



Imam Khomeini International University
Vol. 9, No. 3, Autumn 2024



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

Research Paper

Preparation of a Pb-Zn Potential Map in the Ardestan Area Using the AHP-TOPSIS Hybrid Method

Mahboobi M.¹, Katibeh H.^{2*}, Maghsoudi A.²

1- Ph.D Student, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 08 May 2023

Accepted: 26 Dec. 2023

Abstract: Ardestan area is located in parts of Central Iran and Urumieh-Dokhtar zones, and due to its special geological features, is one of the most promising areas for Pb-Zn mineralization in Iran. The purpose of this research is to model the mineral potential using the hybrid AHP-TOPSIS method, to increase the accuracy of the results and thus to reduce the cost and the risk of exploration operations. For this, in the first step, the evidential layers, which include the geochemical anomaly map, the phyllic, argillic, and iron oxide alterations, the fault density map, and finally carbonate rock units, were transformed in the range of 0 to 1 using the Logistic function. In the next step, all the evidential maps and their corresponding classes weighted using the Analytical Hierarchy (AHP) method and incorporated with the technique of prioritization similar to the ideal solution (TOPSIS). The results show the positive spatial correlation of Pb-Zn elements with lithologies prone to mineralization. Finally, the Prediction-Area (P-A) curve was used to validate the applied method. According to this curve, the intersection point of the prediction rate curves and the corresponding occupied area showed the value of 68. The results of this curve proved the acceptable ability of this method in identifying promising areas.

Keywords: Ardestan, AHP-TOPSIS, Concentration- Area, Mineral Prospectivity Mapping, P-A plot.

How to cite this article

Mahboobi, M., Katibeh, H., and Maghsoudi, A. (2024). "Preparation of a Pb-Zn potential map in the Ardestan area using the AHP-TOPSIS hybrid method". Journal of Mineral Resources Engineering, 9(3): 23-40.

DOI: [10.30479/JMRE.2024.18677.1644](https://doi.org/10.30479/JMRE.2024.18677.1644)

*Corresponding Author Email: katibeh@aut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2024 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

Exploration mineral activities are costly and time-consuming, emphasizing the need for mineral prospectivity mapping (MPM) to pinpoint zones with high mineral potential. MPM serves as a crucial process that combines diverse geoscience datasets collected at various scales [1]. To do so, numerous approaches have emerged in the last thirty years, broadly classified as either data-driven or knowledge-driven methods. This research aims to use a high hybrid multi criteria decision making (MCDM) approach, namely AHP-TOPSIS, for identifying areas highly prospective for Pb-Zn in the Ardestan area.

METHODS

Ardestan area is located in parts of Central Iran and Urumieh-Dokhtar zones, and due to its special geological features, is one of the most promising areas for Pb-Zn mineralization in Iran [2-4]. This research seeks to map the promising area of Pb-Zn in the Ardestan area using the AHP-TOPSIS methodology. This approach combines AHP to establish the weights for criteria and sub-criteria, followed by the application of the TOPSIS method to prioritize decision alternatives [2,5]. Although each of the two methods has individual capabilities and competence, practical experience has demonstrated that combining these two MCDM methods and utilizing their potentials simultaneously yields superior results and enhances the overall performance of the MPM [1,6]. The primary and essential step in MPM is to identify and gather geospatial data relevant to the targeted deposit type [6]. In this study, the mentioned data is considered, taking into account its availability, along with theoretical and empirical analysis of the spatial relationship between Pb-Zn mineral deposits and various datasets [7,8]. In this context, eight evidential layers were employed as predictor maps to delineate potential Pb-Zn zones. These layers encompass multi-element geochemical signatures relevant to Pb-Zn mineralization (two factors derived from PCA method), proximity to Cretaceous and Triassic carbonate rocks, proximity to faults, and proximity to argillic, phyllic, and iron oxide alterations.

FINDINGS AND ARGUMENT

The spatial evidence values in the acquired maps do not share identical maximum and minimum values [4,9,10]. Consequently, the evidential values from these maps were converted into a new space [9]. Subsequently, the concentration-area (C-A) fractal model was utilized to categorize the spatial values of evidential maps [6,9,10,11]. Next, the AHP-TOPSIS MCDM method was employed to produce the Pb-Zn prospectivity map [1,7,12,13]. In this context, the AHP method was employed to assign weights to criteria and sub-criteria (Table 1), while the TOPSIS method was utilized to prioritize alternatives [3,14]. To facilitate this, a decision matrix measuring $361,638 \times 8$ was established, encompassing 8 criteria (represented by evidential maps) and 361,638 alternatives, each corresponding to a specific cell with defined coordinates in the evidence layers. Ultimately, the Pb-Zn prospectivity map was created (Figure 1). To assess the

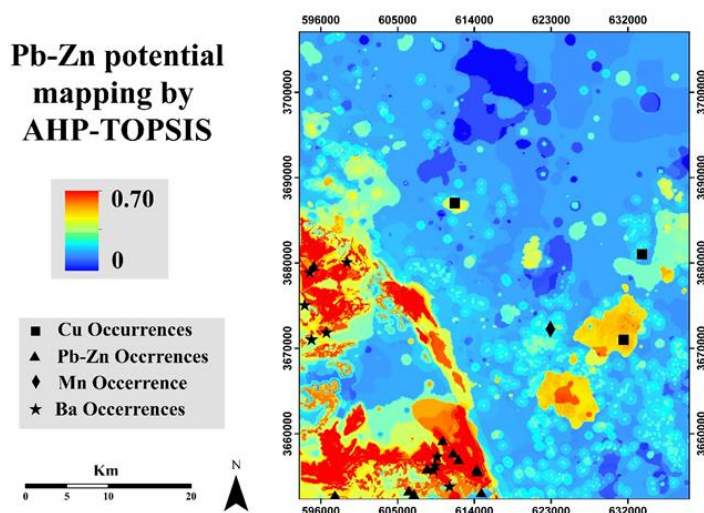


Figure 1. AHP-TOPSIS prospectivity map for Pb-Zn mineralization in the study area

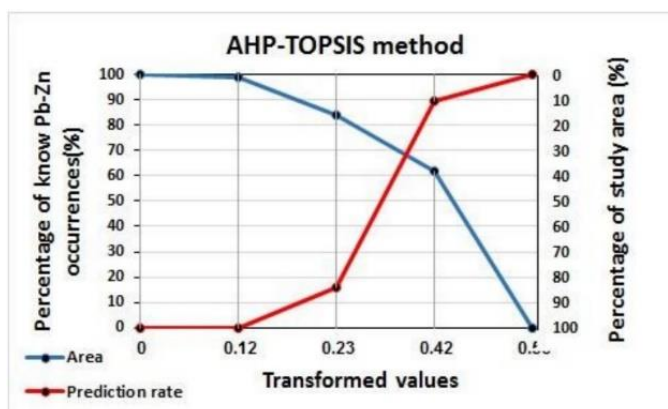


Figure 2. Prediction–area (P–A) plots of AHP-TOPSIS prospectivity models

Table 1. The obtained weights for criteria and sub-criteria using AHP method

Criteria	Sub-criteria	Weight	Criteria	Sub-criteria	Weight
PC2	class 1	0.047	Fault density	class 1	0.045
	class 2	0.118		class 2	0.094
	class 3	0.35		class 3	0.313
	class 4	0.485	Phyllic	class 1	0.042
PC4	class 1	0.031		class 2	0.103
	class 2	0.069		class 3	0.31
	class 3	0.192		class 4	0.546
	class 4	0.267	Argillic	class 1	0.042
	class 5	0.442		class 2	0.103
Carbonate	class 1	0.034		class 3	0.31
	class 2	0.057		class 4	0.546
	class 3	0.111	Iron-oxide	class 1	0.043
	class 4	0.221		class 2	0.073
	class 5	0.577		class 3	0.32
		class 4		0.564	

effectiveness of the prospectivity map produced by the AHP-TOPSIS method, Predication-Area (P–A) plot was employed [11-15] (Figure 2).

CONCLUSIONS

This study focuses on the effective implementation of a hybrid MCDM approach, AHP-TOPSIS, to create a predictive model for Pb-Zn mineralization in the Ardestan area. While each method alone has its merits, practical experience has shown that combining two or more MCDM methods leads to superior results. Opting for a combination of the two methods was decided upon, because utilizing them simultaneously results in narrowing down target areas, signifying the high precision of the hybrid method in predicting these areas. Following the creation of the overlay prospectivity map, P–A plot was employed to assess its effectiveness in predicting favourable areas. Based on the findings from this P–A plot, the intersection point in this prospectivity model is 68%. Consequently, this map can serve as the targeted map for further in-depth explorations. The outcomes indicate that the AHP-TOPSIS method can serve as an appropriate tool for quantifying the characteristics of geo-anomalies and delineating target areas in mineral exploration initiatives.

REFERENCES

[1] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2019). "BWM-ARAS: A new hybrid MCDM method for Cu prospectivity

- mapping in the Abhar area, NW Iran*". *Spatial Statistics*, 33: 100382.
- [2] 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.
- [3] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2021). "Application of AHP-TOPSIS method to model copper mineral potential in the Abhar 1:100000 geological map, NW Iran". *Researches Earth Sciences*, 12(1): 41-57. (In Persian)
- [4] Bahrami, Y., and Hassani, H. (2024). "Optimization of machine learning algorithms for remote alteration mapping". *Advances in Space Research* (In Press). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.045>.
- [5] Afzal, P., Yousefi, M., Mirzaei, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S., and Daneshvar Saein, L., (2019). "Delineation of podiform-type chromite mineralization using Geochemical Mineralization Prospectivity Index (GMPI) and staged factor analysis in Balvard area (southern Iran)". *Journal of Mining and Environment*, 10: 705-715.
- [6] Afzal, P., Farhadi, S., Boveiri Konari, M., Shamseddin Meigoony, M., and Daneshvar Saein, L. (2022). "Geochemical anomaly detection in the Irankuh District using Hybrid Machine learning technique and fractal modelling". *Geopersia*, 12(1): 191-199.
- [7] Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zia Zarifi, A., Foster, P., and Yasrebi, A. B. (2016). "Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis". *Journal of African Earth Sciences*, 119: 139-149.
- [8] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2020). "Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran". *GeoJournal*, 86: 1797-1816.
- [9] Abedi, M., Torabi, S. A. and Norouzi, G. H. (2013). "Application of fuzzy-AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: seridune copper deposit". *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 54(2): 145-164.
- [10] Abedi, M., and Norouzi, G. H. (2012). "Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for copper exploration". *Journal of Applied Geophysics*, 83: 35-45.
- [11] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2022). "Spatial modeling for mineral prospectivity using BWM and COPRAS as a new HMCDM method". *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5): 394.
- [12] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2020). "Application of the SWARA-MOORA Method for Cu Prospectivity Mapping in Abhar 1:100000 Geological Map, Iran". *Journal of Mineral Resources Engineering*, 5(2): 1-20. (In Persian)
- [13] Pazand, K., Hezarkhani, A., and Ataei, M. (2012). "Using TOPSIS approaches for predictive porphyry Cu potential mapping: A case study in Ahar-Arasbaran area (NW, Iran)". *Computers and Geosciences*, 49: 62-71.
- [14] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2018). "Investigating the capabilities of multispectral remote sensors data to map alteration zones in the Abhar area, NW Iran". *Geosystem Engineering*, 24(1): 18-30.
- [15] Aliyari, F., Afzal, P., Harati, H., and Zengqian, H. (2020). "Geology, mineralogy, ore fluid characteristics, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Kahang Cu-(Mo) porphyry deposit, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Central Iran". *Ore Geology Reviews*, 116: 103238.



دوره نهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۲۷ تا ۴۰
Vol. 9, No. 3, Autumn 2024, pp. 27-40



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

علمی-پژوهشی

تهیه نقشه پتانسیل سرب- روی در برکه اردستان با روش ترکیبی AHP-TOPSIS

مهناز محبوبی^۱، همایون کتیبه^۲، عباس مقصودی قره بلاغ^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

چکیده

ورقه یکصد هزار اردستان در بخش‌هایی از زون‌های ایران مرکزی و ارومیه دختر قرار دارد و با توجه به ویژگی‌های خاص زمین-شناسی یکی از مناطق امیدبخش برای کانی‌زایی سرب- روی در کشور است. هدف از این پژوهش مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از روش ترکیبی AHP-TOPSIS، برای افزایش میزان صحت نتایج با کمترین میزان مساحت جستجو و در نتیجه کاهش هزینه و ریسک عملیات اکتشافی است. بدین منظور در گام نخست لایه‌های اکتشافی شاهد که شامل نقشه ژئوشیمیایی حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی، نقشه فاصله از دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و اکسید آهن، نقشه چگالی گسل و در نهایت نقشه فاصله از واحدهای کربناته است، با استفاده از تابع لجستیکی در دامنه صفر تا ۱ قرار گرفت. با توجه به اهمیت شناسایی و تفکیک جوامع ژئوشیمیایی آنومال از مقادیر زمینه در اکتشاف کانسارهای فلزی از روش فرکتال عیار- مساحت به دلیل در نظر گرفتن همزمان مقادیر فراوانی و تغییرات فضایی داده‌های ژئوشیمیایی استفاده و با استفاده از این روش، جوامع آنومالی ژئوشیمیایی مرتبط با کانی‌زایی سرب و روی از زمینه تفکیک شد. در مرحله بعد تمامی معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) وزن‌دهی و با تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS) تلفیق شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده ارتباط فضایی مثبت کانی‌زایی سرب- روی تیپ MVT در ورقه اردستان، با لیتولوژی‌های مستعد کانی‌زایی است. در نهایت برای صحت‌سنجی روش به کار گرفته شده در شناسایی نواحی امیدبخش، از منحنی Prediction-Area (P-A) استفاده شد. طبق این نمودار، نقطه تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال‌شده مربوطه، مقدار ۶۸ را نشان داد. نتایج حاصل از این منحنی، توانایی قابل قبول این روش را در شناسایی نواحی امیدبخش ثابت کرد.

کلمات کلیدی

اردستان، سرب- روی، فرکتال عیار- مساحت، مدل‌سازی پتانسیل معدنی، منحنی P-A، AHP-TOPSIS.

استناد به این مقاله

محبوبی، م.، کتیبه، ه.، مقصودی قره بلاغ، ع.؛ ۱۴۰۳؛ "تهیه نقشه پتانسیل سرب- روی در برکه اردستان با روش ترکیبی AHP-TOPSIS". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره نهم، شماره ۳، ص ۴۰-۲۳.

DOI: 10.30479/JMRE.2024.18677.1644



حق مؤلف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: katibeh@aut.ac.ir

۱- مقدمه

تهیه نقشه پتانسیل معدنی نقش مهمی را در اکتشاف ذخایر معدنی دارد، زیرا مانع از اتلاف منابع مالی و انسانی می‌شود. در تهیه این نقشه‌ها باید به فاکتورهای متعددی از محدوده مورد مطالعه به طور هم‌زمان توجه کرد. به عبارتی دیگر تهیه نقشه پتانسیل معدنی فرآیندی در جهت جداسازی و تفکیک مناطق مطلوب و دارای پتانسیل معدنی از سایر نواحی موجود در منطقه است [۱].

بدین منظور لایه‌های شاهد مختلف (از جمله زمین‌شناسی، ژئوشیمی، سنجش از دور، ژئوفیزیک و نظایر آن) از محدوده مورد مطالعه جمع‌آوری و پردازش شده و در نهایت نواحی امیدبخش جهت مدلسازی پتانسیل معدنی (MPM) در محیط GIS با یکدیگر تلفیق شدند [۹-۲]. با توجه به اینکه مدلسازی پتانسیل معدنی (MPM) به تولید نقشه‌های پیشگو بر اساس معیارهای اکتشافی متعددی منجر می‌شود، از مسایل تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) محسوب می‌گردد [۱۰]. الگوریتم‌های مورد استفاده برای تلفیق داده‌های مکانی برای مدلسازی پتانسیل معدنی به دو دسته روش‌های داده محور و دانش محور تقسیم می‌شود [۳، ۴]. روش‌های داده محور در مناطقی که کارهای اکتشافی زیادی صورت گرفته (Brown Fields) به کار می‌رود که در این روش از مختصات اندیس‌ها و کانسارهای شناخته شده منطقه مورد مطالعه به عنوان نقاط آموزشی برای تعیین روابط مکانی داده‌ها استفاده می‌شود [۱۱]. انواع روش‌های داده محور که برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی به کار گرفته شده‌اند، شامل وزن شواهد [۳]، رگرسیون لجستیکی [۱۲، ۱۳]، شبکه عصبی [۱۷-۱۴]، ماشین بردار پشتیبان [۱۸، ۱۹]، جنگل تصادفی [۱۴، ۲۰، ۲۱]. در مقابل روش‌های دانش محور برای مناطقی که مطالعات اکتشافی کمتری صورت گرفته (Green Fields) مناسب است [۳]. روش‌های متداول در این زمینه شامل شاخص همپوشانی [۲۲]، تصمیم‌گیری چند معیاره [۶، ۸]، روش‌های اولویت‌بندی مانند تاپسیس [۵، ۱۵] و پرومته [۳، ۱۸] است.

در این پژوهش از روش ترکیبی AHP-TOPSIS که از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) است، برای شناسایی نواحی امیدبخش سرب- روی در ورقه یکصد هزار اردستان استفاده شده است. در این روش از AHP برای وزن‌دهی لایه‌ها و زیرلایه‌های شاهد و از روش TOPSIS برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شده است.

تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه‌حل ایده‌آل یا تاپسیس که از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) محسوب می‌شود، اولین بار توسط پازند و همکاران [۲۳] برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار گرفت. در این تکنیک تلفیق لایه‌های اکتشافی مختلف بر اساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت^۴ (PIS) و حداکثر فاصله تا راه‌حل ایده‌آل منفی^۵ (NIS) است [۱۵]. از روش ترکیبی AHP و TOPSIS برای شناسایی نواحی امیدبخش در شمال باختر ایران توسط پازند و هزارخانی [۲۴] استفاده شده است. الگوریتم AHP-TOPSIS شامل دو گام اساسی است. در گام نخست با استفاده از روش AHP مقادیر وزنی هر یک از لایه‌های اکتشافی (معیارها) بر اساس نظر کارشناسان تعیین و محاسبه می‌شود. در گام دوم، الگوریتم TOPSIS برای تلفیق لایه‌های شاهد اکتشافی به کار گرفته می‌شود [۲۵].

در مطالعه حاضر که در ورقه یکصد هزار اردستان صورت گرفته جهت مدلسازی نواحی امید بخش سرب- روی از ۸ لایه شاهد اطلاعاتی شامل دو نقشه ژئوشیمیایی پیوسته حاصل از مولفه‌های دوم و چهارم (PC2, PC4) به روش تحلیل مولفه‌های اصلی^۶ (PCA)، لایه‌های فاصله از واحدهای سنگی نفوذی و کربناته، نقشه پیوسته چگالی گسل و سه نقشه پیوسته فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک، فلیک، پروپیلیتیک استفاده شد. برای وزن‌دهی لایه‌های شاهد به وسیله روش AHP^۷ لازم است تا این نقشه‌های پیوسته مکانی به کلاس‌های مختلف تبدیل شود. یکی از روش‌های جداسازی آنومالی‌ها از مقادیر زمینه، روش فرکتال عیار- مساحت است. در این مرحله سعی شد تا با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی، حدود آستانه و محل جدایش جوامع آنومال از زمینه مشخص شود، چون در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی نمی‌توان با تکیه بر روش‌های سنتی اکتشاف و اطلاعات زمین‌شناسی، مناطق آنومال و دارای پتانسیل را از زمینه جدا کرد، از این رو برای جداسازی آنومالی عناصر سرب و روی از روش فرکتالی عیار- مساحت استفاده شده است. از مزیت‌های این روش در مقابل روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک، در نظر گرفتن توزیع فراوانی داده‌ها و موقعیت فضایی آنها به طور هم‌زمان است [۲۶]. در گام بعدی با استفاده از الگوریتم TOPSIS نقشه‌های کلاسه‌بندی شده وزن‌دار، تلفیق شدند. در نهایت صحت‌سنجی روش ترکیبی AHP-TOPSIS با استفاده از نمودار Predication-Area (P-A) [۲۷] انجام شد.

۲- مواد و روش

۱-۲- زمین‌شناسی منطقه

ورقه یکصد هزارم اردستان در حاشیه باختری زون ایران مرکزی، در زیر زون ارومیه- دختر و در بخش جنوب خاوری چهارگوش ۱:۲۵۰,۰۰۰ کاشان قرار دارد. مختصات جغرافیایی این ورقه ۵۲° ۰۰' تا ۵۲° ۳۰' طول خاوری و ۳۳° ۰۰' تا ۳۳° ۳۰' عرض شمالی است. در محدوده مورد مطالعه سنگ‌های آذرین، رسوبی و آذرآواری از پالئوزوئیک تا عهد حاضر برونزد داشته و در این میان فعالیت‌های آتش‌فشانی آئوسن گسترش چشمگیری دارند. کهن‌ترین برونزدگی از سنگ‌های پالئوزوئیک، در ناحیه مورد بررسی، مربوط به سنگ‌های آهکی و آهکی- دولومیتی با سن دونین است، که بر روی آنها به صورت‌های گسله و دگرشیب نهشته‌های ماسه‌سنگی و آهکی فوزولین‌دار قرار می‌گیرد. سنگ‌های آهکی دوران کرتاسه در قسمت باختر و جنوب باختری ورقه اردستان رخنمون دارد. بخش وسیعی از ورقه اردستان به وسیله سنگ‌های آندزیت- بازالت، آندزیت و توف دوران آئوسن، الیگوسن و میوسن پوشیده شده است [۲۸]. واحدهای کنگومرا، ماسه‌سنگ و شیل‌های آئوسن، از دیگر واحدهای زمین‌شناسی منطقه هستند [۲۸]. عرض سنگ‌های نفوذی یا گرانیتوئیدی مشتمل بر چندین توده کوچک و بزرگ مجزا با روند شمال باختری جنوب خاوری بوده که این توده‌ها، نهشته‌های کهن تا سنگ‌های آتش‌فشانی متعلق به آئوسن و الیگوسن را قطع می‌کند [۲۹]. بیشترین گسترش سنگ‌های نفوذی در منطقه مربوط به سنگ‌های دیوریتی تا مونزودیوریتی است. در ورقه اردستان، در اثر عملکرد فازهای زمین‌ساختی مختلف، دگرشکلی‌هایی عمده تا از نوع ساختمان‌های شکستگی و چین‌خوردگی‌های وابسته به آنها به وجود آمده است. مکانیسم چین‌خوردگی‌ها در ناحیه عمدتاً از نوع خمش لغزش و ظهور ریزچین‌ها است، که نوع اخیر از حرکات گسل‌های پنهان و با نفوذ توده‌های ماگمایی حاصل می‌شود. در منطقه مورد مطالعه گسترش سنگ‌های آتش‌فشانی و آتش‌فشانی- رسوبی به وسیله گسل‌های اصلی کنترل شده و به نظر می‌رسد پراکندگی آنها تابعی از گسل‌ها و یا خطواره‌های اصلی ناحیه بوده است. همینطور توده‌های نفوذی نیز در امتداد مناطق گسله جاگیر شده و محدوده گسترش آنها نیز به وسیله گسل‌ها کنترل می‌شود. از گسل‌های مهم در منطقه می‌توان به گسل اصلی میلاجرد- زفره با روند شمال باختری- جنوب خاوری و گسل عباس‌آباد با روند شمالی- جنوب و گسل‌های راندگی گچومثقال- گنجان و کوه دوشاخ اشاره کرد که روند کلی

خاوری- باختری دارند. از جمله کانسارهای مهم منطقه، تعداد ۹ اندیس سرب و روی، اندیس مس- مولیبدن ظفرقند، اندیس مس- طلائی تپه‌خرگوش و تعدادی معادن باریت، منگنز و آهن است. لازم به ذکر است که تیپ کانی‌زایی سرب و روی از نوع MVT بوده و در واحدهای کربناته دوران کرتاسه و تریاس رخ داده است [۳۰]. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده ورقه یکصد هزار اردستان نشان داده شده است.

۲-۲- روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

معیار اندازه‌گیری با شاخص، در ارزیابی هر موضوعی ضروری است. به منظور مقایسه بین جایگزین‌ها بایستی از شاخص مناسب استفاده شود. زمانی که با چندین شاخص در ارزیابی مواجه هستیم به ویژه هنگامی که معیارهای چندگانه با هم در فضا و از جنس‌های مختلف باشند، پیچیدگی کار بیشتر می‌شود. در این حالت به یک ابزار تحلیل عملی قوی برای ارزیابی نیاز خواهد بود. یکی از ابزارهای توانمند برای چنین وضعیت‌هایی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است. این روش اولین بار توسط توماس ال ساعتی [۳۳،۳۲] در سال ۱۹۸۰ مطرح شد. سه گام اصلی این فرآیند شامل ایجاد ساختار سلسله مراتبی، قضاوت مقایسه‌ای معیارها و زیرمعیارها و تلفیق نهایی براساس وزن‌های رتبه‌ای اختصاص داده شده است [۲۴]. از کاربردهای روش تحلیل سلسله مراتبی می‌توان به مدل‌سازی پتانسیل معدنی و اختصاص وزن به لایه‌های اطلاعاتی شاهد توسط کارشناسان اشاره کرد [۳۵،۳۴]. در فرآیند AHP پس از تشکیل سلسله مراتبی، عناصر به صورت زوجی از منظر اهمیت مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌شود، سپس با استفاده از این ماتریس وزن نسبی عناصر محاسبه می‌شود. در این مقایسه‌ها قضاوت‌های شفاهی تصمیم‌گیران با استفاده از جدول پیشنهاد شده توسط ساعتی [۳۶] (جدول ۱) به مقادیر کمی تبدیل و با توجه به هدف تصمیم‌گیری رتبه‌بندی می‌شود.

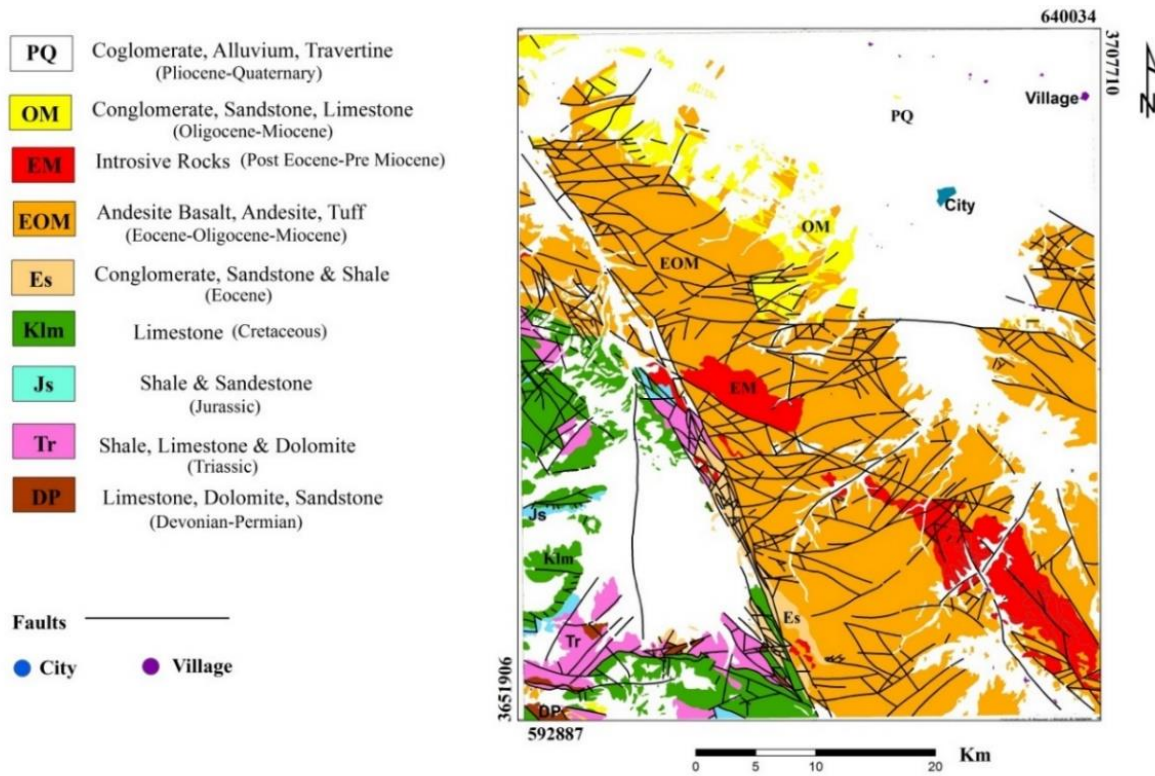
ماتریس مقایسه زوجی برای n معیار (یا زیر معیار) مختلف به صورت رابطه ۱ تعریف شده و سپس مقادیر وزنی مناسب معیارها (یا زیر معیارها) طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

(۱)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}; a_{ij} = 1 \quad \forall i$$

(۲)

$$AW = \lambda_{max} W$$



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه اردستان [۳۱]

جدول ۱: چگونگی ارزش‌گذاری شاخص‌ها نسبت به هم [۳۳]

توضیحات	وضعیت <i>i</i> نسبت به <i>j</i>	ارزش ترجیحی
گزینه یا شاخص <i>i</i> نسبت به <i>j</i> اهمیت برابر دارند و یا ارجحیتی نسبت به هم ندارند.	اهمیت برابر	۱
گزینه یا شاخص <i>i</i> نسبت به <i>j</i> کمی مهم‌تر است.	نسبتاً مهم‌تر	۳
گزینه یا شاخص <i>i</i> نسبت به <i>j</i> مهم‌تر است.	مهم‌تر	۵
گزینه یا شاخص <i>i</i> دارای ارجحیت خیلی بیشتری از <i>j</i> است.	خیلی مهم‌تر	۷
گزینه یا شاخص <i>i</i> مطلقاً از <i>j</i> مهم‌تر و قابل مقایسه با <i>j</i> نیست.	کاملاً مهم	۹
ارزش‌های میانی بین ارزش‌های ترجیحی را نشان می‌دهد		۲، ۴، ۶ و ۸

اطلاعاتی (زمین‌شناسی، ژئوشیمی و نظایر آن) گام دوم: استاندارد کردن داده‌ها و تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده از طریق رابطه زیر:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n f_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, n \text{ \& } j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

گام سوم: تعیین ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده موزون V_{ij} ؛ در این مرحله پس از مشخص شدن وزن هر یک از شاخص‌ها، یک ماتریس مربعی شامل وزن شاخص‌ها (W_j)

۲-۳- روش اولویت‌بندی با شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS)

الگوریتم TOPSIS در ابتدا توسط هووانگ و یون [۳۷] ارائه شد. در این روش، گزینه انتخاب شده بایستی کوتاه‌ترین فاصله را از جواب ایده‌آل مثبت (PIS) و دورترین فاصله را از ناکارآمدترین جواب یا راه حل ایده‌آل منفی (NIS) داشته باشد [۳۸]. برای بهره‌گیری از این تکنیک، مراحل زیر به اجرا گذاشته می‌شود:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری لایه‌های شاهد

کانی‌زایی رگه‌ای سرب- روی و داده‌های اکتشافی موجود در ورقه یکصد هزار اردستان، ۸ لایه شاهد بر اساس ژئوشیمیایی، زمین‌شناسی و دورسنجی به شرح زیر استفاده شد.

الف- معیار ژئوشیمیایی: شناسایی الگوهای رفتاری عناصر در کانسارهای مختلف بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت ویژه همبستگی ژنتیکی مثبت یا منفی عناصر تحت مطالعه، بررسی‌های دو یا چند متغیره انجام شد. بدین منظور از ۸۹۹ نمونه رسوب آبراهه‌ای که توسط سازمان زمین‌شناسی (۱۳۸۳) [۳۹] برداشت شده، استفاده گردید. سپس برای تهیه نقشه ژئوشیمیایی چند عنصری از روش تحلیل مولفه اصلی (PCA) استفاده شد. این روش ابزاری مناسب برای تبدیل مقادیر عیاری چند عنصری به حالت تک مولفه‌ای است. با استفاده از این روش مشخص شد که عناصر سرب، روی، مولیبدن، کادمیم و بیسموت بیشترین همبستگی را در مولفه دوم (PC2) و عناصر باریم، نقره، آنتیموان، جیوه و طلا بیشترین همبستگی را در مولفه چهارم (PC4) نشان داد، بنابراین نقشه نهایی پیوسته ژئوشیمیایی از مولفه‌های دوم و چهارم ترسیم شد.

ب- معیار زمین‌شناسی: برای تهیه لایه اطلاعات زمین‌شناسی از نقشه یکصد هزار ورقه اردستان که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه و تدوین شده، استفاده گردید. در منطقه مورد مطالعه کانی‌زایی سرب و روی با واحدهای کربناته متعلق به دوران تریاس و کرتاسه مطابقت دارد. قبل از خلاصه‌سازی نقشه بر اساس واحدهای مهم زمین‌شناسی مرتبط با کانی‌زایی، تمام واحدهای زمین‌شناسی منطقه به صورت دستی در محیط Arc GIS 10.3 به فرمت وکتور، دیجیت و به شیپ فایل تبدیل شدند، سپس نقشه پیوسته فاصله از واحدهای کربناته برای استفاده در مدلسازی پتانسیل معدنی تولید شد. شکستگی‌ها و کنترل‌کننده‌های خطی در زون کانی‌سازی به عنوان راهنمای اکتشافی محسوب می‌شود. ماگمای هیدروترمال از طریق شکستگی‌ها در سنگ میزبان منطقه نفوذ کرده و باعث کانی‌زایی در محل شکستگی‌ها می‌شود [۴۰]. پس یکی از عوامل کنترل‌کننده کانی‌سازی در هر منطقه گسل‌های موجود در آن است که ممکن است کانی‌سازی در امتداد آنها صورت گرفته باشد، بنابراین گسل‌های واقع در نقشه زمین‌شناسی اردستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بازبینی و به شیپ‌فایل در محیط Arc GIS 10.3 تبدیل و سپس نقشه پیوسته چگالی گسل به عنوان یکی از لایه‌های اطلاعاتی برای مدلسازی پتانسیل

تعیین می‌شود که درایه‌های قطر اصلی آن، وزن هر یک از شاخص‌ها و بقیه درایه‌ها صفر است. در ادامه به وسیله ضرب ماتریس وزن‌ها در ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده، ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده موزون به دست می‌آید.

$$V_{ij} = W_j \times r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

گام چهارم: تعیین گزینه ایده‌آل مثبت و گزینه ایده‌آل منفی

$$\text{گزینه ایده‌آل } (A_j^+) = \left[\text{بردار بهترین مقدار هر شاخص در ماتریس } V \mid V_j^+ \right] \quad (5)$$

$$\text{گزینه ایده‌آل } (A_j^-) = \left[\text{بردار بهترین مقدار هر شاخص در ماتریس } V \mid V_j^- \right] \quad (6)$$

برای شاخص‌های مثبت، بهترین مقدار همان بیشترین مقدار و برای شاخص‌های منفی، بهترین مقدار، کمترین است. گام پنجم: به دست آوردن فاصله هر گزینه از گزینه ایده‌آل و گزینه ضد ایده‌آل

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

S_i^+ برابر با فاصله هر گزینه تا گزینه ایده‌آل و S_i^- برابر با فاصله هر گزینه تا گزینه ضد ایده‌آل است.

گام ششم: محاسبه شاخص نزدیکی نسبی هر گزینه با گزینه ایده‌آل؛ بدین منظور شاخص نزدیکی نسبی هر گزینه (Cl_i^*) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید و در انتها براساس مقدار Cl_i^* رتبه‌بندی انجام می‌گیرد.

$$Cl_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (9)$$

۳- مدل‌سازی، بحث و بررسی

به طور کلی به دلیل شرایط پیچیده زمین‌شناسی، شناسایی مناطق امیدبخش و پر پتانسیل با دشواری‌های زیادی همراه است. در این راستا مدل‌سازی پتانسیل معدنی که از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره محسوب می‌شود، در تعیین مناطق پر پتانسیل کمک قابل توجهی می‌کند. با توجه به تیپ

معدنی تهیه گردید.

شکل ۲ نشان داده شده است.

$$i = \frac{\max(x) - \min(x)}{2}, S = \frac{2 \ln 99}{\max(x) - \min(x)} \quad (11)$$

۲-۳- گسسته‌سازی نقشه‌های شاهد

در این پژوهش برای گسسته‌سازی و کلاسه‌بندی مقادیر پیوسته مکانی لایه‌های اطلاعاتی، از روش فرکتال عیار-مساحت (C-A)^۸ استفاده شد. تعیین حد آستانه، آنومالی احتمالی و آنومالی ممکن در هندسه فرکتال به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که یکی از آنها روش عیار-مساحت است. این روش که برای اولین بار توسط آقای چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد داده شد، مبتنی بر مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه مورد مطالعه اشغال کرده است. بدین ترتیب که هرچه عیار عنصر افزایش یابد، مقدار مساحت اشغالی به وسیله آن کاهش می‌یابد. یکی از مزیت‌های عمده مدل‌های فرکتالی نسبت به روش‌های آماری، آن است که موقعیت فضایی نمونه‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود [۲۶].

این روش بر اساس وجود روابط قانون توانی بین عیار و مساحت اشغال شده به وسیله منحنی‌های کنتوری معرف عیار، بر اساس رابطه ۱۲ ارایه شده است [۴۴، ۴۳، ۳]:

$$A (>\rho) \propto \rho^{-D} \quad (12)$$

که در آن:

A: مساحت اشغال شده به وسیله کنتورهای معرف غلظت ρ
D: بعد فرکتال است.

در این روش سلول‌هایی که مقدار عیار خاصی دارند، شمارش می‌شوند و سپس تعداد سلول‌ها در مساحت هر سلول ضرب و به صورت صعودی مرتب می‌شوند، سپس مقادیر مساحت‌های متناظر به صورت تجمعی محاسبه می‌گردد. در مرحله بعد، از مقادیر مساحت و عیار متناظرش لگاریتم گرفته و نمودار تمام لگاریتمی عیار-مساحت ترسیم می‌شود. از آنجا که مدل فرکتالی عیار-مساحت نوعی روابط نمایی بین پارامتر عیار و مساحت برقرار می‌کند، بنابراین نمودار آنها در یک دستگاه مختصات تمام لگاریتمی به صورت خط راست درمی‌آید. در نمودارهای حاصل، وجود شکستگی و تغییر شیب خط برازش شده نشان‌دهنده تغییر بعد فرکتال و در نتیجه تغییر جامعه و نوع توزیع عنصر است که به این صورت می‌توان حد آستانه جوامع را تعیین کرد [۴۹، ۴۵، ۲۷]. با افزایش عیار، مساحت کم

ج- معیار دورسنجی: سیالات گرمایی حین عبور از میان سنگ‌های پوسته زمین، به دگرسانی آنها منجر می‌شوند. تشخیص نوع دگرسانی، در تعیین الگوی مناسب برای کانی‌زایی منطقه مفید است [۴۱]. از مهم‌ترین مزایای استفاده از روش سنجش از دور شناسایی دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌زایی، پتانسیل‌یابی معدنی و تهیه نقشه آلتراسیون هیدروترمال در کمترین زمان ممکن است. با توجه به اینکه زون‌های آلتراسیون فلیک و پتاسیک و فرآیند ثانویه اکسید آهن برای شناسایی کانی‌زایی سرب و روی حائز اهمیت است، بنابراین برای بارزسازی دگرسانی‌های آرژیلیک، فلیک و اکسید/هیدروکسید آهن از روش PCA استفاده شد که در این راستا از باندهای ۱، ۴، ۶ و ۷ استر برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک و از باندهای ۱، ۳، ۵ و ۶ استر برای بارزسازی دگرسانی فلیک و همچنین از باندهای ۲، ۴، ۵ و ۶ تصاویر OLI برای بارزسازی اکسید/هیدروکسید آهن استفاده گردید [۴۲]. در نهایت آلتراسیون‌های تشخیص داده شده در نرم‌افزار ENVI، به صورت شیپ فایل ذخیره و نقشه‌های نهایی پیوسته فاصله از آلتراسیون‌های آرژیلیک، فلیک و اکسید آهن در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3 تهیه شد.

۳-۱- فازی‌سازی لایه‌های اکتشافی

لایه‌های اطلاعاتی که در بخش قبل معرفی شد مقدار بیشینه و کمینه متفاوتی دارند؛ بنابراین برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی لازم است که به یک دامنه یکسانی منتقل شوند. در این پژوهش از تابع سیگموئیدی لجستیک جهت انتقال داده‌ها به فضای مثبت و با دامنه (۰-۱) استفاده شد. مزیت این تابع این است که با استفاده از مقادیر مناسب i و s ، اعداد صحیح و مقادیر شناور در محدوده‌های مختلف را می‌توان به دامنه (۰-۱) تبدیل کرد [۲۷]:

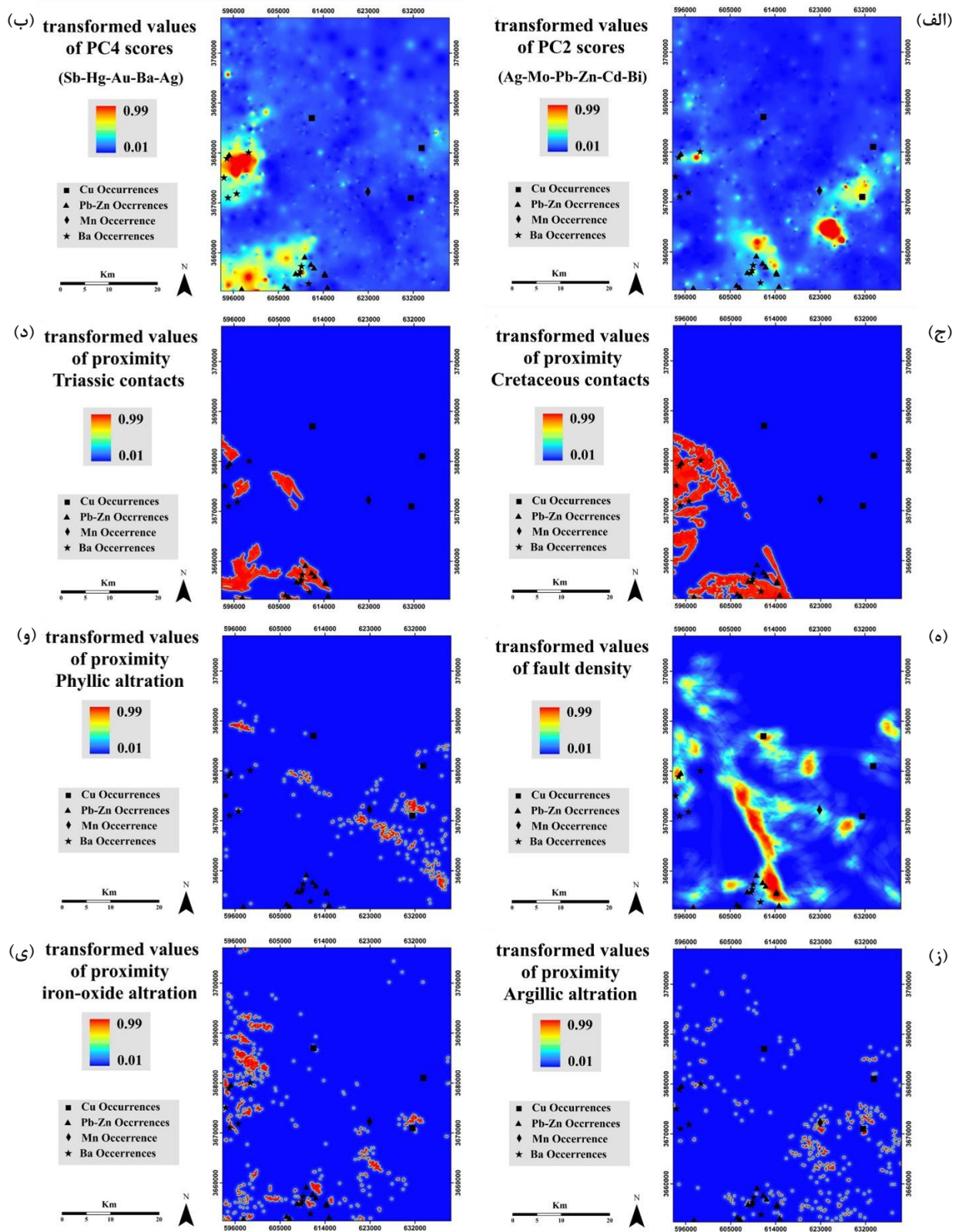
$$F_x = \frac{1}{1 + e^{-s(x-i)}} \quad (10)$$

که در آن:

x و F_x : به ترتیب مقادیر تبدیل یافته و مقادیر اولیه داده‌های ژئوشیمیایی

s و i : به ترتیب مقادیر شیب و نقطه عطف تابع لجستیکی هستند که از رابطه ۱۱ قابل محاسبه است.

نقشه‌های فازی‌سازی شده لایه‌های شاهد اکتشافی در



شکل ۲: لایه‌های شاهد مختلف فازی سازی شده با استفاده از تابع لجستیک سیگموئیدی: الف) نقشه آنومالی ژئوشیمیایی مقادیر PC2، ب) نقشه آنومالی ژئوشیمیایی مقادیر PC4، ج) نقشه فاصله از توده‌های کرتاسه، د) نقشه فاصله از توده‌های تریاس، ه) نقشه چگالی گسل، و) نقشه فاصله از دگرسانی فیلیک، ز) نقشه فاصله از دگرسانی آرزلیک، ی) نقشه فاصله از دگرسانی اکسید آهن

یک از معیارها و زیرمعیارها وزن مناسبی اختصاص داده شد (جدول ۲ و ۳). در گام نهایی ماتریس تصمیم نهایی تشکیل و با استفاده از روش TOPSIS بر اساس نزدیکی به راه حل ایده آل مثبت و دوری از ضد ایده آل‌ها وزن دهی و در نهایت رتبه بندی و نقشه پتانسیل نهایی تشکیل شد (شکل ۵).

جدول ۲: وزن‌های اختصاص داده شده به لایه‌های شاهد جهت پتانسیل یابی سرب- روی با استفاده از روش AHP

معیار	وزن‌ها	نسبت ناسازگاری
فاکتور PC2	۰٫۲۲۴	۰٫۰۳
فاکتور PC4	۰٫۱۶۶	
کربنات	۰٫۱۵۴	
چگالی گسل	۰٫۱۲	
دگرسانی فیلیک	۰٫۰۵۶	
دگرسانی آرژیلیک	۰٫۰۵۶	
اکسید آهن	۰٫۰۶۹	

جدول ۳: اوزان اختصاصی به زیر لایه‌های معیارهای شاهد اطلاعاتی با استفاده از روش AHP

معیار	زیرمعیار	وزن	معیار	زیرمعیار	وزن
فاکتور PC2	کلاس ۱	۰٫۰۴۷	فاکتور PC4	کلاس ۱	۰٫۰۳۱
	کلاس ۲	۰٫۱۱۸		کلاس ۲	۰٫۰۶۹
	کلاس ۳	۰٫۳۵		کلاس ۳	۰٫۱۹۲
کلاس ۴	کلاس ۱	۰٫۴۸۵	کلاس ۴	کلاس ۱	۰٫۲۶۷
	کلاس ۲	۰٫۳۱		کلاس ۲	۰٫۴۴۲
کلاس ۱	کلاس ۱	۰٫۰۴۲	کلاس ۱	کلاس ۱	۰٫۰۳۴
	کلاس ۲	۰٫۱۰۳		کلاس ۲	۰٫۰۵۷
کلاس ۳	کلاس ۳	۰٫۳۱	کلاس ۳	کلاس ۳	۰٫۱۱۱
	کلاس ۴	۰٫۵۴۶		کلاس ۴	۰٫۲۲۱
کلاس ۱	کلاس ۱	۰٫۰۴۲	کلاس ۱	کلاس ۱	۰٫۵۷۷
	کلاس ۲	۰٫۱۰۳		کلاس ۲	۰٫۰۷۳
کلاس ۳	کلاس ۳	۰٫۳۱	کلاس ۳	کلاس ۳	۰٫۳۲
	کلاس ۴	۰٫۵۴۶		کلاس ۴	۰٫۵۶۴
کلاس ۱	کلاس ۱	۰٫۰۴۳	کلاس ۱	کلاس ۱	۰٫۰۴۳
	کلاس ۲	۰٫۰۷۳		کلاس ۲	۰٫۰۷۳
کلاس ۳	کلاس ۳	۰٫۳۲	کلاس ۳	کلاس ۳	۰٫۳۲
	کلاس ۴	۰٫۵۶۴		کلاس ۴	۰٫۵۶۴

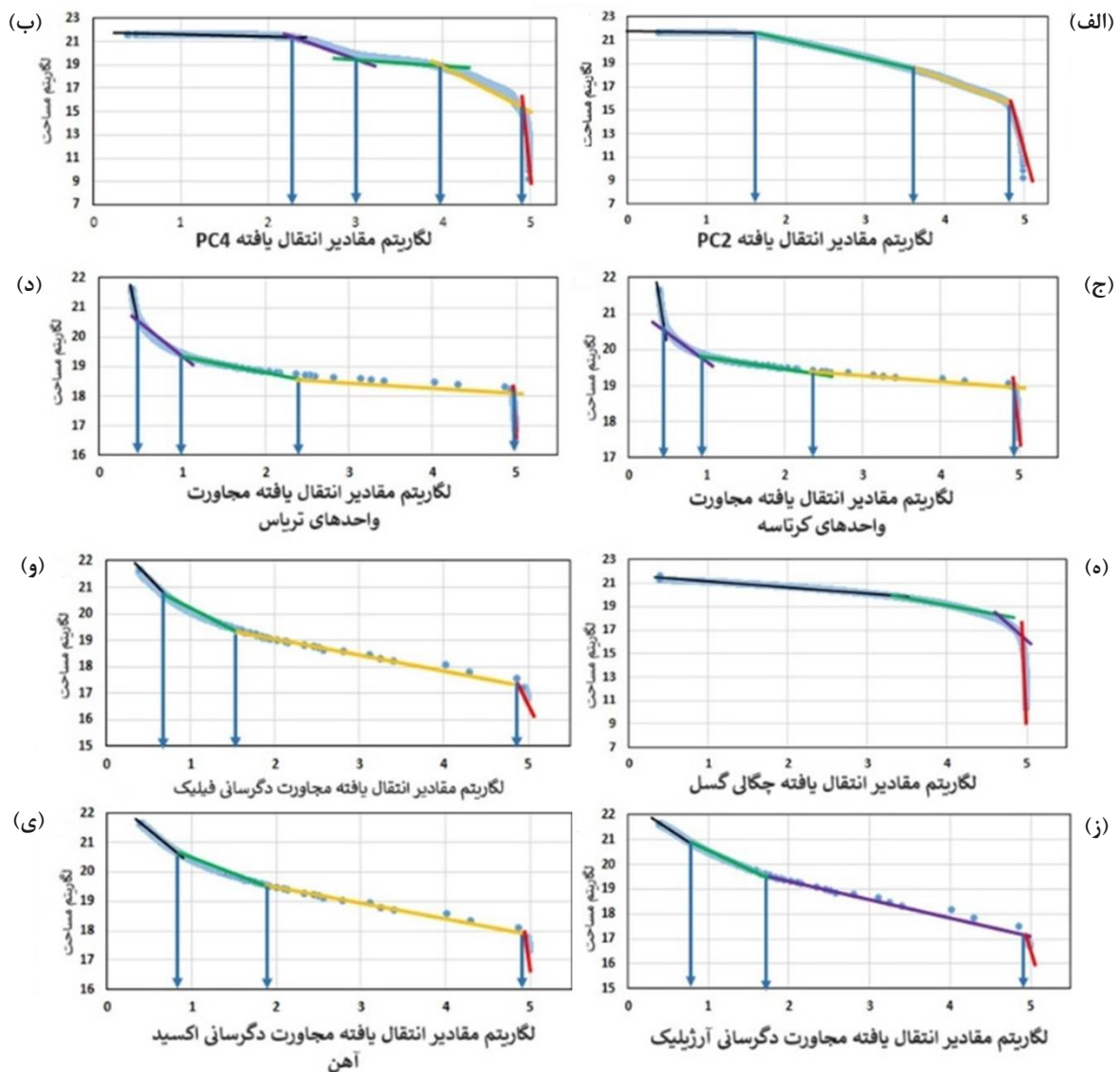
شده که این نشانگر کاهش مساحت از سمت زمین به سمت مناطق آنومال است. اگر سطح ژئوشیمیایی تک فرکتالی باشد، یک رابطه خطی مستقیم منفرد ظاهر می‌شود (مونو فرکتال)؛ در حالی که برای سطوح مولتی فرکتال مقادیر داده روی چندین خط مستقیم خواهد افتاد. شکستگی‌های بین خطوط مستقیم روی این نمودارها بیان کننده وجود جوامع مختلف و مقادیر متناظر نقاط شکست این خطوط به عنوان عیار حد برای جدایش مقادیر زمینه (ناحیه‌ای یا محلی) از مقادیر آنومال است [۴۴، ۱۳، ۱۲، ۴]. برای رسم نمودار عیار مساحت لازم است نقشه کنتروری و یا نقشه شبکه بندی شده منطقه اکتشافی رسم شود تا بتوان مقادیر عیار و مساحت مربوط به عیار مورد نظر را محاسبه کرد. نخستین کاری که در این مرحله صورت پذیرفت، شبکه بندی محدوده مورد مطالعه بود که بر اساس آن محدوده اکتشافی به سلول‌هایی با ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ متر تقسیم بندی شد، سپس با استفاده از روش مجذور عکس فاصله IDW میزان عیار برای هر یک از عناصر مس، سرب و روی در هر سلول برآورد شد. با توجه به این که مساحت هر سلول معلوم و برابر ۱۰۰۰۰ متر مربع و نیز مقدار عیار هر عنصر برای هر سلول محاسبه شد و بر این اساس منحنی‌های لگاریتمی عیار- مساحت برای هر یک از لایه‌های شاهد ترسیم شد [۴۷، ۴۶].

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای تمام لگاریتمی و نقشه‌های شاهد کلاسه بندی شده عیار- مساحت، نشان داده شده است.

۳-۳- تلفیق لایه‌های اکتشافی

در این پژوهش از روش تلفیقی AHP-TOPSIS به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره، برای شناسایی نواحی امیدبخش سرب- روی که شامل سه گام به شرح ذیل است، استفاده شد [۴۸، ۲۴]:

(۱) تعیین معیارها برای استفاده در مدل سازی، (۲) تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش AHP و (۳) تلفیق نهایی و تعیین نواحی امیدبخش با استفاده از روش TOPSIS. در گام نخست ۸ معیار اکتشافی متناسب با نظر کارشناس شامل دو نقشه آنومالی ژئوشیمیایی سرب- روی حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی، دو نقشه فاصله از واحدهای سنگی کرتاسه و تریاس، نقشه چگالی گسل‌های منطقه و در نهایت نقشه‌های فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن در نظر گرفته شد، سپس برای معیارهای ذکر شده، ماتریس مقایسه زوجی تشکیل و بر اساس روش AHP به هر

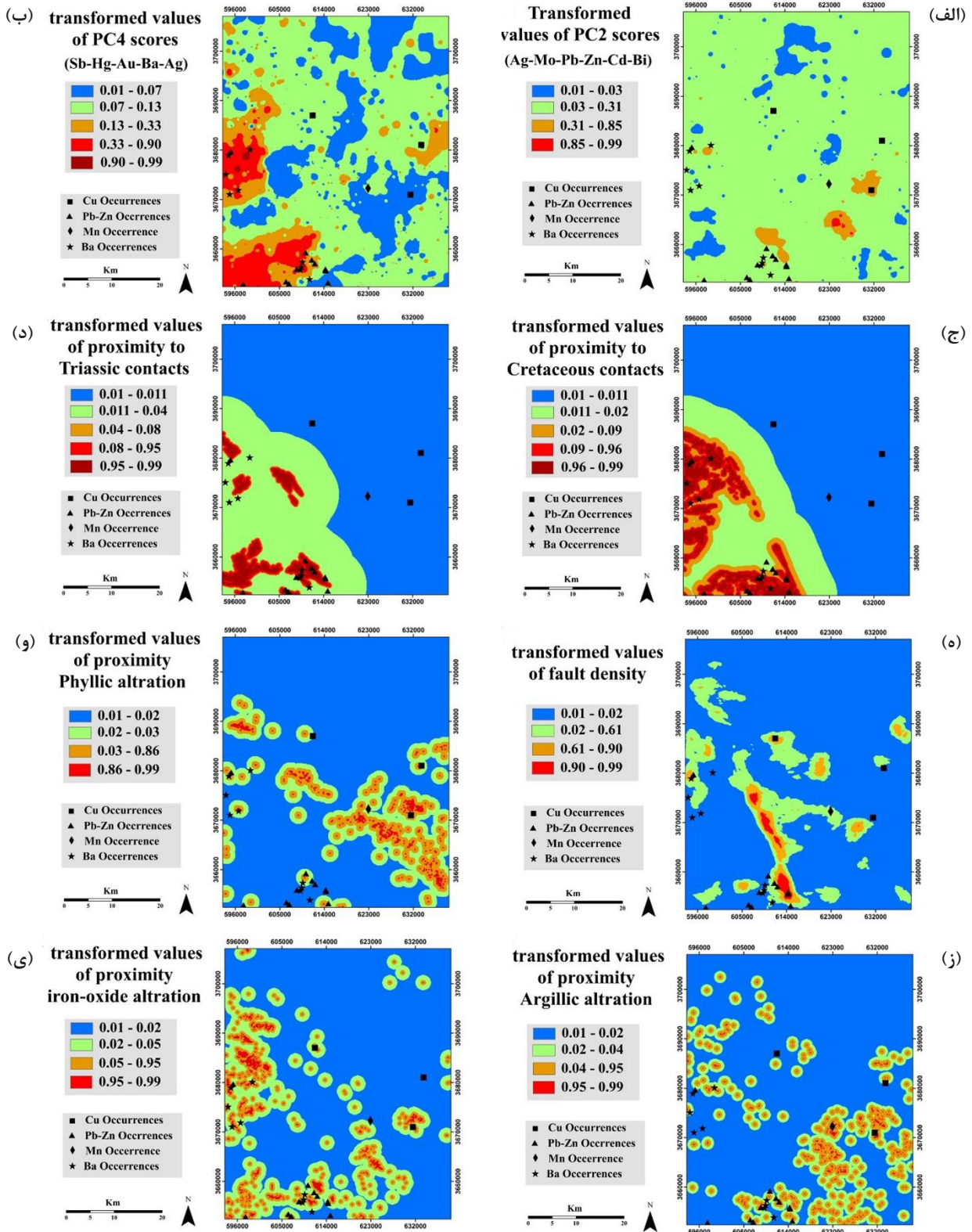


شکل ۳: نمودار تمام لگاریتمی حاصل از روش فرکتالی عیار- مساحت مربوط به: الف) آنومالی ژئوشیمیایی PC2 حاصل از روش PCA (که به عنوان فاکتور مهم برای عناصر سرب، روی، مولیبدن، کادمیوم و بیسموت در نظر گرفته شد)، ب) آنومالی ژئوشیمیایی PC4 حاصل از روش PCA (که بعنوان فاکتور مهم برای عناصر باریم، نقره، آنتیموان، جیوه و طلا در نظر گرفته شد)، ج) فاصله از واحدهای کرتاسه، د) فاصله از واحدهای تریاس، ه) چگالی گسل‌های منطقه، و) فاصله از دگرسانی فیلیک با استفاده از روش PCA، ز) فاصله از دگرسانی آرژیلیک با استفاده از روش PCA، ی) فاصله از دگرسانی اکسید آهن با استفاده از روش PCA

از کارآمدترین روش‌ها در ارایه خصوصیات تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند [۲۴، ۴۹، ۵۰، ۵۱]. بدین منظور از نقشه‌هایی کلاسه‌بندی شده عیار- مساحت، برای تعیین تعداد اندیس‌های قرار گرفته در هر کلاس و حدود آستانه استفاده شد، سپس نمودار نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال شده برای هر کلاس از نقشه‌های نهایی نسبت به حد آستانه متناظرش رسم

۳-۴- اعتبارسنجی مدل پتانسیل معدنی

برای تعیین اعتبار مدل‌ها و یا انتخاب بهترین مدل از میان مدل‌های پیش‌گوی پتانسیل معدنی، سنجش اعتبار مدل‌های ایجاد شده امری مهم است. در این پژوهش برای مقایسه و ارزیابی توانایی نقشه نهایی پتانسیل‌یابی سرب- روی ورقه یکصد هزار اردستان در پیش‌بینی مناطق هدف، از روش صحت‌سنجی Prediction- Area (P-A) plot استفاده شد. این نمودار



شکل ۴: نقشه کلاسه‌بندی شده حاصل از روش فرکتالی عیار- مساحت مربوط به: (الف) آنومالی ژئوشیمیایی PC2، (ب) آنومالی ژئوشیمیایی PC4، (ج) فاصله از واحدهای کرتاسه، (د) فاصله از واحدهای تریاس، (ه) چگالی گسل‌های منطقه، (و) فاصله از دگرسانی فیلیک، (ز) فاصله از دگرسانی آرژیلیک، (ح) فاصله از دگرسانی اکسید آهن

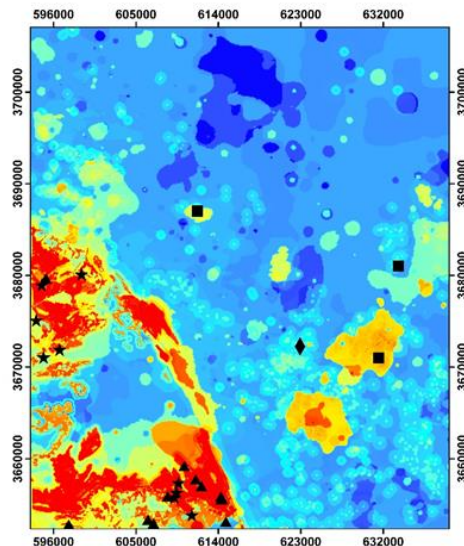
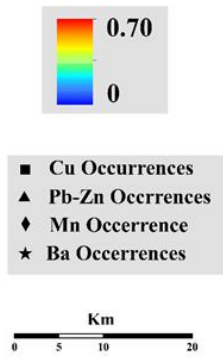
لایه اکتشافی شامل نقشه‌های ژئوشیمیایی حاصل از مولفه دوم و چهارم (PC2, PC4)، نقشه‌های فاصله از واحدهای سنگی کرتاسه و تریاس، نقشه چگالی گسل و نقشه‌های فاصله از آلتراسیون‌های فیلیک و آرژیلیک و اکسید آهن پس از فازی‌سازی به وسیله تابع لجستیک سیگموئیدی، با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت برای تعیین جوامع مختلف، گسسته‌سازی شد. سپس با استفاده از روش ترکیبی AHP-TOPSIS تلفیق نهایی لایه‌ها صورت گرفت [۵۲، ۲۵، ۱۰]. این روش ترکیبی که بر مبنای روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است، داده- دانش محور محسوب می‌شود. استفاده هم زمان این دو روش در کنار یکدیگر، به کاهش مساحت مناطق امیدبخش و افزایش صحت پیش‌بینی منجر می‌شود.

شد. نقطه تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال شده معرف میزان موفقیت مدل در پیش‌بینی مناطق هدف است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نقطه تقاطع عدد ۶۸ را نشان می‌دهد که میزان توانمندی مدل AHP-TOPSIS را در شناسایی نواحی امیدبخش سرب- روی نشان می‌دهد.

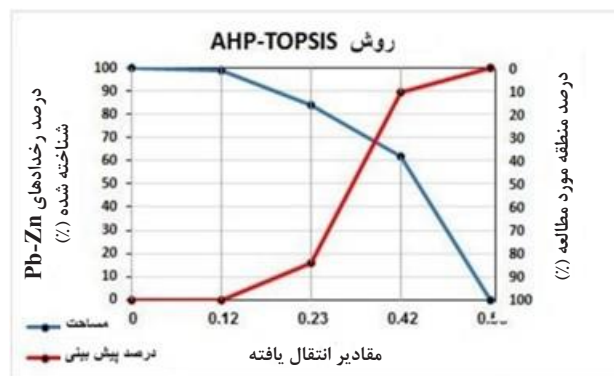
۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش ترکیبی AHP-TOPSIS به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره، برای تلفیق لایه‌های اکتشافی و مدل‌سازی پتانسیل معدنی سرب- روی در ورقه یکصد هزار اردستان استفاده شد. در گام نخست ۸

Pb-Zn potential mapping by AHP-TOPSIS



شکل ۵: نقشه پتانسیل نهایی مناطق امیدبخش اکتشاف سرب- روی با استفاده از روش AHP-TOPSIS



شکل ۶: نمودار P-A مربوط به مدل‌های پتانسیل معدنی حاصل از روش AHP-TOPSIS

modeling in Aghkand Area, NW Iran". Arabian Journal of Geosciences, 12(7): 248-257.

[8] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2020). "Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran". GeoJournal, 86: 1797-1816.

[9] Ghaeminejad, H., Abedi, M., Afzal, P., Zaynali, F., and Yousefi, M. (2020). "A fractal-based outranking approach for integrating geochemical, geological, and geophysical data". Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 61(4): 555-588.

[۱۰] بهرامی، ی.، حسنی، ی.، مقصودی، ع.؛ ۱۴۰۰؛ "استفاده از روش ترکیبی AHP-TOPSIS به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس در ورقه یکصد هزار ابهر، شمال غرب ایران". پژوهش‌های دانش زمین، سال دوازدهم، شماره ۴۵، ص ۵۷-۴۱.

[11] Abedi, M., Torabi, S. A. and Norouzi, G. H. (2013). "Application of fuzzy-AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: seridune copper deposit". Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 54(2): 145-164.

[12] Chen, C., Dai, H., Liu, Y., and He, B. (2011). "Mineral prospectivity mapping integrating multisource geology spatial data sets and logistic regression modelling". Proceedings 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services, Fuzhou, China, 214-217. DOI: 10.1109/ICSDM.2011.5969034.

[13] Porwal, A., González-Álvarez, I., Markwitz, V., McCuaig, T. C., Mamuse, A. (2010a). "Weights-of-evidence and logistic regression modeling of magmatic nickel sulfide prospectivity in the Yilgarn Craton, Western Australia". Ore Geology Reviews, 38: 184-196.

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

[15] Abedi, M., and Norouzi, G. H. (2015). "A general framework of TOPSIS method for integration of airborne geophysics, satellite imagery, geochemical and geological data". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 46: 31-44.

[16] Oh, H. J., and Lee, S. (2010). "Application of artificial neural network for gold-silver deposits potential mapping: a case study of Korea". Natural Resources Research, 19(2): 103-124.

[17] Harris, D. P., Zurcher, L., Stanley, M., Marlow, J., and Pan, G. (2003). "A comparative analysis of favourability mappings by weights of evidence probabilistic neural networks, discriminant analysis, and logistic regression". Natural Resources Research,

در این روش ترکیبی از AHP جهت وزن دهی به معیارها و زیرمعیارها و از روش TOPSIS برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی استفاده شد.

نتایج استفاده از این روش ترکیبی نشان داد که اندیس‌های معدنی سرب و روی تیپ MVT که در بخش‌های جنوب و جنوب باختری منطقه مورد مطالعه که در واحدهای کربناته کرتاسه و تریاس واقع شدند [۵۴،۵۳،۳۹،۳۰]؛ منطبق بر آنومالی‌های کانی‌زایی است. در نهایت صحت‌سنجی این مدل با نمودار Prediction-Area (P-A) صورت گرفت. محل تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال شده عدد ۶۸ را نشان می‌دهد که معرف میزان توانایی مدل به دست آمده در معرفی نواحی امیدبخش سرب-روی است، بنابراین می‌توان از این مدل در انتخاب و اولویت‌بندی مناطق هدف برای انجام عملیات اکتشاف بعدی بهره گرفت.

۵- مراجع

[1] Bahrami, Y., and Hassani, H. (2024). "Optimization of machine learning algorithms for remote alteration mapping". Advances in Space Research (In Press). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.045>.

[۲] بهرامی، ی.، حسنی، ی.، مقصودی، ع.؛ ۱۳۹۹؛ "به کارگیری روش SWARA-MOORA به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ ابهر، ایران". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره پنجم، شماره ۲، ص ۲۰-۱.

[3] Carranza, E. J. M. (2008). "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS". Elsevier, 11: pp. 365.

[4] Li, Q., Chen, G., and Luo, L. (2023). "Mineral prospectivity mapping using attention-based convolutional neural network". Ore Geology Reviews, 156: 105381.

[5] Nouri, R., Jafari, M. R., Arian, M., Feizi, F., and Afzal, P. (2013). "Prospection for copper mineralization with contribution of remote sensing, geochemical and mineralogical data in Abhar 1:100,000 sheet, Nw Iran". Archives of Mining Sciences, 58(4): 1071-1084.

[6] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2019). "BWM-ARAS: A new hybrid MCDM method for Cu prospectivity mapping in the Abhar area, NW Iran". Spatial Statistics, 33: 100382.

[7] Shahsavari, S., Jafari Rad, A., Afzal, P., Nezafati, N., and Akhavan Aghdam, M. (2019). "Prospecting for polymetallic mineralization using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) and fractal

- deposit, Central Iran". Neues Jahrbuch Mineralogie, 197: 145-164.
- [29] Aliyari, F., Afzal, P., Harati, H., and Zengqian, H. (2020). "Geology, mineralogy, ore fluid characteristics, and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology of the Kahang Cu-(Mo) porphyry deposit, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Central Iran". Ore Geology Reviews, 116: 103238.
- [30] Sabahi, F., Lotfi, M., Afzal, P., and Nezafati, N. (2019). "Geological, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Gardaneshir Zn-Pb deposit, Central Iran". Geopersia, 9(2): 221-232.
- [31] رادفر، ج.، امینی‌چهرق، م.؛ ۱۳۷۸؛ "نقشه و شرح نقشه زمین‌شناسی ورقه اردستان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰". سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [32] Saaty, T. L. (1980). "The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation". McGraw-Hill, New York.
- [33] Saaty, T. L. (1990). "Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world". RWS Publications, University of Pittsburgh, pp. 292.
- [34] Moreira, F. R., Almeida-Filho, R., and Câmara, G. (2003). "Spatial Analysis techniques applied to mineral prospecting: an evaluation in the Poços de Caldas Plateau". Brazilian Journal of Geology, 33(2): 183-190.
- [35] 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.
- [36] Saaty, T. L. (2005). "The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making". In: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, Springer New York, 345-405.
- [37] Hwang, C. L., and Yoon, K. (1981). "Methods for multiple attribute decision making". In: Multiple Attribute Decision Making, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 186, Springer, Berlin, Heidelberg, 58-191.
- [38] Samimi Namin, F., Shahriar, K., Atae-Pour, M., and Deghani, H. (2008). "A new model for mining method selection of mineral deposit based on fuzzy decision making". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(7): 385-395.
- [39] سازمان اکتشافات معدنی کشور؛ ۱۳۸۳؛ "گزارش اکتشاف ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه یکصد هزار اردستان". سازمان اکتشافات معدنی کشور.
- 12: 241-255.
- [18] Abedi, M., Torabi, S. A., Norouzi, G. H., Hamzeh, M., and Elyasi, G. R. (2012a). "PROMETHEE II: a knowledge-driven method for copper exploration". Computers & Geosciences, 46: 255-263.
- [19] Zuo, R., and Carranza, E. J. M. (2011). "Support vector machine: a tool for mapping mineral potential". Comput. Geosci, 37(12): 1967-1975.
- [20] Carranza, E. J. M., and Laborte, A. G. (2015a). "Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: application of random forests algorithm". Ore Geology Reviews, 71: 777-787.
- [21] Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zia Zarifi, A., Foster, P., and Yasrebi, A. B. (2016). "Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis". Journal of African Earth Sciences, 119: 139-149.
- [22] Mirzaei, M., Afzal, P., Adib, A., Khalajmasoumi, M., and Zarifi, A. Z. (2014). "Prospection of iron and manganese using index overlay and fuzzy logic methods in Balvard 1:100,000 sheet, Southeastern Iran". Iranian Journal of Earth Sciences, 6: 1-11.
- [23] Pazand, K., Hezarkhani, A., and Ataei, M. (2012). "Using TOPSIS approaches for predictive porphyry Cu potential mapping: A case study in Ahar-Arasbaran area (NW, Iran)". Computers and Geosciences, 49: 62-71.
- [24] Pazand, K., and Hezarkhani, A. (2015). "Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahroud area (NW, Iran)". Earth Science Informatics, 8(1): 207-220.
- [25] Asadi, H. H., Sansoleimani, A., Fatehi, M., and Carranza, E. J. M. (2016). "An AHP-TOPSIS Predictive Model for District-Scale Mapping of Porphyry Cu-Au Potential: A Case Study from Salafchegan Area (Central Iran)". Natural Resources Research, 25: 417-429.
- [26] Shafieyan, F., and Abdideh, M. (2018). "Application of concentration-area fractal method in static modelling of hydrocarbon reservoirs". Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9: 1197-1202.
- [27] 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.
- [28] Ostadhosseini, A., Barati, M., Afzal, P., and Lee, I. (2021). "Geochemical and microthermometric characteristics of the Davaran Manto-type copper

- Information Science, 28: 1336-1354.
- [49] Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2003). "Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India". *Natural Resources Research*, 12: 155-171.
- [50] Abedi, M., and Norouzi, G. H. (2012). "Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for copper exploration". *Journal of Applied Geophysics*, 83: 35-45.
- [51] Abedi, M., Norouzi, G. H., and Bahroudi, A. (2012a). "Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas". *Computers & Geosciences*, 46: 272-283.
- [52] De Araújo, C. C., and Macedo, A. B. (2002). "Multicriteria geologic data analysis for mineral favorability mapping: application to a metal sulphide mineralized area, Ribeira Valley Metallogenic Province, Brazil". *Natural Resources Research*, 11(1): 29-43.
- [53] Sadeghi, B., Afzal, P., Moarefvand, P., and Khodashenas, N. (2012). "Application of Concentration-Area fractal method for determination of Fe geochemical anomalies and the background in Zaghia area, Central Iran". 34th International Geological Congress Unearthing our Past and Future.
- [54] Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2002b). "Where porphyry copper deposits are spatially localized? A case study in Benguet province, Philippines". *Natural Resources Research*, 11: 45-59.
- [40] Forster, H. (1978). "Mesozoic - Cenozoic metallogensis in Iran". Geological Society London, 135: 443-445.
- [41] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2018). "Investigating the capabilities of multispectral remote sensors data to map alteration zones in the Abhar area, NW Iran". *Geosystem Engineering*, 24(1): 18-30.
- [42] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2022). "Spatial modeling for mineral prospectivity using BWM and COPRAS as a new HMCDM method". *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5): 394.
- [43] Zuo, R., Zhang, Z., Zhang, D., Carranza, J., and Wang, H. (2016). "Evaluation of uncertainty in mineral prospectivity mapping due to missing evidence: a case study with skarn-type Fe deposits in Southwestern Fujian Province, China". *Ore Geology Reviews*, 71: 502-515.
- [44] Yilmaz, H., Behnam Sadeghi, B., and Cohen, D. (2022). "The efficiency of fractal techniques in geochemical anomaly delineation within BLEG and <180 μm stream sediments in Western Turkey". *Journal of Geochemical Exploration*, 236: 106957.
- [45] Farhadi, S., Afzal, P., Boveiri, Konari, M., Daneshvar Saein, L., and Sadeghi, B. (2022). "Combination of Machine Learning Algorithms with Concentration-Area Fractal Method for Soil Geochemical Anomaly Detection in Sediment-Hosted Irankuh Pb-Zn Deposit, Central Iran". *Minerals*, 12(6): 689.
- [46] Afzal, P., Yousefi, M., Mirzaei, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S., and Daneshvar Saein, L., (2019). "Delineation of podiform-type chromite mineralization using Geochemical Mineralization Prospectivity Index (GMPI) and staged factor analysis in Balvard area (southern Iran)". *Journal of Mining and Environment*, 10: 705-715.
- [47] Afzal, P., Farhadi, S., Boveiri Konari, M., Shamseddin Meigoony, M., and Daneshvar Saein, L. (2022). "Geochemical anomaly detection in the Irankuh District using Hybrid Machine learning technique and fractal modelling". *Geopersia*, 12(1): 191-199.
- [48] Rodriguez-Galiano, V. F., Chica-Olmo, M., and Chica-Rivas, M. (2014). "Predictive modelling of gold potential with the integration of multisource information based on random forest: a case study on the Rodalquilar area, Southern Spain". *International Journal of Geographical*

¹ Mineral Prospectivity Mapping

² Multi-Criteria Decision Making

³ PROMETHEE

⁴ Positive Ideal Solution

⁵ Negative Ideal Solution

⁶ Principal Component Analysis

⁷ Analytical Hierarchy Process

⁸ Concentration- Area