونه با فاصله h از

مجذور فاصله (در نرم افزار Rockworks) ارزیابی ذخیره کانسار اکتشافی معدن ایله ۱ انجام و نتایج کار با یکدیگر مقایسه شد. بنابراین با استفاده از این دو نرم افزار و از طریق ترسیم گمانه‌ها، ترسیم نیم‌رخ‌های عرضی لیتولوژی و عیارسنجی و مدل سه بعدی لیتولوژی (شکل ۵)، شناخت کاملی از وضعیت سطحی و عمقی کانسار صورت گرفته است.

برای این منظور در محدوده مورد بررسی، ابتدا ابعاد بهینه بلوک‌های تخمینی بر اساس نحوه گسترش فضایی ماده معدنی و طراحی پله‌های استخراجی معدن به خصوص ضخامت تناوب‌های تبدیل کانسنگ به باطله و باطله به کانسنگ، انتخاب شد و سپس عیار آنها برآورد شد و در نهایت با استفاده از این دو نرم افزار به روش‌های کریجینگ (در نرم افزار Surpac) و کلاسیک عکس

Borehole Description		Lithology	Alteration Assemblage		Ore Minerals	Gangue Minerals	Core properties		Sample		Analyze	
Depth	Thickness (m)		Alteration I	Alteration II			RQD (%)	CR (%)	ID	Type	Fe(%T)	Fe2O3(%)
0	3	Silicified Limestone	Silicification	Dolomitization	Hematite Goethite	Calcite	21	33	EL1-BH5-S1	XRF	11.78	16.84
-5	9	Hematite, Goethite	Vein	Vein	Hematite,	Calcite	40	31	EL1-BH5-S2	XRF	30.53	43.65
-10		Hematite, Goethite	Vein	Vein	Hematite, Goethite	Calcite	41	90	EL1-BH5-S3	XRF	29.17	41.71
-15	8	Limestone	Dolomitization	Silicification		Calcite	52	47				
-20	1.5	Vein (Low grade)	Vein	Vein	Hematite, Goethite	Calcite	76	95	EL1-BH5-S4	XRF	20.51	29.32
-25	5.5	Silicified Limestone	Silicification	Dolomitization	Goethite		66	90				
-30	2.3	Vein	Vein	Vein	Goethite Hematite, Goethite	Calcite	75	95	EL1-BH5-S5	XRF	27.43	39.21
-35	9.45	Limestone	Dolomitization	Silicification		Calcite, Dolomite	92	95				
-40	1.25	Vein	Dolomitization	Hematite	Goethite Goethite, Hematite,	Calcite Calcite Calcite	98 44 98	100 98 98	EL1-BH5-S6		19.17	27.41
-45			Dolomitization	Silicification		Calcite	98	98				
-50	16.5	Limestone	Dolomitization	Silicification			94	98				
-55			Silicification	Dolomitization			91	100				
-60	4.5	Low grade Hematite	Dolomitization	Silicification	Goethite, Hematite,	Calcite	75	90	EL1-BH5-S7		13.81	19.74
-65	2	Limestone	Dolomitization	Hematite Silicification,		Calcite	70	98				
-65	3	Vein (Low grade)	Dolomitization	Hematite	Goethite, Hematite,		47	65	EL1-BH5-S8		32.85	46.97
-70	4	Limestone	Dolomitization	Silicification		Calcite	90	30				

شکل ۵. نمونه چاه‌نگارهای کانسار آهن ایله ۱ شامل، ستون سنگ‌شناسی، ستون دگرسانی و تغییرات عمقی عیارسنجی آهن (بر حسب درصد)

Fig. 5. Representative of logging of Eileh 1 deposit, including lithology column, alteration column and depth changes of iron grading (in percent)

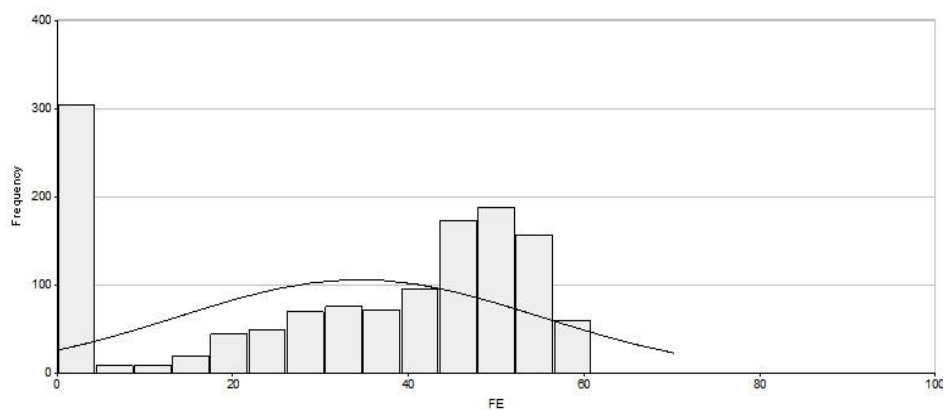
پردازش آماری داده‌ها

قبل از انجام هرگونه عملیات مدل‌سازی، برای آگاهی از نحوه توزیع داده‌ها (نرمال بودن یا نبودن تابع توزیع)، بررسی‌های آماری بر روی داده‌های عیار آهن انجام شد (شکل‌های ۶ و ۷).

همچنین برای محاسبه ذخیره ماده معدنی، چگالی متوسط ماده معدنی $3/8 \text{ gr/cm}^3$ (با توجه به آنالیزهای انجام شده) در نظر گرفته شد. برای ساخت مدل بلوکی کانسار نیز، ابعاد بلوک‌ها بر اساس نوع ماده معدنی (آهن)، وضعیت و اطلاعات اکتشافی کانسار و در نظر گرفتن شرایط استخراج، $5 \times 10 \times 10$ متر در نظر گرفته شد.

Histogram for FE

Total Samples	: 1332
Minimum	: 0.000
Maximum	: 62.000
Mean	: 32.322
Variance	: 422.439
StdDeviation	: 20.553
Skewness	: -0.562
Kurtosis	: -1.185
Log-Est Mean	: 42.496

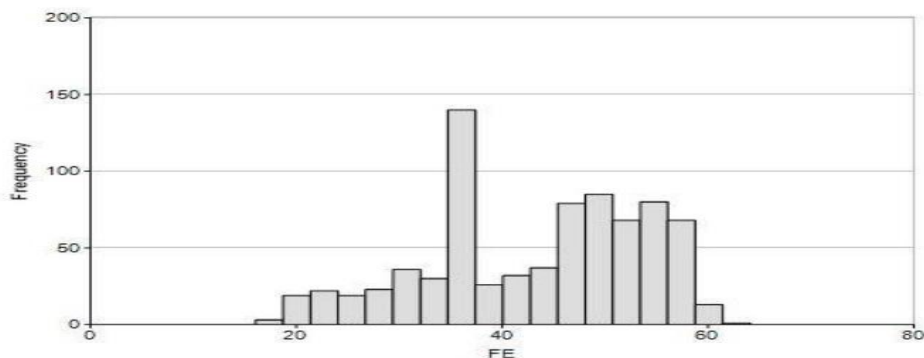


شکل ۶. هیستوگرام عیار نمونه‌های مربوط به گمانه‌های آهن کانسار ایله ۱

Fig. 6. Grade histogram of the samples related to the iron boreholes of Eileh 1

Histogram for FE

Minimum	: 17.100
Maximum	: 62.000
Total	: 33660.080
Mean	: 43.099
Variance	: 111.700

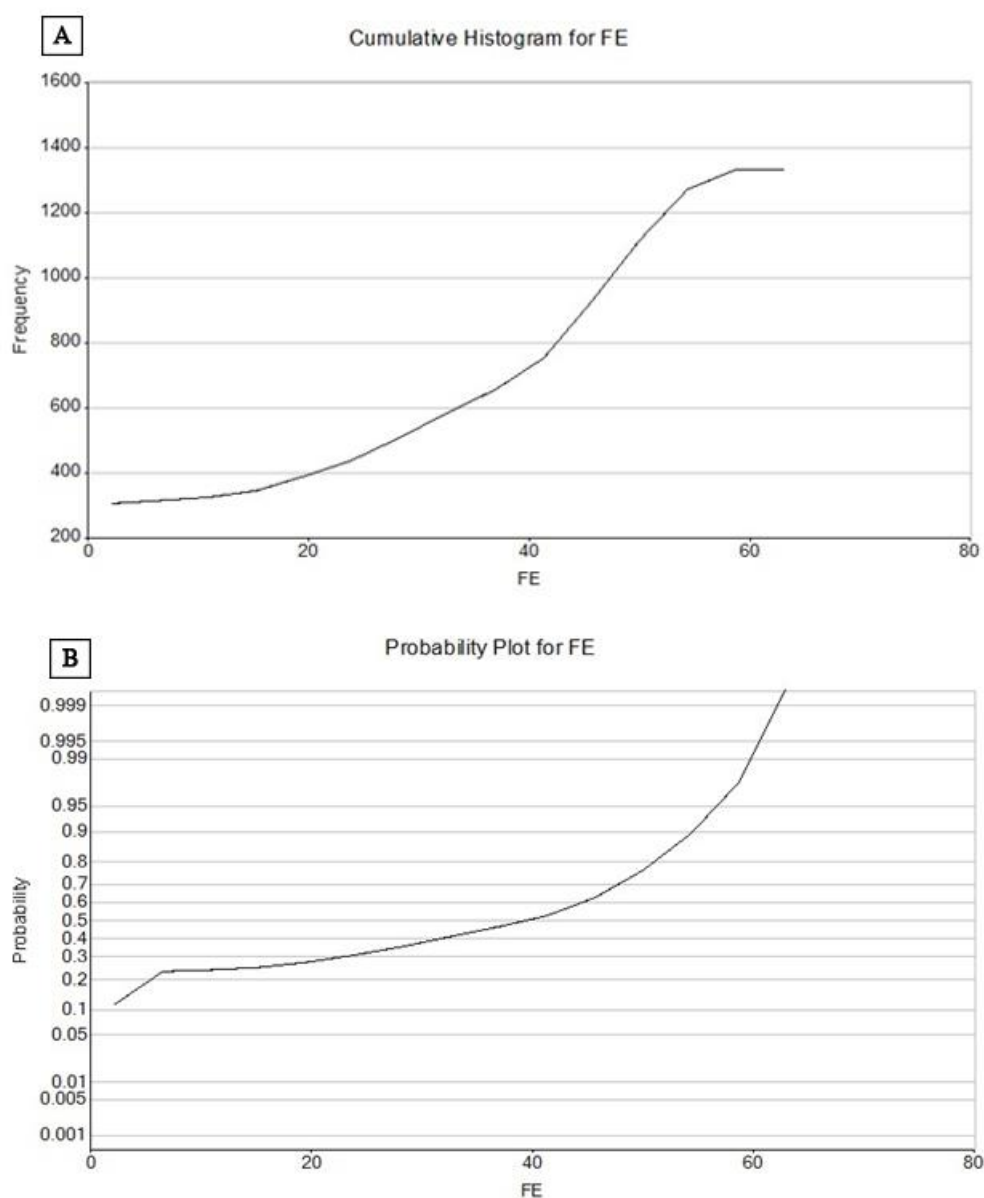


شکل ۷. هیستوگرام عیار نمونه‌های مربوط به فضای تخمین کانسار آهن ایله ۱

Fig. 7. The grade histogram of the samples related to the estimation space of the Eileh 1 iron deposit

نظر گرفته شده است. پس از برآزش مدل به واریوگرام اعتبارسنجی متقابل واریوگرام انجام شد و پس از تأیید درستی مدل برآزش شده به واریوگرام، با روش کریجینگ و عکس مجذور فاصله، تخمین عیار بلوک‌ها انجام شده و در نهایت با استفاده از عیارهای تخمینی بلوک‌ها، تخمین ذخیره صورت گرفت.

ابزار اصلی در این گام، ایجاد نمودارهای گرافیکی از توزیع داده‌ها و بررسی آمارهای گرایش به مرکز و پراکندگی است. با توجه به داده‌های شکل ۸-۸ مشاهده می‌شود که توزیع داده‌های آهن نرمال نبوده و به توزیع لگاریتمی شباهت دارد (شکل ۸-۸-B). یک برآزش مدلی برای هر یک از این شاخص‌ها با دامنه قابل قبولی در

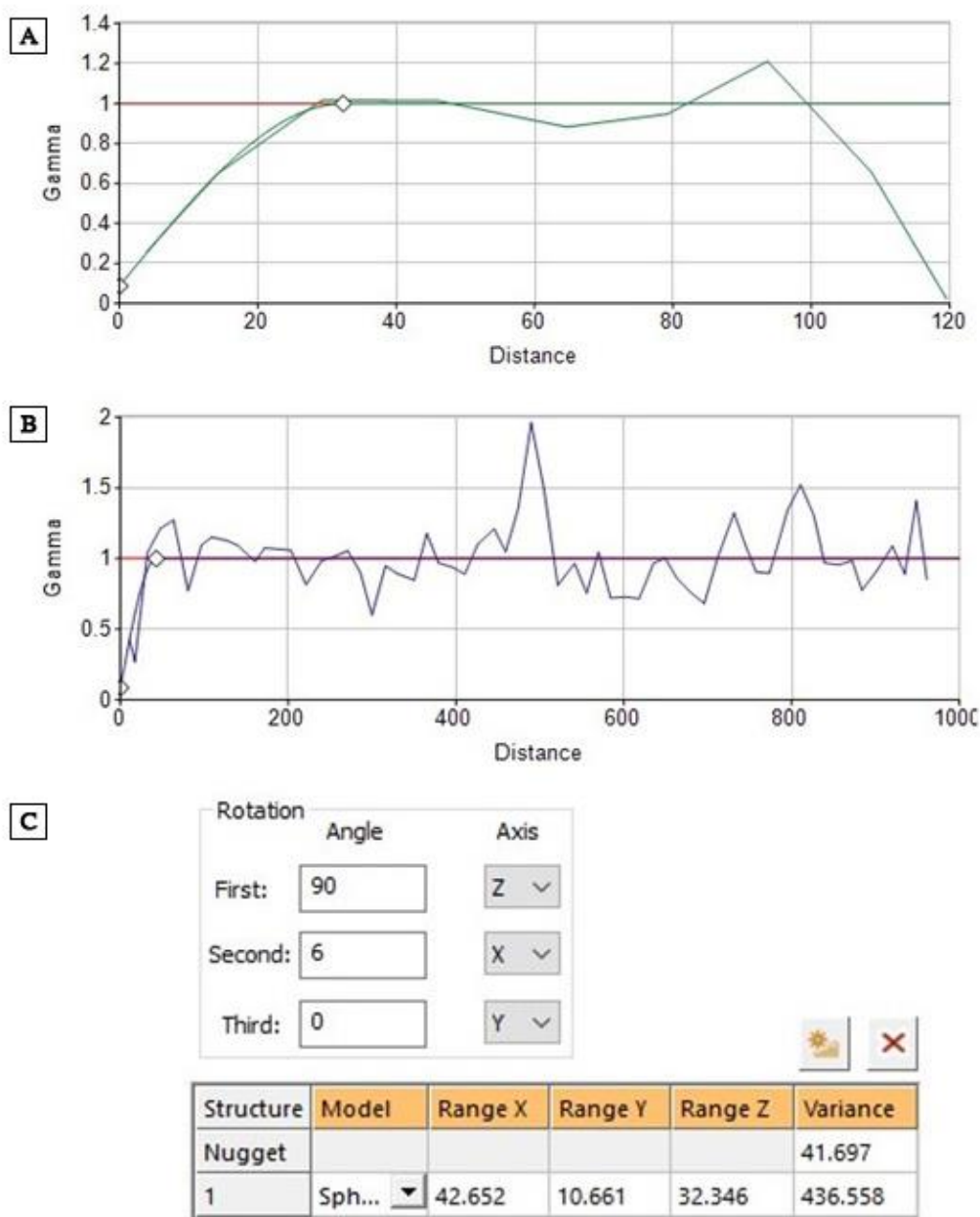


شکل ۸. A: نمودار توزیع عیار در نمونه‌ها و B: نمودار احتمال عیار آهن

Fig. 8. A: grade distribution in samples, and B: Probability graph of iron grade

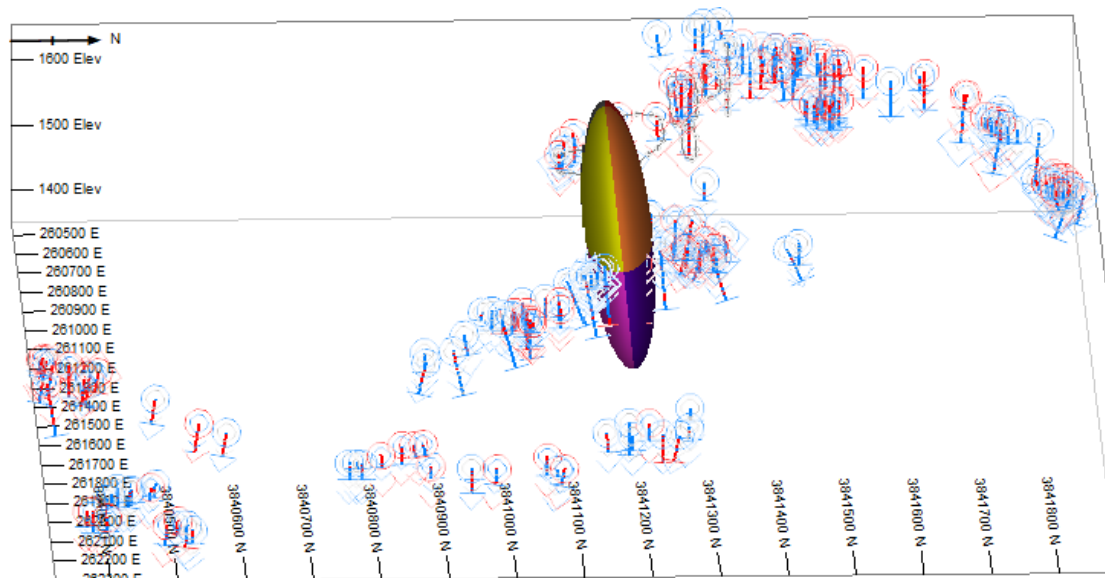
چال بیانگر وجود تناوبی از زون‌های کم‌عیار و پرعیار در کانسار است. بر اساس نتایج عملیات واریوگرافی، کانسار دارای ناهمسان‌گردی از نوع هندسی است. شکل ۱۰ نمای سه بعدی از بیضوی جستجوی حالت‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

برای تجزیه و تحلیل ساختار فضایی منطقه مورد بررسی، واریوگرافی داده‌های پردازش‌شده با استفاده از نرم‌افزار Surpac ترسیم شد. شکل ۹-A، B و C، واریوگرام امتدادی ترسیم شده برای داده‌های عیارسنجی آهن را نشان می‌دهد. اثر



شکل ۹. A، B و C: واریوگرام‌های جهتی فضای تخمین سنگ آهن در محدوده معدن ایله ۱

Fig. 9. A, B and C: Directional variograms of iron ore estimation space in Eileh1 mine



شکل ۱۰. نمای سه بعدی بیضوی جستجو در کانسار ایله ۱
Fig. 10. 3D view of the search ellipse in Eileh1 deposit

عوامل دیگری از جمله شدت تغییرات کیفیت کانسار و عیار آن نیز می‌شود. در این کانسار، چنان‌که در شکل ۱۱ نیز مشخص است، طول‌های نمونه‌گیری متفاوت بوده است؛ بنابراین ضروری است که با وزن‌دهی صحیح، داده‌ها ترکیب (کامپوزیت) شوند تا نمونه‌هایی با ارزش آماری یکپارچه را ایجاد کنند. برای این منظور باید توزیع فراوانی طول داده‌ها را رسم کرد. می‌توان طول معینی با بیشترین فراوانی نسبت به دیگر طول‌ها و واریانس کم را به عنوان طول مبنا (کامپوزیت) در نظر گرفت و میانگین عیار این طول را برای نقطه وسط کامپوزیت منظور کرد.

نکته مهم در کامپوزیت‌سازی انتخاب طول مناسبی برای آن است؛ به طوری که در آن طول باید:

- واریانس کامپوزیت‌های حاصل مطابق با واریانس داده‌های اولیه باشد.

- به ازای آن طول، کمترین مقدار داده حذف شود.

- داده‌های حذف‌شده متمایل به گروه عیاری خاصی نباشند که باعث انحراف در تخمین‌ها شوند.

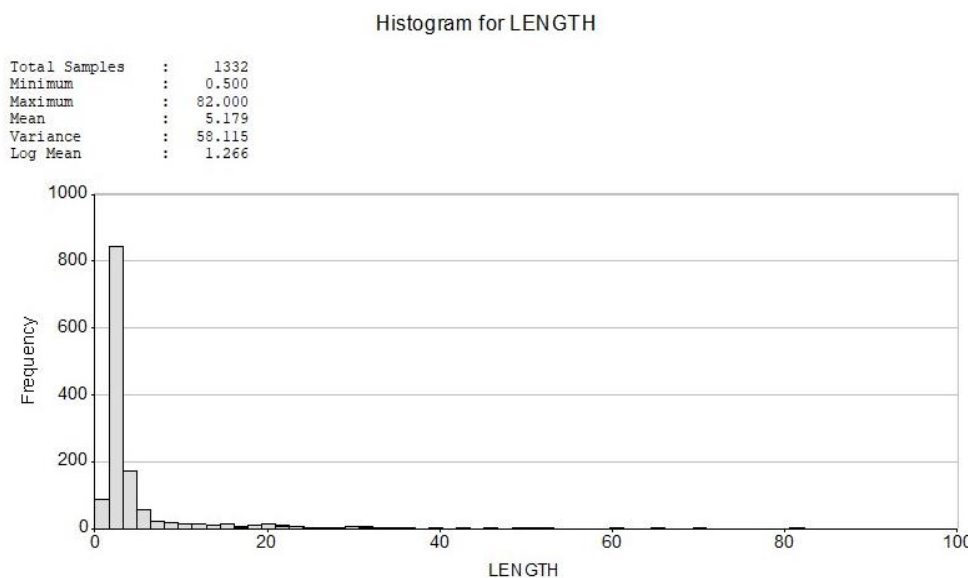
مدل‌سازی عیاری ماده معدنی به روش کریجینگ معمولی (با استفاده از نرم‌افزار Surpac)

نرم‌افزار SURPAC مانند سایر نرم‌افزارهای مشابه برای مدل‌سازی، نیازمند داده‌های خاص با قالب‌بندی منظم و استاندارد است. فایل‌های مورد نیاز برای وارد کردن به این نرم‌افزار شامل Assay (عیار عناصر و کانی‌های مهم از جمله آهن)، Survey (وضعیت گمانه‌ها در داخل زمین شامل آزیموت و شیب)، Collar (شماره گمانه و مختصات دهانه گمانه) و Gology (وضعیت زمین‌شناسی منطقه شامل نوع سنگ) است.

پس از حفر گمانه‌های اکتشافی، از مغزه‌های به دست آمده، نمونه‌گیری می‌شود. این نمونه‌ها اغلب به صورت هدف‌دار از نواحی تحت کانی‌زایی گرفته می‌شوند و تا حد ممکن سعی بر آن است که طول آنها برابر باشد؛ اما در عمل، به علل گوناگون مانند نبود لایه کانی‌سازی، عدم بازیابی مغزه و خردشدگی نمونه، امکان نمونه‌گیری پیوسته از تمام نقاط وجود ندارد و بنابراین طول نمونه‌ها برابر نخواهد بود. از سوی دیگر، طول نمونه‌ها دستخوش

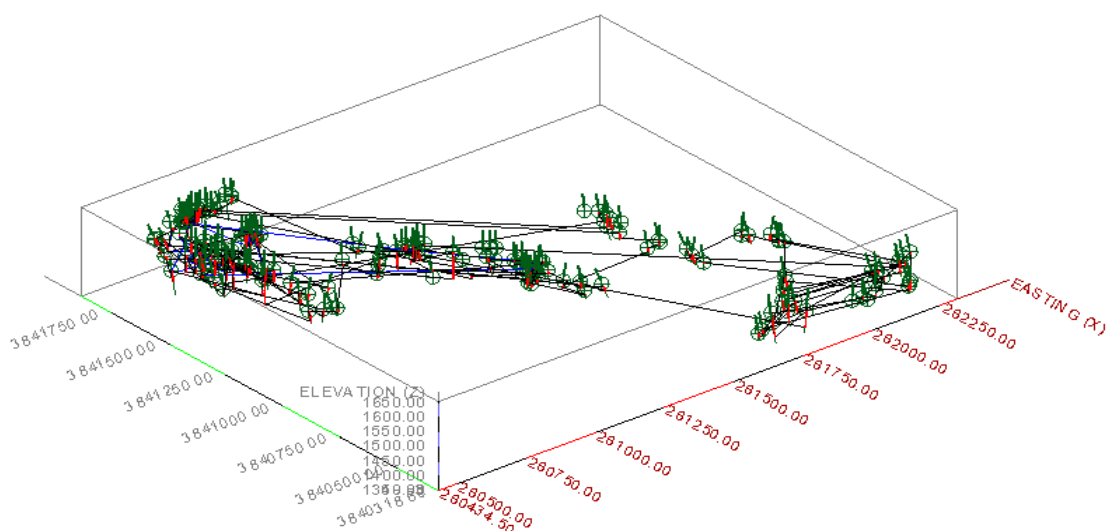
با ۱ متر در نظر گرفته شد و فایل کامپوزیت داده‌ها، در دامنه عیاری ۱۷ تا ۶۳ ایجاد شد (شکل ۱۲) و سپس مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

برای کامپوزیت‌سازی به کمک ترسیم هیستوگرام طول نمونه‌ها (شکل ۱۱) در حین تغییرات عیاری در مغزه‌های اکتشافی، با توجه به مناسب‌ترین طول برای تهیه کامپوزیت‌ها (طول با بیشترین فراوانی داده‌ها)، طول بهینه یکپارچه‌سازی در مورد متغیر آهن برابر



شکل ۱۱. هیستوگرام برای طول نمونه‌گیری داده‌های خام کانسار ایله ۱

Fig. 11. Histogram for the sampling length of the raw data of Eileh1 deposit

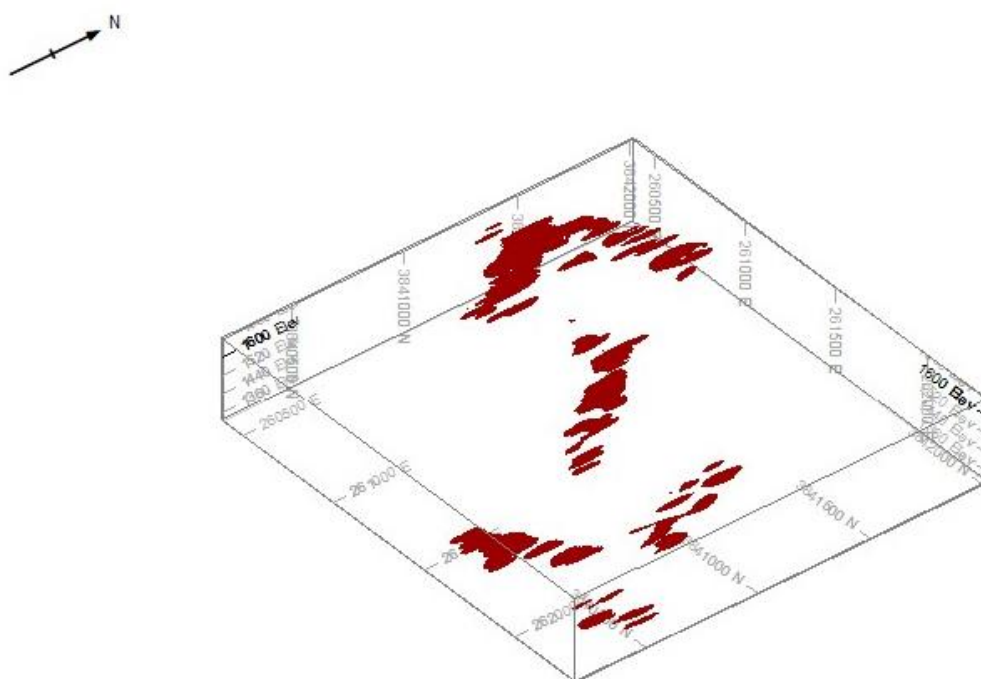


شکل ۱۲. نمای سه بعدی از کامپوزیت‌سازی عیاری گمانه‌های کانسار ایله ۱

Fig. 12. 3- A three-dimensional view of the grade composite construction of the boreholes of Eileh 1 deposit

پس از وارد کردن بانک اطلاعات اکتشافی و مدل‌سازی، وضعیت فضایی حفرهای اکتشافی و مقاطع عرضی در امتداد نیم‌رخ‌های اکتشافی ترسیم شد و با استفاده از اطلاعات موجود داده‌های اکتشافی، شکل و پیکره ماده معدنی به صورت یک دسته پوسته‌های توخالی تهیه و با استفاده از الگوریتم مثلث‌بندی نرم‌افزار SURPAC، حجم فضایی ماده معدنی مدل‌سازی شد (شکل ۱۳). سپس مدل بلوکی زمین‌شناسی که متداول‌ترین روش در برآورد مؤلفه‌های منابع معدنی محسوب می‌شود، ایجاد شد. برای این منظور، ابتدا باید گستره مناسبی با توجه به عمق گمانه‌ها و محدوده ماده معدنی تعریف شود (جدول ۱).

شکل ۱۳. نمایش سه بعدی از بلوک ماده معدنی محدوده معدن ایله ۱



شکل ۱۳. نمایش سه بعدی از بلوک ماده معدنی محدوده معدن ایله ۱
Fig. 13. 3-Dimensional view of Ore block model of Eileh 1 mine

جدول ۱. محدوده تعریف شده برای مدل بلوکی محدوده معدن ایله ۱

Table 1. Defined range for the block model of Eileh 1 mine

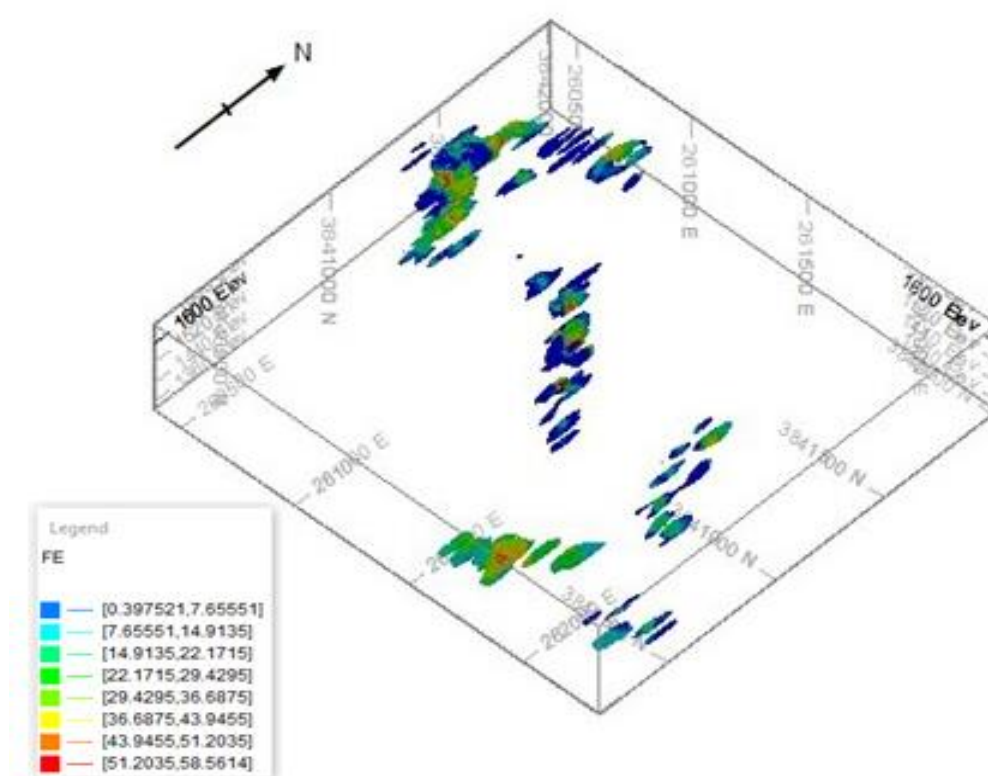
Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax
260428.9	262318.9	3840316	3841906	1353.82	1643.82

محدوده توپوگرافی در مدل تعریف شد. بلوک‌های بالای این محدوده به عنوان بلوک‌های هوا در مدل در نظر گرفته می‌شوند و دارای وزن مخصوص صفر هستند. با اتکا به مدل پیکره ماده معدنی، مرزهای کانسار در مدل بلوکی تعریف شدند. با

ابعاد بلوک‌ها با توجه به فواصل کارهای اکتشافی، در راستای X و Y به ترتیب، امتدادهای شرقی-غربی و شمالی-جنوبی معادل ۱۰ متر و در امتداد محور Z برابر با ۵ متر در نظر گرفته شد که تعداد ۳۰۶۳۳۴ بلوک ساخته شد. با تشکیل مدل بلوکی، ابتدا

مخصوص ۳/۸) انجام شد. پس از اجرای بررسی‌های عیار آهن و نیز برآورد وزن مخصوص توده سنگ در زون کانی‌زایی، برآورد تناژ ذخیره انجام شد. در ادامه برای مقایسه دو روش کریجینگ و عکس مجذور فاصله، تخمین ذخیره به روش عکس مجذور در نرم‌افزار RockWorks نیز انجام شد.

مشخص شدن فضای تخمین در مدل بلوکی، مؤلفه‌های ذخیره عیار آهن و وزن مخصوص کانسنگ مورد تخمین قرار گرفت. به ازای هر یک از این مؤلفه‌ها، یک ویژگی در مدل بلوکی تعریف و با استفاده از روش کریجینگ تخمین زده شدند (شکل ۱۴). تخمین وزن مخصوص نیز با رگرسیون استخراج شده از داده‌ها، انجام شد. برای مؤلفه وزن مخصوص (G.S)، برآورد در دو بخش، زون باطله (با وزن مخصوص ۲/۷) و رگرسیون بین عیار آهن (با وزن



شکل ۱۴. نمایش سه‌بعدی از مدل بلوکی ماده معدنی همراه رنگ‌بندی با توجه به ویژگی عیاری معدن ایله ۱

Fig. 14. 3- A three-dimensional view of the block model of the ore mineral along with the coloring according to the characteristic of grade of Eileh 1 mine

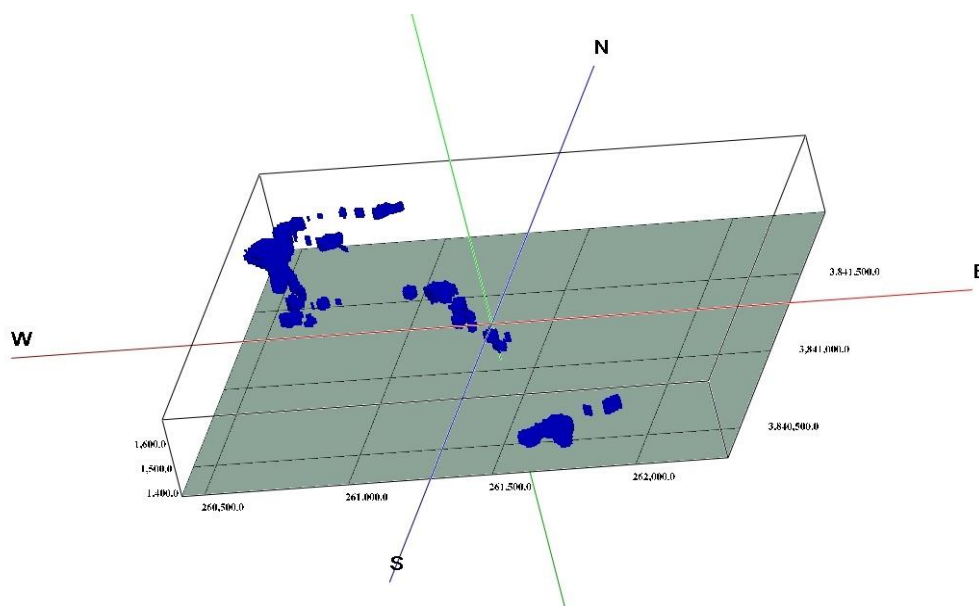
نرم‌افزار Rockworks از طریق ترسیم چاه‌نگار گمانه‌ها، ترسیم نیم‌رخ‌های عرضی لیتولوژی و عیارسنجی و مدل سه‌بعدی لیتولوژی، شناخت کاملی از وضعیت سطحی و عمقی کانسار را می‌دهد. مدیریت لاگ‌ها (گمانه‌های اکتشافی) و داده‌های سطحی، نقشه‌برداری عمومی و نقشه چاه‌ها، بررسی‌های لیتولوژی،

مدل‌سازی عیاری ماده معدنی به روش عکس مجذور فاصله (با استفاده از نرم‌افزار Rockworks)
نرم‌افزار RockWorks به عنوان یکی از ساده‌ترین و در عین حال کاربردی‌ترین نرم‌افزارهای علوم زمین بوده که برای تصویرسازی و تحلیل‌های زمین‌شناسی و معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بلوکی از یک گروه بلوک‌های منظم تشکیل می‌شود که به هر یک ویژگی‌هایی از قبیل عیار و یا کدهای مشخصاتی دیگر نسبت داده می‌شود. سپس در مراحل بعد با استفاده از مدل بلوکی ایجاد شده، تخمین میزان عیار و ذخیره کانسار صورت می‌گیرد. تمامی مراحل این فرایند برای محدوده مورد بررسی، برای عیار حد ۱۷ درصد (با در نظر گرفتن شرایط مختلف اقتصادی روز و آینده) انجام شد. برای ساخت مدل بلوکی کانسار نیز ابعاد بلوک‌ها برابر با $10 \times 10 \times 5$ متر (با حجم 1851444 متر مکعب) در نظر گرفته شد. این ابعاد بر اساس نوع ماده معدنی (آهن)، وضعیت و اطلاعات اکتشافی کانسار و در نظر گرفتن شرایط استخراج انتخاب شد. مدل بلوکی کانسار به ازای عیار حد ۱۷، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این مدل بلوکی با استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه آماره‌های طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع داده‌های عیارسنجی گمانه‌های اکتشافی محدوده ساخته شده است.

هیدرولوژی، تعیین حجم و ذخیره کانسار، بررسی‌های هیدروشیمیایی، ژئوتکنیک و ... از توانمندی‌های این نرم‌افزار است که با صرف کمترین زمان بهترین نتایج را ارائه می‌دهد. در نرم‌افزار RockWorks محاسبه حجم ماده معدنی از دو طریق، پنجره Manager Borehole، منوی Data-I، زیرمنوی Volumetrics و چهار مسیر دیگر در پنجره Utilities، امکان‌پذیر است.

برای محاسبه ذخیره به روش استفاده از منوی Data-I، ابتدا مدل بلوکی کانسار ساخته می‌شود. معمولاً توده‌های کانساری دارای شکل‌های هندسی نامنظم هستند که برای تخمین ذخیره درست این توده‌های کانساری، ابتدا مدل صلب (جامد) کانسار ایجاد می‌شود و سپس بلوک‌بندی کانسار صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، شکل هندسی نامنظم باید به صورت شکل هندسی منظم تبدیل شود تا محاسبه دقیق حجم امکان‌پذیر شود. یک مدل



شکل ۱۵. مدل بلوکی کانسار آهن ایله ۱ به ازای عیار حد ۱۷

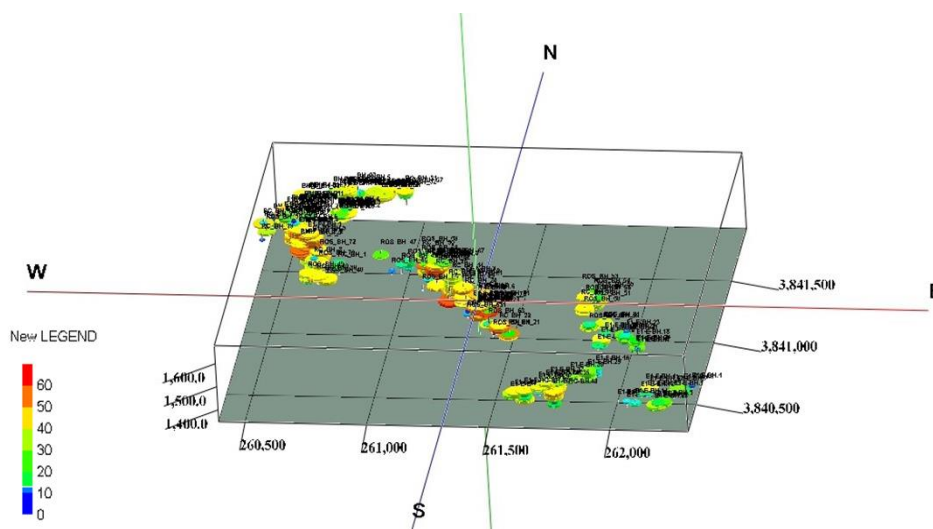
Fig. 15. Block model of Eileh 1 iron deposit for Cut-off grade 17

معدنی و نیز ترسیم مدل سه‌بعدی عیارسنجی کانسار به منظور شناخت کانسار محدوده اکتشافی ایله ۱ و مقایسه با نتایج حاصل از

در نرم‌افزار RockWorks، ابتدا با استفاده از ترسیم چاه‌نگار گمانه‌ها (شکل ۵)، مقاطع عرضی سنگ‌شناسی و عیارسنجی ماده

نمایش داده شده است که تغییرات عیار منطقه مورد بررسی با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار ۶۳ درصد محدوده رنگی مشخص شده است. بر اساس این شکل، بخش اعظم محدوده دارای عیار متوسط (کمتر از ۴۰ درصد) است که با رنگ سبز مشخص شده و محدوده با عیار نسبتاً بالا (بیش از ۴۵ درصد) در بخش مرکزی است که با رنگ قرمز مشخص شده است. بدیهی است که دقت تمام مدل‌های ایجاد شده، به تعداد گمانه‌های اکتشافی و میزان و دقت اطلاعات اکتشافی موجود بستگی دارد.

نرم‌افزار Surpac انجام شد. برای ارائه تصویری تغییرات عیارسنجی ماده معدنی درون کانسار، برش‌هایی در آن ایجاد شده است. پروفیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که شاخص بوده و هر پروفیل تا حد ممکن، بیشترین تعداد گمانه را دربرداشته باشد. در ترسیم نیم‌رخ عرضی عیارسنجی از الگوریتم عکس مجذور فاصله در ساخت مدل سه بعدی (صلب) جامد عیارسنجی استفاده شد و تغییرات میزان عیار ماده معدنی در گمانه‌های اکتشافی منطقه بر حسب درصد با طیف رنگی در شکل ۱۶



شکل ۱۶. تغییرات میزان عیار ماده معدنی در گمانه‌های اکتشافی منطقه اکتشافی معدن ایله ۱

Fig. 16. The Value of Assay Changes of mineral in the exploratory boreholes of the region in exploration of Eileh 1 mine

محدوده، مقادیر آنها مشخص شد.

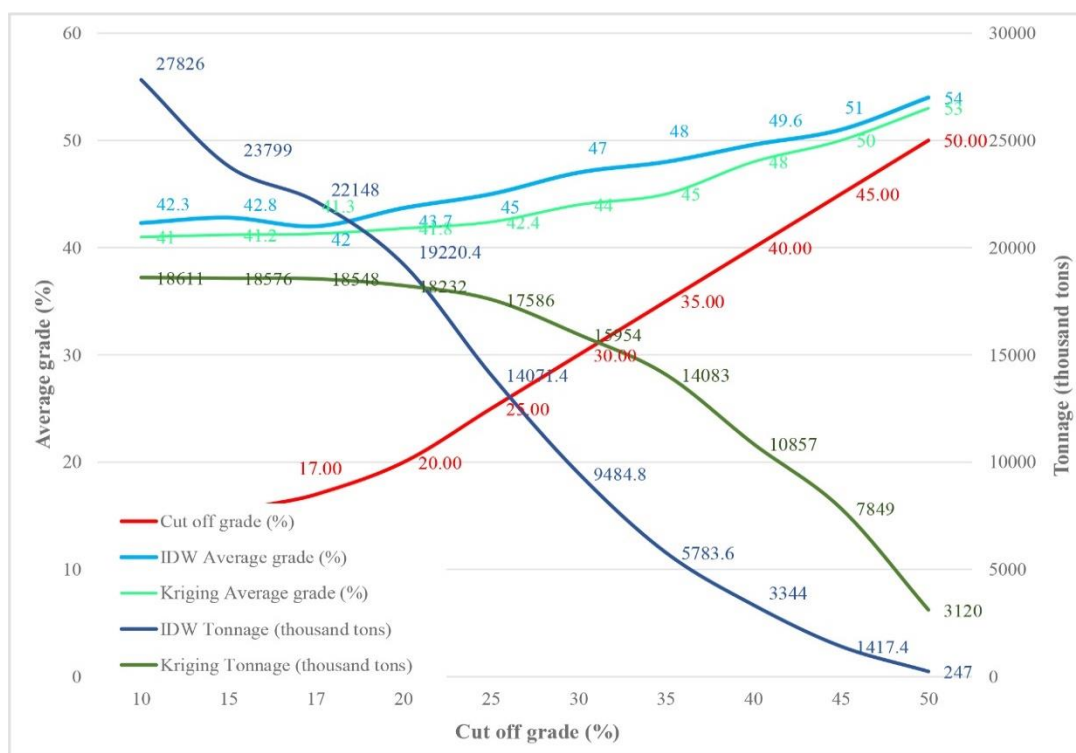
در این پژوهش، مدل‌سازی کمی سه بعدی کانی‌زایی (عیارسنجی) و ذخیره معدنی کانسار آهن ایله ۱ تایید، با استفاده از اطلاعات چاه‌نگار گمانه‌های اکتشافی و عیارسنجی مغزه‌های حفاری آنها برای ارزیابی نتایج حاصل از تخمین و دستیابی به نوعی دقت تخمینی، نتایج تخمین ذخیره به دو روش کلاسیک عکس مجذورفاصله (با استفاده از نرم‌افزار Rockwork) و زمین‌آماری کریجینگ (با استفاده از نرم‌افزار Surpac) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۱۷ منحنی عیار- تناژ کانسار آهن معدن ایله ۱ را با

بحث و نتیجه‌گیری

تخمین ذخیره و تهیه مدل بلوکی ماده معدنی شامل مراحل جداگانه‌ای است که انجام آگاهانه و دقیق آنها به یک ارزیابی دقیق و مدلی مناسب منجر می‌شود که در این محاسبات مقادیر پیش فرضی برای محاسبات ذخیره در نرم‌افزارها وجود دارد که معمولاً به نتایج مناسبی منجر نمی‌شود. بنابراین در این پژوهش با در نظر گرفتن شکل ماده معدنی به صورت یک دسته پسته‌های توخالی صحیح، بیشترین شعاع کاوش، تعداد کمینه و بیشینه نقاط مورد استفاده در تخمین بلوک و نحوه کاوش نقاط با تقسیم

متوسط عیار، افزایش می‌یابد.

استفاده از این دو روش را نشان می‌دهد. طبق انتظار در این شکل با افزایش عیار حد، میزان ذخیره کانسار، کاهش یافته و مقدار



شکل ۱۷. منحنی عیار- تناژ کانسار آهن معدن ایله ۱

Fig. 17. Grade-tonnage curve of Eile 1 mine iron deposit

عکس مجذور فاصله از دقیق‌ترین روش‌های کلاسیک تخمین ذخیره است؛ اما روش زمین‌آماري کریجینگ با در نظر گرفتن ساختار فضای تخمین و به دلیل ناریب بودن و دارا بودن کمترین میزان واریانس تخمین، دقیق‌تر بوده و از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است؛ به طوری که در روش عکس مجذور فاصله، با وجود بالا بودن دقت به دلیل بلوک‌بندی کانسار، میزان ذخیره کانسار در کانسارهای کم‌عیار به دلیل اختلاط زیاد کانسنگ و باطله در بلوک‌ها، قدری بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. جدول ۲ میزان حجم و ذخیره کانسار را به روش‌های مختلف نمایش می‌دهد.

نتایج این پژوهش در زمینه مدل‌سازی داده‌های عیارسنجی و تخمین ذخیره کانسار آهن ایله ۱ با استفاده از روش‌های عکس مجذور فاصله و کریجینگ در نرم‌افزارهای RockWorks و Surpac برای عیار حد ۱۷ درصد مطابق جدول ۲ نشان می‌دهد که میزان ذخیره محاسبه شده به روش‌های متفاوت و نرم‌افزارهای مختلف، به طور کلی اختلاف زیادی مشاهده نمی‌شود. چنان‌که در شکل ۱۷ مشخص است، نمودار عیار میانگین محاسبه شده به دو روش و در دو نرم‌افزار متفاوت بر هم منطبق بوده و تفاوت نمودارهای تناژ نیز در شیب خط نمودار و در عیارهای خاصی است (شکل ۱۷). با اینکه تفاوت زیادی در نتایج این دو روش مشاهده نمی‌شود و روش

جدول ۲. میزان حجم و ذخیره ماده معدنی کانسار آهن ایله ۱

Table 2. The Value of volume and reserve of ore mineral of Eileh 1 iron deposit

Selected Software	Cut off grade (%)	Average grade (%)	Volume	Weight of mineral deposit (T)	
				Measured reserve	
Inverse Distance	17	47	5,829,500	22,148,000	
Kriging	17	46	5,148,500	18,610,500	

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

از همکاری ریاست محترم مجموعه شرکت های صنعتی و معدنی عطامتال آقای مهندس عابدی و مدیر محترم واحد اکتشاف آقای دکتر رکنی، برای در اختیار گذاشتن اطلاعات لازم در این پژوهش، قدردانی می شود.

انجام بررسی های واریوگرافی از طریق ترسیم واریوگرام های امتدادی در جهت های مختلف نشان داد که کانسار دارای ناهمسان گردی از نوع هندسی است و در جهت محور X بیشترین کشیدگی و در جهت محور Y دارای کمترین کشیدگی است (شکل های ۹-C و ۱۰).

با توجه به نتایج به دست آمده از مدل سازی کانسار ایله ۱، نبود اطلاعات در مناطقی که در زمان حفاری اولیه قابل دسترسی نبوده و بعدها قابل دسترسی خواهند شد، پیشنهاد می شود برای تعیین دقیق تر ذخیره معدن، گمانه های جدیدی با شبکه منظم طراحی و اجرا شوند.

1. Tunberget
2. Inverse Distance Weight (IDW)
3. Lithology
4. Hydrology

References

- Aghanabati, A., 2006. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, 586 pp. Retrieved January 2004, from https://www.researchgate.net/publication/292808705_Geology_of_Iran_Tehran_Iran
- Ahmadi, R., 2010. Application of statistical patterns for ore reserve estimation emphasis to Ali-abad, Yazd copper mine. Arak University of Technology, Arak, Report 1, 102 pp. (in Persian with English abstract)
- 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*, 15(1): 1–34. <http://dx.doi.org/10.52547/jeg.15.1.1>
- Daya, A.A., 2012. Reserve estimation of central part of Choghart north anomaly iron ore deposit through ordinary kriging method. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(4): pp. 573–577. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2012.01.022>
- Ghajar, Y. and Soltani-Mohammadi, S., 2015. Statistical and geostatistical modeling of Fe, S and P grade in Jalal-abad Iron ore mine. 33rd National Geosciences Symposium, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. Retrieved January 2015, from https://www.researchgate.net/publication/274564712_mqaysh_rwshhay
- Hassani pak, A.A., 1998. Geostatistics. Tehran University Press, Tehran, 314 pp. (in Persian)
- Hassanipak, A.A., 2000. Modeling of metallic and nonmetallic deposits and their exploration application. Tehran University Press, Tehran, 512 pp. (in Persian)
- Hassani Pak, A.A., Sharafodin, M.S., 2001. Exploration data analysis. Tehran University Press, Tehran, 987 pp. (in Persian)
- Madani, H., 1997. Principles of prospecting, exploration and evaluation of ore reserves. Khane Farhang, Tehran, 816 pp. (in Persian)
- Rasera, L., Felipe, L. and Costa, C., 2015, A conflict-free, path-level parallelization approach for sequential simulation algorithms; *Computers & Geosciences*, 80: 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.03.016>
- Rooki, R., Mohammadi, M.N. and Safari, M., 2022. Reserve estimation of IV deposit of Sangan Iron ore mine using geostatistical method and SURPAC software. *Journal of Mining Engineering*, 17(56): 21–39. <https://doi.org/10.22034/ijme.2022.537596.1879>
- Salsabilian, F., 2006. Iron deposit reserve estimation of northern anomaly of Bafg using indicator kriging. 5th Students Mining Engineering Conference, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Retrieved April 2006, from <https://civilica.com/doc/9735>
- Sharif, A.J. and karim-zadeh, V., 2015. Variography of exploration data of Korkora2 iron ore deposit for determination of required parameters in order to reserve estimation. 33rd National Geosciences Symposium, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Sharifi, H., 2023. Geological map report 1:1000 hematite Eile 1, Negin Kani Ehya Industrial and Mining Company.
- Surur, A.N., 2008. Surveying, modelling and visualisation of geological structures in the Tunberget tunnel. M.Sc. Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 75 pp.
- Ternet, Y., Guillou, Y. and Maurizot, P., 1978. Geological map of Iran, 1:100000 Series, Sheet 8059, Khaf.
- Yousefi, M. and Khaloukakai, R., 2015. Computer use in mining (exploration, extraction, geology and Mapping. Jihad Publications, Amirkabir Industrial University, Tehran 287 pp.
- Zakary, M., Rasouli, V. and Tokhmchi, B., 2005. Geostatistical modeling and reserve estimation of Gol-Gohar iron ore (3) anomaly using Surpac software. 9th Symposium of Geological Society of Iran, Kharazmi University, Tehran, Iran.