

Research Article

Separation of geological ore and gangues zones based on multivariate fractal modeling in Jalal Abad iron ore deposit, Central Iran

Misagh Mirzaei¹, Ahmad Adib^{1*}, Peyman Afzal¹, Esmail Rahimi¹, Ghodratollah Mohammadi¹

1- Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Keywords: Ore, Gangues, Fractal model, Concentration-volume, Jalal Abad

1- Introduction

One of the importance problem in mining engineering especially for mine planning is modeling of ore and gangue grades in different ore deposits. Elemental modeling is important based on different elements in a case study based on ore deposit type. Sulfur and phosphorous are essential for iron mines' planning because these are dangerous for environment and steel production. Based on this issue, high grades of these elements are penalty for iron concentration production (Zahedi and Afzal, 2018; Yasrebi and Hezarkhani, 2019; Wu et al., 2016). Fractal modeling is proper approach for detection of zones and populations in geosciences and mining engineering especially elemental zones (Mandelbrot, 1983; Bolviken et al., 1992; Li et al., 2003). Fractal methods are independent from data distribution and related to geometrical spaces of different variables. Main fractal models are concentration-area (C-A; Cheng et al., 1994), concentration-distance (C-D; Li et al., 2003) and concentration-volume (C-V; Afzal et al., 2011). The C-V model is used for delineation of mineralized zones in various ore deposits. In this study, main aim is modeling of sulfur and phosphorous zones based on the C-V fractal model in Jalal Abad iron ore deposit, NE Iran. The main mineral of Jalal Abad iron ore I and II is magnetite and hematite is a secondary mineral and is often found in the surface parts of the deposit and is insignificant in the deep parts and its amount is less than magnetite. Sulfide minerals of Jalal Abad I include marcasite, covellite and bornite (Khosrovanjam and Shahabpour 1998).

2- Materials and methods

The C-V fractal model is introduced for detection of mineralized zones in different ore deposits by Afzal et al. (2011) as follows:

$$V(\geq \rho) \propto \rho^{-D} \quad (1)$$

In this formula, V, ρ and D are occupied volume of ore grades equal and more than ρ and D fractal dimension, respectively (Daneshvar Saein, 2017; Yasrebi and Hezarkhani, 2019).

3- Discussion

In this study, 2929 samples from 72 boreholes were collected and analyzed by XRF method. Based on statistical analysis, mean values are 36.18%, 1.087% and 0.1018% for Fe, S and P, respectively. Based on abnormal distribution, their medians are thresholds for mineralized zones which are 53.55%, 2.585% and 0.1852% for Fe, S and P, respectively.

* Corresponding author: adib@azad.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2022.39754.2272

Received 2022-01-13

Accepted 2022-06-05

S and P 3D block models were created by Datamine.Studio.3.21.7164.0 using ordinary kriging estimation method. These block models are input for fractal modeling. The log-log plots for Fe, P and S indicate multifractal nature. High grade zones for Fe, P and S contain >57.54%, >7.76% and >2.95%, respectively. These zones are located marginal parts especially in the eastern part of this deposit. There are five zones for this deposit.

4- Discussion

Results obtained by this study represent that the main mineralized zones have a grading range as $Fe \geq 51$, $S \leq 0.7$ and $P \leq 0.4\%$. The fourth and fifth populations obtained by the iron block model are related as the main ores. Gangues and weakly mineralized zones also indicated at the first and second zones which are located in the marginal parts of the Jalal Abad deposit. Consequently, optimal decisions can be made based on economic changes related to time and market conditions for the third zone.

References

- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration* 108, 220–232.
- Bolviken, B., Stokke, P.R., Feder, J., Jossang, T., 1992. The fractal nature of geochemical landscapes. *Journal of Geochemical Exploration* 43, 91–109.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration* 51, 109-130.
- Daneshvar Saein, L., 2017. Delineation of enriched zones of Mo, Cu and Re by concentration volume fractal model in Nowchun Mo-Cu porphyry deposit, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 9, 64- 72.
- Khosroanjam, M., Shahabpour, J., 1998. The occurrence of Jalalabad deposit, Izan. *Journal of Crystallography and Mineralogy* 2, 107–122 (in Persian).
- Li, C.J., Ma, T.H., Shi, J.F., 2003. Application of a fractal method relating concentration and distances for separation of geochemical anomaly from background. *Journal of Geochemical Exploration* 77, 167–175.
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, San Fransisco, 468 p.
- Mart, W.S., Markey, G., 2013. *Intelligent Mining Software “Solutions” IMS - Lerch-Grossman Pit Optimization*. Mine Map Pty Ltd.
- Wu, J., Yang, J., Ma, L., Li, Zh., Shen, X., 2016. A system analysis of the development strategy of iron ore in China. *Resources Policy* 48, 32-400.
- Yasrebi, A.B., Hezarkhani, A., 2019. Resources classification using fractal modelling in Eastern Kahang Cu-Mo porphyry deposit, Central Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 11, 56-67.
- Zahedi, R., Afzal, P., 2018. Determination of phosphorous and sulfur zonation using fractal modeling in Jalal Abad iron ore, SE Iran, The 18th International Geo Conference SGEM 2018, pp. 247-254.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Mirzaei, M., Adib, A., Afzal, P., Rahimi, E., Mohammadi, G, 2022. Separation of geological ore and gangues zones based on multivariate fractal modeling in Jalal Abad iron ore deposit, Central Iran. *Adv. Appl. Geol.* 12(3), 573-588.

DOI: 10.22055/aag.2022.39754.2272

url: https://aag.scu.ac.ir/article_17841.html

©2022 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.

جدایش زون‌های کانه و باطله زمین‌شناسی بر اساس مدلسازی فرکتالی چند متغیره در کانسار سنگ آهن جلال آباد، ایران مرکزی

میناق میرزائی

گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احمد ادیب*

گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پیمان افضل

گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اسماعیل رحیمی

گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

قدرت الله محمدی

گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*adib@azad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۵

چکیده

کانسار آهن جلال آباد در ۳۸ کیلومتری شمال غربی شهرستان زرنند با حدود ۲۰۰ میلیون تن ذخیره سنگ آهن با عیار متوسط ۴۶/۲ درصد آهن، ۹۸/۰۷ درصد گوگرد و ۰/۰۷ درصد فسفر یکی از هفت کانسار مهم آهن در ایران مرکزی می‌باشد. سنگهای معدنی این محدوده شامل سنگ آهن پر عیار اکسیده کم گوگرد، سنگ آهن پر عیار مگنتیتی گوگرددار و سنگ آهن کم عیار مگنتیتی سیلیس دار می‌باشد. جدایش زون‌های کانه‌زایی بر اساس گسترده‌گی کانه و باطله زمین‌شناختی برای برنامه‌ریزی تولید و عملیات حفاری در معادن حائز اهمیت است. هدف اصلی این پژوهش جدایش و تفکیک زون‌های معدنی بر پایه فراوانی و گسترش فضایی کانه و باطله معدنی با استفاده از روش مدلسازی فرکتالی در کانسار است. مدل فرکتالی عیار - حجم (C-V) برای عناصر آهن، گوگرد و فسفر، نشان داد که مناطق کانی‌سازی اصلی معدنی دارای محدوده بهینه عیاری برای این عناصر به ترتیب $S, Fe \geq 51$ و $P \leq 0.4$ و ≤ 0.7 درصد است که با زون‌های چهارم و پنجم جامعه‌های بدست آمده از مدل بلوکی آهن به عنوان کانه اصلی در ارتباط هستند. باطله‌های زمین‌شناسی نیز زون‌های اول و دوم را تشکیل می‌دهند و برای زون سوم نیز می‌توان بر اساس تغییرات اقتصادی مرتبط با زمان و شرایط بازار تصمیمات بهینه اتخاذ نمود.

کلمات کلیدی: کانه، باطله زمین‌شناسی، مدل فرکتالی، عیار - حجم، جلال آباد

مقدمه

(Mart and Markey, 2013). معادن سنگ آهن، به ویژه معادن روباز، به عنوان منبع ماده اولیه و اصلی تولید فولاد، مقادیر زیادی از مواد معدنی سنگ معدنی را در تمام بخشهای معدنی تولید کرده‌اند. مقادیر بالای گوگرد و فسفر در سنگ آهن بر فرآیند تولید در صنایع فولاد تاثیر داشته و برای محیط زیست مضر بوده و می‌تواند باعث ناپایداری زیست‌محیطی شود. علاوه بر این، هوازدهگی گوگرد در سنگ آهن و پسماندهای زباله باعث تخلیه معادن اسیدی (AMD) می‌شود که برای خاکها، آبهای سطحی و تجهیزات معدنی خطرناک است. بر این اساس، مقادیر زیاد این عناصر در فضای کار و یا همرا با مواد استخراج

یکی از مسائل اصلی برای برنامه‌ریزی تولید و طراحی معدن، تهیه نقشه زون‌بندی مناسب معدن بر اساس عیار سنگ معدن و سایر عوامل تاثیر گذار در امر تولید است. (Seymour, 1995; Hustrulid and Kuchta, 2006; Yasrebi et al., 2011). علاوه بر این، تشخیص مناطق بر اساس فراوانی عناصر مضر در ذخایر مختلف سنگ معدن برای عملیات بهره برداری ضروری است. عیار کانه‌های اصلی و عناصر موجود در باطله زمین‌شناسی برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری از معادن به ویژه برای محاسبات اقتصادی ضروری هستند (Yasrebi et al., 2017).

توزیع غیر نرمال: حد آستانه: میانه

روش‌های متفاوتی برای ترسیم مناطق حاوی ذخایر مختلف سنگ معدن معرفی شده است. یکی از آنها روش فرکتال است که در سالهای اخیر توسعه زیادی یافته است (Ghezelbash et al., 2019). بر اساس Mandelbrot (۱۹۸۳) مدل‌سازی فرکتال برای تشخیص فراوانی‌های مختلف بر مبنای ویژگی‌های طبیعی توسعه یافته و بر اساس آن مدل‌های متفاوتی در شاخه‌های علوم زمین ارائه شده است، به عنوان مثال می‌توان به، مدل فرکتالی عیار - مساحت (C-A) چنگ و همکاران (Cheng et al., 1994)، مدل عیار - فاصله (C-D) لی و همکاران (Li et al., 2003)، مدل عیار - حجم (C-V) افضل و همکاران (Afzal et al., 2011) و نقشه‌برداری از شاخص‌های ژئوشیمیایی که توسط قزلباش و همکاران (Ghezelbash et al., 2019) ارائه شده اشاره نمود. مدل فرکتال C-V برای تشخیص زون‌های کانه‌زایی در معادن مختلف استفاده می‌شود. علاوه بر این، مدل C-V برای طبقه‌بندی فراوانی‌های مختلف متغیرهای منطقه‌ای دیگر مانند ویژگی‌های سنگ‌شناسی، پارامترهای زیست محیطی و اقتصادی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Yasrebi et al., 2017) و (Zahedi and Afzal, 2018). هدف اصلی این مطالعه تفکیک مناطق مختلف معدنی بر اساس ویژگی‌های سنگ آهن (Fe%) و ترکیبات مضر شامل گوگرد و فسفر با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی عیار - حجم (C-V) در کانسار آهن جلال زرنند واقع در در زون ساختاری ایران مرکزی، بلوک یزد، بخش جنوبی زون کاشمر کرمان، شهرستان زرنند (شکل ۱) برای تسریع اکتشاف آتی، استخراج و اقتصادی نمودن روند تولید در این معدن است.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی فرکتالی عیار - حجم (C-V)

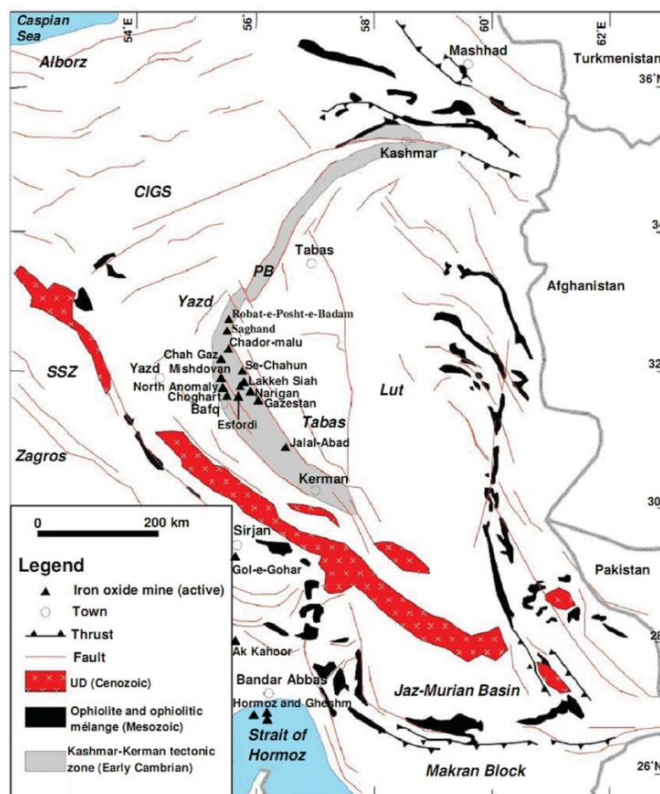
افضل و همکاران (Afzal et al., 2011)، روش فرکتال عیار - حجم (C-V) را برای ترسیم مقادیر آستانه و مناطق کانه‌زایی معرفی و در نظر گرفته‌اند. در این روش فرمول مورد استفاده مطابق با رابطه ۱ ارائه گردیده است:

$$V(\geq \rho) \rho - D \quad (1)$$

که در آن V حجم دربرگیرنده عیارهای بزرگتر و مساوی ρ در کانسار و D بعد فرکتال است. داده‌های ژئوشیمیایی بعد از شبیه‌سازی یا برآورد زمین‌آمار مورد استفاده قرار می‌گیرد (Daneshvar Saein, 2017; Yasrebi and Hezarkhani, 2019).

شده برای ادامه کار مضر بوده و نمره منفی برای بلوک استخراج شده در یک معدن آهن است (Zahedi and Afzal, 2018; Yasrebi and Hezarkhani, 2019; Wu et al., 2016). جداسازی زون کانه‌زایی از زمینه معدن یک موضوع اساسی در ژئوشیمی اکتشافی می‌باشد. یک زون کانه‌زایی ژئوشیمیایی، ناحیه‌ای است که تمرکز عنصری خاص بیشتر از یک مقدار آستانه ای قطعی که توسط روش‌های مختلف از قبیل روش‌های آماری مشخص شده است، باشد (Bolvik et al., 1992; Cheng et al., 1996; Li et al., 2003). زون کانه‌زایی نشان دهنده زمینه محلی و مقادیر پر عیار آن نشان دهنده کانه‌زایی‌های واقعی است. از نظر اکتشافی در اطراف اغلب کانسارها هاله‌هایی تشکیل می‌شود. این هاله‌ها نسبت به مناطق اطراف خود پرعیارترند ولی عیار آنها در حد کانه‌سازی، اقتصادی نیست، این هاله‌ها کانه‌سازی را مانند غلافی بزرگ در برمی‌گیرند و بخشی از زون کانه‌زایی را تشکیل می‌دهند. روش‌های آماری مختلفی برای جداسازی و تشخیص زون کانه‌زایی از زمینه وجود دارد. این روش‌ها از انواع ساده (بر اساس پارامترهای آماری توزیع عناصر) تا پیچیده (بر اساس ساختار فضایی داده‌ها) تغییر می‌کنند. در واقع می‌توان این روش‌ها را به دو گروه روش‌های ساختاری و غیرساختاری تقسیم نمود. روش‌های سنتی آمار کلاسیک عمدتاً غیر ساختاری هستند و موقعیت فضایی نمونه و ارتباط آن با سایر نمونه‌ها را در نظر نمی‌گیرند، به عنوان مثال می‌توان به روش‌هایی نظیر جداسازی عناصر بر اساس میانه و انحراف معیار ($\bar{X} + 2S$)، جداسازی بر اساس حاصل ضرب P.N، جداسازی با استفاده از نمودار احتمال، روش آماره انفعال، استفاده از تحلیل تمایز و استفاده از تحلیل فاکتوری اشاره کرد. در این پژوهش از روش آمار کلاسیک متداول جداسازی بر اساس میانه و انحراف معیار ($\bar{X} + 2S$) بهره گرفته شده است (Hawkes and Webb., 1979). بر اساس این روش می‌توان با آمار کلاسیک برای عناصر با توزیع نزدیک به نرمال، حد زمینه را (میانگین + انحراف معیار) و حد زون کم عیار را (میانگین + دو برابر انحراف معیار) و حد زون متوسط عیار را (میانگین + سه برابر انحراف معیار) و حد زون پر عیار را (میانگین + چهار برابر انحراف معیار) را در نظر گرفت. برای عناصر دیگر نیز که دارای توزیع غیر نرمال هستند، حد آستانه (حد آномالی) را برابر میانه در نظر می‌گیریم.

$(\bar{X} + S)$	حد آستانه (حد زمینه):	توزیع نرمال
$(\bar{X} + 2S)$	حد زون کم عیار:	
$(\bar{X} + 3S)$	توزیع نرمال حد زون متوسط عیار:	
$(\bar{X} + 4S)$	حد زون پر عیار:	



شکل ۱- موقعیت معدن جلال آباد در زون تکتونیکی کرمان - کاشمر از خرده قاره ایران مرکزی، بلوک یزد، با تغییرات از Ramezani و Tucker (2003).

Fig.1. Structural-map- of Jalal Abad Mine in Kashmar – Kerman tectonic zone of Central Iranian microcontinent, Yazd block. Modified from Ramezani and Tucker (2003).

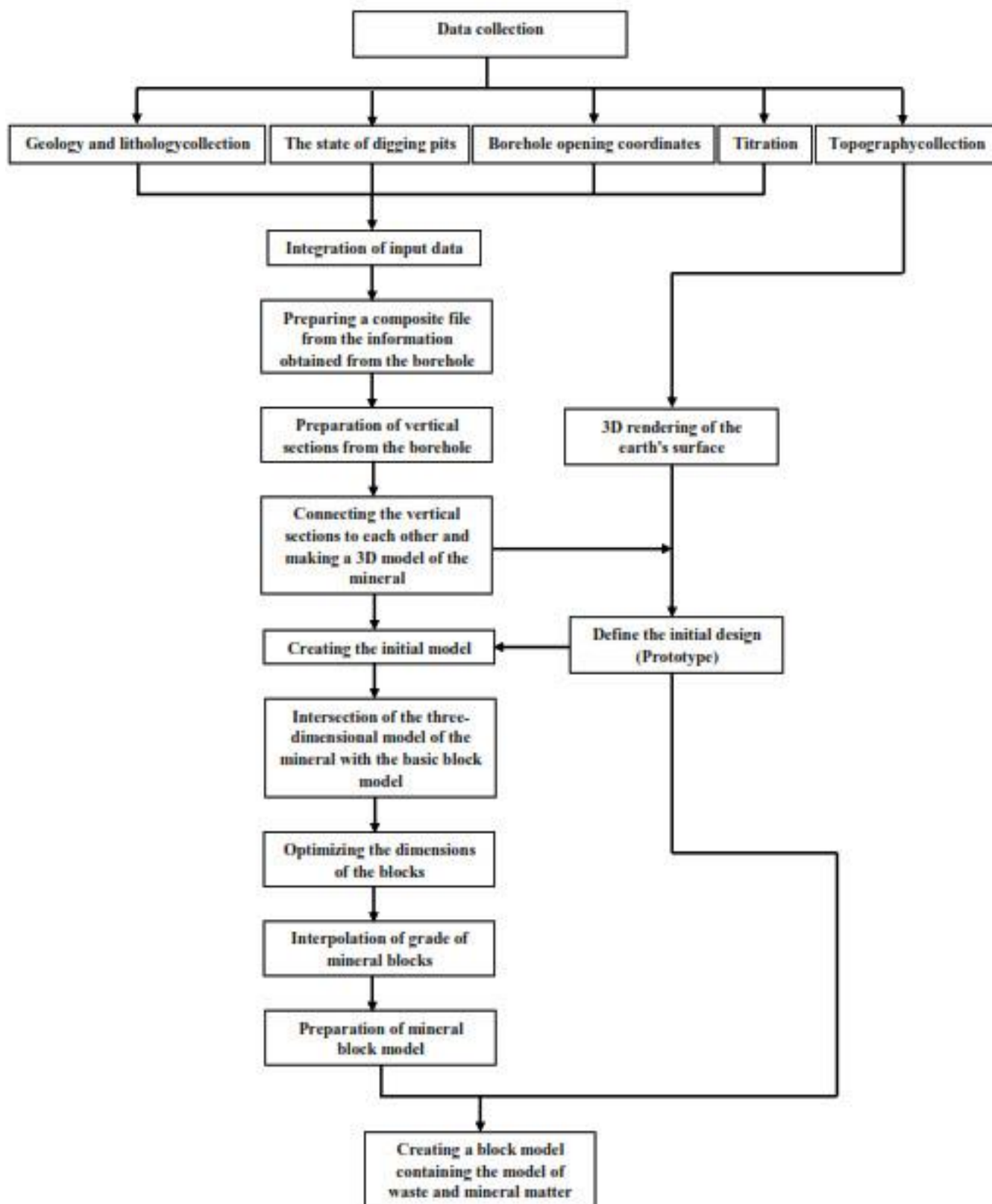
رسوبی - ولکانیکی، توده‌های نفوذی و سنگ آهک با سن اینفراکامبرین و پالئوزوئیک رخمون دارد. مهمترین واحدهای تشکیل دهنده کانسار جلال آباد سنگ‌های سری مراد و واحدهای آتشفشانی - رسوبی کامبرین زیرین سری ریزو - دزو است که در زمان نئوپروتروزوئیک پایانی تا کامبرین زیرین در منطقه تشکیل شده اند (Ramezani and Tucker, 2003). کانی‌سازی اغلب در بخش‌های عمیق و در سیلتستون، سیلتستون ماسه‌ای، سنگ‌های آتشفشانی اسیدی و دولومیت گروه ریزو صورت گرفته است (شکل ۳). افق‌های کناره‌دار از سیلتستون‌های کلریتی شده، ماسه‌سنگ سیلنتی، بخش‌های متاسوماتیتی شده کلریتی - تالکی و دولومیتی، کانسنگ‌های مگنتیتی با میان لایه - های دولومیتی، ماسه‌سنگ‌های آهکی، سنگ‌های کربناتی سیلیسی شده، توف و توفیت تشکیل شده است. سنگ‌های آذرین مافیک موجود در منطقه جلال آباد با سنگ‌های موجود در منطقه آهن‌دار بافق شباهت زیادی دارند و از نظر سنی به کامبرین زیرین نسبت داده می‌شود که همراه سنگ‌های ولکانیکی و رسوبی کامبرین زیرین (گروه ریزو و دزو دیده می‌شوند (Ramezani and Tucker, 2003).

ساخت مدل بلوکی

در این مقاله برای مدلسازی از نرم افزار Datamine.Studio.3.21.7164 که توانایی مرتب کردن داده‌های ذخائر در حالت دو بعدی و سه بعدی و مدلسازی برای ذخائر مختلف رگه‌ای و توده‌ای و نهایتاً طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز و زیر زمینی را دارد استفاده شده است. با توجه به قابلیت این نرم افزار و امکان انجام محاسبات زمین آماری در آن، می‌توان با دریافت اطلاعات گمانه‌های اکتشافی و تجزیه تحلیل آنها و با توجه به توزیع عیار ماده معدنی مورد نظر، محدوده توده معدنی را دقیق تر مشخص کرد و طرح استخراجی مناسب با آن توده معدنی را ارائه داد. در حالت کلی روند ساخت یک مدل زمین‌شناسی توسط نرم افزار Datamine.Studio.3.21.7164 به پنج مرحله آماده‌سازی اطلاعات ورودی، پردازش اطلاعات، تهیه مقاطع زمین‌شناسی، تهیه مدل ترسیمی از مقاطع و نهایتاً بلوک‌بندی مدل قابل تفکیک است (Ahmadi, 2008) (شکل ۲).

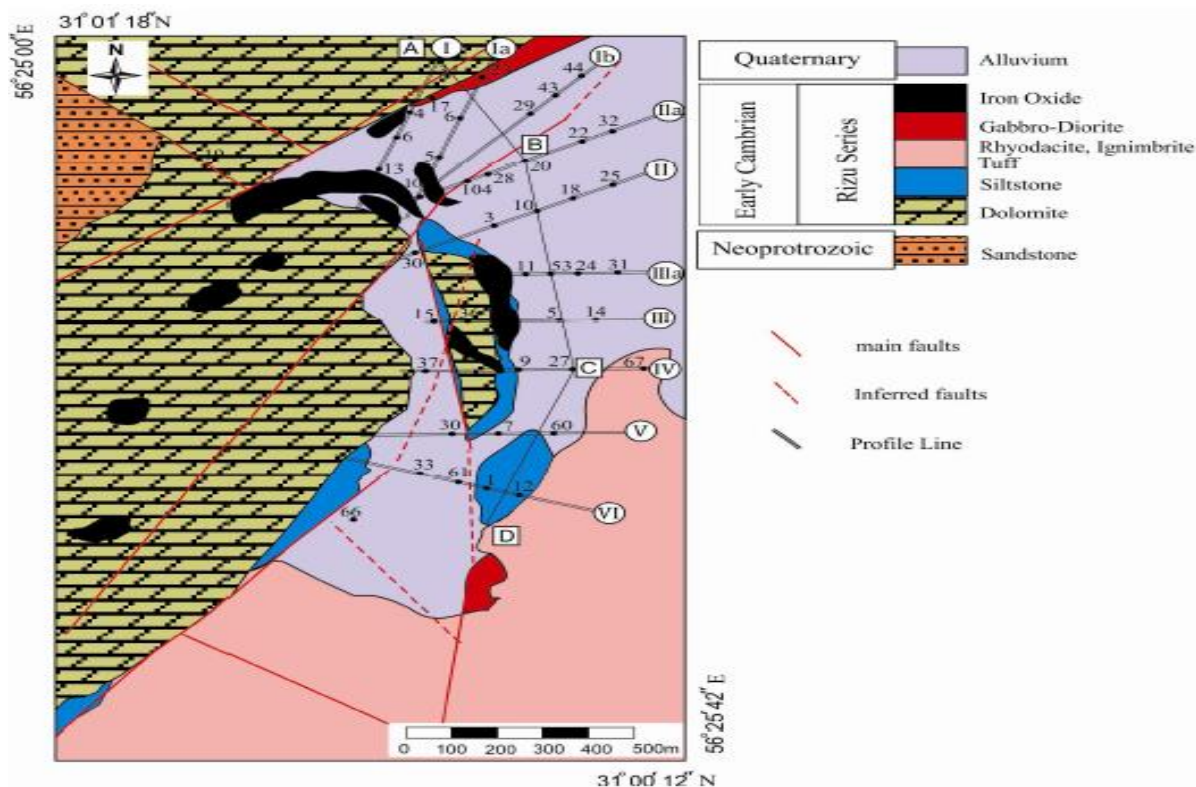
زمین‌شناسی و کانی‌شناسی کانسار

کانسار آهن جلال آباد در بلوک یزد از زون ساختاری ایران مرکزی و در شهرستان زرنند واقع شده است (شکل ۲). در این منطقه، سنگ‌های



شکل ۲- مراحل تهیه مدل بلوکی (Ahmadi , 2008).

Fig. 2. Steps to prepare a block model (Ahmadi, 2008).



شکل ۳- نقشه زمین شناسی معدن جلال آباد (Karemi Sharake and Mehrabe, 2017).

Fig. 3. Geological map of Jalal Abad Iron deposit (Karemi Sharake and Mehrabe, 2017).

(Geotov and Esev, 1976). ماده معدنی در این معدن به بخش خاصی از لایهها اختصاص دارد و عیار آهن نیز به صورت تدریجی از بخش ماسه سنگ کوارتز - فلدسپاتی کم عیار به بخش پریکار و سپس به بخش کم عیار و به طرف بالاتر به سنگهای سیلتی کم عیارتر منتهی می شود. تکرار تناوب بخش کم عیار و پریکار نشان دهنده فعالیت و توقف فعالیت رسوب گذاری آهن در یک محیط رسوب گذاری در منطقه است.

در جنوب شرق کانسار جلال آباد توده بازی و دایکها، لایه های حاوی سنگ معدن را قطع کرده و کانسار را به دو بخش I و II تفکیک می نماید، بخش I لایه ای شکل و با سنگ های دیواره هم شیب قرار گرفته و در زیر آن افق ماسه سنگی کوارتز - فلدسپاتی حضور دارد، ولی بخش II نامنظم است و نسبت به سنگ های کربناتی به صورت دگرشیب قرار دارد. در جدول (۱) انواع سنگها و در جدول (۲) مقایسه درصد آهن در واحدهای سنگی معدن جلال آباد نشان داده می شود

جدول ۱- تقسیم بندی سنگ آهن در کانسار آهن جلال آباد I و II.

Table 1. Classification of iron ore in Jalal Abad I and II iron ore deposit.

Type of iron ore	Possible reserve (million tons)	Percentage of iron	Phosphorus percentage	Sulfur percentage
High grade magnetite iron ore	91.6	53.47	0.08	1.18
Oxidized high grade iron ore	20.6	55.70	0.05	0.15
Low grade iron ore	88.2	23.57	0.08	1.17

جدول ۲- مقایسه درصد آهن در سنگ های معدن جلال آباد.

Table 2. Comparison of iron content in Jalal Abad ore deposit.

Type of stone	Average percentage of iron in stone units
Dolomite limestone	4.55
Diabase	9.63
Tal and chlorite schist	4.3
Silitic rocks	11.45
Quartz feldspathic sandstone	12

ابعاد کوچکتر از ۲۵ میکرون داخل کالکوپیریت دیده می‌شود. کانی-سازی بیسموتینیت، کباتیت، آرسنوپیریت و کاسیتريت در مقادیر کم در کانسنگ جلال آباد نیز تشکیل شده است. کوارتز به صورت آزاد، پراکنده و رگه‌های تزریقی درون سیلتستون‌های ماسه‌ای، کانسنگ‌های آهن و دولومیت دیده می‌شود. کانی‌های کوارتز به همراه مگنتیت، همتایت، پیریت، کالکوپیریت و کلسیت دیده می‌شود. در ناحیه کم عیار و اکسیده کانسار، درصد کوارتز آزاد بیشتر است. توالی هم یافتی کانی‌ها نشان می‌دهد که مگنتیت، اکتینولیت، آپاتیت و پیریت در مراحل اولیه تشکیل کانسار ایجاد شده و کانی‌سازی طلا همراه با کانی‌سازی مس سولفیدی رخ داده است (Williams et al., 2005; Groves et al., 2010; Rieger et al., 2010).

بحث و بررسی

در این تحقیق، ۲۹۲۹ نمونه از ۷۲ گمانه حفر شده در کانسارکه فواصل بین نمونه‌ها در هر گمانه ۲ متر بود جمع آوری شده است. نمونه‌های جمع‌آوری شده توسط روش XRF برای Fe، S و P مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج آماری نشان می‌دهد که میانگین مقادیر Fe، S و P به ترتیب ۳۶.۱۸٪، ۱.۰۸۷٪ و ۰.۱۰۱۸٪ می‌باشد، اگر مقادیر میانه به عنوان مقادیر آستانه فرض شوند، مقادیر آستانه‌ها به ترتیب برای Fe، S و P برابر ۵۳.۵۵٪، ۲.۵۸۵٪ و ۰.۱۸۵۲٪ می‌باشند (جدول ۳). میزان حداقل و حداکثر عنصر آهن به ترتیب برابر ۲/۳۴٪ و ۶۷/۷۱٪ و حد زون آستانه آن برابر ۵۳/۵۵٪ است. هیستوگرام ترسیم شده (شکل ۴) دارای توزیع دو قله‌ای و نشانگر دو جامعه مجزا در کانی‌زایی منطقه است. جامعه نخست دارای کانی‌سازی مضرت‌تر در نتیجه کم عیارتر و جامعه دوم دارای کانی‌زایی پرعیارتر و مرغوب‌تر است. میزان حداقل و حداکثر عنصر فسفر به ترتیب برابر ۰/۰۰۳٪ و ۰/۲۸٪ می‌باشد. حد زون آستانه برابر ۰/۱۸۵۲٪ و زون کم عیار برابر ۰/۲۶۸۶٪ است.

مجموعه بزرگی از سنگ‌های آذرین اسیدی و بازی در جنوب و جنوب‌باختری این کانسار وجود دارد. واحدهای ریولیتی، کوارتز پورفیری، ایگنمبریت، داسیت، توده‌های گابرویی و دیوریتی، همراه با دایک و سیل‌های بازیک، از دیگر سنگ‌های منطقه می‌باشند. این سنگ‌ها درون واحدهای آتشفشانی-رسوبی سری ریزو و دولومیت‌های سری دزو تزریق شده‌اند. دایک و سیل‌ها با روند جنوب‌شرق - شمال - شرق در افق‌های زیرین کانسار، لایه‌های آهن‌دار را قطع کرده‌اند (Gotlov and Esev, 1976).

کانی اصلی در معدن سنگ آهن جلال آباد I و II مگنتیت و همتایت کانی ثانویه سنگ آهن در هر دو کانسار است که بر اثر مارتیتی شدن ایجاد شده و اغلب در قسمت‌های کم عمق و سطحی کانسار دیده می‌شود، مقدار همتایت ناچیز و کمتر از مگنتیت است. مارتیت، ایلمینیت و لیمونیت از کانی‌های اکسیدی فرعی جلال آباد I و لیمونیت از کانی‌های اکسیدی فرعی جلال آباد II هستند. (Khosroanjani and Shahabpour, 1998).

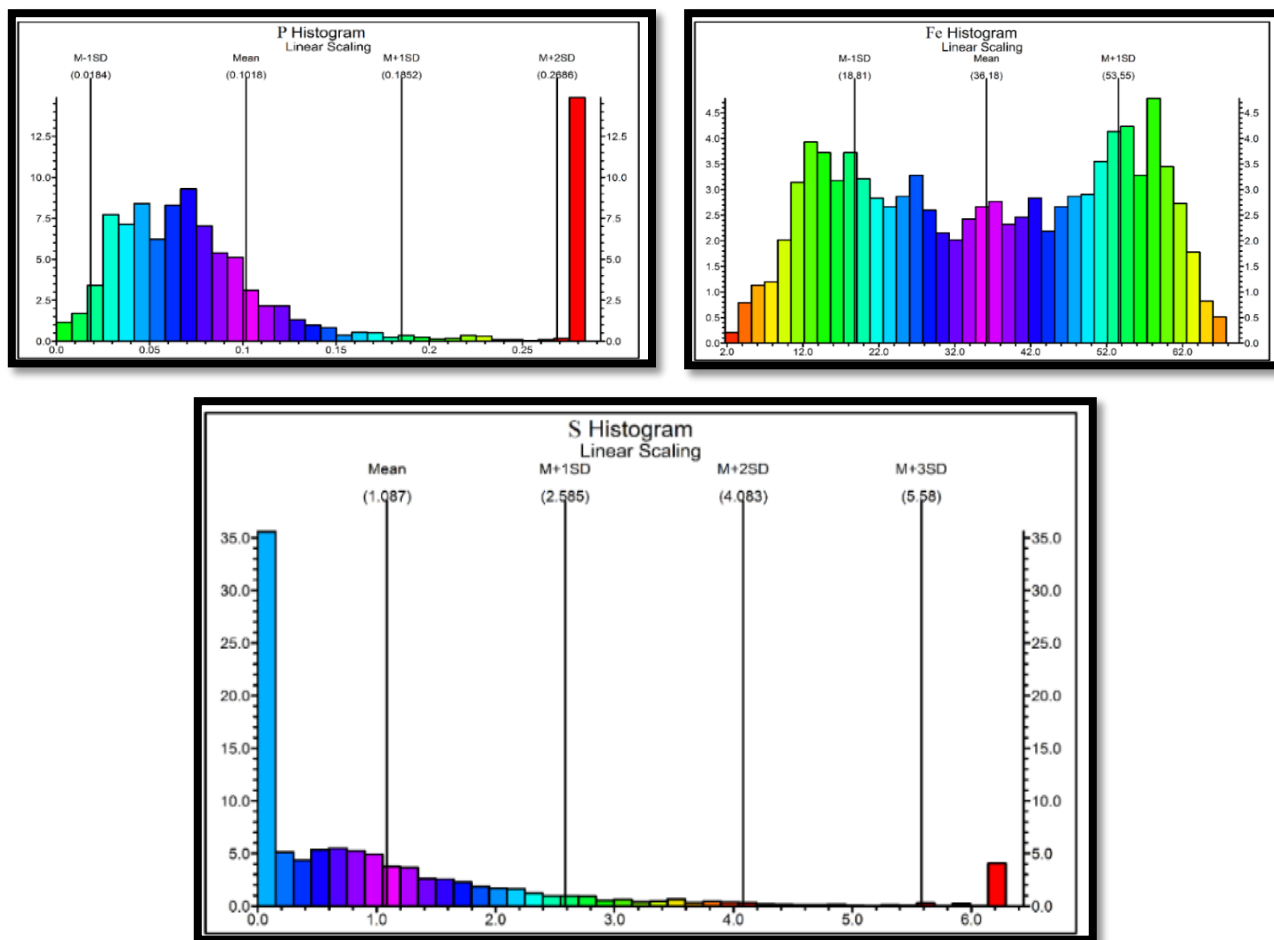
کانی‌های سولفیدی جلال آباد I شامل مارکاسیت، کولین و بورنیت می‌باشد (Khosroanjani and Shahabpour, 1998)، کانه پیریت که درصد بالایی از گوگرد موجود در ذخیره را به خود اختصاص می‌دهد به صورت بلورهای درشت و ریز خود شکل با ابعاد کمتر از ۱ سانتیمتر دیده می‌شوند. کالکوپیریت دومین کانی سولفیدی است که بیشتر شکستگی‌ها، حفره‌های ریز پیریت و مگنتیت را پر کرده است. کانی‌گوتیت بیشتر در نواحی اکسیده کانسار (زون همتایت‌دار) دیده می‌شود و در اثر هوازدگی و آبیگری اکسیدها و سولفیدهای آهن تشکیل شده است (Karimi Shahraki and Mehrabi, 2017).

مالاکیت در بخش‌های اکسیدی به همراه سنگ‌های بخش بالایی کانسار به صورت پرکننده فضاهای خالی حضور دارد. کانی-سازی طلا اغلب همراه کالکوپیریت و به صورت ادخال‌های ریز در

جدول ۳- پارامترهای آماری محاسبه شده برای عناصر معدن جلال آباد.

Table 3. Calculated statistical parameters for elements of Jalal Abad mine.

Statistical components	Fe (%)	S (%)	P (%)
Average	36.18	1.087	0.1018
Middle	36.59	0.58	0.07
Standard deviation	17.36	1.49	0.083
Variance	301.671	2.243	0.007
The maximum amount	61.37	10.313	2.986
The lowest amount	11.64	0	0.030



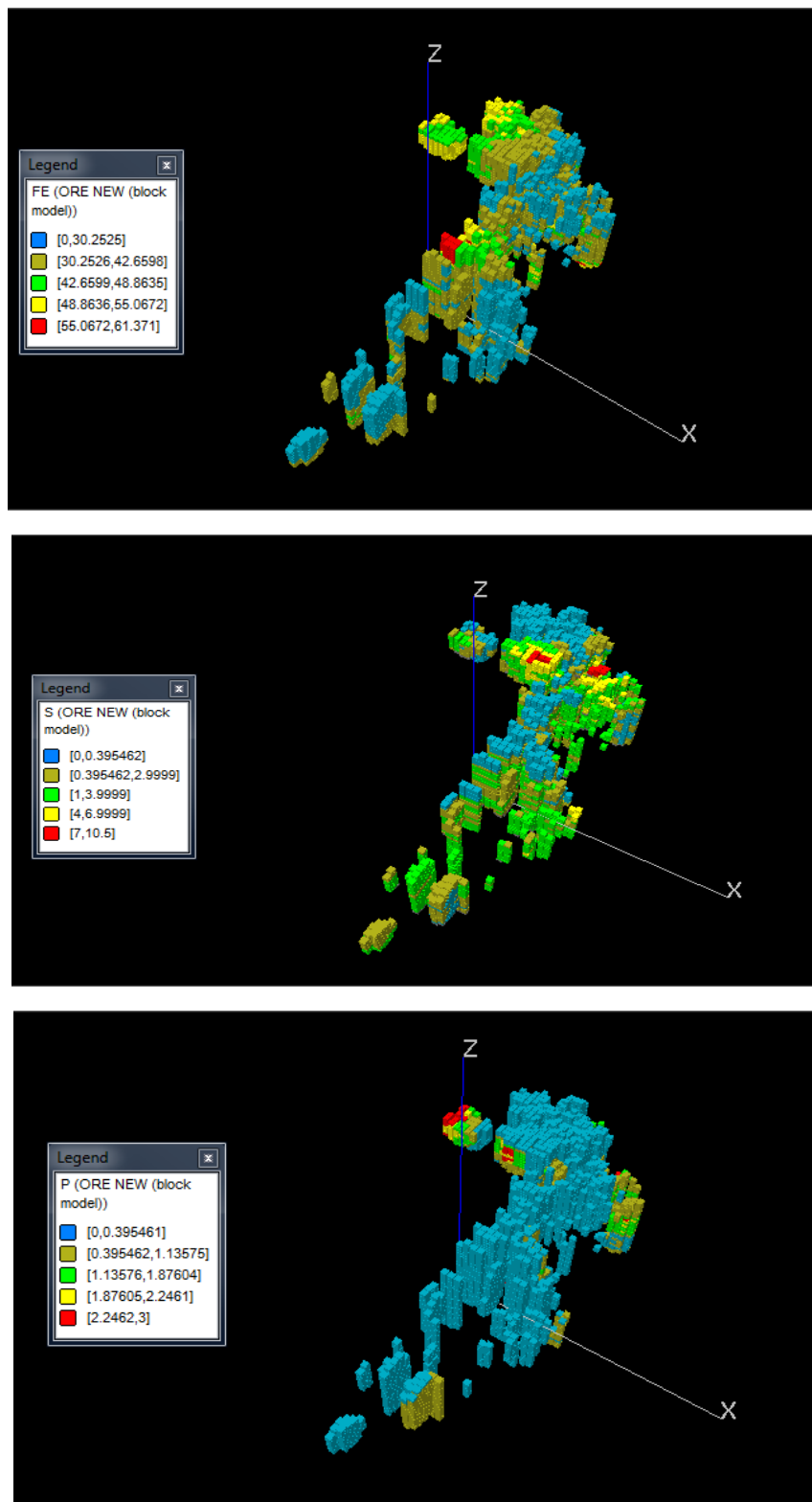
شکل ۴- هیستوگرام توزیع عناصر مورد مطالعه در معدن جلال آباد.

Fig. 4. Histogram of distribution of studied elements in Jalal Abad mine.

کاربرد مدل فراکتال عیار - حجم (C-V)

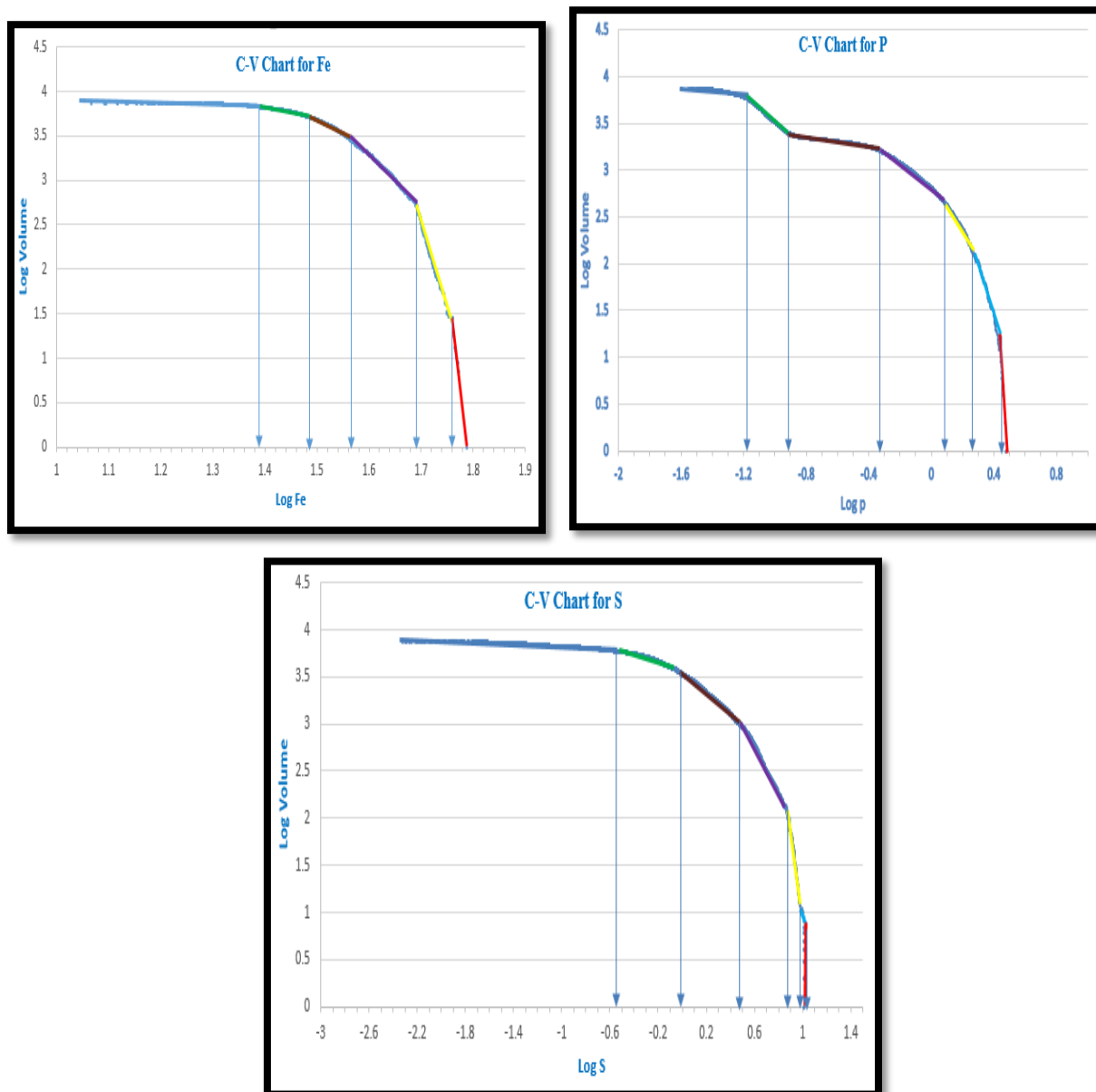
نمودارهای log-log مدل فراکتال عیار - حجم (C-V) برای Fe، P و S بر اساس داده‌های زیر سطحی ترسیم شده است، نقاط شکست در بخش‌های مستقیم برازش شده در نمودارهای log-log مقادیر آستانه-ای را نشان می‌دهد و تفکیک جامع عیاری بر اساس حجم در برگیرنده، نشان از تفاوت‌های زمین‌شناسی موجود در منطقه است. بر اساس نمودارهای log-log، چهار حد آستانه‌ای و پنج جامعه عیاری برای آهن، گوگرد و فسفر وجود دارد (شکل ۶). برای عنصر آهن جامعه چهارم دارای حد زون پرعیار برابر 57.54% و جامعه پنجم داده‌های حد زون غنی شده را شامل می‌شوند (شکل ۶ و جدول ۴). علاوه بر این، برای عنصر گوگرد جامعه اول دارای حد آستانه برابر 0.282%، جامعه چهارم دارای حد زون پرعیار برابر 7.763% و جامعه پنجم داده‌های بزرگتر از حد زون پرعیار را شامل می‌شوند (شکل ۵ و جدول ۴). بر این اساس، برای عنصر فسفر جامعه اول دارای حد آستانه برابر 0.0603 درصد، جامعه چهارم دارای حد زون پرعیار برابر 2.95 درصد و جامعه پنجم داده‌های بزرگتر از حد زون پرعیار را شامل می‌شوند (شکل ۶ و جدول ۴).

در بخش‌هایی از هیستوگرام شکل ۴ انفصال دیده می‌شود، این انفصال نشان می‌دهد که امکان دارد بعضی از بخش‌های کانسار مورد برداشت قرار نگرفته و کمبود نمونه داریم و یا اینکه بدلیل ساز و کارهای زمین‌ساختی و ژنتیکی کانسار در چند مرحله مجزا و با سن‌های گوناگون تشکیل شده و دارای توزیع L می‌باشد، هیستوگرام دارای توزیع دو قله‌ای می‌باشد که نشانگر دو جامعه مجزا در کانی‌زایی منطقه است. جامعه نخست دارای کانی‌سازی مرغوب‌تر در نتیجه کم‌عیارتر و جامعه دوم دارای کانی‌زایی پرعیارتر و مضر است. میزان حداقل و حداکثر گوگرد به ترتیب برابر 0.02% و 6.29% می‌باشد. حد زون آستانه برابر 2/585، زون کم عیار برابر 4/083 و زون متوسط عیار برابر 5/58 است. مدل‌های سه بعدی عنصری نیز به صورت خام، توسط روش کریجینگ معمولی با استفاده از بسته نرم افزاری Datamine.Studio.3.21.7164.0 تولید شده است (شکل ۵).



شکل ۵- نمای سه بعدی از مدل بلوکی نهایی به روش کریجینگ معمولی برای عیار های عناصر Fe, P و S کانسار سنگ آهن جلال آباد.

Fig. 5. Three-dimensional view of the final block model by conventional kriging method for Fe, P and S grades of Jalal Abad iron ore deposit.



شکل ۶- نمودار عیار- حجم عناصر کانسار آهن، گوگرد و فسفر معدن جلال آباد.
 Fig. 6. Diagram grade - volume of Fe, S and P in Jalal Abad mine.

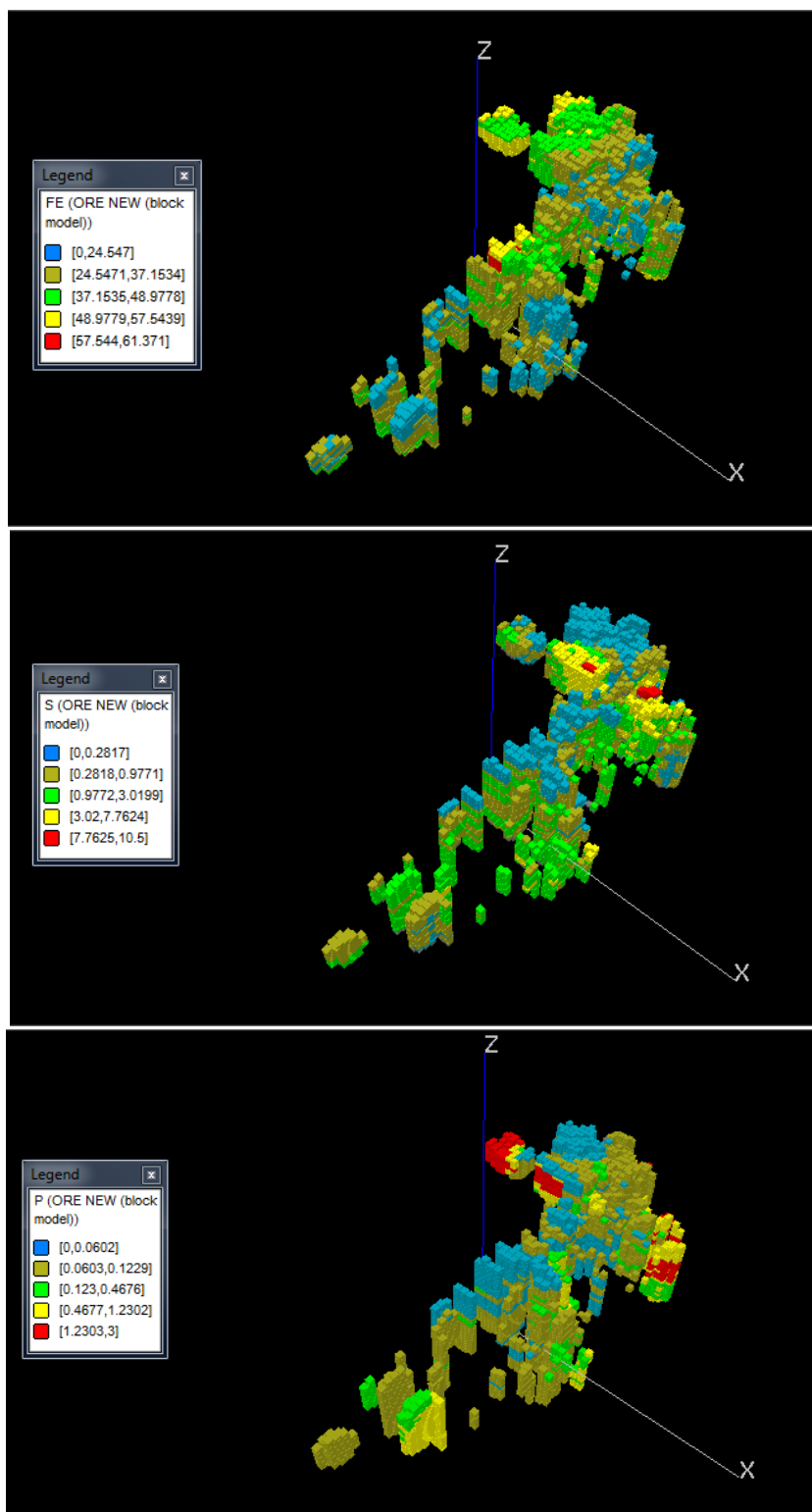
جدول ۴- حدود آستانه‌های عناصر معدن جلال آباد بر اساس روش فرکتالی عیار- حجم.

Table 4. Threshold limits of Jalal Abad mine elements based on grade-volume fractal method.

Element	Threshold limit	Low grade zone limit	Medium grade zone limit	High grade zone limit
Fe	24.55	37.15	48.98	57.54
S	0.282	3.020	3.020	7.763
P	0.0603	0.468	0.468	1.230

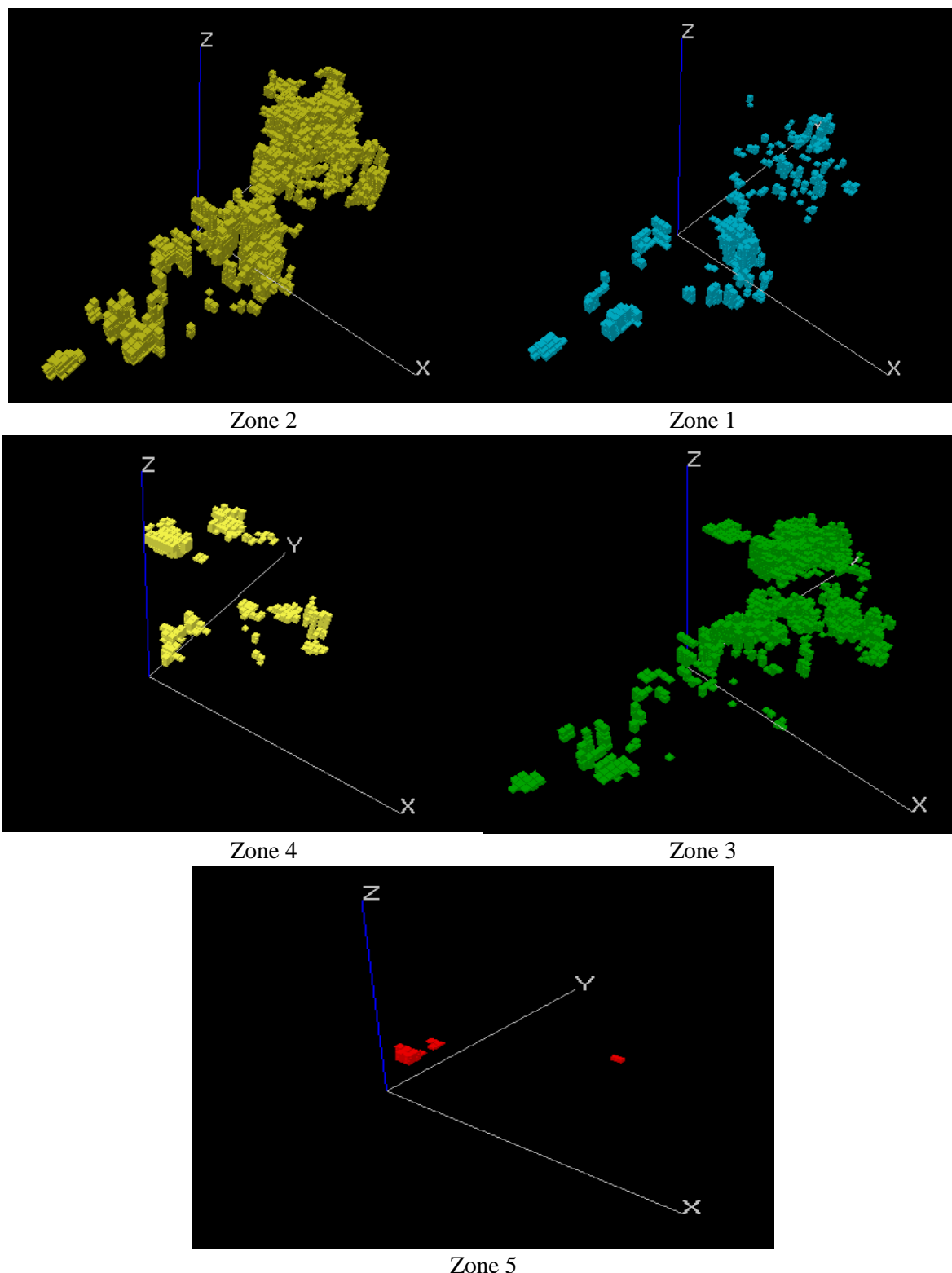
جلال آباد به کمک حد بالا و پایین هر زون عیاری و کمک گیری از نرم افزار Datamine و اعمال فیلتر بر روی مدل بلوکی موقعیت فضایی این ۵ زون در شکل ۸ نشان داده شده است.

مدل‌های سه بعدی از بلوکی نهایی به کمک فرکتال عیار - حجم، با روش کریجینگ معمولی برای عیار های عناصر Fe، P و S با استفاده از بسته نرم افزاری Datamine.Studio.3.21.7164.0 تولید شده است (شکل ۷). با تعیین ۵ جامعه (زون) عیاری برای عنصر آهن معدن



شکل ۷- نمای سه بعدی از مدل بلوکی نهایی بر اساس فرکتال عیار - حجم، با روش کریجینگ معمولی برای عیارهای عناصر Fe، P و S کانسار سنگ آهن جلال آباد.

Fig. 7. Three-dimensional view of the final block model base on grade-volume fractal, with conventional kriging method for Fe, P and S elements of Jalal Abad iron ore deposit.



شکل ۸- موقعیت فضایی زون های عنصر Fe در کانسار سنگ آهن جلال آباد.
 Fig. 8. Spatial position of Fe element zones in Jalal Abad iron ore deposit.

حضور دارد میانگین آهن، گوگرد و فسفر به ترتیب برابر با ۲۱/۳۶، ۱/۳۶۳ و ۰/۲۳۴ درصد است. (شکل ۸ و جدول ۵).

اولین زون از جامعه های بدست آمده از مدل بلوکی آهن نشان می دهد که این زون از لحاظ آهن و فسفر دارای عیار کمتر از حد آستانه، و عیار گوگرد متوسط می باشد، بر این مبنای ۷۶۲ بلوک در این جامعه

حضور دارد میانگین آهن، گوگرد و فسفر بترتیب برابر با ۰/۵۸/۳۸، ۰/۴۰۳٪ و ۰/۲۰۹٪ است (شکل ۸ و جدول ۵). بر این مبنی جامعه چهارم و پنجم دارای کانی‌سازی مرغوب‌تر در نتیجه پرعیارتر هستند و تمرکز برای اکتشاف آنها دارای اولویت است. برای تحلیل بهتر و نیز صحت‌سنجی از روش ماتریس همپوشانی آرایه شده توسط Carrenza (۲۰۱۱) استفاده شده است. این یک ماتریس ۲×۲ می‌باشد که براساس تعداد ریزبلوک‌های مشترک و نیز غیرمشترک در دو مدل بلوکی قابلیت یافتن میزان همپوشانی و انطباق را دارد. بر این اساس جوامع پنجم و چهارم موجود در جدول ۵، با سنگ آهن مگنتیتی پرعیار و نیز سنگ آهن پرعیار اکسیده (جدول ۱) مقایسه شده‌اند (جدول ۶). میزان همپوشانی بین جامعه پنجم و سنگ آهن مگنتیتی پرعیار حدود ۹۶ درصد است که میزان بسیار بالایی است. همچنین این میزان برای جامعه چهارم و سنگ آهن پرعیار اکسیده حدود ۸۹ درصد می‌باشد که این امر می‌تواند نشانه دیگری از صحت مدل‌های ایجاد شده با استفاده از مدلسازی فرکتالی در این کانسار باشد.

دومین زون از جامعه‌های بدست آمده از مدل بلوکی آهن نشانگر این مطلب است که این زون از لحاظ آهن کم عیار، گوگرد متوسط عیار و فسفر دارای عیار کمتر از حد آستانه می‌باشد که بر این مبنی ۳۹۸۶ بلوک در این جامعه حضور دارد میانگین آهن، گوگرد و فسفر بترتیب برابر با ۰/۳۱/۵۸، ۱/۵۶۸٪ و ۰/۲۷۶٪ است (شکل ۷ و جدول ۵). سومین زون از جامعه‌های بدست آمده از مدل بلوکی آهن نشانگر این مطلب است که این زون از لحاظ آهن و گوگرد متوسط عیار و فسفر کم عیار می‌باشد که بر این مبنی ۲۱۸۳ بلوک در این جامعه حضور دارد میانگین آهن، گوگرد و فسفر بترتیب برابر با ۰/۴۱/۷۶، ۱/۳۹۸٪ و ۰/۳۰۶٪ است (شکل ۸ و جدول ۵). چهارمین زون از جامعه‌های بدست آمده از مدل بلوکی آهن نشان می‌دهد که این زون از لحاظ آهن و فسفر پر عیار، گوگرد کم عیار می‌باشد، میانگین آهن، گوگرد و فسفر بترتیب برابر با ۰/۵۱/۰۶، ۰/۶۹٪ و ۰/۰۶٪ است (شکل ۸ و جدول ۵). در نهایت، پنجمین زون از جامعه‌های بدست آمده از مدل بلوکی آهن نشان می‌دهد که این زون از لحاظ آهن دارای عیاری بیشتر از حد پر عیار، گوگرد کم عیار و فسفر متوسط عیار می‌باشد که بر این مبنی ۲۸ بلوک در این جامعه

جدول ۵- جامعه‌های بدست آمده از مدل بلوکی Fe ساخته شده برای عیارهای عناصر P، S و Fe کانسار سنگ آهن جلال آباد.

Table 5. Communities obtained from Fe block model made for Fe, P and S grades of Jalal Abad iron ore deposit.

Community name	Fe grade range		S grade range		P grade range		Fe average	S average	P average	Number of microblocks
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum				
First	24.54	11.64	9.014	0	2.665	0.031	21.36	1.363	0.234	762
Second	37.15	24.55	10.313	0	2.910	0.025	31.58	1.568	0.276	3986
Third	48.97	37.16	10.310	0	2.986	0.025	41.76	1.398	0.306	2183
Fourth	56.77	49.02	6.816	0	2.813	0.034	51.06	0.69	0.6	501
The fifth	61.27	57.68	1.330	0.079	1.483	0.034	58.38	0.403	0.209	28

جدول ۶- ماتریس همپوشانی بین جوامع ساخته شده در مدلسازی فرکتالی و مدل‌های اولیه در کانسار جلال آباد.

Table 6. Log ratio matrix for calculation of correlation between fractal and conventional models in Jalal-Abad deposit.

The fifth community based on fractal modeling			
Outside the community	Within the community		
20	8	Within the community	High grade magnetite iron ore
8206	342	Outside the community	
The amount of overlap = 0.958			
The fourth community based on fractal modeling			
Outside the community	Within the community		
397	104	Within the community	High grade oxidized iron ore
7506	569	Outside the community	
The amount of overlap = 0.887			

نتیجه گیری

استفاده از روش فراکتال عیار - حجم (C-V) و ساخت مدل بلوکی سه بعدی از آنها می تواند توضیح داده های زیر سطح را بهبود بخشد و در یک اکتشاف دقیق نتایج بدست آمده از این کار نشان می دهد که ترکیبی از این دو روش، برای تعیین مناطق دارای اولویت استخراج جهت برنامه ریزی بهره برداری مبتنی بر جداسازی همزمان کانه و باطله زمین شناسی بسیار مناسب است.

متغیرها به دو گروه اصلی، مناطق معدنی (کانه) حاوی $Fe \geq 51$ ، $P \leq 0.4$ و $S \leq 0.7$ که با زون های چهارم و پنجم جامعه های بدست

آمده از مدل بلوکی آهن به عنوان کانه در ارتباط هستند و فرعی (باطله-های زمین شناسی) را زون های اول و دوم تشکیل می دهند. و برای زون سوم نیز می توان بر اساس تغییرات اقتصادی تصمیمات بهینه اتخاذ نمود. در مقایسه با زون بندی بدون در نظر گرفتن روش فراکتال عیار - حجم (C-V) شاهد بلوک های قابل استخراج به مراتب بیشتر هستیم که امکان بهره برداری بیشتری را در اختیارمان قرار داده است. در نتیجه، این روش می تواند برای سایر سنگ های آهن در منطقه زرنند و سایر کشورها با ویژگی های معدنی مشابه استفاده شود.

منابع

- Afzal, P., Dadashzadeh Ahari, H., Rashidnejad Omran, N., Aliyari, F., 2013. Delineation of gold mineralized zones using concentration-volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 55, 125-133.
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration* 108, 220-232.
- Afzal, P., Ghasempour, R., Mokhtari, A.R., Asadi Haroni, H., 2015. Application of concentration number and concentration-volume fractal models to recognize mineralized zones in North Anomaly iron ore deposit, Central Iran. *Archives of Mining Sciences* 60, 777-789.
- Ahmadi Rouyin, M., 2017. Modeling and design in mines, Datamine Studio, First Edition, P. 272.
- Bolviken, B., Stokke, P.R., Feder, J., Jossang, T., 1992. The fractal nature of geochemical landscapes. *Journal of Geochemical Exploration* 43, 91-109.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration* 51, 109-130.
- Daneshvar Saein, L., 2017. Delineation of enriched zones of Mo, Cu and Re by concentration-volume fractal model in Nowchun Mo-Cu porphyry deposit, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 9, 64-72.
- Geotov, V.I., Esev, Y.M., 1976. Report on result of preliminary survey of the Zarand iron ore deposit, NIS Co, v/o TECCHNOEXPORT, USSR, 1,104P.
- Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., Daviran, M., 2019. Combination of multifractal Geo statistical interpolation and spectrum-area (S-A) fractal model for Cu-Au geochemical prospects in Feizabad district, NE Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 12(5), 152.
- Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., Carranza, E. J. M., 2019. Mapping of single-and multi-element geochemical indicators based on catchment basin analysis: Application of fractal method and unsupervised clustering models. *Journal of Geochemical Exploration* 199, 90-104.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D. and Hitzman, M.W., 2010. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology* 105(3), 641-654.
- Hawkes, H.E., Webb, J.S., 1979. *Geochemistry in mineral exploration*, 2nd ed., Academic Press, New York, 657 p.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., 2006. *Open Pit Mine Planning and Design*. Taylor & Francis. Isaak's, E., Srivastava. R., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Karimi Shahraki, B., Mehrabi, B., 2016. Chemical composition of fluids involved in Jalal Abad iron deposit, North Arab Zarand using LA-ICP-MS microanalysis method. *Journal of Economic Geology* 9(1), 197-211 (in Persian).
- Khosroanjam, M., Shahabpour, J., 1998. The occurrence of Jalalabad deposit, Izan. *Journal of Crystallography and Mineralogy* 2, 107-122 (in Persian).
- Li, C.J., Ma, T.H., Shi, J.F., 2003. Application of a fractal method relating concentration and distances for separation of geochemical anomaly from background. *Journal of Geochemical Exploration* 77, 167-175.
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, San Fransisco, 468p.

- Mart, W.S., Markey, G., 2013. Intelligent Mining Software “Solutions” IMS - Lerch-Grossman Pit Optimization. Mine Map Pty Ltd.
- Ramezani, J., Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303(7), 622-665.
- Rieger, A.A., Marschik, R., Diaz, M., 2010. The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the Mantoverde District. Northern Chile. *Economic Geology*, 105(7), 1271-1299.
- Seymour, F., 1995. Pit limit parameterization for modified 3D Lerch-Grossmann Algorithm. *SME Transactions* 298, 1860-1864.
- Soltani, S., Hezarkhani, A., 2011. Determination of realistic and statistical value of the information gathered from exploratory drilling. *Natural Resources Research* 20, 4.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontbote, L., DeHaller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution and possible modes of origin. *Economic Geology* 100, 371-405.
- Wu, J., Yang, J., Ma, L., Li, Zh., Shen, X., 2016. A system analysis of the development strategy of iron ore in China. *Resources Policy* 48, 32-400.
- Yasrebi, A.B., Hezarkhani, A., 2019. Resources classification using fractal modelling in Eastern Kahang Cu-Mo porphyry deposit, Central Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 11, 56-67.
- Yasrebi, A.B., Hezarkhani, A., Afzal, P., 2017. Application of Present Value-Volume (PV-V) and NPV-Cumulative Total Ore (NPV-CTO) fractal modelling for mining strategy selection. *Resources Policy* 53, 384-393.
- Yasrebi, A.B., Wetherelt, A., Foster, P., Afzal, P., 2011. Determination and Analysis of final pit limit of Esfordi phosphate open pit mine. 22nd World Mining Congress & Expolration, Istanbul, Turkey, pp. 513-522.
- Zahedi, R., Afzal, P., 2018. Determination of phosphorous and sulfur zonation using fractal modeling in Jalal Abad iron ore, SE Iran, The 18th International Geo Conference SGEM 2018, pp. 247-254.
- Zahedi, R., Afzal, P., 2018. Determination of phosphorous and sulfur zonation using fractal modeling in Jalal Abad iron ore, SE Iran, The 18th International Geo Conference SGEM 2018, pp. 247-254.
- Zhang, T., 2001. A leave-one-out cross-validation bound for kernel methods with applications in learning. In 14th Annual Conference on Computational Learning Theory, pp. 427-443.