



Imam Khomeini International University
Vol. 7, No. 2, Summer 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Determination of Potential Mineralization Areas by Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Methods in the Khoynehrud Region of East Azerbaijan

Geranian H.^{1*}

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Received: 28 Nov. 2020

Accepted: 17 Nov. 2021

Abstract: The diversity of exploration data and the cost of borehole drilling necessitate the use of a suitable integration method for the analysis of the data of the semi-detailed exploration stage. In this paper, two hybrid multi-criteria decision-making algorithms, namely CCSD-EDAS and CCSD-MARCOS, are introduced. The data of Khoynaroud exploration area, in East Azerbaijan province, has been used to investigate the performance of these algorithms. The spatial data layers used include four geochemical, two geophysical and two geological layers in an area of 1400×2100 meters. The integration results show that the map obtained from the CCSD-EDAS algorithm has samples with weights approximately close to each other and above, while in the CCSD-MARCOS algorithm, the samples have more reasonable weights. The R statistics of the permutation method also show the relative superiority of the results obtained of the CCSD-MARCOS algorithm. The integration results show four potential mineralization zones in the study area. Zones I and II have the possibility of copper-gold porphyry mineralization and Zones III and IV have the possibility of mineralization of quartz-gold veins. Zone I, with an area of 400 × 1200 meters, has been proposed as the best zone for drilling network design. Also, the use of these two hybrid methods, especially the CCSD-MARCOS hybrid multi-criteria decision-making method, for integrating the exploration data is the most important suggestion of this paper.

Keywords: CCSD algorithm, EDAS algorithm, MARCOS algorithm, Mineral potential mapping, Khoynaroud exploration area.

How to cite this article

Geranian, H. (2022). "Determination of potential mineralization areas by hybrid multi-criteria decision-making methods in the Khoynehrud region of East Azerbaijan". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(2): 25-46.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.14635.1470](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.14635.1470)

*Corresponding Author Email: h.geranian@birjandut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Integrating data, due to the use of various exploration tools, is one of the most important part of an exploration project. The diversity of the exploration data and the cost of the borehole drilling necessitate the use of a suitable integration method for the analysis of the data of the semi-detailed exploration stage [1]. Integration methods are divided into data-driven and knowledge-driven algorithms [2]. In this paper, two hybrid multi-criteria decision-making algorithms, namely CCSD-EDAS and CCSD-MARCOS, are introduced. The data of Khoynaroud exploration area, in East Azerbaijan province, has been also used to investigate the performance ability of these algorithms in integration of exploration data. The aim of this integration is to propose the drilling network area for the detailed exploration stage in the study area.

METHODS

Correlation coefficients and standard deviations (CCSD) algorithm is a multi-criteria decision-making method used to weight variables or spatial data layers. This method uses a combination of objective and subjective weighting [3]. Evaluation based on distance from average solution (EDAS) and measurement of alternatives and ranking according to the compromise solution (MARCOS) algorithms are also two multi-criteria decision-making methods used to rank the samples or object. These algorithms apply a statistically average solution and the degree of usefulness of the objects in relation to the ideal and anti-ideal solution, respectively [4]. Therefore, the results obtained from EDAS Algorithm have high and close sample weights and in MARCOS Algorithm, the samples will have more reasonable weights. Combination CCSD with EDAS and MARCOS were caused to make two hybrid multi-criteria decision-making algorithms, namely CCSD-EDAS and CCSD-MARCOS that used in this paper.

FINDINGS AND ARGUMENT

The study region is Khoynaroud exploration area with an area of 1400×2100 meters. The spatial data layers used include four geochemical layers (contour maps of Cu and Au concentration, the PC2 scores and geochemical mineralization probability index), two geophysical layers (reduced to the pole residual magnetic intensity and upward continuation from 50 meters maps), and two geological layers (rock units and fault density maps). These data layers shown in Figure 1.

In the first stage, the spatial data layers are weighted according to expert opinions and then the weights are optimized using CCSD algorithm. Table 1 shows the initial (w), and optimized (w_{jC}) weights of the layers. In the second stage, the samples are ranked based on EDAS and MARCOS algorithms. The result will be the weight ranking of each sample. Then the contour map is drawn based on these weights. Figure 2 shows these maps with continuous and classified scales. The maps were classified into two classes based on the concentration-area fractal algorithm. The integration results show that the map obtained from the CCSD-EDAS algorithm (Figures 2A and 2B) has samples with weights approximately close to each other and above, while in the CCSD-MARCOS algorithm (Figures 2C and 2D), the samples have more reasonable weights. The R statistics of the permutation method are 67.6 and 69.2 percent for CCSD-EDAS and CCSD-MARCOS algorithms, respectively. It show the relative superiority of the results obtained of the CCSD-MARCOS algorithm. The integration results also show four potential mineralization zones in the study area (Figures 2B and 2D). Zones I and II have the possibility of copper-gold porphyry mineralization and Zones III and IV have the possibility of mineralization of quartz-gold veins.

Zone I, with an area of 400×1200 meters, has been proposed as the best zone for drilling network design. In this zone, 6 exploration profiles with distances of 200 meters and 26 boreholes with distances of 100 meters have been designed (Figure 3). If the drilling results are appropriate, in the second step, the distances of the profiles and the distance of the boreholes can be reduced by half to one third.

The use of two hybrid multi-criteria decision-making algorithms on semi-detailed exploration stage data in Khoynaroud area showed following subjects:

1. The weight of the sample in the CCSD-EDAS algorithm is almost close to each other and as a result, most of the exploration area is composed of high weight samples; while in the CCSD-MARCOS algorithm, the samples have more reasonable weights.

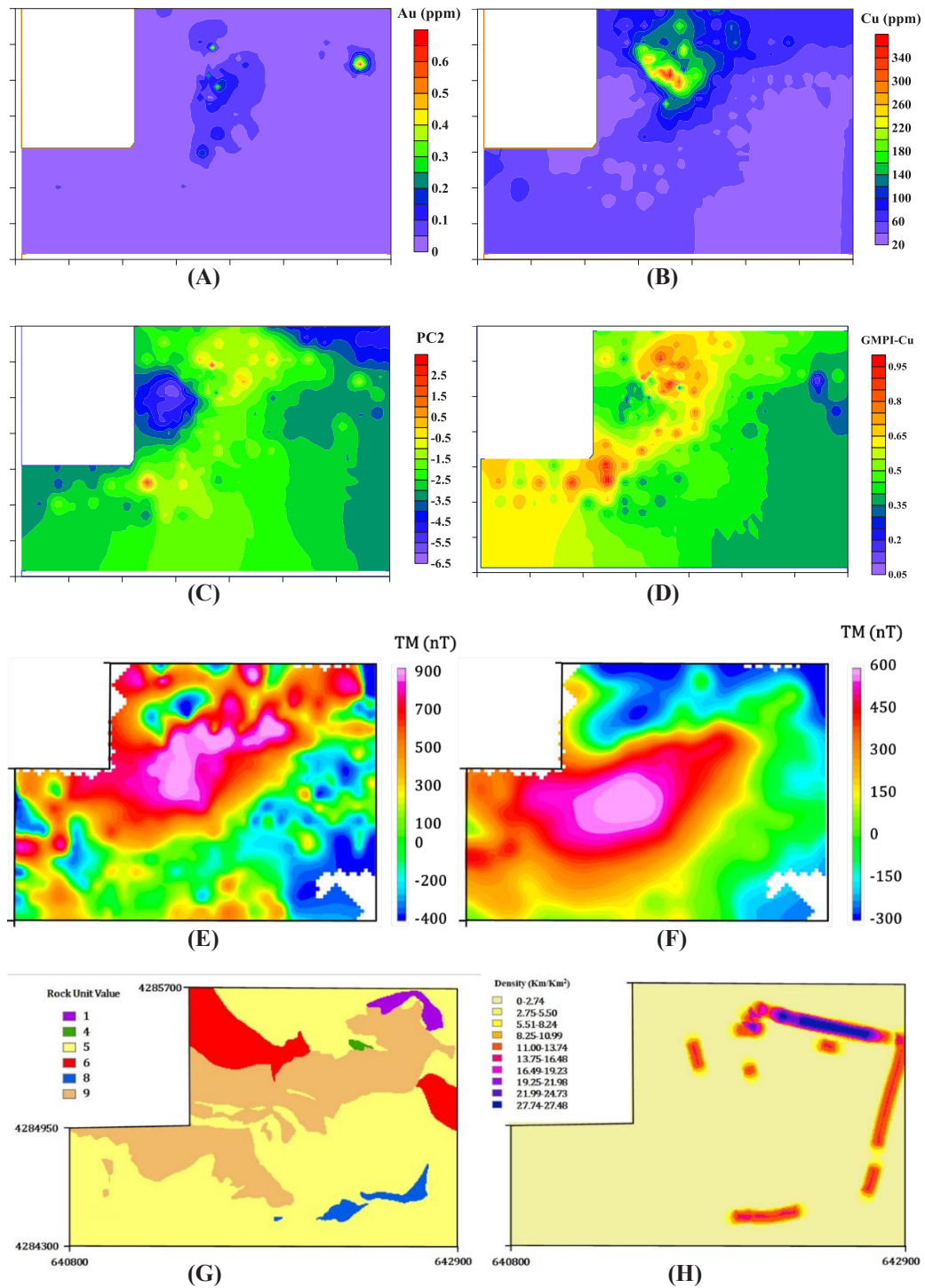


Figure 1. Spatial data layers in the study area, **A:** contour maps of Au concentration, **B:** contour maps of Cu concentration, **C:** contour maps of the PC2 scores, **D:** geochemical mineralization probability index map, **E:** reduced to the pole residual magnetic intensity map, **F:** upward continuation from 50 meters map, **G:** rock units map and **H:** fault density map

2. The results of the integration show four zones have potential to mineralization in the study area. Zones I and II have the possibility of copper-gold porphyry mineralization and zones III and IV have the possibility of mineralization of quartz-gold veins.

3. Due to the appropriate adaptation of the proposed zones to the geological conditions of the study area,

Table 1. Weight of each spatial data layer

Criterion	Spatial data layer	w	w_{jC}
Geochemistry	Au concentration	0.07	0.1153
	Cu concentration	0.18	0.1432
	PC2 scores	0.12	0.1124
	geochemical mineralization probability index	0.15	0.1188
Geophysics	Reduced to the pole	0.13	0.1215
	Upward continuation from 50 meters	0.10	0.1233
Geology	Rock unit	0.19	0.1343
	fault density	0.06	0.1312

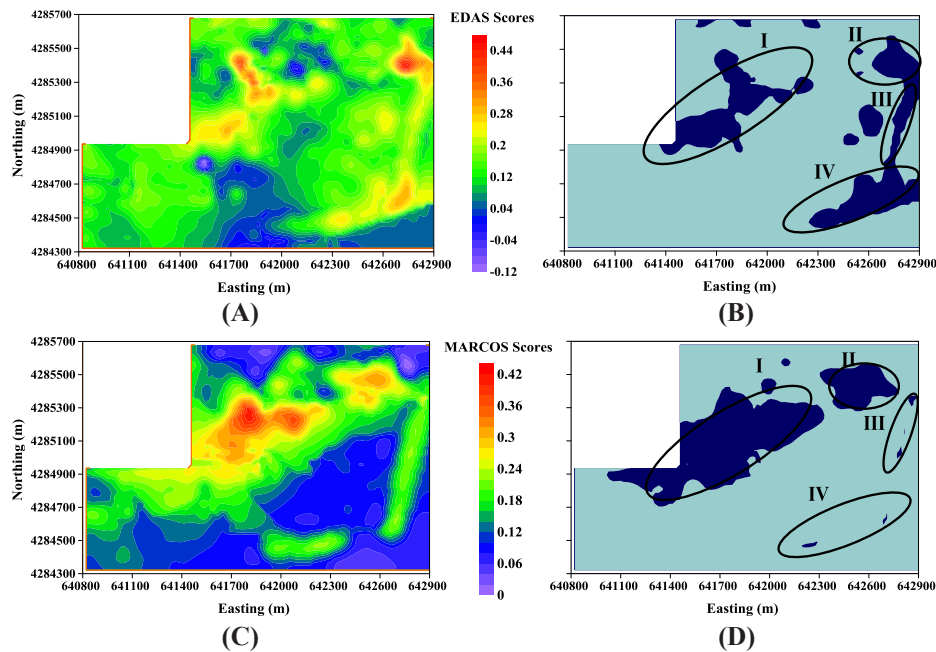


Figure 2. Maps of integration of the spatial data layers in Khoynaroud area by **A:** continuous scale and **B:** classified CCSD-EDAS algorithm, **C:** continuous scale and **D:** classified CCSD-MARCOS algorithm

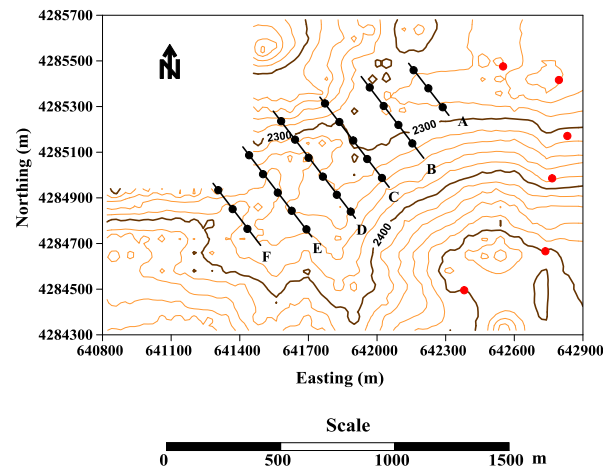


Figure 3. Location of the proposed drilling network on the topographic map of Khoynaroud area, 6 profiles (A, B, C, D, E and F) with 26 boreholes (black dots) and 6 experimental boreholes (red dots)

the use of these two hybrid algorithms, especially the CCSD-MARCOS hybrid multi-criteria decision-making method for integrating exploration data is the most important suggestion of this paper.

REFERENCES

- [1] Gezelbash, R., and Maghsoudi, A. (2018). “*A hybrid AHP-VIKOR approach for prospectivity modeling of porphyry Cu deposits in the Varzaghan District, NW Iran*”. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11): 275.
- [2] Khalifani, F. M., Bahroudi, A., Barak, S., and Abedi, M. (2019). “*An integrated Fuzzy AHP-VIKOR method for gold potential mapping in Saqez prospecting zone, Iran*”. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 3(1): 21-33.
- [3] Dahooie, J. H., Zavadskas, E. K., Firoozfar, H. R., Vanaki, A. S., Mohammadi, N., and Brauers, W. K. M. (2019). “*An improved fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria decision making based on objective weighting method (CCSD) and its application to technological forecasting method selection*”. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 79: 114-128.
- [4] Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., and Chatterjee, P. (2020). “*Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS)*”. *Computers & Industrial Engineering*, 140: 106231.



تعیین محدوده‌های مستعد کانی‌سازی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی در منطقه خوینه‌رود آذربایجان شرقی

حمید گرانیان^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸

چکیده

متنوع بودن لایه‌های اکتشافی و هزینه‌بر بودن انجام حفاری‌های گمانه‌ای، لزوم استفاده از یک روش تلفیق مناسب برای تحلیل داده‌های فاز اکتشافی نیمه‌تفصیلی را به همراه دارد. در این مقاله دو الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی CCSD-MARCOS و CCSD-EDAS معرفی و برای بررسی عملکرد این دو الگوریتم از داده‌های محدوده اکتشافی خوینه‌رود در استان آذربایجان شرقی استفاده شده است. لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده شامل ۴ لایه ژئوشیمیایی (نقشه‌های پراکندگی عیار مس و طلا، امتیازهای مولفه اصلی دوم و شاخص احتمال کانی‌زایی ژئوشیمیایی)، ۲ لایه ژئوفیزیکی (نقشه‌های بازماند مغناطیسی برگردان به قطب و ادامه فراسوی ۵۰ متری) و ۲ لایه زمین‌شناسی (نقشه‌های واحدهای سنگی و چگالی گسل‌ها) در محدوده‌ای به ابعاد ۱۴۰۰×۲۱۰۰ متری است. نتایج تلفیق نشان می‌دهد که نقشه به دست آمده از الگوریتم CCSD-EDAS نمونه‌هایی با وزن‌های تقریباً نزدیک به هم و بالا دارد؛ در حالی که در الگوریتم CCSD-MARCOS، نمونه‌ها وزن‌های منطقی‌تری دارند. همچنین آماره روش جایگشت نشان‌دهنده برتری نسبی نتایج الگوریتم CCSD-MARCOS نسبت به الگوریتم دیگر است. نتایج تلفیق چهار محدوده مستعد کانی‌سازی را در منطقه نشان می‌دهد. دو محدوده دارای احتمال کانی‌سازی پورفیری مس-طلا و دو محدوده دیگر دارای احتمال کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز-طلا دار هستند. محدوده اول با وسعت ۱۲۰۰×۴۰۰ متر به عنوان بهترین محدوده برای طراحی شبکه حفاری پیشنهاد شده است. در این محدوده، ۶ پروفیل اکتشافی با فواصل ۲۰۰ متری و ۲۶ گمانه با فواصل ۱۰۰ متری از هم طراحی شده است. همچنین استفاده از این دو روش تلفیق به ویژه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی CCSD-MARCOS برای تلفیق داده‌های اکتشافی مهم‌ترین پیشنهاد این مقاله است.

کلمات کلیدی

الگوریتم CCSD، الگوریتم EDAS، الگوریتم MARCOS، پتانسیل‌یابی معدنی، منطقه اکتشافی خوینه‌رود.

استناد به این مقاله

گرانیان، ح؛ ۱۴۰۱؛ "تعیین محدوده‌های مستعد کانی‌سازی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی در منطقه خوینه‌رود آذربایجان شرقی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۴۶-۲۵.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.14635.1470



۱- مقدمه

افزایش تعداد معیارها و توانایی محدود در تحلیل همبستگی بین معیارها از مهم‌ترین معایب روش‌های ذهنی‌اند [۲۳، ۲۲]. همچنین خطاهای موجود در ماتریس تصمیم‌گیری، ایجاد اریب در وزن‌دهی‌ها و عدم استفاده از وزن‌دهی اولیه توسط متخصصین نیز از معایب روش‌های وزن‌دهی عینی است [۲۴، ۲۲]. به همین دلیل استفاده از روش‌های ترکیبی برای برطرف کردن معایب یاد شده و استفاده از مزایایی هر دو روش وزن‌دهی پیشنهاد می‌شود.

از آنجا که در اکثر تحقیقات انجام گرفته برای به کار بردن روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تلفیق داده‌های اکتشافی، از روش‌های وزن‌دهی عینی و یا ذهنی استفاده شده است و داده‌های مورد استفاده در مقیاس ناحیه‌ای بوده‌اند؛ به همین دلیل، هدف این مقاله به کار بردن روشی ترکیبی برای تلفیق داده‌های اکتشافی در مقیاس محلی انتخاب شده است. برای این منظور ضمن معرفی دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی جدید، از داده‌های اکتشافی منطقه خوینه‌رود در استان آذربایجان شرقی نیز استفاده خواهد شد. در منطقه مورد مطالعه، عملیات اکتشافی در سه مرحله (فاز اکتشافی مقدماتی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ و فاز اکتشافی نیمه‌تفصیلی با دو مقیاس ۱:۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰) انجام گرفته است که در این تحقیق داده‌های اکتشافی فاز نیمه‌تفصیلی آن به کار خواهد رفت.

۲- معرفی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به دو دسته مدل‌های جبرانی و غیرجبرانی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های غیر جبرانی مبادله در بین معیارها مجاز نیست. در حالی که در مدل‌های جبرانی اجازه مبادله بین معیارها داده می‌شود؛ یعنی تغییرات مثلاً کاهشی در یک معیار می‌تواند به وسیله تغییرات افزایشی در معیارهای دیگر جبران شود [۲۵]. با توجه به ماهیت داده‌های اکتشافی، برای تلفیق آنها از مدل‌های جبرانی استفاده می‌شود. در ادامه مدل‌های به کار رفته شرح داده می‌شود.

۲-۱- الگوریتم CCSD

روش ضربی همبستگی و انحراف معیار^۳ (CCSD) که توسط وانگ و لو ارایه شده است، یک روش وزن‌دهی ترکیبی برای معیارها است [۲۶]. اگر مجموعه داده‌ها (D) شامل n نمونه (گزینه) باشد که برای هر نمونه m متغیر (ویژگی یا

تفکیک عملیات اکتشافی در یک منطقه به فازهای پی‌جویی، شناسایی، اکتشاف مقدماتی و اکتشاف تکمیلی از اصول پذیرفته شده در پروژه‌های معدنی است. برای محدود کردن منطقه عملیاتی فاز بعدی از تلفیق داده‌های اکتشافی (داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی، دورسنجی و حفاری) استفاده می‌شود [۲، ۱]. تلفیق داده‌ها یا لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی به دو صورت داده-محور و دانش-محور انجام می‌گیرد. مدل‌سازی پتانسیل‌های معدنی بر اساس روش‌های دانش‌محور برای اکتشاف مناطقی که در آنها کارهای اکتشافی کمتری انجام شده است مناسب‌تر است؛ در حالی که روش‌های داده‌محور برای نواحی اکتشافی مناسب‌اند که قبلاً در آنها کارهای اکتشافی فراوانی انجام شده است [۳، ۴]. روش‌های شاخص همپوشانی، منطق فازی، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه‌حل ایده‌آل از دسته روش‌های دانش-محور و روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی، اوزان شاهد، رگرسیون لجستیک، ماشین بردار پشتیبان و طبقه‌بندی بیزین از دسته روش‌های داده-محور، مهم‌ترین الگوریتم‌های تلفیق داده اکتشافی مورد استفاده تاکنون بوده‌اند [۱۴-۵].

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که بیشتر برای انتخاب بهترین گزینه در مباحث اقتصادی، کشاورزی، مهندسی و مدیریتی استفاده شده‌اند را می‌توان به عنوان یک روش تلفیق برای تبدیل داده‌های اکتشافی به یک لایه یا نقشه به کار برد [۱۵]. روش‌هایی از قبیل VIKOR, AHP, SAW, PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS و MOORA از مهم‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شوند که در تلفیق داده‌های اکتشافی از آنها استفاده شده است [۲۱-۱۶]. در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره یاد شده، وزن‌های اختصاص داده شده به هر معیار (یا متغیر و یا لایه‌های اطلاعات اکتشافی) می‌تواند به صورت ذهنی (کارشناسانه)^۱ و یا عینی (مبتنی بر منطق علمی)^۲ به دست آید. روش‌های وزن‌دهی ذهنی (یا دانش-محور) بر پایه نظر متخصص انجام می‌گیرد، در حالی که در روش‌های عینی (یا داده-محور) تاکید بر ارزیابی داده‌ها به وسیله روش‌های ریاضی است. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. عدم اطمینان بالقوه در قضاوت متخصصین به علت کم‌تجربگی بعضی از متخصصین، پیچیدگی در تصمیم‌گیری با

(۸)

$$\text{Minimize } J = \sum_{j=1}^m \left(w_{jc} - \frac{\sigma_j \sqrt{1-R_j}}{\sum_{k=1}^m \sigma_k \sqrt{1-R_k}} \right)^2$$

$$\sum_{j=1}^m w_{jc} = 1 \quad \text{به شرطی که:}$$

در رابطه ۸ پارامتر σ_j انحراف معیار متغیر J است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{ij} - \bar{h}_j)^2} \quad (۹)$$

استفاده از نظر افراد متخصص برای وزن‌دهی اولیه و به کارگیری پارامترهای آماری داده‌ها (یعنی انحراف معیار که نشان دهنده پراکندگی حول میانگین است و ضریب همبستگی بین متغیرها) برای وزن‌دهی نهایی ممکن است تاثیر خطاها را کاهش داده و باعث تخمین نارایی شود [۲۶، ۲۴].

۲-۲- الگوریتم EDAS

روش ارزیابی بر اساس فاصله از راه‌حل میانگین^۴ (EDAS) اولین بار توسط کشاورز قربانی و همکارانش ارائه شده است [۲۸]. این روش یک الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره جبرانی است که بیشتر در انتخاب بهترین گزینه‌ها استفاده می‌شود [۳۰، ۲۹]. مراحل محاسبه کمیت نمونه‌ها در این الگوریتم به شرح زیر است [۳۱-۳۵، ۲۹، ۲۸]:

۱- راه‌حل میانگین: در اولین مرحله میانگین هر متغیر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} ; j = 1, 2, \dots, m \quad (۱۰)$$

۲- فاصله از راه‌حل میانگین: ماتریس فاصله‌های مثبت و منفی از راه‌حل میانگین به ترتیب برای متغیرهای با تاثیر مثبت از رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ و برای متغیرها با تاثیر منفی از رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (۱۱)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - x_j))}{AV_j} \quad (۱۲)$$

معیار) نیز اندازه‌گیری شده باشد، این مجموعه داده چند بعدی به صورت زیر می‌تواند تعریف شود:

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

مراحل محاسبه وزن معیارها با الگوریتم CCSD عبارتست از [۲۷، ۲۴، ۲۶]:

۱- استاندارد کردن ماتریس داده‌ها: ماتریس‌های داده‌ها برای متغیرها با تاثیر مثبت توسط رابطه ۲ و برای متغیرها با تاثیر منفی به وسیله رابطه ۳ استاندارد می‌شوند:

$$h_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (۲)$$

$$h_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (۳)$$

۲- محاسبه ماتریس تاثیر هر متغیر: با حذف هر متغیر به وسیله رابطه زیر تاثیر آن بر روی ماتریس تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود:

$$d_{ij} = \sum_{k=1, k \neq j}^m h_{ik} w_k \quad (۴)$$

که در آن:

w_k : وزن متغیر k ام است که در این مقاله، توسط افراد متخصص تعیین می‌شود.

۳- محاسبه ضرایب همبستگی: بردار سطری ضرایب همبستگی بین هر متغیر و ماتریس تاثیر آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{ij} - \bar{h}_j)(d_{ij} - \bar{d}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{ij} - \bar{h}_j)^2 \sum_{i=1}^n (d_{ij} - \bar{d}_j)^2}} \quad (۵)$$

$$\bar{h}_j = \frac{\sum_{i=1}^n h_{ij}}{n} \quad (۶)$$

$$\bar{d}_j = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ij}}{n} \quad (۷)$$

۴- محاسبه وزن هر متغیر: برای محاسبه وزن هر متغیر می‌توان مدل بهینه‌سازی غیرخطی زیر را حل کرد:

وزن متغیرها، کم کردن احتمال انحراف از بهترین راه حل و
ارایه یک راه حل متوسط از مهم ترین مزایای الگوریتم EDAS
است [۳۰، ۲۸].

۳-۲- الگوریتم MARCOS

الگوریتم اندازه گیری گزینه ها و رتبه بندی با توجه به روش
راه حل سازش^۵ (MARCOS) اولین بار توسط استویچ و
همکارانش ارایه شده است [۴۰]. مراحل رتبه بندی نمونه ها یا
محاسبه کمیت هر نمونه به وسیله این الگوریتم تصمیم گیری
جبرانی به شرح زیر است [۴۱، ۴۰، ۲۴]:

۱- توسعه ماتریس داده ها: با توجه به معیارهای ایده آل
و غیرایده آل، ماتریس داده به صورت زیر بسط داده می شود:

$$u = \begin{matrix} AAI \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \\ AI \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{aai1} & x_{aai2} & \dots & x_{aaim} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \\ x_{ai1} & x_{ai2} & \dots & x_{aim} \end{bmatrix} \quad (20)$$

که در آن:

راه حل ایده آل (AI) برابر بهترین معیار و راه حل غیر ایده آل
(AAI) برابر بدترین معیار است که از رابطه های زیر به دست
می آید:

$$AI = \max(x_{ij}) ; AAI = \min(x_{ij}) \quad (21)$$

$$AI = \min(x_{ij}) ; AAI = \max(x_{ij}) \quad (22)$$

رابطه ۲۱ برای متغیرها با تاثیر مثبت و رابطه ۲۲ برای
متغیرها با تاثیر منفی است.

۲- استاندارد کردن: ماتریس بسط داده شد به وسیله
رابطه های زیر به ترتیب برای متغیرها با تاثیر مثبت و منفی
استاندارد می شوند:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{aij}} \quad (23)$$

$$y_{ij} = \frac{x_{aij}}{x_{ij}} \quad (24)$$

در نهایت ماتریس استاندارد شده $n+2 \times m$ بعدی خواهد
بود.

۳- محاسبه ماتریس وزن داده شده: ماتریس وزن دار از

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_{ij} - x_j))}{AV_j} \quad (13)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (14)$$

که در آن:

PDA_{ij} : فاصله مثبت از راه حل میانگین برای متغیر j ام از
نمونه i ام

NDA_{ij} : فاصله منفی از راه حل میانگین برای متغیر j ام از
نمونه i ام است.

۳- فاصله های وزن دار: با توجه به وزن هر متغیر (w_{jc}) که
به وسیله الگوریتم CCSD تعیین شده است، بردار ستونی
فاصله های مثبت و منفی وزن دار از راه حل میانگین برای هر
نمونه به ترتیب از رابطه های زیر محاسبه می شود:

$$SP_i = \sum_{j=1}^m PAD_{ij} w_{jc} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^m NAD_{ij} w_{jc} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

۴- فاصله های وزن دار استاندارد شده: برای یکسان کردن
دامنه تغییرات دو فاصله، با تقسیم فاصله ها بر ماکزیمم هر
کدام، بردار ستونی مقادیر فاصله های وزن دار هر نمونه به
صورت زیر استاندارد می شوند:

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$NSN_i = \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

۵- نمره ارزیابی: نمره یا امتیاز هر نمونه یا گزینه از رابطه
زیر به دست می آید:

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i) ; i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

مقدار به دست آمده از رابطه ۱۹ کمیت نسبت داده شده
به هر نمونه خواهد بود. تاکنون چندین مدل گسترش داده
شده برای این الگوریتم ارایه شده است که می توان به مدل های
فازی [۳۶-۳۸] و مدل اعداد خاکستری [۳۹] اشاره کرد.
پایداری نتایج به دست آمده از این الگوریتم نسبت به تغییرات

تعریف نقاط مرجع (مقادیر ایده‌آل و غیرایده‌آل)؛ تعیین رابطه بین گزینه‌ها و ارزش‌های ایده‌آل/غیرایده‌آل و تعریف درجه سودمندی گزینه‌ها در رابطه با راه‌حل ایده‌آل و غیرایده‌آل باعث می‌شود که نتایج به دست آمده از روش MARCOS به دلیل آمیختگی نتایج رویکرد نسبتی و رویکرد مرتب‌سازی نقطه مرجع، منطقی‌تر باشد [۴۰].

۳- معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده اکتشافی- معدنی خوپنه‌رود در استان آذربایجان شرقی و در ۲۵ کیلومتری شمال شهر ورزقان واقع شده است. این منطقه از نظر موقعیت طبیعی در بخش میانی رشته‌کوه‌های قره‌داغ قرار گرفته که از نظر ژئومورفولوژی از دو بخش کوهستانی و کوهپایه‌ای تشکیل شده است. بر اساس تقسیم‌بندی‌های پهنه‌های رسوبی- ساختمانی ایران، این منطقه در کمان ماگمایی ارومیه- دختر و در ایالت متالورژی ارسباران واقع شده است [۴۲]. فرآیندهای تکتونیکی دونین که عامل اصلی تشکیل گسل تبریز بوده و حرکات مهم تریاس بالایی که باعث شکافته شدن پلاتفرم آذربایجان و تشکیل گسل زرينه‌رود شده، مهم‌ترین پدیده‌های تشکیل‌دهنده شرایط زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه‌اند [۴۲].

سنگ‌های بازالتی پالتوسن، قدیمی‌ترین واحد سنگی است که بیشتر در بخش شمال‌شرقی منطقه و به رنگ خاکستری تیره تا روشن مشاهده می‌شوند (شکل ۱). وجود کانی‌های کلریت، اپیدوت و پیریت‌های اولیه به همراه آلتراسیون پروپلیتیک ضعیف از مشخصه‌های این واحد سنگی است. توده‌های کوارتزموزنونیتی پورفیری با سن اولیگوسن مهم‌ترین واحد سنگی حاوی کانی‌زایی در منطقه است که به رنگ قرمز در زون اکسیدی تا خاکستری در زون سولفیدی قابل مشاهده است. این توده‌های نفوذی، بافت استوک‌ورکی و کاملاً خرد شده به همراه آلتراسیون‌های کوارتز سرپسیت متوسط تا شدید، فیلیک متوسط و آرژیلیک و پروپلیتیک ضعیف دارند. کانی‌زایی در این منطقه، از نوع مس- طلای پورفیری و رگه‌های اپی‌ترمال کوارتز- طلا دار است. مهم‌ترین کانی‌های مرتبط با کانی‌زایی نیز شامل پیریت، کوپریت، مالاکیت، کالکوپریت، گالن، اسفالریت، سروزیت، آرسنوپریت، استیبینیت، مولیبدنیت، کانی‌های جیوه و اکسیدهای آهن است. همچنین طلا به صورت دانه‌های آزاد و درون کانی‌های پیریت و آرسنوپریت قابل مشاهده است [۴۳، ۴۴]. واحد سنگی دیوریت پورفیری اولیگوسن- میوسن

حاصلضرب ماتریس استاندارد شده در ماتریس وزن متغیرها (به دست آمده از الگوریتم CCSD) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c_{ij} = y_{ij} \times w_{jc} \quad (25)$$

۴- درجه سودمندی: درجه سودمندی هر نمونه مربوط به راه‌حل ایده‌آل و غیرایده‌آل به ترتیب به وسیله رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_i^+ = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad (26)$$

$$Z_i^- = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad (27)$$

که

$$S_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} \quad (28)$$

۵- تابع سودمندی: تابع سودمندی هر نمونه از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$f(Z_i) = \frac{Z_i^+ + Z_i^-}{1 + \frac{1 - f(Z_i^+)}{f(Z_i^+)} + \frac{1 - f(Z_i^-)}{f(Z_i^-)}} \quad (29)$$

که در آن:

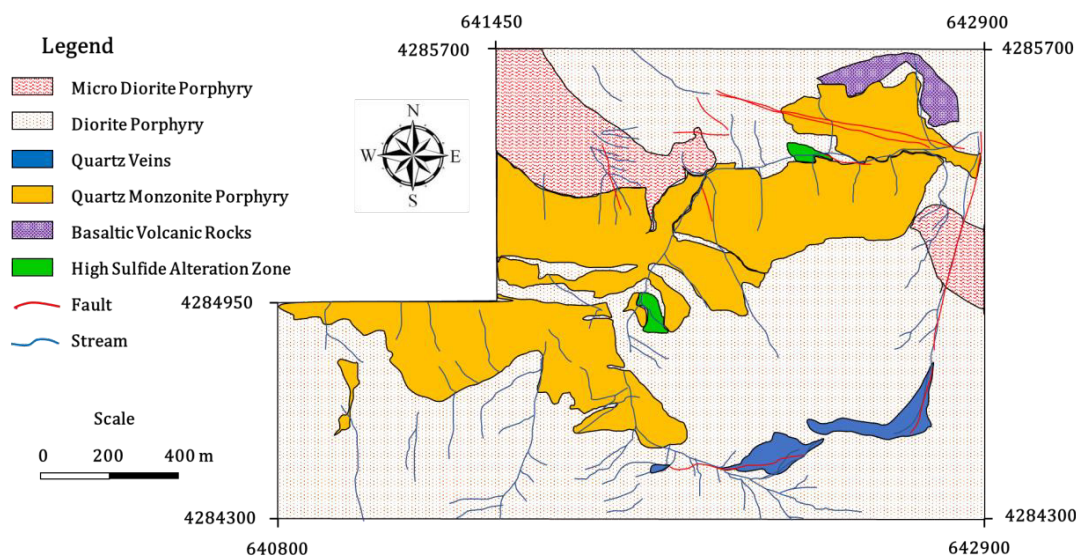
تابع $f(Z_i^+)$ سودمندی مربوط به راه‌حل ایده‌آل و $f(Z_i^-)$ تابع سودمندی مربوط به راه‌حل غیر ایده‌آل است و به ترتیب از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$f(Z_i^+) = \frac{Z_i^-}{Z_i^+ + Z_i^-} \quad (30)$$

$$f(Z_i^-) = \frac{Z_i^+}{Z_i^+ + Z_i^-} \quad (31)$$

۶- رتبه‌بندی: نمونه‌ها بر اساس تابع سودمندی به صورت نزولی رتبه‌بندی می‌شوند. هر نمونه‌ای که تابع سودمندی بالاتری داشته باشد، در مسایل تصمیم‌گیری مناسب‌تر و در تلفیق داده‌های اکتشافی، احتمال ارتباط بالاتر با کانی‌سازی در منطقه خواهد داشت.

انعطاف‌پذیری در توانایی پردازش بدون توجه به مقیاس استفاده شده، مناسب بودن برای داده‌ها با متغیرهای زیاد، سادگی در اجرای الگوریتم و قدرتمندی و مقاوم بودن نتایج الگوریتم از مزایای این روش محسوب می‌شود. همچنین



شکل ۱: نقشه ساده شده زمین‌شناسی محدوده کانی‌زایی خوینه‌رود (اقتباس از مرجع [۴۳]).

CHEME کانادا انجام شده است). برای بررسی دقت و صحت نمونه‌برداری و تجزیه نیز ۴۳ نمونه‌ی تکراری در نظر گرفته شده است. نتایج داده‌ها نشان می‌دهد که مقدار انحراف معیار نسبی (RSD) به روش تامپسون و هوارث برای کلیه عناصر کمتر از ۱۰ درصد است.

برای انتخاب عناصر مرتبط با کانی‌سازی در منطقه از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی استفاده شده است. شکل ۲ دندروگرام خوشه‌بندی عناصر به روش اتصال وارد را نشان می‌دهد (عناصر دارای سنسورد بالا حذف شده‌اند). مطابق شکل عناصر خوشه اول (یعنی عناصر Zn, Pb, Cu, Ag, Au, Sr و Ba) مرتبط با زون داخلی و میانی کانی‌سازی پورفیری و هیدروترمال، عناصر خوشه دوم (یعنی عناصر Cr, Mn, Co, Ni, V, Ti, S و P) مرتبط با زون خارجی کانی‌سازی و عناصر خوشه سوم (یعنی عناصر Na و K, Mg, Fe, Ca, Al) مرتبط با لیتولوژی منطقه مورد مطالعه‌اند [۴۶، ۴۷، ۵۲]. بنابراین عناصر خوشه اول را می‌توان به عنوان لایه‌های اطلاعاتی جهت تلفیق داده‌ها در مرحله بعدی در نظر گرفت.

برای کاهش لایه‌های اطلاعاتی داده‌های ژئوشیمیایی، روش تحلیل مولفه‌های اصلی نیز به کار رفته است. جدول ۱ مقادیر ویژه و بردارهای ویژه‌ی، ۵ مولفه اصلی اول را نشان می‌دهد که ۷۷ درصد تغییرپذیری را توجیه می‌کنند و مقادیر ویژه بزرگتر از واحد دارند. کلیه عناصر مرتبط با لیتولوژی خود را در مولفه اول نشان می‌دهند، بنابراین این مولفه را می‌توان به واحدهای

به شکل یک توده بزرگ در منطقه دیده می‌شود که توده‌های کوارتز مونزونیت پورفیری را احاطه کرده است. آلتراسیون غالب در این واحد سنگی، پروپلیتیک ضعیف و آرزلیک ضعیف است. از نظر ماکروسکوپی نیز این سنگ‌ها به رنگ سبز روشن-متوسط و قهوه‌ای روشن-متوسط هستند. در داخل این توده دیوریتی، رگه و رگچه‌های سیلیسی قابل مشاهده است (به ویژه در بخش جنوب تا جنوب‌شرقی؛ شکل ۱) که در بعضی بخش‌ها، کانی‌زایی طلا نیز دارد. ضخامت این رگه‌ها به ۳ تا ۱۵ متر می‌رسد. واحد سنگی میکرودیوریت پورفیری میوسن جوان‌ترین واحد شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه است که در قسمت‌های شرقی و شمال شرقی منطقه و به صورت توده‌ای رخمون دارد. رنگ‌های خاکستری روشن و سبز روشن تا قهوه‌ای، کانی‌زایی پیریت و آلتراسیون پروپلیتیک ضعیف تا متوسط از مشخصات این واحد سنگی است [۴۳، ۴۵].

۴- داده‌های اکتشافی منطقه مورد مطالعه

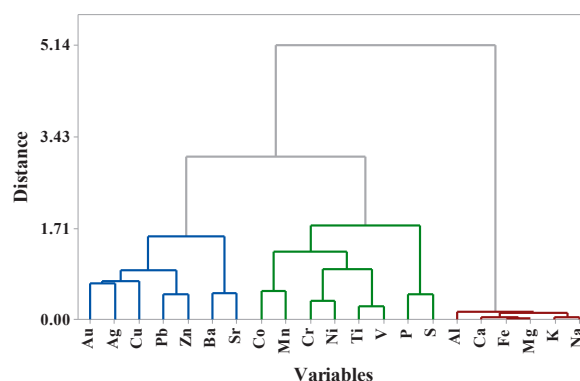
از منطقه اکتشافی- معدنی خوینه‌رود، در دو مرحله ۳۰۴ نمونه ژئوشیمیایی در فاز اکتشافی نیمه‌تفصیلی برداشت شده است. نمونه‌برداری از محیط خاکی انجام گرفته است و جزو ۸۰- مش نمونه‌ها (به دلیل تمرکز فلزات در این بخش خاک) برای تجزیه شیمیایی ۲۸ عنصر به روش ICP و طلا به روش Fire Assay انتخاب شده است (نمونه‌برداری توسط مهندسین شرکت اسپیر و تجزیه شیمیایی در آزمایشگاه ALS

بنابراین با توجه به نوع کانی‌سازی در منطقه (مس- طلا) پورفیری و رگه‌های اپی‌ترمال کوارتز- طلا دار، نقشه‌های کنترولی طلا، مس و امتیازهای مولفه دوم را می‌توان به عنوان سه لایه اطلاعاتی برای تلفیق داده‌های اکتشافی استفاده کرد. شکل ۳ پراکندگی مقادیر این لایه‌ها را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳-الف، این منطقه دو آنومالی طلا یکی در بخش شمال شرقی و دیگری در بخش میانی تا شمالی دارد. همچنین آنومالی مس در بخش میانی تا شمالی منطقه قابل مشاهده است (شکل ۳-ب). آنومالی عناصر زون داخلی و میانی کانی‌سازی، ضمن همپوشانی با آنومالی‌های طلا و مس، از آنها بزرگتر بوده و از شمال تا جنوب منطقه با راستای تقریباً شمال شرقی- جنوب غربی گسترش دارد (شکل ۳-ج).

همچنین، مطابق شکل ۳-د از نقشه شاخص احتمال کانی‌زایی ژئوشیمیایی برای کاهش عدم قطعیت لایه‌های ژئوشیمیایی استفاده شده است (برای اطلاع از نحوی محاسبه این شاخص و تهیه این لایه اطلاعاتی می‌توان به مراجع ۵۳ و ۵۴ مراجعه کرد).

ارتباط کانی‌های آهن‌دار با آلتراسیون‌های پتاسیک و پروپلیتیک و وجود این کانی‌ها در توده‌های اصلی تشکیل دهنده کانسارهای پورفیری باعث استفاده از روش مغناطیس‌سنجی به عنوان یک ابزار اکتشاف ژئوفیزیکی در منطقه مورد مطالعه شده است [۴۶، ۱۸]. کانی‌های مگنتیت در آلتراسیون پتاسیک و اکسیدهای آهن (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) در آلتراسیون پروپلیتیک از جمله کانی‌های آهن‌داری‌اند که در منطقه مشاهده شده‌اند [۴۵، ۴۳]. برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی به وسیله یک دستگاه مگنتومتر پروتون GEM با دقت ۱٫۰ نانوتسلا و بر روی یک شبکه ۷۰×۷۰ متری انجام گرفته است (برداشت داده‌ها توسط مهندسین شرکت اسپیر انجام شده است). تعداد نقطه‌های برداشت شده ۴۷۳ عدد است که بر روی ۲۰ پروفیل قرار دارند. شدت تغییرات میدان کل مغناطیسی^۶ (TMI) بر اساس اطلاعات برداشت شده پس از تصحیح روزانه از ۴۸۲۰۰ نانو تسلا تا ۴۹۲۰۰ نانو تسلا و نشان‌دهنده تغییرات ۱۰۰۰ نانوتسلا است. این میزان تغییرات حاکی از وجود آنومالی‌های مغناطیسی با شدت میدان مغناطیسی بالا در محدوده مطالعاتی است [۴۳]. در بخش مرکزی منطقه، آنومالی وسیعی به صورت دوقطبی با ابعاد تقریبی ۳۵۰×۹۰۰ متر با راستای شمال شرق- جنوب غرب مشاهده می‌شود (شکل ۴). از داده‌های TMI دو لایه اطلاعاتی زیر تهیه شده است [۴۸، ۴۳]:

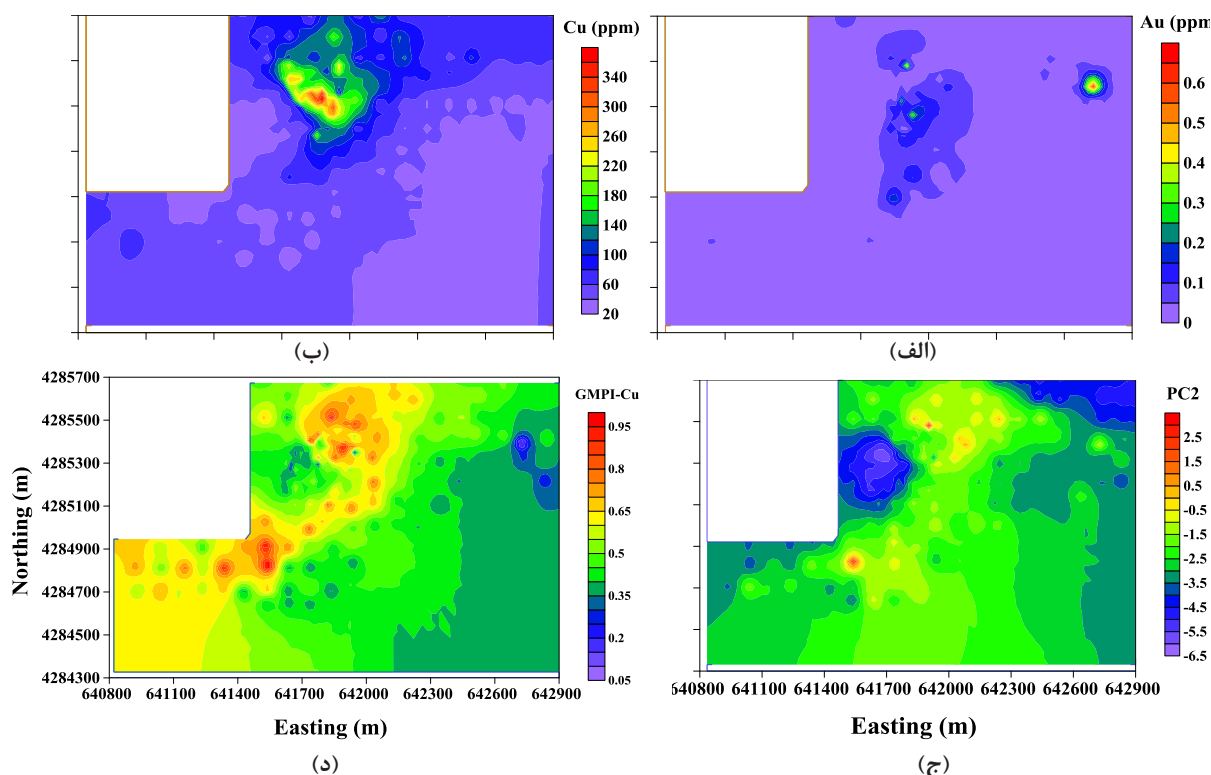
سنگی منطقه نسبت داد. بیشتر عناصر مرتبط با زون داخلی و میانی کانی‌سازی در مولفه اصلی دوم، بالاترین بردارهای ویژه را دارند. در حالی که عناصر مرتبط با زون خارجی کانی‌سازی خود را در مولفه‌های سوم و چهارم نشان می‌دهند.



شکل ۲: دندروگرام خوشه‌بندی متغیرها به روش اتصال Ward

جدول ۱: مقادیر ویژه و بردارهای ویژه پنج مولفه اصلی اول

متغیر	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Au	۰٫۰۸۴	۰٫۲۷۴	۰٫۰۸۳	۰٫۱۳۳	۰٫۱۷۰
Ag	۰٫۱۷۹	۰٫۱۶۷	۰٫۲۴۹	۰٫۱۷۶	-۰٫۱۲۷
Al	۰٫۳۱۹	-۰٫۰۷۷	-۰٫۰۰۳	۰٫۰۶۳	۰٫۱۲۱
Ba	-۰٫۰۲۹	۰٫۳۷۸	-۰٫۲۹۲	۰٫۱۴۴	۰٫۳۳۷
Ca	۰٫۳۲۷	-۰٫۱۵۷	-۰٫۰۵۱	۰٫۰۴۲	۰٫۱۴۶
Co	-۰٫۰۵۱	-۰٫۲۰۴	۰٫۴۰۲	۰٫۲۰۳	۰٫۳۹۳
Cr	-۰٫۲۴۴	-۰٫۰۹۵	-۰٫۲۲۷	۰٫۲۳۷	-۰٫۰۷۷
Cu	۰٫۱۹۴	۰٫۲۱۹	۰٫۱۶۴	-۰٫۱۷۳	۰٫۱۴۴
Fe	۰٫۳۳۷	-۰٫۱۵۵	-۰٫۰۳۰	۰٫۰۴۶	۰٫۰۹۵
K	۰٫۳۴۴	-۰٫۰۶۱	-۰٫۰۳۰	۰٫۰۱۷	۰٫۰۸۴
Mg	۰٫۳۳۲	-۰٫۱۶۴	-۰٫۰۲۳	۰٫۰۴۲	۰٫۱۱۸
Mn	-۰٫۰۳۴	۰٫۰۲۳	۰٫۴۴۳	۰٫۳۸۰	-۰٫۱۲۲
Na	۰٫۳۴۴	-۰٫۰۵۰	-۰٫۰۰۸	-۰٫۰۵۰	۰٫۱۲۶
Ni	-۰٫۲۰۰	-۰٫۱۹۴	-۰٫۱۱۱	۰٫۲۹۴	۰٫۲۶۴
P	۰٫۰۰۲	-۰٫۰۷۴	-۰٫۳۵۱	۰٫۴۳۱	۰٫۱۹۷
Pb	-۰٫۰۸۲	۰٫۳۹۹	۰٫۱۶۲	۰٫۳۳۴	-۰٫۰۷۴
S	۰٫۱۱۵	-۰٫۲۱۴	-۰٫۲۰۹	۰٫۴۱۳	-۰٫۲۵۹
Sr	-۰٫۱۸۷	۰٫۲۰۶	-۰٫۱۱۶	-۰٫۱۴۵	۰٫۵۵۲
Ti	-۰٫۲۲۷	-۰٫۳۵۲	۰٫۱۲۴	۰٫۰۵۰	۰٫۱۱۱
V	-۰٫۱۵۶	-۰٫۲۷۳	۰٫۳۶۹	-۰٫۰۷۱	۰٫۲۵۶
Zn	۰٫۱۳۹	۰٫۲۷۹	۰٫۱۸۱	۰٫۲۵۱	۰٫۰۱۵
تجمعی	۳۷٫۱	۵۱٫۶	۶۲٫۳	۷۱٫۶	۷۷٫۰



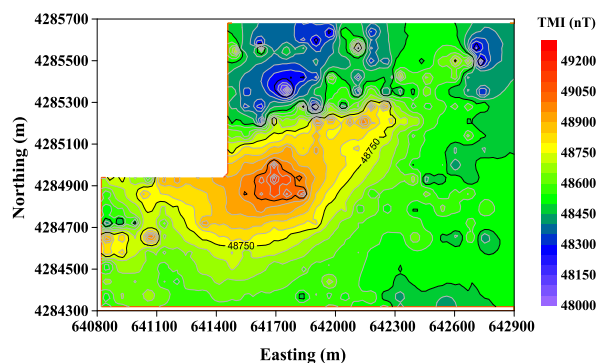
شکل ۳: نقشه کنتوری پراکندگی، الف (طلا، ب) مس، ج) امتیازهای مولفه اصلی دوم و د) شاخص احتمال کانی‌زایی ژئوشیمیایی

نشان می‌دهد.

ب) نقشه ادامه فراسو: برای مشخص کردن اثرات عمقی آنومالی مغناطیسی از روش ادامه فراسو استفاده شده است. با توجه به مطالعات انجام گرفته، آنومالی‌ها تقریباً سطحی بوده و حداکثر عمق ۵۰ متری دارد [۴۳]. به همین دلیل، نقشه ادامه فراسوی ۵۰ متری به کار رفته است که شکل ۵-ب این نقشه را نشان می‌دهد. مطابق شکل موقعیت مرکز توده کانی‌سازی نسبت به آنومالی مغناطیسی مثبت کمی به سمت جنوب جابه‌جایی دارد.

داده‌های زمین‌شناسی لایه‌های بعدی اکتشافی منطقه را تشکیل می‌دهند. با توجه به ارتباط واحدهای سنگی با نوع کانی‌سازی در منطقه، نقشه واحدهای سنگی با ارزش‌های عددی زیر تهیه شده است. توده نفوذی کوارتزومونونیت پورفیری بالاترین ارزش و واحد سنگی بازالتی کمترین ارزش یا ارتباط با کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه را دارند. ارزش عددی کلیه سنگ‌ها با توجه به مطالعات قبلی انجام گرفته عبارتند از [۵۰، ۴۹، ۴۷، ۳]:

الف- واحد سنگی کوارتزومونونیتی پورفیری عدد ۹



شکل ۴: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه

الف) نقشه برگردان به قطب بازماند مغناطیسی: در ابتدا میدان مغناطیسی مرجع از داده‌های TMI کم شده تا مقدار بازماند مغناطیسی به دست آید. برای این منظور از مختصات جغرافیایی مرکز منطقه و زاویه انحراف مغناطیسی ۵٫۱ درجه و زاویه میل مغناطیسی ۵۷٫۳ درجه استفاده شده است، سپس برای تثبیت موقعیت آنومالی‌ها در محل واقعی خود، روش برگردان به قطب به کار رفته است. شکل ۵-الف نتیجه کار را

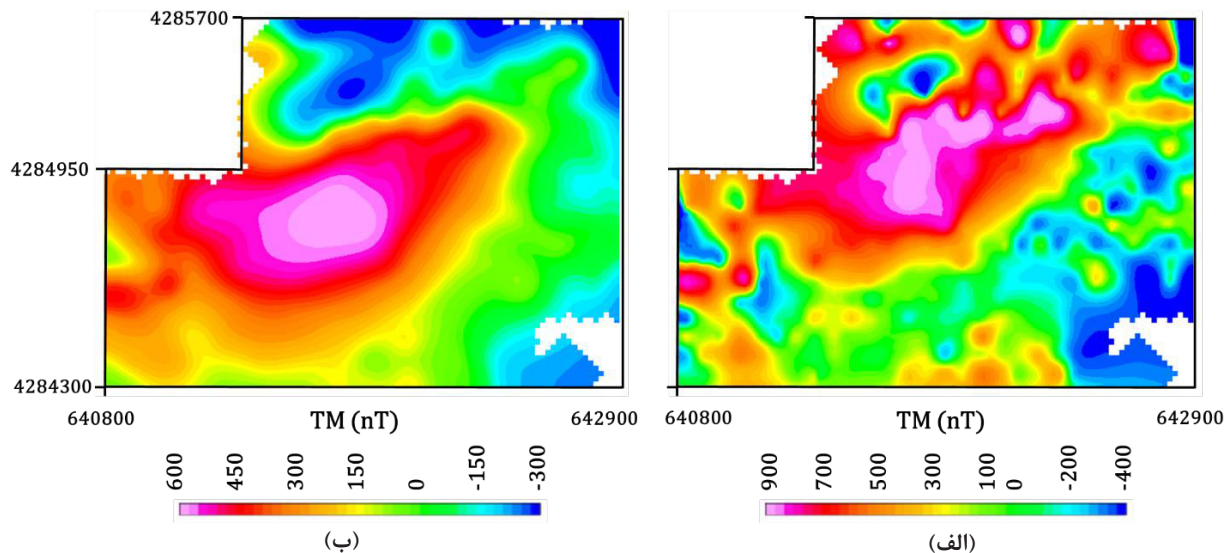
ب- رگه‌های کوارتزی عدد ۸
 ج- واحد سنگی میکرودیوریت پورفیری عدد ۶
 د- واحد سنگی دیوریت پورفیری عدد ۵
 ه- سنگ‌های آلتراسیون سولفیدی عدد ۴
 و- واحد سنگی بازالتی عدد ۱

در شکل ۶-الف، نقشه واحدهای سنگی به دست آمده از این روش ارزش‌دهی عددی نشان داده شده است.

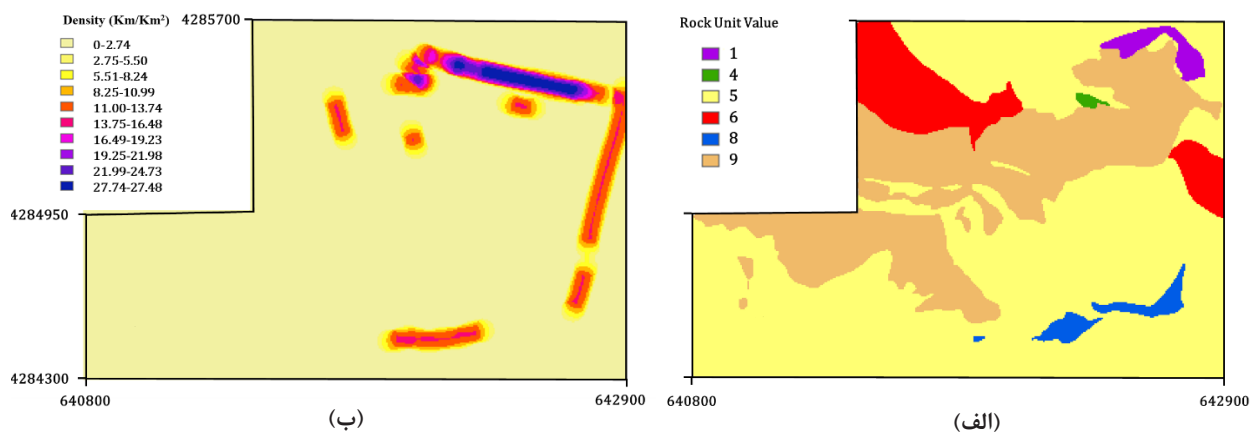
نقشه چگالی گسلی دومین لایه اطلاعاتی به دست آمده از نقشه زمین‌شناسی منطقه است [۵۰، ۵۱]. برای این منظور از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده و نقشه چگالی گسل‌ها ترسیم شده است که در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود. چگالی گسلی هر

۵- تلفیق داده‌های اکتشافی

با توجه به تنوع ابزارها در فاز اکتشافی نیمه‌تفصیلی، استفاده از روش تلفیق داده‌ها، بهترین گزینه برای پیشنهاد محدوده مستعد کانی‌سازی برای تهیه شبکه حفاری گمانه‌ها است. در این مقاله، از سه نوع داده اکتشافی و در ۸ لایه برای



شکل ۵: نقشه برگردان به قطب بازماند مغناطیسی الف) و ادامه فراسوی ۵۰ متری ب) در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶: لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی، الف) نقشه واحدهای سنگی و ب) نقشه چگالی گسل‌ها در منطقه مورد مطالعه

در مرحله بعدی ضرایب به دست آمده از الگوریتم CCSD به همراه الگوریتم‌های EDAS و MARCOS به کار گرفته شده است تا نقشه نهایی تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به دست آیند (اجرای این الگوریتم‌ها به وسیله کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است). شکل ۷-الف نتایج این تلفیق را به وسیله الگوریتم ترکیبی CCSD-EDAS و شکل ۷-ج به وسیله الگوریتم ترکیبی CCSD-MARCOS نشان می‌دهد. برای نشان دادن بهتر محدوده‌های مستعد کانی‌سازی از روش فرکتالی عیار-مساحت نیز استفاده شده تا داده‌های به دست آمده از هر الگوریتم به دو کلاس تفکیک شوند [۵۱،۳،۱۵]. شکل‌های ۷-ب و ۷-ج نقشه کلاسه‌بندی شده تلفیق داده‌ها را نشان می‌دهد.

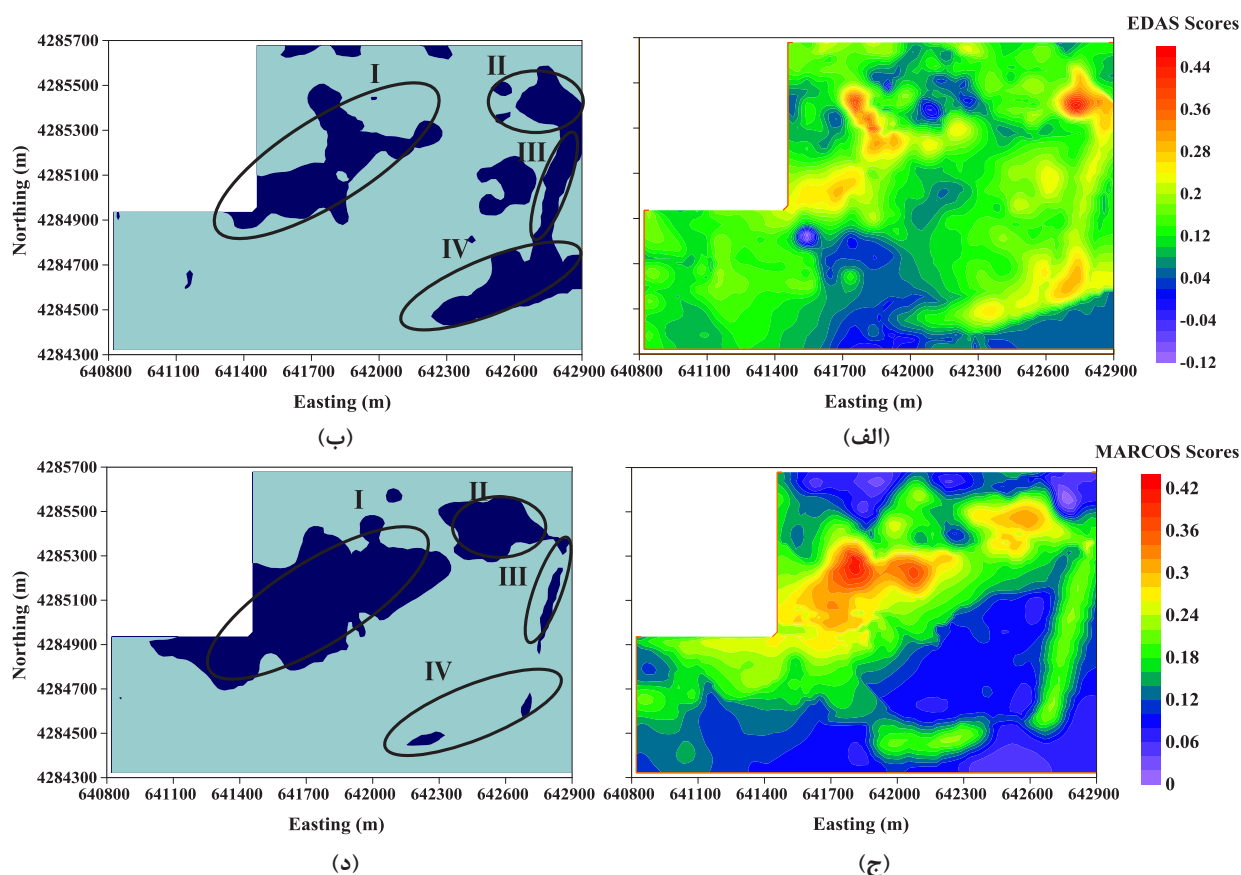
مقایسه شکل ۷-الف با ۷-ج نشان می‌دهد که در الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی CCSD-EDAS، به دلیل استفاده از راه‌حل میانگین نمونه وزن‌های تقریباً نزدیک به هم دارند [۳۰،۲۸]؛ به همین دلیل بخش اعظم منطقه اکتشافی را نمونه‌هایی با طیف رنگی سبز به بالا تشکیل داده است. در حالی که در الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی CCSD-MARCOS، با به کارگیری ارزش‌های ایده‌آل/غیرایده‌آل و تعریف درجه سودمندی گزینه‌ها در رابطه با راه‌حل ایده‌آل و غیرایده‌آل، نمونه‌ها وزن‌های منطقی‌تری دارند [۴۰]؛ بنابراین نقشه تلفیق به دست آمده تنوع وزنی و تنوع طیف رنگی بهتری نسبت به الگوریتم قبلی دارد. در نقشه‌های کلاسه‌بندی شده نیز، در شکل ۷-ب محدوده‌های با وسعت ۴۷۴۰۰۰ مترمربع و در شکل ۷-د محدوده‌های با وسعت ۵۴۰۰۰۰ مترمربع به عنوان محدوده‌های مستعد کانی‌سازی برای طراحی شبکه حفاری پیشنهاد شده است.

پیشنهاد این محدوده در منطقه اکتشافی خوینه‌رود استفاده شده است. جدول ۲ ضمن معرفی این لایه‌ها، ضرایب اولیه به کار رفته در الگوریتم CCSD را نیز نشان می‌دهد. این ضرایب (w) از میانگین‌گیری نظرات ۵ متخصص اکتشافی به دست آمده است. مطابق نظر متخصصین، لایه اطلاعاتی واحد سنگی و لایه پراکندگی عیار مس بالاترین ضرایب و لایه‌های چگالی گسل و پراکندگی عیار طلا کمترین ضرایب را دارند. از این ضرایب و الگوریتم CCSD استفاده شده تا ضرایب نهایی برای تلفیق داده‌های اکتشافی (w_{JC}) به دست آید. برای اجرای الگوریتم و حل مساله بهینه‌سازی (رابطه ۸) از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. مقایسه ضرایب به دست آمده با ضرایب اولیه (جدول ۲) نشان‌دهنده کاهش اختلاف بین آنها است؛ علیرغم آنکه همچنان بالاترین ضرایب متعلق به لایه‌های پراکندگی عیار مس و واحد سنگی و کمترین ضرایب متعلق به لایه پراکندگی عیار طلا است.

در الگوریتم CCSD لایه‌های اطلاعاتی که ضریب همبستگی بالا (مطابق رابطه ۵، ضریب همبستگی بالا یعنی تاثیر کمتر متغیر در ماتریس داده‌ها) و انحراف معیار پایین (مطابق رابطه ۹، انحراف معیار پایین به معنی پراکندگی کمتر داده‌ها و در نتیجه تاثیر کمتر متغیر در ماتریس داده‌ها) دارند، مقدار ضرایب آنها کاهش می‌یابد و برعکس ضریب لایه اطلاعاتی که ضریب همبستگی پایین و انحراف معیار بالایی داشته باشد، افزایش پیدا می‌کند [۲۷،۲۶]، بنابراین الگوریتم CCSD می‌تواند ضمن در نظر گرفتن ضرایب اولیه، کمیت آنها را با توجه به ماهیت آماری ماتریس داده‌ها بهبود بخشد. در نتیجه ضرایب به دست آمده ترکیبی از وزن‌دهی عینی و ذهنی خواهند بود.

جدول ۲: لایه‌های اکتشافی به همراه ضرایب اهمیت آنها

نوع داده	لایه اطلاعاتی	w	w_{JC}
ژئوشیمیایی	پراکندگی عیار طلا	۰٫۰۷	۰٫۱۱۵۳
	پراکندگی عیار مس	۰٫۱۸	۰٫۱۴۳۲
	امتیازهای مولفه اصلی دوم	۰٫۱۲	۰٫۱۱۲۴
	شاخص احتمال کانی‌زایی	۰٫۱۵	۰٫۱۱۸۸
ژئوفیزیکی	برگردان به قطب	۰٫۱۳	۰٫۱۲۱۵
	ادامه فراسو ۵۰ متری	۰٫۱۰	۰٫۱۲۳۳
زمین‌شناسی	واحد سنگی	۰٫۱۹	۰٫۱۳۴۳
	چگالی گسل	۰٫۰۶	۰٫۱۳۱۲



شکل ۷: نقشه تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در منطقه خوینه‌رود توسط الگوریتم CCSD-EDAS (الف) با مقیاس پیوسته، (ب) کلاسه‌بندی شده، (ج) الگوریتم CCSD-MARCOS با مقیاس پیوسته و (د) کلاسه‌بندی شده

نتایج تلفیق داده‌های اکتشافی در منطقه خوینه‌رود چهار محدوده مستعد کانی‌سازی را پیشنهاد می‌کند (شکل ۷-ب و ۷-د). محدوده I در بخش میانی تا شمال‌غربی منطقه مورد مطالعه قرار دارد. این محدوده به وسیله هر دو الگوریتم تلفیق به خوبی مشخص شده است؛ در حالی که مساحت آن در الگوریتم ترکیبی CCSD-MARCOS بزرگتر از الگوریتم ترکیبی CCSD-EDAS است. این محدوده تقریباً به صورت بیضی با قطر بزرگ ۱۲۰۰ متر در راستای شمال‌شرقی - جنوب‌غربی و قطر کوچک ۴۰۰ متر بزرگترین محدوده پیشنهادی است. سنگ‌های کوارتزموزنونیت و میکرودیوریت پورفیری بستر این محدوده را پوشش می‌دهند. موقعیت این محدوده با آنومالی‌های ژئوشیمیایی مس و طلا (شکل ۳) همپوشانی قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین آنومالی‌های مثبت مغناطیسی تبدیل به قطب (شکل ۵-الف) و ادامه فراسوی ۵۰ متری (شکل ۵-ب) که مرکز توده کانی‌سازی را نشان می‌دهد) نیز در این محدوده قرار دارد.

در ادامه برای مقایسه نتایج این دو الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی از روش جایگشت^۷ استفاده شده است. برای این منظور آماره R به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C'_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij}} \times 100 \quad (32)$$

که در آن:

$$C'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{If } x_{ij} > x_{ij-1} | AS_i \\ & \geq AS_{i-1} \text{ or } f(Z_i) \\ & \geq f(Z_{i-1}) \end{cases} \quad (33)$$

و C_{ij} برابر تعداد کل مقایسه است (برای جزئیات بیشتر می‌توان به منبع ۵۲ مراجعه کرد). مقدار آماره R برای الگوریتم ترکیبی CCSD-EDAS برابر ۶۷٫۶٪ و برای الگوریتم ترکیبی CCSD-MARCOS برابر ۶۹٫۲٪ به دست آمده که نشان‌دهنده برتری نسبی الگوریتم دوم است.

در مرحله‌ی بعدی با توجه به وجود دو تیپ کانی‌سازی پورفیری و رگه‌ای در منطقه مورد مطالعه و برای ارزیابی روش‌های جدید تلفیق آرایه شده، از روش تحلیل سلسله مراتبی^۸ (AHP) استفاده شده است. روش تحلیل سلسله مراتبی نیز یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شود که یک روش تلفیق شناخته شده در بین متخصصین علوم زمین است و بیشتر برای شناسایی کانی‌سازی‌های سطحی به کار می‌رود [۵۷-۵۵]. برای آشکارسازی بیشتر کانی‌سازی‌های رگه‌ای سطحی، لایه اطلاعاتی خطواره‌های مغناطیسی جایگزین لایه ادامه فراسوی ۵۰ متری شده است.

برای تقویت آنومالی‌های ژئومغناطیسی سطحی نسبت به آنومالی‌های عمقی می‌توان از روش گرادیان یا مشتق‌گیری شدت میدان مغناطیسی استفاده کرد [۵۸]. شکل ۸-الف نقشه مشتق اول در جهت قائم داده‌های برگردان به قطب منطقه اکتشافی خوینه‌رود را نشان می‌دهد. در این نقشه، آنومالی‌های سطحی قابل مشاهده است ولی اثر نوفه یا نویز تعیین موقعیت دقیق آنومالی‌های سطحی را مشکل کرده است، بنابراین این نقشه برای تلفیق مناسب نخواهد بود. ولی به کمک فیلتر زاویه تیلت می‌توان خطواره مغناطیسی را از این نقشه استحصال کرد و نتایج آن را به عنوان یک لایه اطلاعاتی در تلفیق استفاده کرد [۵۹]. شکل ۸-ب نقشه فیلتر زاویه تیلت در منطقه را نشان می‌دهد. در این نقشه، مقدار زاویه تیلت مستقیماً در بالای توده‌های زیر سطحی مثبت، در نواحی خارج از توده زیر سطحی منفی و کمترین مقدار را در بالای خطواره‌های مغناطیسی دارد [۵۹، ۶۰]. بنابراین مناطق آبی رنگ در شکل ۸-ب نشان دهنده موقعیت خطواره‌های مغناطیسی در منطقه‌اند.

با توجه به هدف تلفیق داده‌های به روش AHP برای شناسایی کانی‌سازی‌های رگه‌ای در منطقه، ترتیب اهمیت لایه‌های اطلاعاتی به ترتیب شامل پراگندگی عیار طلا، چگالی گسل، خطواره‌های مغناطیسی (نقشه زاویه تیلت)، واحدهای سنگی، عیار مس، امتیازهای مولفه اصلی دوم و برگردان به قطب است. برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی از وزن اولیه به دست آمده از نظرات کارشناسان استفاده شده است. شکل ۹ نتایج تلفیق این لایه‌های اطلاعاتی را با مقیاس پیوسته و کلاس‌بندی شده نشان می‌دهد.

در شکل ۹ نیز چهار محدوده دارای پتانسیل کانی‌سازی مشاهده می‌شود با این تفاوت که محدوده‌های I و II که پتانسیل

بخشی از نقشه چگالی گسل‌های منطقه نیز بخش شمال تا شمال شرقی این محدوده را پوشش می‌دهد، بنابراین با توجه به شواهد لایه‌های اکتشافی می‌توان گفت که محدوده پیشنهادی I مناسب و مستعد برای کانی‌سازی خواهد بود.

محدوده پیشنهادی II در بخش شمال شرقی منطقه اکتشافی خوینه‌رود قرار دارد. سنگ بستر این محدوده را توده کوارتز مونزونیت پورفیری هم مرز با سنگ‌های بازالتی، تشکیل می‌دهد (شکل ۱). مهم‌ترین آنومالی ژئوشیمیایی مس به لحاظ کمیت (شکل ۳-الف) در این محدوده واقع شده است. همچنین آنومالی مثبت مغناطیسی تبدیل به قطب (شکل ۵-الف) و نقشه چگالی گسل‌ها (شکل ۶-ب) نیز در این محدوده قابل مشاهده است. وسعت این محدوده تقریباً 400×400 متر است. هر چند وسعت این محدوده در الگوریتم CCSD-MARCOS کمی بزرگتر و در الگوریتم CCSD-EDAS کمی به سمت غرب جابه‌جایی نشان می‌دهد.

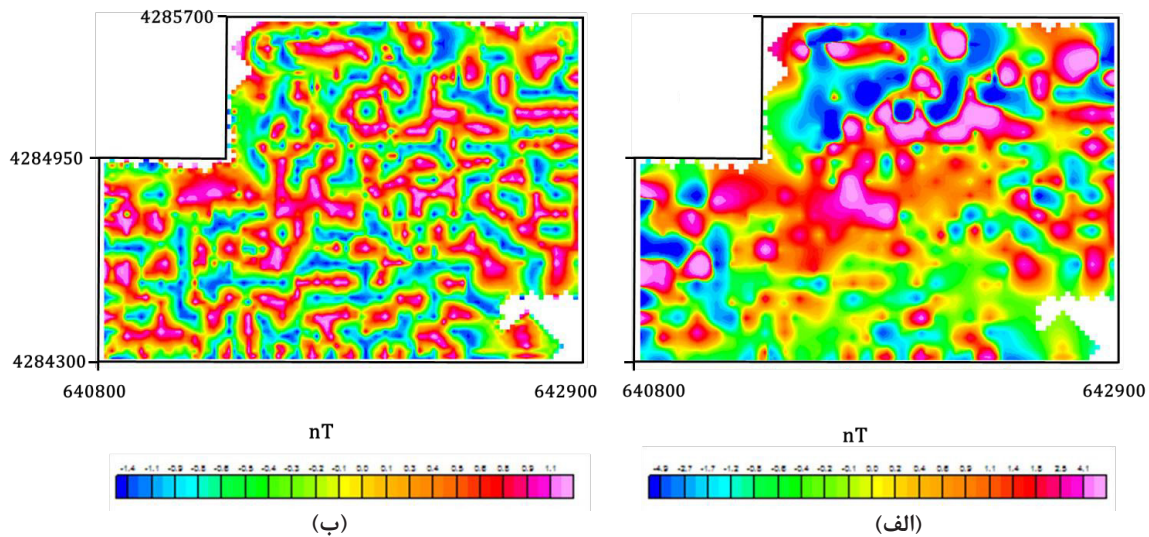
محدوده III به صورت یک بیضی کشیده با قطر بزرگ ۵۰۰ متر در راستای شمال شرقی- جنوب غربی و قطر کوچک ۱۰۰ متر در غرب منطقه اکتشافی مورد مطالعه قرار دارد. هر چند این محدوده در شکل ۷-د به خوبی دیده نمی‌شود، ولی در شکل ۷-ج به خوبی قابل مشاهده است. سنگ‌های دیوریت و میکرودیوریت پورفیری سنگ بستر این محدوده هستند. موقعیت این محدوده تنها با نقشه چگالی گسل‌های منطقه (شکل ۶-ب) همخوانی دارد، بنابراین این محدوده اعتبار کانی‌سازی کمتری دارد. با توجه به ژنز کانی‌سازی در این منطقه، تنها احتمال کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز- طلا دار که با گسل ارتباط داشته باشد را می‌توان به این محدوده نسبت داد.

محدوده پیشنهادی IV دارای راستای شرقی- غربی با طول ۷۰۰ متر و پهنا ۲۰۰ متر در جنوب شرقی منطقه اکتشافی خوینه‌رود قرار دارد. این محدوده در الگوریتم CCSD-EDAS به خوبی تفکیک شده است (شکل‌های ۷-الف و ۷-ب) ولی در الگوریتم CCSD-MARCOS به صورت جزئی در شکل ۷-د و به صورت واضح‌تری در شکل ۷-ج مشاهده می‌شود. رگه‌های کوارتزی بخش اعظم این محدوده را پوشش می‌دهد (شکل ۱). این محدوده نیز همانند محدوده III تنها با نقشه چگالی گسل‌ها، همخوانی قابل ملاحظه‌ای دارد. با توجه به نوع سنگ بستر این محدوده، احتمال کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز- طلا دار در این محدوده از محدوده قبلی بالاتر است.

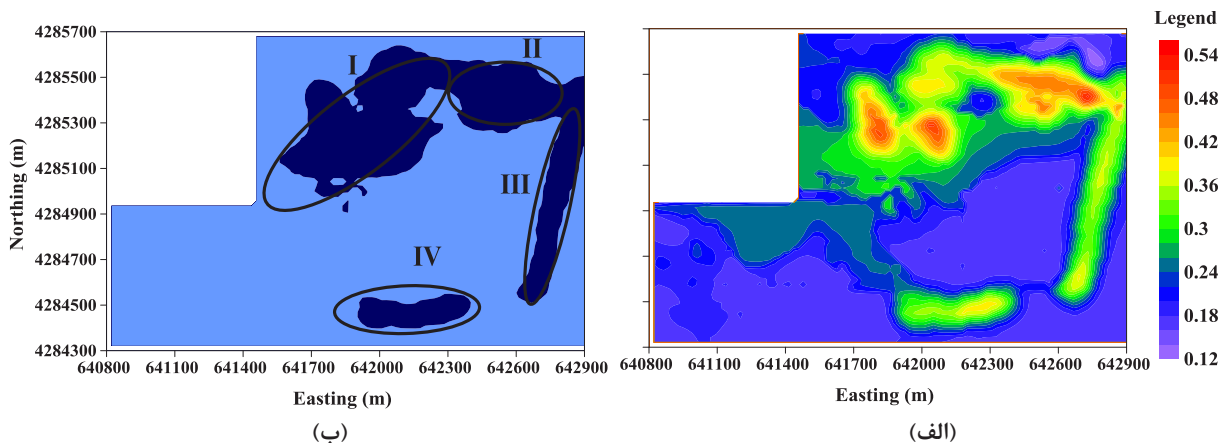
الگوریتم ترکیبی CCSD-MARCOS و برتری نسبی این الگوریتم (برتری از نظر انطباق با شرایط زمین‌شناسی منطقه و برتری از نظر آزمون آماری جایگشت)، طراحی شبکه حفاری بر روی محدوده I نشان داده شده در شکل ۷-د انجام شده است. این محدوده با محدوده انتخابی توسط شرکت اسپیر برای انجام عملیات اکتشافی در مقیاس ۱/۱۰۰۰ همخوانی کاملی دارد. همچنین شواهد کانی‌سازی سطحی و ترانشه‌های حفاری شده در فاز اکتشافی ۱/۵۰۰۰ نیز در داخل این محدوده قرار دارند. در این طراحی که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در مرحله اول ۶ پروفیل به فواصل ۲۰۰ متری و در راستای شمال غربی- جنوب شرقی در نظر گرفته شده است. فاصله گمانه‌ها بر روی

کانی‌سازی پورفیری دارند، به یکدیگر متصل‌اند. محدوده‌های دارای پتانسیل کانی‌سازی رگه‌ای (محدوده‌های III و IV) در شکل ۹ واضح‌تر از شکل ۷ تفکیک و مشخص شده است. با توجه به مطالب یاد شده و شواهد زمین‌شناسی، می‌توان احتمال کانی‌سازی پورفیری مس- طلا را به محدوده‌های I و II و احتمال کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز طلا دار را به محدوده‌های III و IV نسبت داد. همچنین مستعدترین محدوده کانی‌سازی برای پیشنهاد شبکه حفاری گمانه‌ای، محدوده I و در اولویت بعدی محدوده II خواهد بود.

از آنجا که موقعیت محدوده I در هر دو الگوریتم ترکیبی بر هم منطبق است و با توجه به وسعت بیشتر این محدوده در



شکل ۸: نقشه الف) مشتق قائم درجه اول داده‌های برگردان به قطب و ب) زاویه تیلت در منطقه اکتشافی خوبه‌رود



شکل ۹: نقشه تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در منطقه خوبه‌رود توسط الگوریتم AHP با الف) مقیاس پیوسته و ب) کلاسه‌بندی شده

احتمال کانی‌زایی ژئوشیمیایی، ۲ لایه ژئوفیزیکی نقشه‌های بازماند مغناطیسی برگردان به قطب و ادامه فراسوی ۵۰ متری و ۲ لایه زمین‌شناسی نقشه‌های واحدهای سنگی و چگالی گسل‌ها در محدوده‌ای به ابعاد 2100×1400 متری بود. برای این منظور، ابتدا وزن این لایه‌ها توسط متخصصین تعیین و سپس به کمک الگوریتم CCSD بهینه شدند، سپس نمونه‌ها به وسیله الگوریتم‌های EDAS و MARCOS رتبه‌بندی شده و نقشه کنترولی آنها ترسیم شد. نتایج تلفیق نشان داد که:

۱- وزن نمونه در الگوریتم ترکیبی CCSD-EDAS

تقریباً نزدیک به هم و در نتیجه بخش اعظم منطقه اکتشافی را نمونه‌هایی با وزن بالا (طیف رنگی سبز به بالا) تشکیل داده است؛ در حالی که در الگوریتم ترکیبی CCSD-MARCOS، نمونه‌ها وزن‌های منطقی‌تری دارند.

۲- استفاده از آماره روش جایگشت نشان‌دهنده برتری

نسبی نتایج الگوریتم ترکیبی CCSD-MARCOS نسبت به الگوریتم ترکیبی CCSD-EDAS است.

۳- نتایج تلفیق چهار محدوده مستعد کانی‌سازی را در

منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. محدوده‌های I و II دارای احتمال کانی‌سازی پورفیری مس-طلا و محدوده‌های III و IV دارای احتمال کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز-طلادار هستند.

۴- تلفیق داده‌ها به روش AHP نیز این چهار محدوده

کانی‌سازی را نشان داد با این تفاوت که محدوده‌های دارای پتانسیل کانی‌سازی پورفیری در الگوریتم‌های ترکیبی و محدوده‌های دارای پتانسیل کانی‌سازی رگه‌ای در روش AHP بهتر مشخص شده‌اند.

۵- محدوده I با وسعت 1200×400 متر به عنوان بهترین

محدوده برای طراحی شبکه حفاری پیشنهاد شده است. در این محدوده، ۶ پروفیل اکتشافی با فواصل ۲۰۰ متری و ۲۶ گمانه با فواصل ۱۰۰ متری از هم طراحی گردید.

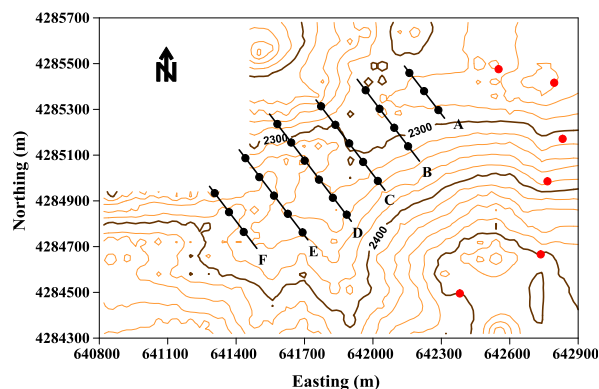
با توجه به انطباق مناسب محدوده‌های پیشنهادی با شرایط

زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه، استفاده از این دو روش تلفیق به ویژه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی CCSD-MARCOS برای تلفیق داده‌های اکتشافی مهم‌ترین پیشنهاد این مقاله است.

۷- سپاس‌گزاری

از شرکت اسپیر به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های اکتشافی منطقه مورد مطالعه (نقشه زمین‌شناسی، داده‌های

هر پروفیل ۱۰۰ متر و در مجموع ۲۶ گمانه طراحی شده است. آرایش گمانه‌ها بر روی هر پروفیل به گونه‌ای است تا شبکه حفاری به صورت لوزی شکل باشد (دلیل این کار پوشش دادن وسعت بیشتری از منطقه اکتشافی با تعداد کمتری گمانه است). در صورت مناسب بودن نتایج حفاری، در مرحله دوم می‌توان فواصل پروفیل‌ها و فاصله گمانه‌ها را از هم به نصف تا یک سوم تقلیل داد. همچنین ۶ گمانه (۲ گمانه برای هر یک از محدوده‌های II، III و IV) به عنوان گمانه‌های آزمایشی نیز پیشنهاد شده است که در صورت مناسب بودن نتایج حفاری‌ها، طراحی شبکه تکمیلی می‌تواند برای این محدوده‌ها در فاز بعدی در نظر گرفته شود. این گمانه‌ها بر روی محدوده II در شکل ۷ و محدوده‌های III و IV در شکل ۹ پیشنهاد شده است.



شکل ۱۰: موقعیت شبکه حفاری پیشنهادی بر روی نقشه توپوگرافی منطقه اکتشافی خوینه‌رود ۶ پروفیل (A, B, C, D, E و F) به همراه ۲۶ گمانه اصلی (نقاط سیاه) و ۶ گمانه آزمایشی (نقاط قرمز)

۶- نتیجه‌گیری

تلفیق داده‌های به دلیل استفاده از ابزارهای اکتشافی متنوع، بخش اصلی یک پروژه اکتشافی محسوب می‌شود. متنوع شدن لایه‌های اکتشافی در فاز نیمه‌تفصیلی، اهمیت اقتصادی محدوده اکتشافی و هزینه‌های سنگین استفاده از حفاری‌های گمانه‌ای، لزوم استفاده از یک روش تلفیق مناسب را به همراه خواهد داشت. در این مقاله دو الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی CCSD-EDAS و CCSD-MARCOS معرفی و کاربرد آنها برای تلفیق داده‌های فاز اکتشافی نیمه‌تفصیلی خوینه‌رود در استان آذربایجان شرقی بررسی شد. لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده شامل ۴ لایه ژئوشیمیایی نقشه‌های پراکندگی عیار مس، طلا، امتیازهای مولفه اصلی دوم و شاخص

[11] Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2001). "Logistic regression for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines". *Exploration and Mining Geology*, 10(3): 165-175.

[12] Abedi, M., Norouzi, G. H., and Bahroudi, A. (2012). "Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas". *Computers and Geosciences*, 46: 272-283.

[13] Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2006). "Bayesian network classifiers for mineral potential mapping". *Computers and Geosciences*, 32(1): 1-16.

[۱۴] روشن‌روان، ب.، آقاجانی، ح.، یوسفی، م.، کرورز، ا.؛ ۱۳۸۹؛ "مدلسازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته در کمربند افیولیتی سبزوار". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره چهارم، شماره ۱، ص ۱۹-۱.

[۱۵] گرانیان، ح.؛ ۱۳۹۹؛ "رتبه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی به روش آنالیز ویژگی و روش‌های VIKOR جهت شناسایی مناطق مستعد کانی‌زایی". روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۲۴، ص ۲۶-۱۳.

[۱۶] مقصودی مود، ف.؛ ۱۳۹۵؛ "مقایسه عملکرد روش‌های تاپسیس و ویکور در پتانسیل‌یابی کانی‌زایی مس در بخش مرکزی کمربند فلزایی کرمان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

[۱۷] بهرامی، ی.، حسینی، ح.، مقصودی قره‌بلاغ، ع.؛ ۱۳۹۹؛ "به کارگیری روش SWARA-MOORA به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ ابهر، ایران". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره ۵، شماره ۲، ص ۲۰-۱.

[18] Abedi, M., Mohammadi, R., Norouzi, G. H., and Mir Mohammadi, M. S. (2016). "A comprehensive VIKOR method for integration of various exploratory data in mineral potential mapping". *Arabian Journal of Geoscience*, 9: 482.

[19] Abedi, M., Torabi, S. A. Norouzi, G. H., and Hamzeh, M. (2012). "ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity mapping". *Journal of Applied Geophysics*, 87: 9-18.

[20] Abedi, M., Torabi, S. A. Norouzi, G. H., Hamzeh, M., and Elyasi, G. R. (2012). "PROMETHEE II: A knowledge-driven method for copper exploration". *Computers & Geosciences*, 46: 255-263.

[۲۱] قزلباش، ر.، مقصودی، ع.؛ ۱۳۹۷؛ "استفاده از روش ترکیبی TOPSIS-AHP برای مدلسازی پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری در ورقه ورزقان، شمال باختر ایران". *مجله علوم زمین*، شماره ۱۰۹، ص ۴۲-۳۳.

[22] Alemi-Ardakani, M., Milani, A. S., Yannacopoulos, S.,

ژئوشیمیایی و گزارش‌های فازهای مختلف اکتشافی) تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین سپاسگزاری خود را از شرکت جیوه خویناوی به دلیل استفاده از گزارش محدوده مینرالیزه خویناوی و راهنمایی دکتر غلامعباس فنایی از اعضاء هیات علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه صنعتی بیرجند اعلام می‌دارم.

۸- مراجع

[1] Haldar, S. K. (2013). "Mineral Exploration: Principles and Applications". Elsevier, pp. 372.

[2] Gandhi, S. M., and Sarkar, B. C. (2016). "Essentials of Mineral Exploration and Evaluation". Elsevier, pp. 410.

[3] Ghezelbash, R., and Maghsoudi, A. (2018). "A hybrid AHP-VIKOR approach for prospectivity modeling of porphyry Cu deposits in the Varzaghan District, NW Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11): 275.

[۴] یوسفی، م.، کامکار روحانی، ا.؛ ۱۳۸۹؛ "اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی". انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۲۲۶ صفحه.

[5] Carranza, E. J. M., Mangaoang, J. C., and Hale, M. (1999). "Application of mineral exploration models and GIS to generate mineral potential maps as input for optimum land-use planning in the Philippines". *Natural Resources Research*, 8(2): 165-173.

[6] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping". *Computers and Geosciences*, 83: 72-79.

[7] Hosseinali, F., and Alesheikh, A. A. (2008). "Weighting spatial information in GIS for copper mining exploration". *American Journal of Applied Sciences*, 5(9): 1187-1198.

[8] Ataei, M., Sereshki, F., Jamshidi, M., and Jalali, S. M. E. (2008). "Suitable mining method for Golbini No. 8 deposits in Jajarm (Iran) using TOPSIS method". *Mining Technology*, 117(1): 1-5.

[9] Carranza, E. J. M. (2008). "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS". Elsevier, pp. 351.

[10] Abedi, M., Norouzi, G. H., and Fathianpour, N. (2013). "Fuzzy outranking approach: a knowledge-driven method for mineral prospectivity mapping". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 556-567.

- [33] Turskis, Z., Morkunaite, Z., and Kutut, V. (2017). "A hybrid multiple criteria evaluation method of ranking of cultural heritage structures for renovation projects". *International Journal of Strategic Property Management*, 21(3): 318-329.
- [34] Kikomba, M. K., Mabela, R. M., and Ntantu, D. I. (2016). "Applying EDAS method to solve air traffic problems". *International Journal of Scientific and Innovative Mathematical Research*, 4(8): 15-23.
- [35] Stanujkic, D., Popovic, G., and Brzakovic, M. (2018). "An approach to personnel selection in the IT industry based on the EDAS method". *Transformations in Business & Economics*, 17(2): 54-65.
- [36] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Amiri, M., and Turskis, Z. (2016). "Extended EDAS Method for Fuzzy Multi-criteria Decision-making: An Application to Supplier Selection". *International Journal of Computers Communication & Control*, 11(3): 358-371.
- [37] Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., and Antucheviciene, J. (2018). "A dynamic fuzzy approach based on the EDAS method for multi-criteria subcontractor evaluation". *Information*, 9(68): 1-15.
- [38] Zhang, S., Gao, H., Wei, G., Wei, Y., and Wei, C. (2019). "Evaluation Based on Distance from Average Solution Method for Multiple Criteria Group Decision Making under Picture 2-Tuple Linguistic Environment". *Mathematics*, 7(243): 2-16.
- [39] Stanujkic, D., Zavadskas, E. K., Keshavarz Ghorabae, M., and Turskis, Z. (2017). "An Extension of the EDAS Method Based on the Use of Interval Grey Numbers". *Studies in Informatics and Control*, 26(1): 5-12.
- [40] Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., and Chatterjee, P. (2020). "Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMPROMISE solution (MARCOS)". *Computers & Industrial Engineering*, 140: 106231.
- [41] Stanković, M., Stević, Ž., Das, D. K., Subotić, M., and Pamučar, D. (2020). "A new fuzzy MARCOS method for road traffic risk analysis". *Mathematics*, 8: 457.
- [۴۲] برنا، ب.؛ ۱۳۹۱؛ "اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه یکصد هزارم ورزقان". سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پروژه ژئوشیمیایی، تهران.
- [۴۳] شرکت اسپیر؛ ۱۳۸۷؛ "گزارش فاز دوم اکتشاف در مقیاس ۱:۱۰۰۰ محدوده پلی‌متال خوینه‌رود". وزارت صنایع و معادن، سازمان صنایع و معادن آذربایجان شرقی.
- [۴۴] سهرابی، قهرمان؛ ۱۳۹۴؛ "بررسی متالورژی و ژئوشیمی ذخایر and Shokouhi, G. (2016). "On the effect of subjective, objective and combinative weighting in multiple criteria decisions making: A case study on impact optimization of composites". *Expert Systems with Applications*, 46: 426-438.
- [23] Doumpos, M., Rui Figueira, J., Greco, S., and Zopounidis, C. (2019). "New Perspectives in Multiple Criteria Decision Making". Springer, pp. 433.
- [24] Ulutas, A., Karabasevic, D., Popovic, G., Stanujkic, D., Nguyen, P. T., and Karaköy, C. (2020). "Development of a novel integrated CCSD-ITARA-MARCOS decision-making approach for stackers selection in a logistics system". *Mathematics*, 8: 1672.
- [25] Alinezhad, A. and Khalili, J. (2019). "New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making". Springer, pp. 233.
- [26] Wang, Y. M., and Luo, Y. (2010). "Integration of correlations with standard deviations for determining attribute weights in multiple attribute decision making". *Mathematical and Computer Modelling*, 51: 1-12.
- [27] Dahooie, J. H., Zavadskas, E. K., Firoozfar, H. R., Vanaki, A. S., Mohammadi, N., and Brauers, W. K. M. (2019). "An improved fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria decision making based on objective weighting method (CCSD) and its application to technological forecasting method selection". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 79: 114-128.
- [28] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Olfat, L., and Turskis, Z. (2015). "Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS)". *Informatica*, 26(3): 435-451.
- [29] Peng, X., and Liu, C. (2017). "Algorithms for neutrosophic soft decision making based on EDAS, new similarity measure and level soft set". *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 32(1): 955-968.
- [30] Aggarwal, A., Choudhary, C., and Mehrotra, D. (2018). "Evaluation of smartphones in Indian market using EDAS". *Procedia Computer Science*, 132: 236-243.
- [31] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., and Antucheviciene, J. (2017). "Stochastic EDAS method for multi-criteria decision-making with normally distributed data". *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(3): 1627-1638.
- [32] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., and Antucheviciene, J. (2017). "A new hybrid simulation-based assignment approach for evaluating airlines with multiple service quality criteria". *Journal of Air Transport Management*, 63: 45-60.

(GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping". Journal of Geochemical Exploration, 115: 24-35.

[55] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". Computers & Geosciences, 74: 97-109.

[۵۶] فیضی‌انهر، ح.، اصلانی، س.، علی‌یاری، ف.، بحرودی، ع.، سرتیپی، ع.؛ ۱۳۹۹؛ "کاربرد روش‌های تلفیق فازی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه استنتاج‌گر فازی در اکتشاف کانسار تیتانیم خائیک - غازان". مجله علوم زمین، سال بیست و نهم، شماره ۱۱۵، ص ۱۸۶-۱۷۵.

[57] Carranza, E. J. M. (2009). "Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS". Elsevier, Amsterdam, pp. 368.

[۵۸] ناسوتی، ی.، فیض‌آبادی، ب.، تاجور، س. م.، ناسوتی، ع.؛ ۱۳۹۶؛ "تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل به منظور بررسی ساختارهای زمین‌شناسی و اکتشاف تله‌های نفتی احتمالی، بررسی موردی: جنوب سمنان". مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۱، شماره ۳، ص ۱۰۴-۹۰.

[59] Castro, F. R., and Oliveira, S. P. (2018). "Combining tilt derivative filters: New approaches to enhance magnetic anomalies". Revista Brasileira de Geofísica, 36(3): 335-343.

[۶۰] امامی، ع.؛ ۱۳۹۶؛ "تفسیر داده‌های گرانی و مغناطیس آنومالی ۳۲ سنگ آهن ساغند با استفاده از روشهای پردازش تصویری". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مولیبدن در نوار قره داغ- شیورداغ، آذربایجان شرقی، شمال غرب ایران". تز دکتری، دانشگاه تبریز.

[۴۵] شرکت اسپیر، ۱۳۸۵؛ "گزارش فاز اکتشافات ۱:۵۰۰۰ محدوده مینرالیزه خوینه‌رود". وزارت صنایع و معادن، سازمان صنایع و معادن آذربایجان شرقی.

[۴۶] کریم‌پور، م. ح.، ملک‌زاده، آ.، حیدریان، م. ر.؛ ۱۳۹۱؛ "اکتشاف ذخایر معدنی: مدل‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ماهواره‌ای و ژئوفیزیکی". انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۶۳۲ صفحه.

[47] Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., and Daviran, M. (2019). "Prospectivity modeling of porphyry copper deposits: recognition of efficient mono- and multi-element geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran". Acta Geochimica, 38: 131-144.

[48] Clark, D. A. (2013). "Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review". Tectonophysics, 624-625: 46-65.

[49] Khalifa, I. H., Hegazi, A. M., and Faisal, M. (2016). "Geological setting for porphyry copper deposits in calc-alkaline rocks: Wadi Rofaiyed area, Sinai, Egypt". Arabian Journal of Geosciences, 9: 336.

[50] Barak, S., Bahroudi, A., and Jozanikohan, G. (2018). "Exploration of Kahang porphyry copper deposit using advanced integration of geological, remote sensing, geochemical, and magnetism data". Journal of Mining and Environment, 9(1): 19-39.

[51] Khalifani, F. M., Bahroudi, A., Barak, S., and Abedi, M. (2019). "An integrated Fuzzy AHP-VIKOR method for gold potential mapping in Saqez prospecting zone, Iran". Earth Observation and Geomatics Engineering, 3(1): 21-33.

[52] Karimi, H., and Rezaeinia, A. (2011). "Adjusted permutation method for multiple attribute decision making with meta-heuristic solution approaches". International Journal of Industrial Engineering Computations, 2: 369-384.

[53] Yousefi, M. (2017). "Analysis of Zoning Pattern of Geochemical Indicators for Targeting of Porphyry-Cu Mineralization: A Pixel-Based Mapping Approach". Natural Resources Research, 26: 429-441.

[54] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., and Carranza, E. J. M. (2012). "Geochemical mineralization probability index

¹ Subjective

² Objective

³ Correlation Coefficients and Standard Deviations

⁴ Evaluation based on Distance from Average Solution

⁵ Measurement of Alternatives and Ranking according to the COMpromise Solution

⁶ Total Magnetic Intensity

⁷ Permutation

⁸ Analytical Hierarchy Process