

## Investigating the Local Variations of the Geological Proportions in the Subsurface Facies: A Case Study of Golgohar Sirjan Iron Deposit

Sajjad Taleh Hosseini<sup>1</sup>, Omid Asghari<sup>2\*</sup>

1. Student of Ph.D, School of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Sajjad.t.hosseini@ut.ac.ir

2. Associate Professor School of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

O.Asghari@ut.ac.ir

Received: 2022/10/20 - Accepted: 2023/06/17

### Abstract

This research deals with the spatial simulation of rock types and the assessing the uncertainty in the domain boundaries in Golgohar Sirjan iron deposit. Based on truncated Gaussian simulation, a simulation approach is proposed to this end, in which the geological units are reproduced by examining the nature of geological boundaries and vertical and horizontal instability. For this purpose, at first, contact analysis is used to investigate the transition in the grade distribution when crossing a rock type boundary. In the next step, the drill holes data are divided into two domains according to the contact analysis results. The first domain includes top magnetite and oxide zone, and the second domain includes bottom magnetite. Next, the local probabilities model is reproduced based on the vertical proportion matrix (VPM). Finally, different stochastic realizations of rock type units are reproduced by using the improved truncated Gaussian simulation algorithm. In this proposed algorithm, soft (probabilities) and hard data played an equal role in the simulation process. The results show the capability of the proposed algorithm to reproduce the single-point statistics, two-point statistics, and the connectivity values obtained by the hard data and extractive block model.

### Keywords

Truncated Gaussian Simulation, Contact Analysis, Vertical Proportion Matrix, Rock Type, Golgohar Sirjan iron deposit.

---

\* Corresponding Author



## ۱- Introduction

In recent years, in order to estimate the mineral resources, spatial modelling of geological variables, such as rock types, has been considered as a critical and important factor in downstream processes. Based on this, spatial modelling of mineral deposits can be implemented with one of the following two approaches:

- **Joint Simulation:** in this method, first, a joint model will be created based on the spatial structures between the discrete and continuous data. In the second step, the spatial models of ore grade and rock types will be reproduced by defining a threshold value.
- **Cascade Simulation:** In this method, the spatial model of the rock types will be produced. After the first step, the spatial distribution of the considered ore grade will be simulated separately in each rock type.

The choice of the appropriate approach depends on the behavior of continuous variables across the boundaries between two adjacent rock types. In general, based on the changes in the distribution of mineralization elements, the boundaries between rock types can be either soft or hard. It should be noted that the joint simulation approach may reproduce realizations of ore grades that exhibit a gradual transition between two simulation geo-domains, commonly referred to as a soft boundary. Also, the cascade simulation approach can be used in cases where there is a sudden shift in the ore grades when transitioning from one simulation rock type to an adjacent one. This scenario is known as a hard boundary.

In this research paper, we present an application of truncated gaussian simulation (TGS) to the spatial simulation of rock types and the assessing the uncertainty in the domain boundaries at the Golgohar Sirjan iron deposit. To this end, in the first stage, contact analysis tools will be used to identify the nature of the geological boundaries related to the continuous variables studied. In next step, based on the changes in the proportions of geological domains, a three-dimensional matrix of the facies proportion will be produced in the vertical and horizontal directions. Finally, the TGS method was used for reproducing the geological boundaries.

## ۲- Methods

Truncated Gaussian simulation(TGS) approach reproduces different realizations of a Gaussian variable at all data locations within the study area and then applies a flag for transformation of the simulated Gaussian values into the related geological areas. The main stages in a TGS approach are as follow:

- Stage ۱. Calculation of threshold values that truncate the defined gaussian random field into sub-domains which are represented the existing geological domains in the study area.
- Stage ۲. Modeling of the variogram of truncated gaussian field that should reproduce the spatial distribution between the drill holes data.
- Stage ۳. Transformation of the discrete data to Gaussian values by using the Gibbs sampler method.
- Stage ۴. Simulation of Gaussian values at the grid nodes. It should be noted that the sequential Gaussian or the turning band simulation method can be performed on the Gaussian variable for this stage.
- Stage ۵. Back-transformation of simulated gaussian values to real space data by using the defined threshold values.

## ۳- Findings and Argument

In this study, a dataset containing ۴۰۸ samples collected from ۵۴ drill holes was used (Figure ۱). The cross-to direct variogram ratio is used to determine the behavior of the iron grade across the

boundaries between rock types. These results show that, on the one hand, the boundary between oxide zone and top magnetite is soft, and on the other hand, the boundary between these zones and bottom magnetite is hard. Therefore, in this paper, the former two rock types (oxide and top magnetite) are considered as one zone (the first domain) and bottom magnetite as the second domain. Based on the local proportion of the first domain ( $0.378$ ), the threshold value to truncate the defined gaussian random field was calculated ( $0.323$ ).

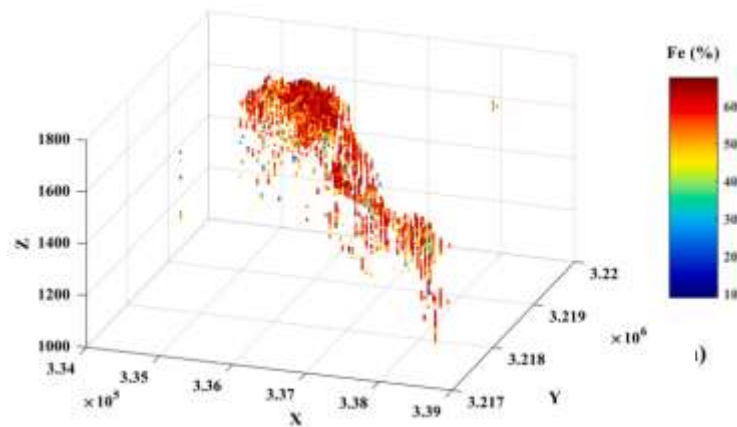


Figure 1. 3D view of the Sirjan Golgohar mine, spatial distribution of the iron grade.

In order to consider the non-stationary in the vertical and horizontal directions, the three-dimensional vertical proportion matrix of the geological domains was used (Figure 2).

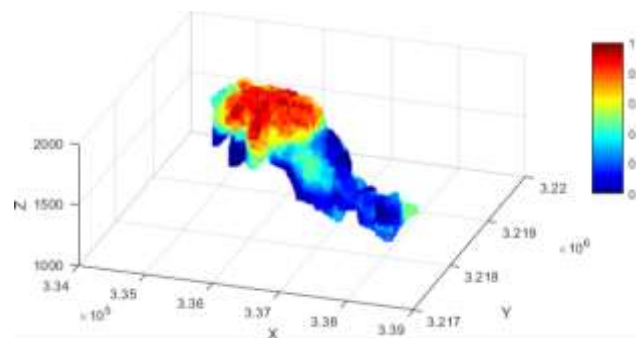


Figure 2. The local probabilities model of domain 1 calculated by using VPM.

After this step, the indicator variogram models of truncated gaussian field are fitted in major, minor and vertical directions. Finally, different realizations of defined geological domains were reproduced based on the improved algorithm. Figure 3 shows a realization obtained from the VPM-TGS algorithm.

## 4- Conclusions

In this research work, based on the distribution of iron deposit in different geological domains, an improved simulation algorithm is presented for modelling the stochastic realizations of the rock types. For this purpose, drill holes were divided into two geological domains by using the cross-to-direct variogram ratio. Then, the VPM-TGS algorithm is used to reproduce these two geological domains.

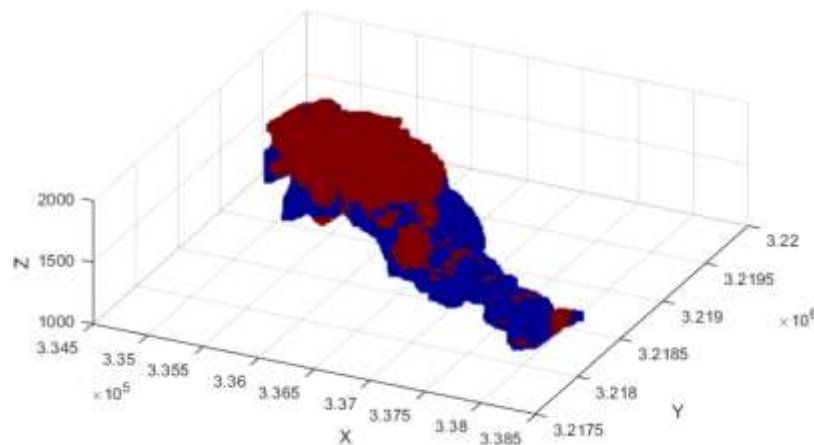


Figure 7. Perspective view of one random conditional realization of rock types.

## References

۱. Maleki, M.; Emery, X.; ۲۰۱۰; "Joint simulation of grade and rock type in a stratabound copper deposit", *Mathematical Geosciences*, ۴۷(۴), ۴۷۱-۴۹۰.
۲. Madani, N., Abulkhair, S.; ۲۰۲۰; "A hierarchical cosimulation algorithm integrated with an acceptance-rejection method for the geostatistical modeling of variables with inequality constraints", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, ۳۴(۱۰), ۱۰۰۹-۱۰۸۹.
۳. Emery, X., Silva, D. A.; ۲۰۰۹; "Conditional co-simulation of continuous and categorical variables for geostatistical applications", *Computers & Geosciences*, ۳۰(۶), ۱۲۳۴-۱۲۴۶.
۴. Talebi, H., Lo, J., Mueller, U.; ۲۰۱۷; "A hybrid model for joint simulation of high-dimensional continuous and categorical variables", In *Geostatistics valencia ۲۰۱۶* (pp. ۴۱۰-۴۳۰). Springer, Cham.
۵. Emery, X., Maleki, M.; ۲۰۱۹; "Geostatistics in the presence of geological boundaries: Application to mineral resources modeling", *Ore Geology Reviews*, ۱۱۴, ۱۰۳۱۲۴.
۶. Roldão, D., Ribeiro, D., Cunha, E., Noronha, R., Madsen, A., Masetti, L.; ۲۰۱۲; "Combined use of lithological and grade simulations for risk analysis in iron ore, Brazil", In *Geostatistics Oslo ۲۰۱۲* (pp. ۴۲۳-۴۳۴). Springer, Dordrecht.
۷. Jones, P., Douglas, I., Jewbali, A.; ۲۰۱۳; "Modeling combined geological and grade uncertainty: application of multiple-point simulation at the Apensu gold deposit, Ghana", *Mathematical geosciences*, ۴۵(۸), ۹۴۹-۹۶۰.
۸. Talebi, H., Sabeti, E. H., Azadi, M., Emery, X.; ۲۰۱۶; "Risk quantification with combined use of lithological and grade simulations: Application to a porphyry copper deposit", *Ore Geology Reviews*, ۷۵, ۴۲-۵۱.
۹. Mery, N., Emery, X., Cáceres, A., Ribeiro, D., Cunha, E.; ۲۰۱۷; "Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit", *Ore Geology Reviews*, ۸۸, ۳۳۶-۳۵۱.
۱۰. Paithankar, A., Chatterjee, S.; ۲۰۱۸; "Grade and tonnage uncertainty analysis of an african copper deposit using multiple-point geostatistics and sequential gaussian simulation", *Natural Resources Research*, ۲۷(۴), ۴۱۹-۴۳۶.
۱۱. Kim, H. M., Mallick, B. K., Holmes, C. C.; ۲۰۰۵; "Analyzing nonstationary spatial data using piecewise Gaussian processes", *Journal of the American Statistical Association*, ۱۰۰(۴۷۰), ۶۵۳-۶۶۸.
۱۲. Talesh Hosseini, S., Asghari, O., Emery, X.; ۲۰۲۱; "An enhanced direct sampling (DS) approach to model the geological domain with locally varying proportions: Application to

Golgohar iron ore mine, Iran”, *Ore Geology Reviews*, ۱۳۹, ۱۰۴۴۵۲.

۱۳. Albertao, G. A., Grell, A. P., Badolato, D., Santos, L.; ۲۰۰۵; “3D geological modeling in a turbidite system with complex stratigraphic-structural framework-an example from Campos Basin, Brazil”, In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro*.
۱۴. Skvortsova, T., Beucher, H., Armstrong, M., Forkes, J., Thwaites, A., Turner, R.; ۲۰۰۲; “Simulating the geometry of a granite-hosted uranium orebody”, In *Geostatistics Rio ۲۰۰۰* (pp. ۸۵-۹۹). Springer, Dordrecht.
۱۵. Talebi, H., Asghari, O., Emery, X.; ۲۰۱۴; “Simulation of the lately injected dykes in an Iranian porphyry copper deposit using the plurigaussian model”, *Arabian Journal of Geosciences*, ۷(۷), ۲۷۷۱-۲۷۸۰.



مقاله پژوهشی

## بررسی تاثیر تغییرات محلی نسبت‌های زمین‌شناسی در مدل‌سازی رخساره‌های زیر سطحی کانسار آهن گل‌گهر سیرجان

سجاد طالب حسینی<sup>۱</sup>، امید اصغری<sup>۲\*</sup>

دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران ir.ac.ut@hosseini.t.sajjad  
دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران ir.ac.ut@asghari.o

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

### چکیده

در این تحقیق مدل‌سازی فضایی واحدهای سنگی مرتبط با کانسار آهن گل‌گهر سیرجان و ارزیابی عدم قطعیت مرزهای بین واحدهای سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس شبیه‌سازی تک گوسی، یک رویکرد شبیه‌سازی برای این منظور پیشنهاد شده است که با بررسی ماهیت مرزهای زمین‌شناسی و ناپایایی قائم و افقی، تحقق‌های تصادفی از این واحدهای زمین‌شناسی بازتولید کرده است. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از آنالیز تماس تغییرات توزیع فضایی عنصر آهن در هنگام عبور از مرزهای زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد، بر اساس نتایج آنالیز تماس، داده‌های مربوط به گمانه‌های اکتشافی به دو دامنه تقسیم شدند. برای این منظور، تغییرات فضایی عیار آهن در سراسر واحدهای زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفت. دامنه اول شامل مگنتیت فوقانی و زون اکسید و دامنه دوم شامل مگنتیت تحتانی است. در ادامه، با استفاده از ماتریس نسبت‌های قائم، مدل احتمالات محلی بر اساس ناپایایی‌های قائم و افقی موجود در داده‌های سخت، بازتولید شد. در نهایت، با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تک گوسی بهبود یافته تحقق‌های تصادفی مختلفی از واحدهای سنگی بازتولید شدند. در این الگوریتم پیشنهادی، داده‌های (احتمالات) نرم و سخت به صورت یکسان در فرآیند شبیه‌سازی نقش داشتند. نتایج نشان‌دهنده توانایی الگوریتم پیشنهادی در بازتولید آماره‌های تک نقطه‌ای، آماره‌های دو نقطه‌ای و پیوستگی بدست آمده از داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی و مدل بلوکی استخراجی حاصل از چال‌های آتشیاری‌اند. همچنین، ماتریس نسبت‌های قائم، سبب توانمندسازی الگوریتم پیشنهادی در کنترل محلی نسبت رخساره‌ها در جهات افقی شده است.

### کلمات کلیدی

شبیه‌سازی تک گوسی، آنالیز تماس، ماتریس نسبت‌های قائم، واحدهای سنگی، کانسار آهن گل‌گهر سیرجان

## ۱- مقدمه

می‌شود [۱۱-۱۲]. برای درک بهتر و پیش‌بینی رفتار متغیرهای پیوسته هنگام عبور از مرز بین دو واحد سنگی مجاور (یعنی سخت یا نرم بودن مرز)، می‌توان انواع مختلف آنالیز تماس<sup>۵</sup>، مانند نسبت‌های واریوگرام متقابل به مستقیم<sup>۶</sup> را مورد استفاده قرار داد [۱۳-۱۴]. این مرحله اکتشافی در تصمیم‌گیری درباره اینکه کدام استراتژی (مدل‌سازی آبشاری یا توام) برای پیش‌بینی فضایی یا کمی‌سازی عدم قطعیت اتخاذ شود، حیاتی است.

علاوه بر این، از آنجا که در سال‌های اخیر صنعت معدن از اهمیت ارزیابی عدم قطعیت زمین‌شناسی و تاثیر آن در برنامه‌های تولید آگاهی پیدا کرده است، از این رو علاقه فزاینده‌ای به توسعه مدل‌های تصادفی<sup>۷</sup> دامنه‌های زمین‌شناسی به جای مدل‌های قطعی<sup>۸</sup> وجود دارد [۱۵]. تا به امروز، روش‌های مدل‌سازی تصادفی متفاوتی برای چنین هدفی پیشنهاد شده است که در آن‌ها دامنه‌های زمین‌شناسی با استفاده از میدان‌های تصادفی فضایی تولید شده از طریق مجموعه داده‌های موجود (به عنوان مثال، گمانه‌های حفاری اکتشافی)، در مکان‌های نمونه‌برداری نشده مدل خواهند شد. در میان این رویکردها، شبیه‌سازی تک‌گوسی<sup>۹</sup> و پلوری‌گوسین<sup>۱۰</sup> [۱۶] در دهه گذشته، به ویژه در زمینه‌های معدن [۱۷-۲۳]، نفت [۲۴-۲۶] و هیدروژئولوژی [۲۷-۲۸] مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های شبیه‌سازی تک‌گوسی و پلوری‌گوسین توانایی بازتولید ویژگی‌های پیچیده را در مقایسه با روش شبیه‌سازی شاخص متوالی<sup>۱۱</sup>، بدون نیاز به تصویر آموزشی افزایش داده‌اند.

از طرف دیگر نکته مهم در روش‌های شبیه‌سازی این است که برای محاسبه سهم رخساره‌ها در حالات پایا تنها کافی است درصد داده‌های متعلق به یک رخساره خاص محاسبه شود. در نمونه‌های عملی ساختارهای زمین‌شناسی اغلب بسیار پیچیده‌اند. به عنوان مثال در یک توالی رسوبی که یک مخزن نفتی را در بردارد، درصد سهم رخساره‌ها در جهت قائم بسیار متغیر است و نوعی ناپایداری از خود نشان می‌دهد. منحنی‌های

در سال‌های اخیر، برای تخمین و ارزیابی منابع و ذخایر معدنی، مدل‌سازی فضایی متغیرهای زمین‌شناسی مانند واحدهای سنگی، بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. این مدل‌های فضایی عاملی کلیدی در فرآیندهای پایین‌دستی مانند برنامه‌ریزی و مدیریت معدن است. از آنجا که توزیع فضایی متغیرهای پیوسته و گسسته مرتبط با کانی‌سازی اغلب به یکدیگر وابسته‌اند، مدل‌سازی جداگانه متغیرهای پیوسته سبب افزایش عدم قطعیت در نتایج می‌شود. بنابراین، انجام یک مدل‌سازی توام واحدهای سنگی و عبار عناصر نتایج بسیار با ارزشی را ارائه می‌دهد [۱].

بر این اساس، مدل‌سازی فضایی کانسارهای معدنی را می‌توان با یکی از دو رویکرد زیر اجرا کرد [۲]:

- شبیه‌سازی توام<sup>۱</sup>: در این روش، ابتدا، بر اساس ساختار فضایی متقابل بین داده‌های گسسته و پیوسته موجود در محیط مورد مطالعه، یک مدل توام ایجاد شده و سپس با تعریف یک حد آستانه، مدل فضایی عیاری و واحدهای سنگی ارائه می‌شود [۳-۵].
- شبیه‌سازی آبشاری<sup>۲</sup>: در این روش، در مرحله اول مدل فضایی واحدهای سنگی تولید شده و در مرحله بعد توزیع فضایی عیاری به صورت مجزا در هر واحد سنگی و بر اساس داده‌های موجود در همان واحد، مدل‌سازی می‌شود [۶-۱۰].

تصمیم برای استفاده از هر یک از رویکردها برای مدل‌سازی فضایی کانسار به رفتار متغیرهای پیوسته موجود در سراسر مرزهای بین دو واحد سنگی مجاور بستگی دارد. به طور کلی بر اساس تغییرات توزیع عناصر کانی‌سازی در یک منطقه، مرزهای بین واحدهای سنگی در این منطقه می‌توانند از نوع مرز نرم<sup>۳</sup> و یا مرز سخت<sup>۴</sup> باشد. زمانی که تغییرات توزیع عیاری عناصر در نزدیکی مرز بین دو واحد سنگی هموار باشد، در این صورت مرز بین این دو واحد سنگی نرم است که با رویکرد شبیه‌سازی توام سازگار است. در مقابل، یک مرز سخت که یک تغییر ناگهانی در توزیع عیاری عناصر در نزدیکی مرز بین دو واحد سنگ ایجاد می‌کند، با استفاده از روش شبیه‌سازی آبشاری مدل‌سازی

<sup>۵</sup> Contact analysis

<sup>۶</sup> Cross-to-direct Variogram Ratios

<sup>۷</sup> Stochastic models

<sup>۸</sup> Deterministic Models

<sup>۹</sup> Truncated Gaussian Simulation (TGS)

<sup>۱۰</sup> Plurigaussian Simulation (PGS)

<sup>۱۱</sup> Sequential Indicator Simulation (SIS)

<sup>۱</sup> Joint simulation

<sup>۲</sup> Cascade simulation

<sup>۳</sup> Soft boundary

<sup>۴</sup> Hard boundary

ناهمسانی‌هایی که باید حفظ شوند را در نظر می‌گیرد.

به فرض یک فضای  $d$  بعدی وجود دارد که شامل  $n$  رخساره  $(F_1, F_2, \dots, F_n)$  است، به نحوی که یک نقطه از این فضا در رخساره  $i$  قرار دارد. این به این معنی است که مقدار تابع گوسی تصادفی استاندارد  $Y(x)$  در آن موقعیت بین مقادیر حدود آستانه مشخص  $s_{i-1}$  و  $s_i$  قرار دارد (رابطه ۱) [۱۶]:

$$F_i = \{x \in \mathbb{R}^d; s_{i-1} < Y(x) \leq s_i\} \quad (1)$$

حدود آستانه از روی سهم هر یک از رخساره‌ها،  $p_i$  که از داده‌های تجربی بدست می‌آیند، محاسبه می‌شوند (رابطه ۲) [۱۶]:

$$p_i = E\{I_i(x)\} = P\{s_{i-1} < Y(x) \leq s_i\} = G(s_i) - G(s_{i-1}) \quad (2)$$

که در آن  $p_i$ ، سهم رخساره  $i$ ام است و

$$I_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in F_i, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

رابطه بین کوواریانس شاخص متقابل رخساره  $F_j$  و  $F_i$  (یا کوواریانس زمانی که  $i = j$ ) و کوواریانس  $\sigma(h)$  متغیر گوسی تصادفی طبق رابطه ۴ است [۱۶]:

$$C_{F_i F_j}(h) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\sigma^2(h)}} \int_{s_{i-1}}^{s_i} \int_{s_{j-1}}^{s_j} \exp\left[-\frac{u^2 + v^2 - 2uv\sigma(h)}{2(1-2\sigma^2(h))}\right] dudv \quad (4)$$

این رابطه ثابت بودن مجموعه کامل کوواریانس و کوواریانس متقابل را برای شاخص‌ها تضمین می‌کند. فرآیند این روش شبیه‌سازی به این صورت است که [۱۶]:

- تعداد رخساره‌ها، سهم هر رخساره و واریوگرام شاخص و واریوگرام متقابل به صورت تجربی محاسبه می‌شوند.
- حدود آستانه با استفاده از رابطه ۲ بدست می‌آید.
- تحقق از تابع تصادفی گوسی استاندارد با استفاده کوواریانس بدست آمده در مرحله قبل و با کمک هر روش در دسترس تولید می‌شود.
- حدود آستانه بر روی تحقق بدست آمده برای تولید تحقق از رخساره‌های رابطه ۱ اعمال می‌شود.

سهم قائم<sup>۱</sup> برای عددی کردن این ناپایایی‌ها ابداع شده‌اند [۱۶]- [۲۹]. در مواردی که ساختارهای زمین‌شناختی پیچیده‌تر باشد، این احتمال وجود دارد که سهم رخساره‌ها در جهات افقی نیز تغییر کند. برای بررسی اینگونه موارد از ماتریس‌های سه بعدی سهم قائم<sup>۲</sup> رخساره‌ها استفاده می‌شود. در عمل لازم است تا ناپایایی‌های قائم و افقی در شبیه‌سازی‌های زمین آماری در نظر گرفته شده و یک ماتریس سه بعدی از سهم رخساره‌ها ایجاد شود [۱۶ - ۳۰].

هدف این مقاله استفاده از روش شبیه‌سازی تک‌گوسی برای تولید مدل‌های تصادفی دامنه‌های زمین‌شناسی برای ارزیابی عدم قطعیت مرزهای زمین‌شناسی در کانسار سنگ آهن گل‌گهر سیرجان است. برای حل مسایل فوق، در مرحله اول از ابزارهای آنالیز تماس به منظور شناسایی ماهیت مرزهای زمین‌شناسی مرتبط با متغیرهای پیوسته مورد مطالعه استفاده می‌شود. در گام بعدی، براساس تغییرات دامنه‌های زمین‌شناسی در گمانه‌های اکتشافی، یک ماتریس سه‌بعدی از سهم رخساره‌ها در جهات قائم و افقی تولید خواهد شد. بنابراین با بهبود روش شبیه‌سازی تک‌گوسی (VPM - TGS)، در نهایت تلاش می‌شود تا مدل‌های تصادفی از مرزهای زمین‌شناسی با استفاده از احتمالات نرم و داده‌های سخت حاصل از گمانه‌های اکتشافی بازتولید شود. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، از معیارهای مختلف استفاده می‌شود.

## ۲- روش شبیه‌سازی تک‌گوسی

ایده اصلی در روش شبیه‌سازی تک و یا چند گوسی، این است که یک یا چند تابع تصادفی گوسی در هر نقطه‌ای از منطقه شبیه‌سازی شود و سپس با استفاده از قانون نوع سنگ، این مقادیر گوسی، به مقادیر گسسته نشان‌دهنده نوع واحد سنگی بازگردانده شود. این روش برای حالت یک رسوب‌گذاری ترتیبی و منظم از واحدهای مختلف وجود دارد، یا روابط بین واحدها به حدی ساده است که تنها با یک تابع گوسی قابل مدل شدن است، استفاده می‌شود [۱۶].

جاذبه‌های اصلی این روش عبارتند از [۲۹]:

- الگوریتم‌های فراوانی برای تولید تحقق‌هایی از تابع تصادفی گوسی وجود دارد.
- این روش ثابت بودن کوواریانس‌ها و کوواریانس‌های متقابل را تضمین می‌کند به گونه‌ای که تمامی روابط ترتیبی و

<sup>۱</sup> Vertical Proportion Curve (VPC)

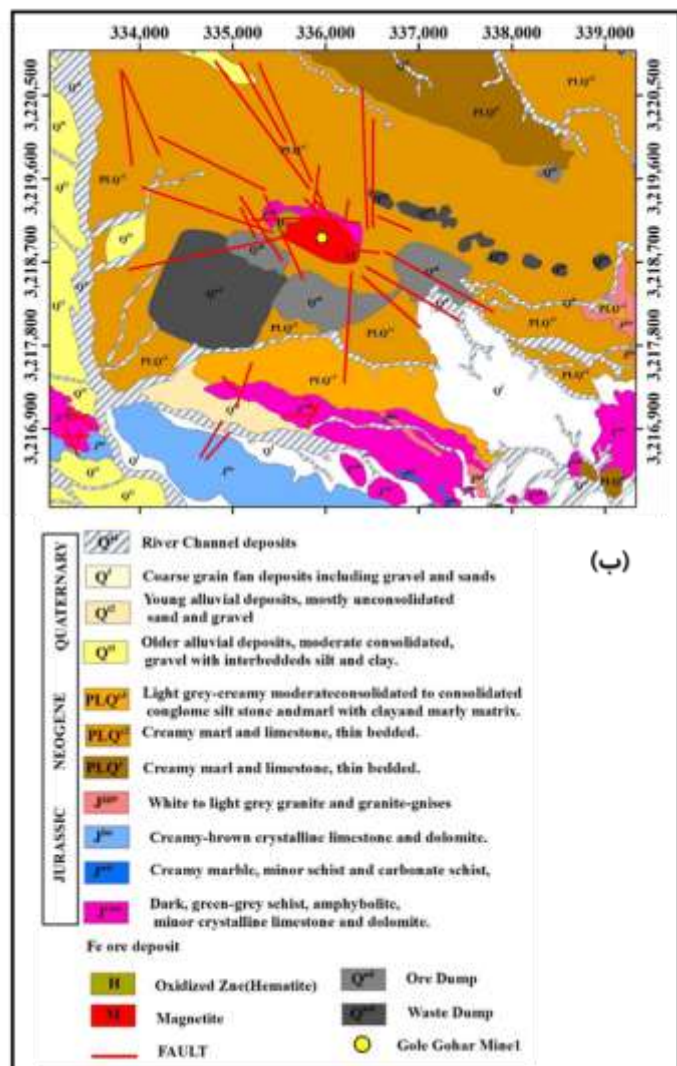
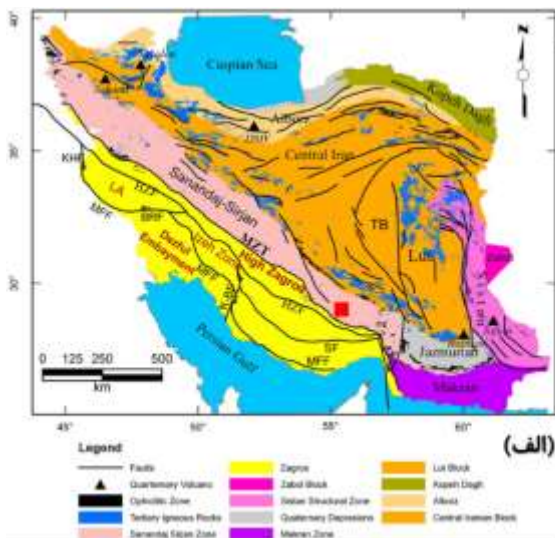
<sup>۲</sup> 3D Vertical Proportion Matrices (VPM)

### ۳- مطالعه موردی: کانسار آهن گل‌گهر سیرجان

#### ۳-۱- زمین‌شناسی

عیار آهن، فسفر و گوگرد در این منطقه به ترتیب برابر با ۵۷٫۲، ۰٫۱۶ و ۱٫۸ درصد است [۳۲]. این ناحیه عموماً از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده است. ارتفاعات محدودی که رخنمون دارند شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک در جنوب و جنوب غرب معدن و سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و سنوزوئیک (در فاصله دورتر) در شرق معدن‌اند. سنگ‌های پالئوزوئیک شامل کمپلکس گل‌گهر است که قدیمی‌ترین مجموعه دگرگونی این منطقه را تشکیل می‌دهد. ذخایر شش‌گانه سنگ آهن در این کمپلکس قرار دارد. بخش تحتانی این کمپلکس شامل تناوبی از گنایس، میکاشیست، آمفیبولیت و کوارتز شیست است [۳۳].

کانسار آهن گل‌گهر در حدود ۵۵ کیلومتری جنوب‌غربی سیرجان و از نظر ساختاری در لبه شرقی زون ماگمایی- دگرگونی سنندج- سیرجان قرار دارد (شکل ۱). مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در منطق مورد مطالعه منجر به کشف شش توده معدنی مجزا در مساحتی بالغ بر ۴۰ کیلومتر مربع شده است. کانساز گل‌گهر یکی از مهم‌ترین ذخایر اقتصادی ایران با ذخیره کل بیش از ۱۱۳۵ میلیون تن است. همچنین، متوسط

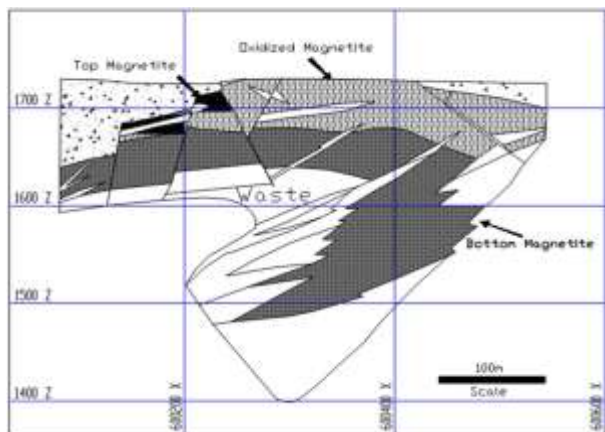


شکل ۱- الف- موقعیت کانسار آهن گل‌گهر در زون ماگمایی- دگرگونی سنندج - سیرجان، ب- یک نقشه زمین‌شناسی ساده از کانسار آهن گل‌گهر [۳۱].

در مراحل بعدی در معرض دگرگونی وسیع زون سنندج - سیرجان واقع شده است. اخیراً نیز برخی نظریات مبنی بر منشأ اسکارنی توده گل‌گهر ارایه شده است [۳۲].

مگنتیت کانی اصلی سنگ آهن منطقه گل‌گهر است و تقریباً

در خصوص منشأ این کانسار نظریات گوناگونی توسط زمین‌شناسان ارایه شده است. برخی از آن‌ها تشکیل این توده معدنی را نتیجه آتشفشان‌های زیردریایی و برخی دیگر آن را در نتیجه رسوبات آهن‌دار از حوضه‌های نیمه عمیق دانسته‌اند که



شکل ۲- یک مقطع عرضی از کانسار شماره ۱ گل‌گهر نشان‌دهنده دامنه‌های واحدهای معدنی اصلی

پیریت و گوگرد در این سنگ معدنی در حین مرحله اکسیداسیون به طور کامل خارج شده و با لیمونیت جایگزین شده‌اند. علاوه بر این مگنتیت تحت تاثیر فرآیند مارتیتی شدن به اکسید آهن قرمز رنگ (ماگهمیت، هماتیت و گوتیت) تبدیل شده است.

در سنگ‌های منطقه اکسیده، به طور میانگین ۱۲ درصد هماتیت و گوتیت وجود دارد. در مجموع کنسانتره حاصل از این سنگ، مقدار آهن کمتری نسبت به کنسانتره تولید شده از سنگ مگنتیتی (۶۲ درصد آهن در مقابل ۶۹ درصد در سنگ مگنتیت) دارد.

کانسنگ مگنتیت فوقانی در مناطقی محدود، در بالای توده معدنی قرار دارد و در حدود ۳ درصد تناژ کل توده معدنی را تشکیل می‌دهد. سنگ معدنی این توده تا اندازه‌ای اکسید شده است اما همچنان دارای شدت مغناطیسی است. میزان اکسیدشدگی این سنگ برای از بین رفتن پیریت کافی بوده و عیار کلی گوگرد در داخل این سنگ معدنی به شدت پایین آمده است، همچنین فسفر این کانسنگ نیز بسیار پایین است. این سنگ حاوی کانه مگنتیت دانه‌ریز تا متوسط است، که دانه‌های مگنتیت با سیمان تالک و کلریت در بر گرفته شده‌اند. در بخش‌هایی که سیمان تالک و کلریت بیشتر شده، مقاومت سنگ کمتر می‌شود، اما عمدتاً مقدار تالک و کلریت آنقدر دیده نمی‌شود که مقاومت سنگ را خیلی پایین آورد.

### ۲-۳- بررسی مجموعه داده‌ها

در این مطالعه، یک مجموعه داده شامل ۴۰۸۱ نمونه جمع‌آوری شده از ۵۴۱ گمانه اکتشافی موجود در معدن شماره یک گل‌گهر سیرجان استفاده شده است (شکل ۳). منطقه مورد

عمده حجم کانسار را تشکیل می‌دهد (شکل ۱- ب). این کانی به همراه لودویگیت، پنتلاندیت (کمیاب) و پیروتیت به عنوان کانی‌های اولیه کانسار گل‌گهر شناخته می‌شوند. هماتیت، گوتیت، مارتیت و ماگهمیت کانی‌های ثانویه سنگ آهن‌اند و در زون اکسیدی متمرکز شده‌اند که مقدار آن‌ها کمتر از مگنتیت است. کانی‌های غیرفلزی کانسار گل‌گهر شامل دو گروه‌اند. گروه اول کانی‌های تالک، کلریت، سرپانتین و فورستریت که به صورت گانگ همراه با دانه‌های مگنتیت قرار گرفته‌اند. گروه دوم تجمع دایکی شکل از کانی‌های تالک، کلریت، آمفیبول و تورمالین است [۳۲].

ماده معدنی اصلی، مگنتیت و سنگ‌های باطله شامل انواع شیسست‌ها (کوارتز شیسست، تالک شیسست، میکاشیسست و کلریت شیسست)، گنایس، آمفیبولیت، اسکارن و دولومیت است. سنگ آهن در این معدن بر اساس مقدار بازیابی وزنی مغناطیسی<sup>۱۶</sup>، کانه‌های همراه، عیار گوگرد و عیار آهن به سه نوع مگنتیت تحتانی، اکسید میانی (سنگ اکسیده) و مگنتیت فوقانی رده‌بندی می‌شود (شکل ۲). مگنتیت تحتانی بخش عمده کانسار است که در قسمت زیرین توده معدنی قرار دارد و از مگنتیت همراه با پیریت تشکیل شده است. مقدار گوگرد این نوع کانسنگ معمولاً از ۰/۲ درصد بیشتر است. حدود ۹ درصد سنگ مگنتیت تحتانی درصد گوگردی در حدود ۳ تا ۶ درصد دارد. گوگرد بیشتر به شکل پیریت دیده می‌شود و در آزمایش‌های جدایش مغناطیسی به راحتی به قسمت باطله منتقل می‌شود. سنگ‌های منطقه اکسید به صورت لایه‌ای روی مگنتیت تحتانی را پوشانده‌اند. این لایه در هنگام بالابردگی لایه آهن، در معرض هوازدگی قرار گرفته و اکسید شده است و بعد از آن رسوبات جوان ترشیاری روی آن را پوشانده‌اند. در این بخش کانی‌های هماتیت، گوتیت و کمی مارتیت و ماگهمیت به صورت ثانویه دیده می‌شود و چگالی این سنگ ۴/۱۷ (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

<sup>۱۶</sup> Magnetic Weight Recovery (MWR)

۵۷٫۸	۶۰٫۲	۶۰٫۶	۵۵٫۰	میانگین
۸٫۱	۷٫۱	۵٫۲	۷٫۵	انحراف معیار

با توجه به مطالب بیان شده در مقدمه، برای مدل‌سازی واحدهای سنگی، لازم است تا همبستگی فضایی داده‌های مربوط به عنصر آهن بر اساس تغییرات واحدهای سنگی مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، مدل‌های واریوگرام کروی استفاده شده است. واریوگرام‌های تجربی نشان‌دهنده وجود ناهمسانگردی در منطقه مورد مطالعه‌اند. همچنین بیشترین پیوستگی فضایی در جهت  $N60^{\circ}W$  است که به عنوان جهت اصلی شناخته می‌شود. رابطه ۵ مشخصات مدل کروی برازش شده بر واریوگرام‌های تجربی محاسبه شده را، نشان می‌دهد.

در رابطه ۵، مقادیر داخل پرانتز به ترتیب دامنه مدل واریوگرام‌ها را در امتداد اصلی (شیب صفر و آزیموت  $120^{\circ}$  درجه)، امتداد فرعی (شیب  $50^{\circ}$  و آزیموت  $30^{\circ}$  درجه) و امتداد قائم (شیب  $50^{\circ}$  و آزیموت  $210^{\circ}$  درجه) ارائه داده‌اند. واریوگرام با یک اثر قطعه‌ای به مقدار  $7.5$  درصد و پنج ساختار برازش شده است.

$$\gamma(h) = 7.5nugget + 18Sph(1050, 31.5, 128) + 14.5Sph(120, 31.5, 128) + 13Sph(120, 109.2, 128) + 22Sph(120, 109.2, 352) + 106Sph(\infty, \infty, 352) \quad (5)$$

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- آنالیز تماس

برای بررسی رفتار عنصر آهن هنگام عبور از مرز بین دو واحد سنگی، از ابزار آنالیز نسبت‌های واریوگرام متقابل به مستقیم عیار - شاخص استفاده شد. برای این منظور از رابطه‌های ۶ و ۷ استفاده شده است [۳۴]:

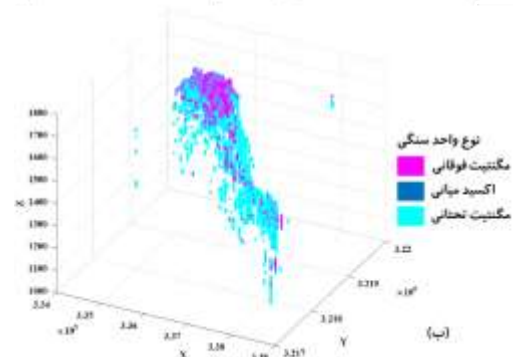
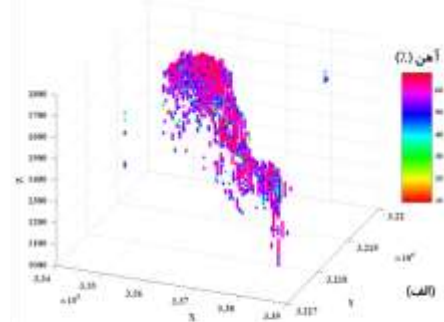
$$\forall h \in R^3, m_i(h) = \frac{\gamma_{Z_{i,j,k}} I_{i,j,k}}{\gamma_{I_{i,j,k}}} \quad (6)$$

$$\forall h \in R^3, m_{i,j}(h) = \frac{\gamma_{Z_{i,j}} I_{i,j}}{\gamma_{I_{i,j}}} \quad (7)$$

در حالی که صورت کسر واریوگرام‌های متقابل بین عیارها و شاخص‌ها و مخرج کسر واریوگرام‌های شاخص‌ها. برای محاسبه واریوگرام متقابل (صورت کسر) لازم است تا با استفاده از روش نمونه‌برداری گیس داده‌ها از ماهیت شاخص به ماهیت پیوسته تبدیل شوند. دو نسبت بیان شده (رابطه ۶ و ۷) چگونگی میانگین عیار در حوزه  $D_i$  هنگام نزدیک و یا دور شدن از مرز حوزه بیان می‌کند (رابطه ۸ و ۹) [۳۴]:

مطالعه تقریباً  $2750$  متر در امتداد شرقی- غربی،  $1000$  متر در امتداد شمالی- جنوبی و  $1922$  متر به صورت عمودی است. نمونه‌ها درون گمانه‌های اکتشافی در فواصل  $6$  متری جمع‌آوری و در قسمت‌های مربوط به واحدهای معدنی اشاره شده در بخش قبلی برای عیارسنجی عناصر آهن، گوگرد، فسفر و شناسایی واحد معدنی هر نمونه به آزمایشگاه ارسال شدند. بررسی آماری نتایج آنالیز عیاری عنصر آهن در هر واحد معدنی و در کل گمانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

همانطور که در جدول ۱ قابل مشاهده است، مقدار عیار متوسط عنصر آهن در زون معدنی اکسیدی و مگنتیت فوقانی بیشتر از این مقدار در مگنتیت تحتانی است. به طوری که مقدار کمینه عیاری این عنصر در مگنتیت تحتانی ( $9$  درصد) دیده می‌شود.



شکل ۳- نمای سه‌بعدی گمانه‌های اکتشافی موجود در معدن شماره یک گل گهر سیرجان، الف- توزیع فضایی عیار آهن و ب- توزیع فضایی سه واحد معدنی.

جدول ۱- آمار توصیفی داده‌های عیاری آهن برای هر واحد معدنی و در کل کانسار

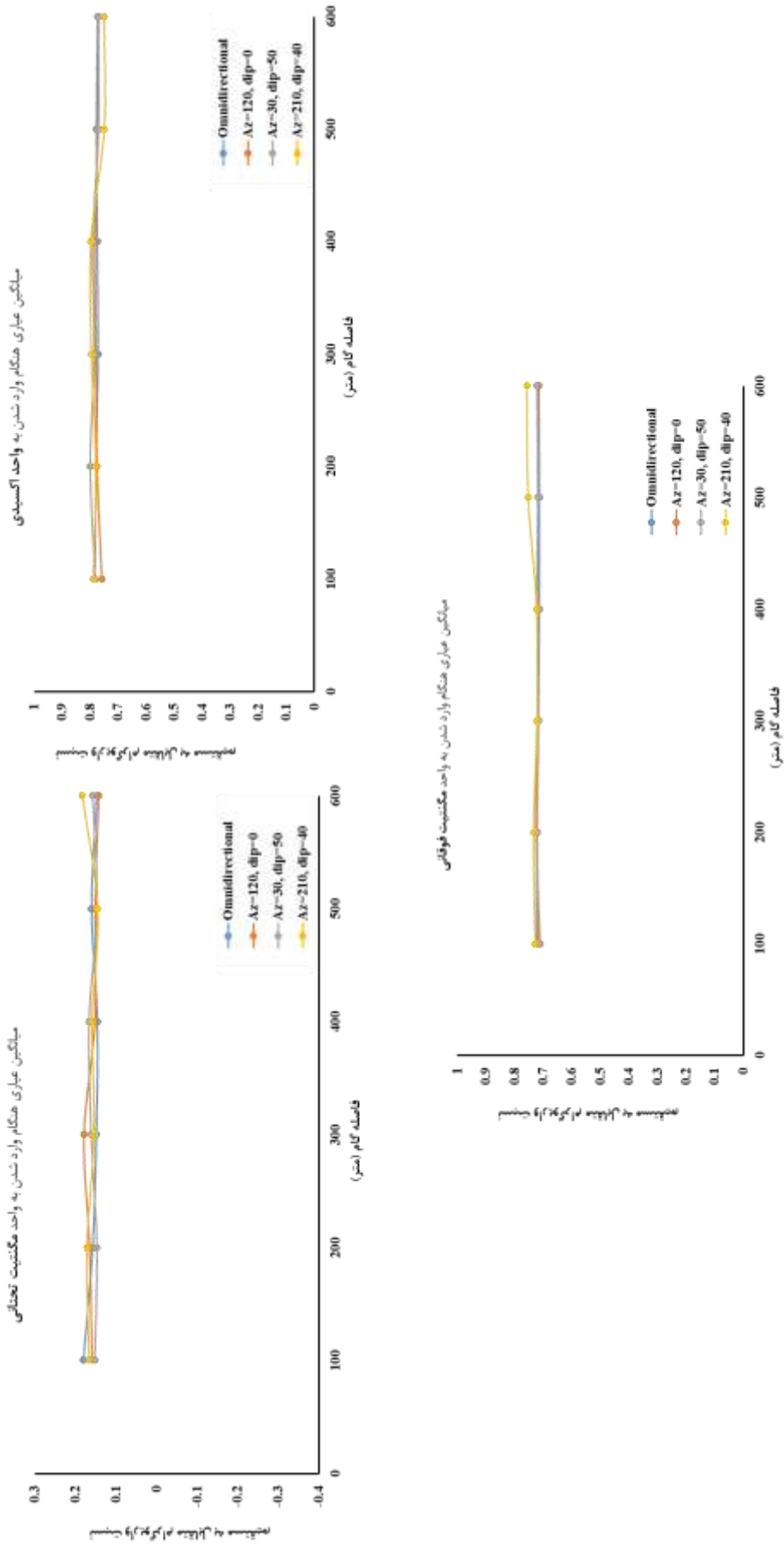
تعداد داده‌ها	مگنتیت تحتانی	اکسید میانی	مگنتیت فوقانی	کل
۲۵۳۹	۴۹۸	۱۰۴۴	۴۰۸۱	
۶۲ درصد	۱۲ درصد	۲۶ درصد	۱۰۰ درصد	نسبت‌ها
۹۰	۲۸۰	۱۳۷	۹۰	واحد
۶۷٫۳	۶۷٫۶	۶۷٫۵	۶۷٫۶	مینیمم
۶۷٫۳	۶۷٫۶	۶۷٫۵	۶۷٫۶	ماکزیمم

اصلی در منطقه مورد مطالعه انجام شده است، این نسبت‌ها برای هر کدام از متغیرها در سه واحد سنگی مگنتیت تحتانی، زون اکسید و مگنتیت فوقانی بررسی شدند. شکل ۴ نتایج حاصل از این آنالیز بر روی سه واحد سنگی برای عنصر آهن نشان می‌دهد. نسبت واریوگرام در فاصله‌های کم نشان می‌دهد که عیار آهن در مگنتیت تحتانی در حدود ۰٫۱۷، در زون اکسید در حدود ۰٫۸ و در مگنتیت فوقانی در حدود ۰٫۷ است.

$$m_i(h) = E \{ Z(x) | x \in D_i, x+h \notin D_i \} \quad (8)$$

$$m_{i,j}(h) = E \{ Z(x) | x \in D_i, x+h \notin D_j \} \quad (9)$$

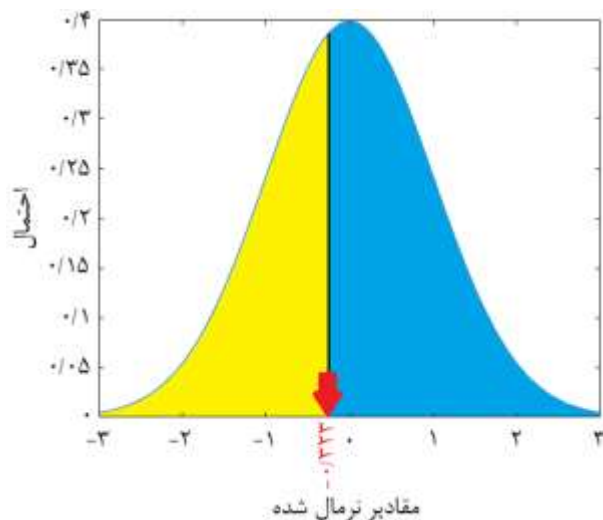
برای بررسی تغییرات میانگین عیاری هر کدام از متغیرها، در همسایگی مرزهای واحد سنگی، نسبت‌های واریوگرام متقابل به شاخص عیار- شاخص در امتداد اصلی، فرعی، قائم و غیرجهتی برای هر کدام از متغیرها محاسبه شدند. با توجه به آن که نمونه‌برداری از سه واحد سنگی



شکل ۴ - نمودارهای نسبت‌های وار یوگرام متقابل به مستقیم عنصر آهن در جهت اصلی، فرعی، قائم و غیر جهتی در سه واحد سنگی موجود

آستانه، پرچم اولیه به دو زیر پرچم تقسیم شده و برنامه به صورت بازگشتی استفاده خواهد شد. اگر پرچمها بسیار پیچیده باشند، حد آستانه‌های خروجی برابر با منفی بی نهایت می شود.

در این حالت، حد آستانه‌ها از طریق روش‌های بهینه‌سازی تکراری صحیح و خطا می‌توانند تعیین شوند. از آنجا که برنامه نوشته شده حدود آستانه‌ای و قانون نوع سنگ را به صورت ناحیه‌ای به روز می‌کند، ناپایایی در هر جهت ممکن به صورت خودکار در محاسبات منظور می‌شود. بنابراین، در ابتدا لازم است تا حد آستانه با استفاده از سهم کلی<sup>۱</sup> هر واحد محاسبه شود (شکل ۶).



شکل ۶- اعمال قانون نوع سنگ بر روی تابع گوسی (قسمت زرد رنگ = واحد سنگی نوع اول و قسمت آبی رنگ = واحد سنگی نوع دوم).

### ۴-۲-۳- ماتریس نسبت‌های قائم

در مدل‌سازی واحدهای سنگی، برای در نظر گرفتن ناپایایی‌های موجود در جهات قائم و افقی، ماتریس سه‌بعدی سهم رخساره‌ها استفاده شد. اولین گام در محاسبه این ماتریس، دسته‌بندی گمانه به صورت محلی بوده است. پس از آن سهم هر رخساره در هر دسته مشخص می‌شود. سپس با استفاده از درصد‌های محاسبه شده برای هر رخساره در هر دسته، مقادیر سهم رخساره بر روی گره‌های یک شبکه منظم با ابعاد از پیش تعیین شده به روش کریجینگ ساده تخمین زده می‌شود. از آنجا که سهم هر رخساره به طور جداگانه تخمین زده می‌شود، حاصل جمع درصد رخساره‌ها در هر گره برابر ۱۰۰ نخواهد شد. در گام بعد با استفاده از یک تغییر خطی مقادیر نرمال‌سازی شده تا شرط یاد شده اعمال شود.

با توجه به بررسی انجام شده، سطح توپوگرافی به عنوان

این نتایج نشان می‌دهد که از یک طرف، مرز بین ناحیه اکسید میانی و مگنتیت فوقانی نرم و از طرف دیگر، مرز بین این حوزه‌ها و مگنتیت تحتانی سخت است. بنابراین، در ادامه کار دو واحد سنگی اکسید و مگنتیت فوقانی به عنوان یک واحد (دامنه اول) و مگنتیت تحتانی به عنوان دامنه دوم در نظر گرفته می‌شود.

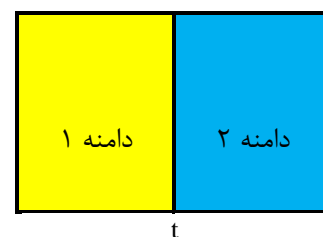
### ۴-۲-۴- الگوریتم شبیه‌سازی تک گوسی

#### ۴-۲-۴-۱- طراحی قانون سنگ واحدهای سنگی

در روش تک گوسی با استفاده از یک تابع گوسی تصادفی و چند حد آستانه می‌توان کانسارهای دارای ساختار ساده دوگانه و چندگانه ترتیبی را به سادگی مدل کرد. هدف مورد نظر در این قسمت از پژوهش، مدل کردن مرز بین دامنه نوع اول (زون اکسید و مگنتیت فوقانی) و دامنه نوع دوم (مگنتیت تحتانی) است. از این رو با مدل کردن دو محدوده می‌توان در واقع مرز بین آن‌ها را درونیابی و عدم قطعیت مرتبط با آن را محاسبه کرد.

در الگوریتم تک گوسی گام اول ترسیم و محاسبه قانون نوع سنگ یا پرچم است که در واقع نحوه ارتباط واحدهای مختلف با یکدیگر را نشان می‌دهد. در مطالعه موردی این پژوهش به علت ارتباط ساده بین واحدهای سنگی نوع اول و دوم، یک گوسی با یک حد آستانه به سادگی نحوه ارتباط واحدها را نشان می‌دهد. در اینجا تابع گوسی تصادفی با یک حد آستانه به دو واحد سنگی نوع اول و نوع دوم با استفاده از رابطه زیر افراز می‌شود (شکل ۵):

$$\begin{cases} \text{if } Y < t, & \text{domain1} \\ \text{if } Y > t, & \text{domain2} \end{cases} \quad (10)$$



شکل ۵- پرچم دوبعدی قانون نوع سنگ برای واحدهای سنگی نوع اول و دوم کانسار گل‌گهر

#### ۴-۲-۴-۲- محاسبه حدود آستانه‌ای

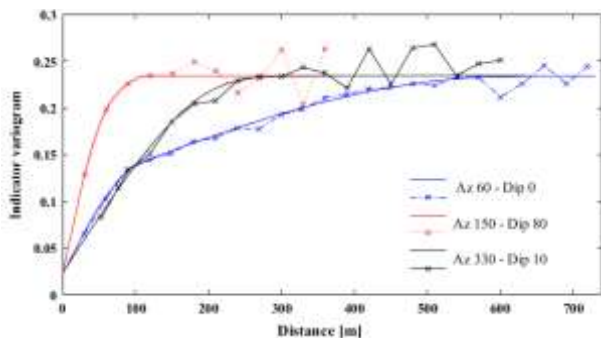
به منظور محاسبه مقادیر حدود آستانه‌ای برای حالت چند گوسی، برنامه‌ای در فضای نرم‌افزار متلب تهیه شده است. بر اساس این برنامه، تابع‌های گوسی تصادفی به صورت متوالی مورد بررسی قرار گرفته است و با گروه‌بندی رخساره‌ها، حدود آستانه‌ای بر روی هر تابع تعیین می‌شود. پس از تعیین حد

<sup>۱</sup> Global Proportion

شکل ۷- مدل احتمالات محلی مربوط به رخساره نوع اول (الف) و رخساره نوع دوم (ب) با استفاده از ماتریس نسبت‌های قائم

#### ۴-۲-۴- تعیین پارامترهای توابع گوسی

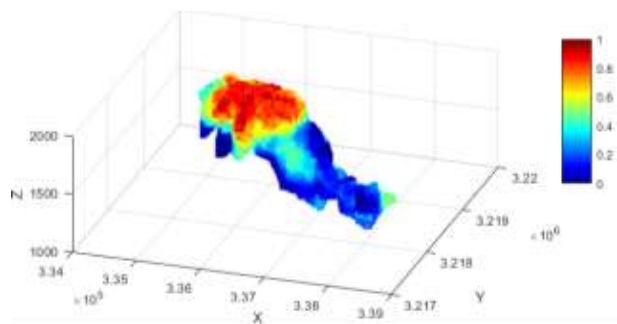
برای به دست آوردن پارامترهای توابع گوسی از روشی مبتنی بر تکرار و قیاس استفاده می‌شود. ابتدا واریوگرام شاخص متمرکز هر واحد محاسبه شده، سپس واریوگرام‌های شاخص متقابل بین دو واحد نیز محاسبه می‌شود. با کوتاه‌سازی تابع گوسی و برازش واریوگرام‌های شاخص به دست آمده از آن با واریوگرام‌های شاخص متمرکز تجربی به دست آمده از داده‌های گمانه، می‌توان قیاسی بین آن‌ها انجام داد. پارامترهای توابع گوسی را آنقدر تغییر داده می‌شود تا بهترین برازش حاصل شود. سپس از این پارامترها می‌توان برای اجرای الگوریتم شبیه‌سازی تک گوسی بهره برد. برای این منظور، برنامه تهیه شده در فضای متلب مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۸ مناسب‌ترین برازش واریوگرام‌های شاخص تجربی با واریوگرام‌های شاخص حاصل از کوتاه‌سازی تابع گوسی مشاهده می‌شود. در تصویر، سه جهت اصلی ناهمسانگردی رخساره برای برازش هرچه دقیق‌تر مدل توابع گوسی در نظر گرفته شده است.



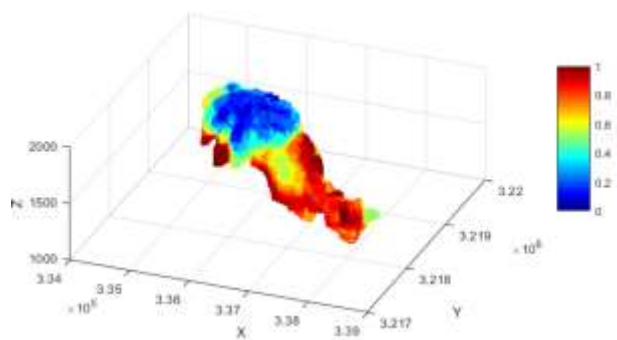
شکل ۸- واریوگرام‌های شاخص تجربی (ضربدرها) و مدل‌های برازش شده متناظر (خطوط) در امتداد سه جهت ناهمسانگردی اصلی

با توجه به برازش‌های حاصل شده در هر سه جهت اصلی ناهمسانگردی پارامترهای تابع گوسی به کار رفته در طراحی قانون نوع سنگ و کوتاه‌سازی، مطابق رابطه ۱۱ حاصل شده است. تابع گوسی که در واقع جداکننده واحدهای سنگی نوع اول و نوع دوم از یکدیگر بوده است، از مدل دو ساختاره کوبیک با دامنه تاثیرهای کوتاه و بلند برخوردار است. شکل واریوگرام در نزدیکی مبدا برای ایجاد مرز شفاف و واضح بین واحدهای زمین‌شناسی نقش اساسی دارد. به طور خاص، مدل واریوگرام کوبیک در نزدیک مبدا هموار است و سبب ایجاد مرز منظم می‌شود. در مقابل، مدل کروی به صورت خطی افزایش می‌یابد و مرز

سطح مبنا انتخاب شده است. پس از تعیین سطح مبنا، بر اساس مدل بلوکی تولید شده در گزارش قبلی و موقعیت قرارگیری گمانه‌های اکتشافی، فضای مورد مطالعه با استفاده از سلول‌هایی با ابعاد  $200 \times 200$  متر مربع، شبکه‌بندی شد. بیان این نکته مهم ضروری است که به دلیل کاهش عدم قطعیت، شرط اساسی در محاسبه احتمالات نرم برای هر سلول قرار گرفتن حداقل دو گمانه محلی در آن است. بنابراین، در این مطالعه ابتدا شبکه‌بندی با استفاده از سلول‌هایی با ابعاد  $200 \times 200$  مترمربع انجام شده و پس از آن بلوک‌ها با استفاده از روش‌های تغییر پایه<sup>۱</sup> به ابعاد متناسب با شبکه شبیه‌سازی ( $15 \times 10 \times 10$  مترمکعب) تقسیم شده تا احتمالات نرم مرتبط با هر رخساره در آن‌ها تعیین شود. برای محاسبه ماتریس نسبت‌های قائم براساس استراتژی بیان شده، برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب تهیه شده است. بر این اساس ماتریس نسبت‌های قائم متناظر با شبکه شبیه‌سازی مشخص می‌شود (شکل ۷). ماتریس نسبت‌های قائم محاسبه شده، به عنوان احتمالات نرم در الگوریتم شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، ناپایایی‌ها در جهات قائم و افقی در منطقه مورد مطالعه در فرآیند شبیه‌سازی کنترل می‌شود.



(الف)

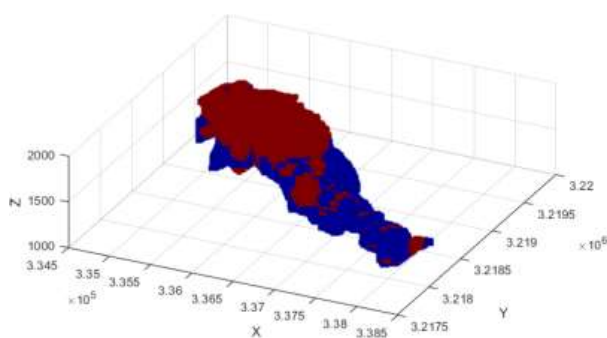


(ب)

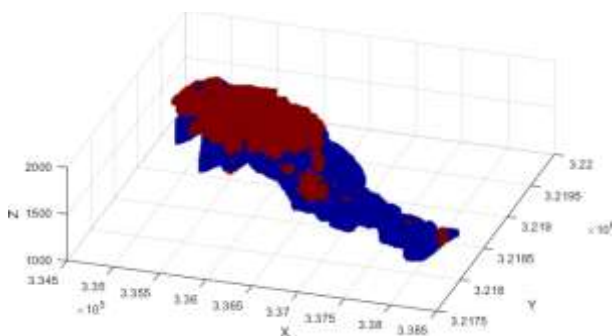
<sup>۱</sup> Change of support

می‌شوند. در نهایت با توجه به قانون نوع سنگ به کار رفته در شبیه‌سازی، این مقادیر پیوسته به مقادیر گسسته نشان‌دهنده واحدهای سنگی نوع اول و نوع دوم تبدیل می‌شوند.

در نهایت تعداد ۱۰۰ تحقق از رخساره‌های مورد نظر بر روی مدل بلوکی از پیش تعیین شده شبیه‌سازی شد. شکل ۹-الف نمای سه‌بعدی یک تحقق تصادفی حاصل از اجرای الگوریتم شبیه‌سازی تک‌گوسی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از بازتولید تحقق‌ها، نقشه محتمل‌ترین رخداد برای هر یک از بلوک‌های شبکه شبیه‌سازی حاصل می‌شود (شکل ۹-ب).



(الف)



(ب)

شکل ۹-الف-مدل سه بعدی یک تحقق شرطی تصادفی از واحدهای سنگی و ب- نقشه محتمل‌ترین رخداد برای هر کدام از بلوک‌های شبکه شبیه‌سازی بر اساس نتایج حاصل از بازتولید تحقق‌های شبیه‌سازی (رنگ قرمز = دامنه اول و رنگ آبی = دامنه دوم)

#### ۶-۲-۴- اعتبارسنجی

در این تحقیق از ابزارهای متفاوتی برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از الگوریتم تک‌گوسی استفاده شده است. بر این اساس، سه معیار اصلی شامل آماره‌های تک نقطه‌ای، آماره‌های دو نقطه‌ای و پیوستگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی و نتایج آنالیز بلوک‌های استخراجی حاصل از داده‌های جمع‌آوری شده با چال‌های آتشیاری به عنوان داده‌های کنترلی استفاده شده‌اند. بر اساس بلوک‌های استخراج شده از

نامنظمی بین دو واحدهای زمین‌شناسی را در پی دارد. مدل واریوگرام تابع گوسی تعریف شده به صورت رابطه ۱۱ است:

$$\gamma(h) = 0.09nugget + 0.38Cubic(108, 64.8, 228) + 0.53Cubic(597.6, 111.6, 288) \quad (11)$$

که در این رابطه؛

$$Cubic(h) = c \left[ 7 \frac{h^2}{a} - \frac{35h^3}{4a^3} + \frac{7h^5}{2a^5} - \frac{3h^7}{4a^7} \right]$$

است ( $h$  = طول گام و  $a$  = دامنه واریوگرام)

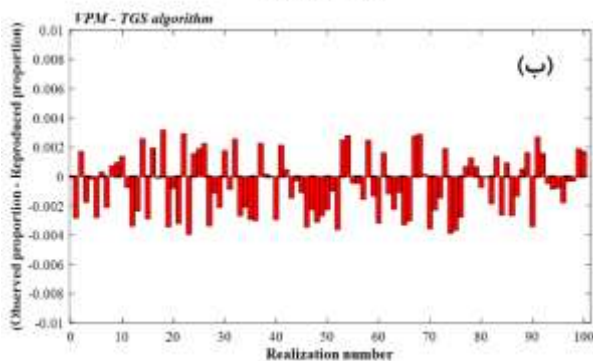
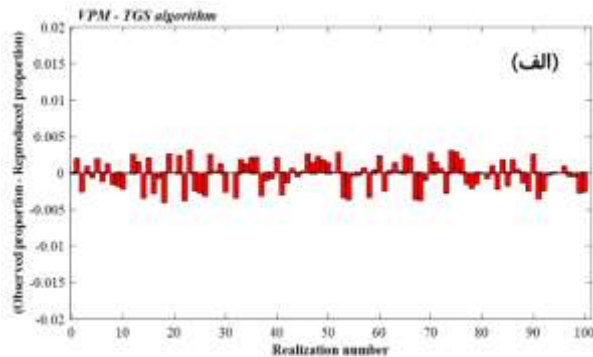
#### ۵-۲-۴- اجرای الگوریتم اصلی شبیه‌سازی تک‌گوسی بر روی واحدهای سنگی

یکی از مهم‌ترین اطلاعات ورودی در الگوریتم‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری، تعریف یک فضای شبیه‌سازی متناسب با منطقه مورد مطالعه است. در این تحقیق بر اساس موقعیت مکانی گمانه‌ها، یک مدل بلوکی با بلوک‌هایی به ابعاد  $10 \times 10 \times 15$  مترمکعب ساخته شده است.

پس از اینکه تمام پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در مراحل قبل آماده شد، این پارامترها به الگوریتم اصلی شبیه‌سازی که برنامه آن فضای نرم‌افزار متلب تهیه شده است، معرفی شد. بر اساس الگوریتم روش شبیه‌سازی تک‌گوسی، داده‌های مربوط به واحدهای سنگی در ابتدا با روش نمونه‌گیر گیبس به مقادیر پیوسته گوسی تبدیل شدند. برای بررسی سهم محلی هر یک از رخساره‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، مدل احتمالات نرم تولید شده بر اساس ماتریس نسبت‌های قائم (شکل ۷) وارد الگوریتم شبیه‌سازی می‌شود. بدین ترتیب، ناپایداری در جهت‌های مختلف از شبکه‌های شبیه‌سازی با این مدل کنترل می‌شود. برای این منظور، داده‌های نرم مستخرج از ماتریس نسبت‌های قائم به صورت بازه‌ای از احتمال به تابع مربوطه که در فضای نرم‌افزار متلب آماده شده است، وارد می‌شوند.

پس از این مرحله، عمل شرطی‌سازی فرآیند شبیه‌سازی به داده‌های سخت و نرم با برنامه تهیه شده در فضای متلب کنترل می‌شود. بدین منظور، ۵۰ درصد شرطی‌سازی بر اساس داده‌های (احتمالات) نرم انجام می‌گیرد و ۵۰ درصد باقیمانده بر اساس داده‌های سخت موجود در گمانه‌ها انجام می‌شود. مقادیر پیوسته تولید شده از داده‌های سخت با روش نوارهای دوار بر روی شبکه تعریف شده (مدل بلوکی) شبیه‌سازی

(رنگ قرمز) و مقدار میانگین + / - انحراف معیار (رنگ آبی) ترسیم شده است. همان طور که به وضوح مشاهده می‌شود، الگوریتم توانایی مناسبی در بازتولید آماره‌های دو نقطه‌ای دارد.



شکل ۱۰- اختلاف میانگین میان تحقق‌های بازتولید شده با الگوریتم تک گوسی و مقدار واقعی آن در داده‌های اکتشافی (الف) و چال‌های آتشیاری (ب)

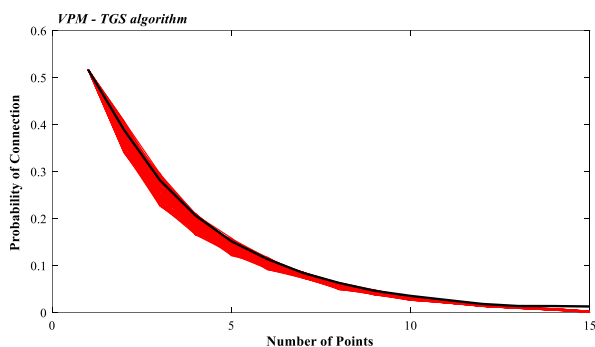
معدن مورد مطالعه، تعداد ۲۸۸۰۷ نمونه به همراه گام زمانی استخراج هر کدام از آن‌ها توسط معدن از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۳۹۸ در اختیار قرار گرفته است. در واقع اطلاعاتی از قبیل عیار آهن، اکسید آهن، فسفر، گوگرد و مقدار بازبایی مغناطیسی به همراه نوع واحد سنگی و زمان برداشت هر کدام از نمونه‌ها در اختیار است. برای این منظور با توجه به موقعیت چال‌های انفجاری و اطلاعات موجود در مورد سائیز بلوک‌های استخراج شده، یک مدل بلوکی ایجاد، در مرحله بعد، با استفاده از روش نزدیک‌ترین فاصله مدل بلوکی استخراجی بازتولید شد. در مرحله اعتبارسنجی، هنگام استفاده از بلوک‌های استخراجی، تنها از بلوک‌های بازتولید شده به وسیله الگوریتم شبیه‌سازی که با بلوک‌های استخراجی متناظر بوده‌اند، استفاده شد.

### الف - بررسی آماره‌های تک نقطه‌ای

بررسی آماره‌های تک نقطه‌ای به طور کلی اشاره به بررسی هیستوگرام تحقق‌های تولید شده با دو روش است. از آنجا که متغیر در حال بررسی گسسته بوده و به دلیل وابسته بودن واریانس به مقدار میانگین (نسبت‌های واحد سنگی)، این مقایسه محدود به بررسی میانگین بازتولید شده با الگوریتم پیشنهادی شده است. شکل ۱۰- الف، اختلاف مقدار واقعی نسبت رخساره‌ها در گمانه‌های اکتشافی و مقادیر بازتولید شده در تحقق‌های حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تک گوسی ارائه داده است. همچنین، شکل ۱۰- ب اختلاف مقدار واقعی نسبت رخساره‌ها در بلوک‌های مربوط به چال‌های آتشیاری و بلوک‌های متناظر بازتولید شده با الگوریتم شبیه‌سازی تک گوسی را ارائه داده است. با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که الگوریتم ارائه شده در بازتولید نسبت رخساره‌ها موفق بوده است.

### ب - بررسی آماره‌های دو نقطه‌ای

ابزاری که با آن آماره‌های دو نقطه‌ای بدست می‌آیند واریوگرام است. این آماره‌ها را می‌توان در راستاهای متفاوت بدست آورد. برای این منظور در ابتدا واریوگرام داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی و بلوک‌های مربوط به چال‌های آتشیاری در جهت اصلی محاسبه شده است (رنگ سیاه در شکل ۱۱). در ادامه، واریوگرام‌های هر کدام از تحقق‌های بازتولید شده با الگوریتم پیشنهادی (رنگ خاکستری) با واریوگرام بدست آمده در مرحله قبلی مقایسه شده است (شکل ۱۱). واریوگرام‌های مربوط به بلوک‌های بازتولید شده متناظر با بلوک‌های مربوط به چال‌های آتشیاری در شکل ۱۱- ب ترسیم شده است. در شکل ۱۱ می‌توان عملکرد الگوریتم پیشنهادی را مورد بررسی قرار داد. برای مقایسه بهتر واریوگرام‌ها مقدار میانگین واریوگرام‌های حاصل از تحقق‌ها

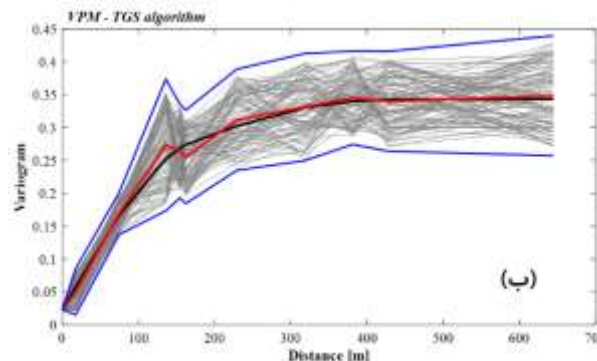
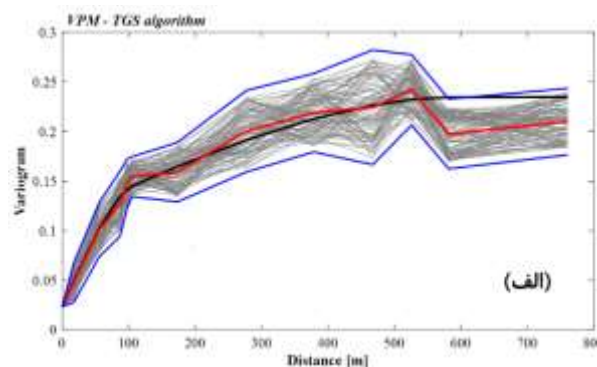


شکل ۱۲- بررسی احتمال پیوستگی مرزهای زمین‌شناسی در تحقق‌های بازتولید شده با الگوریتم پیشنهادی. خطوط قرمز تابع پیوستگی مدل‌های شبیه‌سازی شده را ارایه می‌دهند و خط سیاه نشان‌دهنده تابع پیوستگی چال‌های آتشفشانی است

### ۵- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی تصادفی واحدهای زمین‌شناسی در دهه‌های گذشته توجه فزاینده‌ای را در توصیف ذخایر معدنی، مخازن نفتی و سفره‌های زیرزمینی به خود جلب کرده است. تا جایی که امکان درک بهتر ساختار زمین‌شناسی زیرسطحی را فراهم می‌کند. وجود واحدهای زمین‌شناسی با ویژگی‌های مختلف از جمله تفاوت در توزیع عیار عناصر مرتبط با کانی‌سازی منجر به چالش در فرآیند شبیه‌سازی این متغیرهای پیوسته می‌شود. بنابراین، مدل‌سازی این واحدها با توجه به توزیع فضایی عناصر امری غیرقابل انکار است. آنچه که باید به آن توجه شود این است که قبل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی واحدهای زمین‌شناسی، شناخت ماهیت مرزهای بین این واحدها بسیار مهم است. آنالیز تماس برای تشخیص ماهیت مرز زمین‌شناسی بین دو حوزه با توجه به یک متغیر کمی ضروری است. اساساً بسته به این که متغیر پیوسته ناپیوستگی واضحی را در سراسر یک مرز زمین‌شناسی نشان می‌دهد یا خیر، می‌توان مرزهای بین واحدهای سنگی را به دو گروه سخت و نرم تقسیم کرد.

در این مقاله، با توجه به توزیع عنصر آهن در واحدهای زمین‌شناسی مختلف، یک رویکرد شبیه‌سازی برای ساخت مدل‌های تصادفی از واحدهای سنگی کانسار گل‌گهر سیرجان ارایه شده است. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از آنالیز تماس و بر اساس تفاوت در توزیع متغیر آهن گمانه‌های اکتشافی به دو دامنه زمین‌شناسی تقسیم شدند. سپس، بر اساس الگوریتم VPM-TGS ارایه شده، تحقق‌های تصادفی از این دو واحد زمین‌شناسی بازتولید شد. به عنوان یک تفاوت اساسی، استفاده از ماتریس نسبت‌های قائم در این الگوریتم، سبب شد تا روش پیشنهادی ناپایایی افقی و قائم موجود در



شکل ۱۱- واریوگرام شاخص ۱۰۰ تحقق بازتولید شده با الگوریتم پیشنهادی، (الف) گمانه‌های اکتشافی و (ب) چال‌های آتشفشانی

### پ- بررسی پیوستگی

پیوستگی مرزهای زمین‌شناسی اهمیت زیادی دارد. برای بررسی پیوستگی مرزهای زمین‌شناسی از رابطه ۱۲ استفاده شد:

$$E \left\{ \prod_{j=1}^n I [u + (j-1)h; z] \right\} = \varphi(n) \quad (12)$$

مقدار حاصل از رابطه ۱۲ مقدار احتمال پیوسته بودن  $n$  بلوک در جهت خاص که قابل تعریف است را نشان می‌دهد. بدیهی است با افزایش تعداد سلول‌ها مقدار احتمال هم‌کاهش می‌یابد. مقدار احتمال به ازای تعداد سلول ۱ برابر مقدار نسبت تابع هدف است که به طور حتم در جهت مختلف دارای مقدار یکسان است. در این مطالعه پیوستگی در جهت اصلی محاسبه شده است. مقادیر پیوستگی برای تحقق‌های بازتولید شده با الگوریتم پیشنهادی و نیز مدل بلوکی استخراجی حاصل از چال‌های آتشفشانی بدست آمده است (شکل ۱۲). همان‌طور که دیده می‌شود در راستای اصلی بازتولید پیوستگی مرزهای زمین‌شناسی با الگوریتم پیشنهادی مناسب بوده است.

۱۲. Talesh Hosseini, S., Asghari, O., Emery, X.; ۲۰۲۱; "An enhanced direct sampling (DS) approach to model the geological domain with locally varying proportions: Application to Golgohar iron ore mine, Iran", *Ore Geology Reviews*, ۱۳۹, ۱۰۴۴-۱۰۵۲.

۱۳. Ortiz, J.M., Emery, X.; ۲۰۰۶; "Geostatistical estimation of mineral resources with soft geological boundaries: a comparative study", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, ۱۰۶(۸), ۵۷۷-۵۸۴.

۱۴. Larrondo, P., Deutsch, C. V.; ۲۰۰۵; "Accounting for geological boundaries in geostatistical modeling of multiple rock types", In *Geostatistics Banff ۲۰۰۴* (pp. ۳-۱۲). Springer, Dordrecht.

۱۵. Maleki, M., Emery, X., Cáceres, A., Ribeiro, D., Cunha, E.; ۲۰۱۶; "Quantifying the uncertainty in the spatial layout of rock type domains in an iron ore deposit", *Computational Geosciences*, ۲۰(۵), ۱۰۱۳-۱۰۲۸.

۱۶. Armstrong, M., Galli, A., Beucher, H., Le Loc'h, G., Renard, D., Doligez, B., Eschard, R., Geffroy, F.; ۲۰۱۱; "Plurigaussian simulations in geosciences", Springer Science & Business Media.

۱۷. Carrasco, P., Ibarra, F., Rojas, R., Le Loc'h, G., Séguret, S.; ۲۰۰۷; "Application of the truncated Gaussian simulation method to a porphyry copper deposit", In *Proceedings of the ۳۳rd International Symposium on Application of Computers and Operation Research in the Mineral Industry APCOM* (pp. ۳۱-۳۹).

۱۸. Emery, X., González, K.; ۲۰۰۷; "Incorporating the uncertainty in geological boundaries into mineral resources evaluation", *Journal of the Geological Society of India*, ۶۹(۱), ۲۹-۳۸.

۱۹. Riquelme, R., Le Loc'h, G., Carrasco, P., Tapia, R. R., Le, G., Carrasco, P.; ۲۰۰۸; "Truncated Gaussian and plurigaussian simulations of lithological units in Mansa Mina deposit", *Proceedings of the ۸th international geostatistics congress*, ۸۱۹-۸۲۸.

۲۰. Talebi, H., Asghari, O., Emery, X.; ۲۰۱۳; "Application of plurigaussian simulation to delineate the layout of alteration domains in Sungun copper deposit", *Central European Journal of Geosciences*, ۵(۴), ۵۱۴-۵۲۲.

۲۱. Talebi, H., Asghari, O., Emery, X.; ۲۰۱۴; "Simulation of the lately injected dykes in an Iranian porphyry copper deposit using the plurigaussian model", *Arabian Journal of Geosciences*, ۷(۷), ۲۷۷۱-۲۷۸۰.

۲۲. Skvortsova, T., Beucher, H., Armstrong, M., Forkes, J., Thwaites, A., Turner, R.; ۲۰۰۲; "Simulating the geometry of a granite-hosted uranium orebody", In *Geostatistics Rio ۲۰۰۰* (pp. ۸۵-۹۹). Springer, Dordrecht.

۲۳. Yunsel, T. Y., Ersoy, A.; ۲۰۱۳; "Geological

منطقه را در فرآیند مدل‌سازی کنترل کند.

#### منابع

۱. Maleki, M.; Emery, X.; ۲۰۱۵; "Joint simulation of grade and rock type in a stratabound copper deposit", *Mathematical Geosciences*, ۴۷(۴), ۴۷۱-۴۹۵.

۲. Madani, N., Abulkhair, S.; ۲۰۲۰; "A hierarchical cosimulation algorithm integrated with an acceptance-rejection method for the geostatistical modeling of variables with inequality constraints", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, ۳۴(۱۰), ۱۵۵۹-۱۵۸۹.

۳. Emery, X., Silva, D. A.; ۲۰۰۹; "Conditional co-simulation of continuous and categorical variables for geostatistical applications", *Computers & Geosciences*, ۳۵(۶), ۱۲۳۴-۱۲۴۶.

۴. Talebi, H., Lo, J., Mueller, U.; ۲۰۱۷; "A hybrid model for joint simulation of high-dimensional continuous and categorical variables", In *Geostatistics valencia ۲۰۱۶* (pp. ۴۱۵-۴۳۰). Springer, Cham.

۵. Emery, X., Maleki, M.; ۲۰۱۹; "Geostatistics in the presence of geological boundaries: Application to mineral resources modeling", *Ore Geology Reviews*, ۱۱۴, ۱۰۳۱۲۴.

۶. Roldão, D., Ribeiro, D., Cunha, E., Noronha, R., Madsen, A., Masetti, L.; ۲۰۱۲; "Combined use of lithological and grade simulations for risk analysis in iron ore, Brazil", In *Geostatistics Oslo ۲۰۱۲* (pp. ۴۲۳-۴۳۴). Springer, Dordrecht.

۷. Jones, P., Douglas, I., Jewbali, A.; ۲۰۱۳; "Modeling combined geological and grade uncertainty: application of multiple-point simulation at the Apensu gold deposit, Ghana", *Mathematical geosciences*, ۴۵(۸), ۹۴۹-۹۶۵.

۸. Talebi, H., Sabeti, E. H., Azadi, M., Emery, X.; ۲۰۱۶; "Risk quantification with combined use of lithological and grade simulations: Application to a porphyry copper deposit", *Ore Geology Reviews*, ۷۵, ۴۲-۵۱.

۹. Mery, N., Emery, X., Cáceres, A., Ribeiro, D., Cunha, E.; ۲۰۱۷; "Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit", *Ore Geology Reviews*, ۸۸, ۳۳۶-۳۵۱.

۱۰. Paithankar, A., Chatterjee, S.; ۲۰۱۸; "Grade and tonnage uncertainty analysis of an african copper deposit using multiple-point geostatistics and sequential gaussian simulation", *Natural Resources Research*, ۲۷(۴), ۴۱۹-۴۳۶.

۱۱. Kim, H. M., Mallick, B. K., Holmes, C. C.; ۲۰۰۵; "Analyzing nonstationary spatial data using piecewise Gaussian processes", *Journal of the American Statistical Association*, ۱۰۰(۴۷۰), ۶۵۳-۶۶۸.

- bigaussian method*”, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 3(۲), ۱۵۲-۱۶۱.
۲۹. Emery, X.; ۲۰۰۷; “Simulation of geological domains using the plurigaussian model: new developments and computer programs”, Computers & geosciences, ۳۳(۹), ۱۱۸۹-۱۲۰۱.
۳۰. Ravenne, C., Galli, A., Doligez, B., Beucher, H., Eschard, R.; ۲۰۰۲; “Quantification of facies relationships via proportion curves”, In Geostatistics Rio ۲۰۰۰ (pp. ۱۹-۳۹). Springer, Dordrecht.
۳۱. Masoumi, I., Kamali, G., Asghari, O. and Emery, X.; ۲۰۲۰; “Assessing the impact of geologic contact dilution in ore/waste classification in the Gol-Gohar Iron Ore Mine, Southeastern Iran”, Minerals, 10(۴), p.۳۳۶.
۳۲. Jafari, A., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Shafaroudi, A.M. and Ren, M.; ۲۰۱۹; “Geochemistry of metamorphic rocks and mineralization in the Golgohar iron ore deposit (No. 1), Sirjan, SE Iran: Implications for paleotectonic setting and ore genesis”, Journal of Geochemical Exploration, ۲۰۵, p.۱۰۶۳۳۰.
۳۳. Mirnejad, H., Simonetti, A. and Molasalehi, F.; ۲۰۱۱; “Pb isotopic compositions of some Zn-Pb deposits and occurrences from Urumieh-Dokhtar and Sanandaj-Sirjan zones in Iran”, Ore geology reviews, ۳۹(۴), pp.۱۸۱-۱۸۷.
۳۴. Maleki, M. and Emery, X.; ۲۰۲۰; “Geostatistics in the presence of geological boundaries: Exploratory tools for contact analysis”, Ore Geology Reviews, ۱۲۰, p.۱۰۳۳۹۷.
- modeling of rock type domains in the Balya (Turkey) lead-zinc deposit using plurigaussian simulation*”, Central European Journal of Geosciences, ۵(۱), ۷۷-۸۹.
۲۴. Albertao, G. A., Grell, A. P., Badolato, D., Santos, L.; ۲۰۰۵; “3D geological modeling in a turbidite system with complex stratigraphic-structural framework-an example from Campos Basin, Brazil”, In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.
۲۵. Barbier, M., Hamon, Y., Doligez, B., Callot, J. P., Floquet, M., Daniel, J. M.; ۲۰۱۲; “Stochastic joint simulation of facies and diagenesis: A case study on early diagenesis of the Madison formation (Wyoming, USA)”, Oil & Gas Science and Technology-Revue d’IFP Energies Nouvelles, ۱۷(۱), ۱۲۳-۱۴۵.
۲۶. Galli, A., Le Loch, G., Geffroy, F., Eschard, R.; ۲۰۰۶; “An application of the truncated plurigaussian method for modeling geology”, In: Coburn, T.C., Yarus, J.M., Chambers, R.L. (eds.) Stochastic modeling and geostatistics: Principles, methods, and case studies, volume II, vol. ۵, pp. ۱۰۹-۱۲۲.
۲۷. Cherubini, C., Giasi, C. I., Musci, F. A. U. S. T. A., Pastore, N.; ۲۰۰۹; “Application of truncated plurigaussian method for the reactive transport modeling of a contaminated aquifer”, In Proc. of the ۴th IASME/WSEAS Int. Conf. on Water Resour., Hydraul. & Hydrol.(WHH’۰۹) (pp. ۱۱۹-۱۲۴).
۲۸. Cherubini, C., Giasi, C. I., Musci, F., Pastore, N.; ۲۰۰۹; “Checking simulations of a geolithological model obtained by means of nested truncated