Journal of Mineral Resources Engineering, 8(1): 71-93, (2023)

Imam Khomeini International University
Vol. 8, No. 1, Spring 2023

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

Research Paper

Choosing the Appropriate Strategy of 4.0 Industries for the Implementation of Intelligent Methods in Mining Engineering

Poormirzaee R.[1*], Hosseini S.Sh.[2], Taghizadeh R.[3]

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran
2- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3- Associate Professor, Dept. of Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Received: 20 Dec. 2021 **Accepted: 06 Mar. 2022**

Abstract: The application of new technologies has a significant effect on increasing the efficiency and improving the productivity of production factors in various industries, such as the mining industry. This requires implementing correct and practical strategies, and any incorrect procedure can cause companies and businesses to waste resources. Accordingly, the main aim of this study is to determine attractive strategies for the use of so-called fourth-generation technologies (industry 4.0) in the mining sector of Iran. To do this, a multi-criteria decision-making (MCDM) problem was employed. Therefore, this study presents a new method for evaluating and prioritizing smart mine strategies using a combination of Z-number theory and fuzzy weighted VIKOR technique with a fuzzy cognitive map (FCM). In this regard, questionnaires containing five strategies (options) and 11 criteria were designed and presented to a team of eight experts. The results obtained from the prioritization of the proposed hybrid model confirm that the strategy of "provision of government incentives to mines to use up-to-date technologies" is the most appropriate alternative for implementing industries 4.0 in large-scale mines in Iran. Furthermore, a parametric sensitivity analysis was performed to determine the effectiveness of the proposed strategies. Results showed that the proposed strategy is a fixed mechanism for ranking smart mining engineering strategies. Meanwhile, the weight of the strategy does not affect their ranking.

Keywords: Smart mining, Industry 4.0, Z-number theory, Fuzzy cognitive map.

How to cite this article
Poormirzaee, R., Hosseini, S. Sh., and Taghizadeh, R. (2023). *"Choosing the appropriate strategy of 4.0 industries for the implementation of intelligent methods in mining engineering"*. Journal of Mineral Resources Engineering, 8(1): 71-93.
DOI: 10.30479/JMRE.2022.16681.1568

*Corresponding Author Email: *r.poormirzaee@uut.ac.ir*

COPYRIGHTS
©2023 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

Despite the experience of three major industrial revolutions globally, new technologies within the concept of fourth-generation industries (industry 4.0) have been considered since 2011 by researchers and industry owners. The mining sector requires identifying and selecting effective strategies to maximize the use of this new capacity in various areas of production, pollution reduction, safety, and productivity. Improving productivity, efficiency, and ensuring employees' health is of particular importance, and the use of new technologies meets these requirements [1]. Many mining companies worldwide are attempting to reduce costs and increase efficiency. Meanwhile, the manufacturing sector has been able to use new technologies such as advanced production and industry 4.0 in its activities and has significantly increased productivity. The mining industry is not up to date in the use of new technologies compared to other sectors and many of its activities are still performed in traditional ways [2].

Based on the literature review, researchers have focused on using 4.0 industries. However, the type of strategies in this industry is different from the factors that affect their implementation, and it is difficult to make decisions without identifying the factor that affects them. Therefore, identifying and evaluating the direct effects of influential factors is of particular importance. After identifying the factors influencing the selection of industry 4.0 strategies, this study determined their significance and effectiveness using the fuzzy cognitive map.

METHODS

This paper presents a new method for evaluating and prioritizing industry 4.0 strategies, emphasizing the use of smart technologies. For this purpose, fuzzy VIKOR and fuzzy cognitive map techniques are combined. In the first step, strategies and criteria are identified. Therefore, a questionnaire was designed to complete the decision matrix to determine the weight between criteria and strategies. In this study, in addition to formulating a strategy for implementing industry 4.0 in the country's mining sector, the Z-number theory has been used to ensure the answers of experts [3]. This means that experts express the reliability of their opinion. FCM theory is structured to calculate the weight of criteria based on causal-effect relations between concepts. Finally, the appropriate industry 4.0 strategy is selected using the Fuzzy VIKOR method.

FINDINGS AND ARGUMENT

In the theory of fuzzy cognitive map, experts expressed the causal-effect relationship between the criteria and stated their level of confidence. The reliability of each expert opinion was then affected in response to an accurate view of each. Finally, the obtained matrix was defuzzied to be used in the fuzzy cognitive map. Figure 1 shows the conceptual model of the fuzzy cognitive map. In the next step, the FCM simulation was performed and the initial matrix was updated; then, the final matrix was obtained. The weight variations of criteria in each simulation are illustrated in Figure 2. After calculating the weight of each criterion, the fuzzy best value and fuzzy worst value were calculated. Then, the normalized fuzzy difference was computed. After normalizing the obtained matrix, the indexes S, R, and Q were determined. Finally, each S, R, and Q value is ranked descending (Table 1). According to the obtained results, the ranking of 4.0 industry strategies in group Q can be sorted as follows:

A1> A3> A4> A5> A2

The first strategy (A1), "provision of government incentives to mines to use up-to-date technologies", ranks first in S, R and Q.

CONCLUSION

Although mining as an essential industrial activity has a significant impact on a country's economy, it faces fundamental challenges in various areas such as environmental hazards, occupational hazards and low productivity. Developed countries involving mineral resources have attempted to reduce the obstacles as much as possible by using new technologies and smart methods. Undoubtedly, given the growing importance of the mining industry in Iran to distance itself from the oil economy, the use of industry 4.0 can be an important step in facing the challenges and increasing production. Therefore, in this study, we tried to provide a framework for implementing industry 4.0 strategies in large-scale mines in Iran.

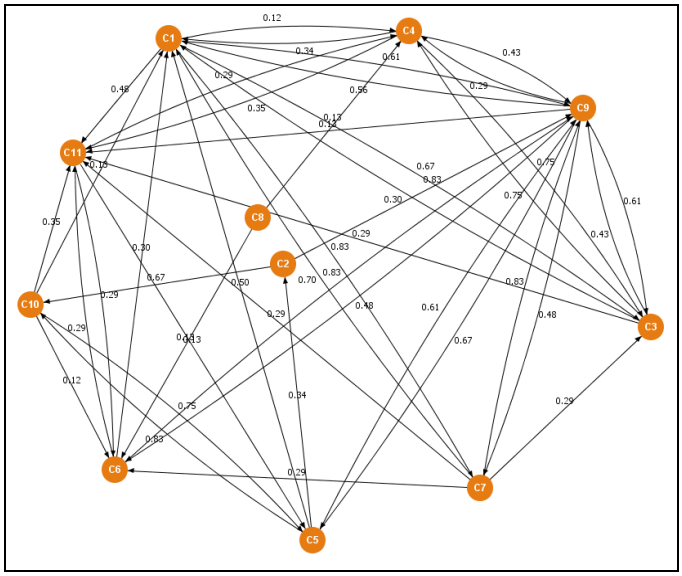


Figure 1. Fuzzy cognitive map of criteria for determining industry 4.0 strategies

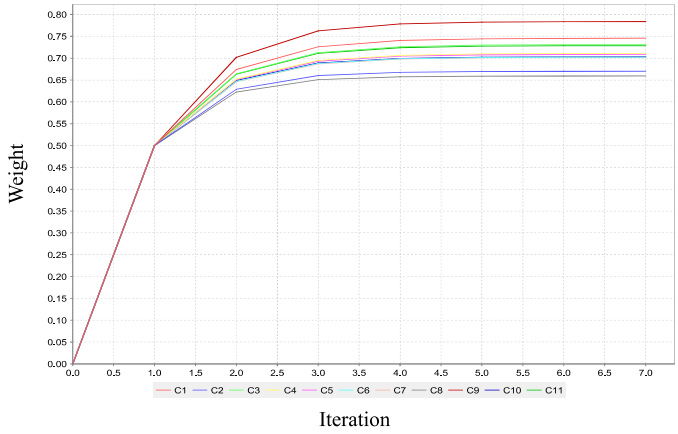


Figure 2. Criterion weights in different iterations

Table 1. Ranking of alternatives

Alternative	S	R	Q	Rank of S	Rank of R	Rank of Q
A1	3.543	0.659	0.000	1	1	1
A2	4.678	0.745	0.847	5	4	5
A3	4.027	0.709	0.412	4	2	2
A4	3.870	0.731	0.432	3	3	3
A5	3.600	0.784	0.525	2	5	4

This paper evaluated and prioritized industry 4.0 strategies by integrating the fuzzy VIKOR method and the Z-number-based fuzzy cognitive map theory. Based on this, 11 main criteria were defined as employment (C1), energy consumption (C2), hazards (C3), trained human resources (C4), marketing and sales (C5), environment (C6), risk (C7), culture (C8), technology (C9), quality of mineral products (C10), legislations (C11) along with five strategies, emphasizing the implementation of industry 4.0 strategies. The combined approach of the fuzzy cognitive map and Z-number was used to determine the importance of the criteria and prioritize their importance. This approach indicated that the “technology” criterion has the most and the “culture” criterion has the most negligible impact on the industry 4.0 strategies. By applying the

proposed method and solving the initial matrix, the values of S, R, and Q were ranked and the best smart mining strategies were identified. Based on the prioritization results, "provision of government incentives to mines to use up-to-date technologies" was selected as the most appropriate alternative. Also, the sensitivity analysis results show that the ranking of strategies was not affected by the value of v. The obtained results proved the accuracy of the ranking. The selected option is a suitable solution for smartening large-scale mines in Iran based on the evaluations.

REFERENCES

[1] Thatcher, M. E., and Oliver, J. R. (2001). *"The impact of technology investments on a firm's production efficiency, product quality, and productivity"*. Journal of Management Information Systems: JMIS, 18(2): 17-46.

[2] Sishi, M. N., and Telukdarie, A. (2018). *"Implementation of industry 4.0 technologies in the mining industry: A case study"*. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 201-205. DOI: 10.1109/IEEM.2017.8289880.

[3] Zadeh, L. A. (2011). *"A note on Z-numbers"*. Information Sciences, 181(14): 2923-2932.

نشریه مهندسی منابع معدنی، سال ۱۴۰۲، دوره هشتم، شماره ۱، ص ۹۳-۷۱

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

دوره هشتم، شماره ۱، بهار ۱٤۰۲، صفحه ۷۵ تا ۹۳
Vol. 8, No. 1, Spring 2023, pp. 75-93

علمی-پژوهشی

انتخاب راهبرد مناسب صنایع نسل چهارم برای اجرای روش‌های هوشمند در حوزه مهندسی معدن

راشد پورمیرزائی[۱*]، سید شهاب حسینی[۲]، رحیم تقی زاده[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده محیط زیست، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه
۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

دریافت: ۱٤۰۰/۰۹/۲۹ پذیرش: ۱٤۰۰/۱۲/۱۵

چکیده

به کارگیری فن‌آوری‌های نوین، تاثیر بسیار مهمی در افزایش کارآیی و بهبود بهره‌وری عوامل تولید در صنایع مختلف به ویژه معادن دارد، اما این مهم نیازمند انتخاب، اتخاذ و پیاده‌سازی راهبردهای صحیح و موثر است و هرگونه راهبرد نادرست ممکن است شرکت‌ها و بنگاه‌های اقتصادی را با اتلاف منابع مواجه سازد. بر همین اساس با رویکرد حل یک مساله تصمیم‌گیری چند معیاره، هدف اصلی این پژوهش تعیین راهبردهای جذاب استفاده از فن‌آوری‌های به اصطلاح نسل چهارم (صنعت ۴٫۰) در بخش معدن ایران است. از این رو این تحقیق با تلفیق تئوری اعداد Z و تکنیک VIKOR فازی وزن‌دهی شده با رویکرد فازی اثرات علت و معلولی، یک روش جدید برای ارزیابی و اولویت‌بندی راهبردهای هوشمندسازی معادن پیشنهاد می‌کند. در این راستا پرسشنامه‌هایی حاوی پنج راهبرد (گزینه) و ۱۱ معیار طراحی و به تیمی متشکل از هشت متخصص ارایه شد. نتایج به دست آمده از اولویت‌بندی مدل ترکیبی پیشنهادی تایید می‌کند که راهبرد "ارایه مشوق‌های دولتی به معادن برای استفاده معادن از فن‌آوری‌های به‌روز" مناسب‌ترین گزینه برای اجرای صنایع نسل چهارم در معادن بزگ مقیاس ایران است. همچنین در این مطالعه، یک تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتری برای تعیین اثربخشی راهبردهای ارایه شده انجام شد.

کلمات کلیدی

معدنکاری هوشمند، صنعت ۴٫۰، تئوری اعداد Z ، نقشه شناختی فازی.

استناد به این مقاله
پورمیرزائی، ر.، حسینی، س. ش.، تقی زاده، ر.؛ ۱۴۰۲؛ "**انتخاب راهبرد مناسب صنایع نسل چهارم برای اجرای روش‌های هوشمند در حوزه مهندسی معدن**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۱، ص ۹۳-۷۱.
DOI: 10.30479/JMRE.2022.16681.1568

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: r.poormirzaee@uut.ac.ir

حق‌مؤلف © نویسندگان
ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۱- مقدمه

تغییرات فن‌آوری یکی از مولفه‌های شتاب‌دهنده صنایع از طریق افزایش کارآیی و بهره‌وری است. انتقال و استفاده از فن‌آوری‌های نو، بدون شناسایی و اتخاذ راهبردهای موثر احتمال موفقیت بالایی ندارد. این فن‌آوری‌ها در قالب مفهوم انقلاب‌های صنعتی، شیوه تولید و توزیع را تغییر داده و در نهایت موجب دگرگونی‌های عمیق در اقتصاد می‌شود. بخش‌های اقتصادی که نتوانند از فرصت ظهور فن‌آوری‌های نوین استفاده موثری داشته باشند ناگزیر به پذیرش تهدیدات آن خواهند بود. علی رغم تجربه سه انقلاب بزرگ صنعتی در جهان، از سال ۲۰۱۱ به بعد، مجموعه‌ای از فن‌آوری‌های نو در چارچوب مفهوم صنایع نسل چهارم توسط پژوهشگران و صاحبان صنایع مورد توجه قرار گرفته است. این فن‌آوری‌ها با رشد سریع خود تسهیلات و امکانات فزاینده‌ای را برای رشد و توسعه اقتصادی در همه بخش‌ها ایجاد کرده‌اند. بخش معدنکاری نیز برای بهره‌برداری حداکثری از این ظرفیت نوین، در حوزه‌های مختلف تولید، کاهش آلودگی، ایمنی و بهره‌وری نیازمند شناسایی و انتخاب راهبردهای موثر است. بهبود بهره‌وری، کارآیی و اطمینان از سلامت کارکنان در صنعت اهمیت ویژه‌ای دارد که استفاده از فن‌آوری‌های نوین این الزامات را برآورده می‌کند [۲،۱]. از سوی دیگر یکی از تاثیرگذارترین و مهم‌ترین عوامل پیشرفت و توسعه اجتماعی، اقتصادی و انسانی یک کشور بخش معدن است. صنعت معدنکاری با چالش‌های مهمی از جمله کاهش عیار ماده معدنی، نیازهای روزافزون جهان به مواد معدنی، ایجاد مخاطرات محیط زیستی و تجارت کاری ضعیف روبه‌رو است [۲]. بسیاری از شرکت‌های معدنی در سراسر جهان به دنبال کاهش هزینه‌ها و افزایش کارآیی هستند. در این بین بخش ساخت و تولید توانسته است از فن‌آوری‌های جدید مانند تولید پیشرفته و صنایع نسل چهارم در فعالیت‌های خود استفاده کند و پیشرفت چشم‌گیری در افزایش بهره‌وری داشته باشد. به نظر می‌رسد در مقایسه با سایر صنایع، صنعت معدنکاری در استفاده از فن‌آوری‌های جدید به‌روز نبوده و بسیاری از فعالیت‌های آن همچنان به روش‌های سنتی انجام می‌گیرد [۳].

چندین قرن طول کشید تا صنعت مدرن رونق بگیرد و با ظهور تکنولوژی‌های جدید، تولید افزایش چشمگیری داشته باشد، اما در دهه گذشته مفهوم جدیدی به نام صنایع نسل چهارم (۴٫۰) به جهان معرفی شد که جایگزینی برای مفهوم انقلاب صنعتی و فن‌آوری‌های نوظهور است. این مفهوم به عنوان نشانه‌ای از انقلاب صنعتی چهارم در ابتدا در سال ۲۰۱۱ برای توسعه صنعتی آلمان پیشنهاد شد. صنایع ۴٫۰ اهداف مشخصی را دنبال می‌کند که سطح بالاتری از سودآوری عملیاتی، کارآیی و اتوماسیون در رأس اهداف آن قرار دارد [۴]. این صنعت پیشرفته ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که ارزش افزوده و مدیریت دانش را افزایش می‌دهد. ویژگی‌های اصلی فن‌آوری‌های ۴٫۰ شامل انتقال خودکار اطلاعات و ارتباطات، تعامل بین ماشین و انسان[۱]، اتوماسیون و انطباق با آن، صنایع با ارزش افزوده و بهینه‌سازی، سفارشی‌سازی تولید و دیجیتال‌سازی [۴] است. فرآیند صنایع ۴٫۰ ارتباط اشیای فیزیکی مانند دستگاه‌ها، حسگرها و دارایی‌های سرمایه‌گذاری را چه با یکدیگر و چه با اینترنت بهبود می‌بخشد و باعث افزایش بهره‌وری و تنوع در روابط بین تولیدکنندگان، تامین‌کنندگان و مشتریان می‌شود که در این صنعت ارتباط بین ماشین‌آلات و انسان‌ها در ۹ گروه قابل طبقه‌بندی است [۵]:

۱) داده‌های بزرگ و تجزیه و تحلیل
۲) ربات‌های همکار (کوباتها[۲])
۳) شبیه‌سازی T
۴) ادغام سیستم: یکپارچه‌سازی افقی و عمودی سیستم
۵) اینترنت اشیا
۶) امنیت سایبری و سیستم‌های فیزیکی سایبری[۳]
۷) فن‌آوری ابر
۸) ساختار افزاینده
۹) حقیقت مجازی

به عقیده بسیاری از پژوهشگران، صنایع ۴٫۰ جزو موثر و اساسی در توسعه و نوآوری پروژه‌های اقتصادی محسوب می‌شود و نقشه راه جامعی را از فن‌آوری‌ها و راهبردها برای تعریف برنامه برای یک شرکت دیجیتال و مدرن بازسازی می‌کند. اگر شرکت‌ها بخواهند برای برتری خود رقابت کنند، باید با صنایع ۴٫۰ سازگار شوند [۶].

وو[۴] و گیلیز[۵] در مورد یک سیستم رایانه‌ای نظارت بر جریان هوا در زمان واقعی برای تشخیص تغییر جریان هوا و فشار در شبکه تهویه معدن زیرزمینی مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از این سیستم و با اتصال سنسورها به نرم‌افزار شبیه‌سازی شبکه تهویه معدن را نظارت کردند [۷]. بای[۶] و همکاران از شبکه‌های حسگر بی‌سیم در پایش گازخیزی در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی استفاده کردند [۸]. نیو[۷] و همکاران یک

سیستم ایمنی سلسله مراتبی توزیع شده مبتنی بر شبکه‌های حسگر بی‌سیم را برای نظارت بر غلظت متان و محیط معادن زیرزمینی پیشنهاد کردند [۹]. لی[۸] و همکاران استفاده از فن‌آوری‌های هوشمند را برای ارزیابی و پایش ریزش سقف در معادن زیرزمینی پیشنهاد دادند [۱۰]. لیو[۹] و همکاران یک سیستم موقعیت جغرافیایی را با استفاده از فن‌آوری ZigBee در مناطق مختلف معدن پیاده‌سازی کردند [۱۱]. بو[۱۰] و همکاران یک سیستم نظارتی هوشمند برای تشخیص رویدادهای مختلف و پردازش حوادث ناشی از ماشین‌آلات در معادن را پیشنهاد دادند [۱۲]. سیستم ارتباطی ZigBee برای ایجاد یک شبکه نظارت هوشمند در معادن توسط مریدی و همکاران پیشنهاد شد [۱۳]. مهدوی پور و همکاران یک شبکه حسگر بی‌سیم از حسگرهای نوری و ریزساخته موسوم به سنسورهای کنترل خودکار گرد و غبار زغال‌سنگ برای نظارت مداوم بر محتوای غیرقابل احتراق گرد و غبار انباشته شده در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی پیشنهاد کردند [۱۴]. چن[۱۱] و همکاران یک سیستم نظارت مبتنی بر سرویس وب برای نظارت از راه دور بر پارامترهای محیطی مانند غلظت متان، رطوبت، دما و همچنین برای یافتن مکان دقیق پرسنل معدن در یک معدن زغال‌سنگ زیرزمینی توسعه دادند [۱۵]. در مطالعه دیگری، ژائو[۱۲] و همکاران یک سیستم نظارت آنلاین با استفاده از یک دستگاه فیبر نوری برای نظارت بر درجه حرارت منطقه در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی طراحی کردند [۱۶]. در مطالعه دیگری، گاریگا[۱۳] و همکاران شبکه‌های حسگر بی‌سیم را با اتصال به یک رابط برنامه‌نویسی برای جمع‌آوری داده‌های حسگر از معدن زغال‌سنگ زیرزمینی و انتقال آن به مرکز نظارت از راه دور از طریق وب اینترنت، راه‌اندازی کردند [۱۷].

پیاده‌سازی فن‌آوری‌های صنایع ۴/۰ در سایر زمینه‌ها نیز ارزیابی شده است. طراحی هوشمند، تولید و بهره‌برداری هوشمند از کشتی‌ها در یک محیط صنعتی با مصرف انرژی بالا در یک زیرساخت مبتنی بر صنایع ۴/۰ توسط آنگ[۱۴] و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۸]. مکتدیر[۱۵] و همکاران راهبردهای صنعت ۴/۰ پیامدهای ایمنی آن در حفاظت از محیط زیست را بررسی کردند [۱۹]. بویوکوزکان[۱۶] و همکاران استفاده از فن‌آوری‌های صنایع ۴/۰ را در خطوط هوایی و فرودگاه‌ها پیاده کردند [۲۰]. بونیائی[۱۷] و همکاران تاثیر فن‌آوری‌های ۴/۰ بر پایداری محیط زیست را مطالعه کرده و مسیر جمع‌آوری زباله‌های شهری را بر اساس این مفهوم بهینه‌سازی کردند [۲۱]. تاثیر فن‌آوری‌های دیجیتال مبتنی بر صنعت ۴/۰ بر عملکرد اقتصادی و محیط زیستی توسط لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام شد [۲۲]. تاثیر فن‌آوری‌های ۴/۰ بر توسعه پایدار در زمینه صنعت پلاستیک برزیل توسط نارا[۱۸] و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۳].

با توجه به قابلیت‌ها و ظرفیت‌هایی که فن‌آوری‌های ۴/۰ ایجاد می‌کنند، انتخاب راهبردهای درست برای بهره‌برداری کارآمد و صحیح از این فن‌آوری‌ها امری ضروری است. بر اساس همین ضرورت، این تحقیق به دنبال انتخاب و رتبه‌بندی راهبردهای صنایع ۴/۰ است. تصمیم‌گیری در مورد راهبردهای مهندسی معدن هوشمند[۱۹] (IME) یک مساله چند معیاره است. در مطالعه حاضر بین معیارها و راهبردهای صنایع ۴/۰ رابطه معناداری وجود دارد. در این شرایط تعیین وزن هر معیار بخش اساسی رویکرد تصمیم‌گیری است. برای این منظور نظرات کارشناسان روابط هر معیار را بر روی یکدیگر در نظر می‌گیرند. پس از تعریف وزن هر معیار یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره پیاده می‌شود.

در موارد عملی، یک متخصص تصمیم‌گیرنده ممکن است در بسیاری از کشورها که تصمیم مناسب برای انتخاب و اولویت‌بندی بهترین گزینه (راهبرد IME) باید انجام شود، با عدم اطمینان و اطلاعات ناقص زیادی روبه‌رو شود. در شرایط یاد شده، تصمیم (به ویژه تصمیم‌گیری در شرایط فازی) باید تحت شرایط نامشخص اعمال شود. مفهوم فازی نظریه مفیدی برای درک مبهم بودن مفهوم در فرآیندهای تصمیم‌گیری تحت شرایط نامشخص است [۲۴].

وانگ[۲۰] و چانگ[۲۱] از VIKOR فازی برای حل مشکلات تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کردند [۲۹]. شمشادی و همکاران برای مشکلات انتخاب تامین‌کننده روش VIKOR را اعمال کردند [۳۰]. یوچنور[۲۲] و دمیرل[۲۳] روش VIKOR فازی را در انتخاب شرکت‌های بیمه در فرآیند تصمیم‌گیری گروهی به کار گرفتند [۲۸]. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۳ از VIKOR فازی برای ارزیابی روش‌های دفع زباله‌های بهداشتی استفاده کردند [۲۵]. در همان سال او یانگ[۲۴] و همکاران VIKOR فازی را در ارزیابی کنترل ریسک امنیت اطلاعات استفاده کردند [۲۶]. کهرمان[۲۵] و همکاران از VIKOR فازی در ارزیابی سرمایه‌گذاری‌ها در تحقیقات سلامت استفاده کردند [۲۷]. بررسی نقش انواع تبلیغات در بهبود رفتار مصرف آب با بهره‌گیری از روش VIKOR فازی توسط سلیمی و همکاران انجام شد [۳۱]. ارزیابی خطرات موجود در زنجیره تامین دانه‌های غذایی با استفاده از VIKOR فازی توسط راتور[۲۶] و همکاران مطالعه

شد [۳۲]. بهادری و همکاران در همان سال یک مدل انتخاب تامین‌کننده برای بیمارستان‌ها با استفاده از ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی و VIKOR فازی را ایجاد کردند [۳۳]. ایونی[۲۷] و همکاران روش VIKOR فازی را برای ارزیابی سیستم‌های مدیریتی در آموزش عالی استفاده کردند [۳۴].

همان‌طور که بررسی اجمالی ادبیات موضوع نشان می‌دهد اکثر محققان عمدتا به دنبال استفاده از صنایع ۴٫۰ تمرکز کرده‌اند، اما باید توجه داشت که نوع راهبردهای این صنعت با عوامل موثر بر اجرای آن متفاوت و بدون شناسایی عامل تاثیرگذار بر آن، تصمیم‌گیری دشوار است، بنابراین شناسایی و ارزیابی اثرات مستقیم و متقابل عوامل موثر اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق پس از شناسایی عوامل تاثیرگذار در انتخاب راهبردهای صنایع ۴٫۰، میزان اهمیت و تاثیرگذاری آن‌ها با استفاده از رویکرد نقشه شناختی فازی[۲۸] مشخص شد.

این مفهوم اخیرا با کاربردهای متعددی به ویژه در علم مهندسی معدن همراه بوده است.

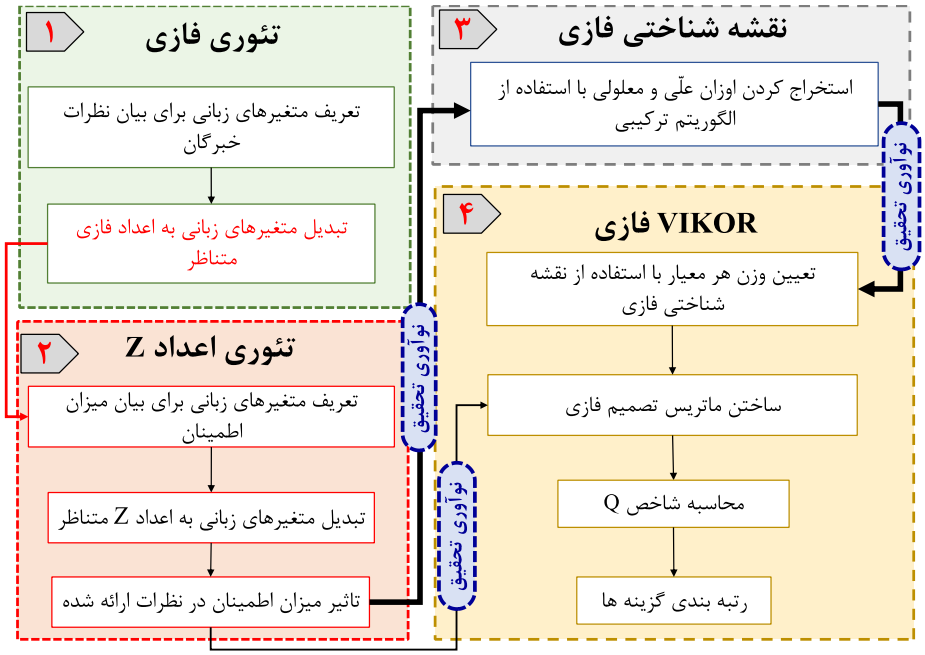
۲- مبانی نظری

در این مقاله یک روش جدید برای ارزیابی و اولویت‌بندی راهبردهای صنایع ۴٫۰ با تاکید بر استفاده از فن‌آوری‌های هوشمند ارایه شده است. برای این منظور روش‌های VIKOR فازی و نقشه شناختی فازی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در مرحله اول، تمام راهبردها و معیارها مشخص شده است، بنابراین یک پرسشنامه برای تکمیل ماتریس تصمیم‌گیری و تعیین وزن بین معیارها و راهبردها طراحی شد.

در این مطالعه علاوه بر تدوین راهبرد برای پیاده‌سازی صنایع نسل چهارم در بخش معدن کشور، جهت اطمینان بخشیدن به پاسخ‌های کارشناسان از تئوری اعداد Z استفاده شده است. به این معنا که هر متخصص پس از پاسخ به سوالات، میزان اطمینان از پاسخ خود را نیز بیان می‌کند. شکل ۱ چارچوب کلی روش تحقیق را نشان می‌دهد.

۲-۱- شناسایی معیارها و تعریف گزینه‌ها (راهبردها)

در مراحل مختلف عملیات استخراج از جمله حفاری، انفجار، بارگیری و باربری، سنگ‌شکنی و فرآوری، برنامه‌ریزی هوشمند معدن و استفاده از یک راهبرد مناسب IME به شرایط و عوامل مختلف مربوط به محیط اطراف، عوامل اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و فن‌آوری بستگی دارد، بنابراین به عنوان اولین مرحله از روش‌شناسی این تحقیق، از یک تیم متخصص و باتجربه خواسته شد که مهم‌ترین معیارهای مربوط به راهبرد IME را معرفی کنند. جدول ۱ تمام معیارها (C) و گزینه‌های (A) تصمیم‌گیری ارایه شده در این تحقیق را در



شکل ۱: چارچوب روش مطالعه بر اساس VIKOR فازی

نظر گرفته است. این مولفه‌ها شامل ۱۱ معیار و ۵ گزینه به عنوان راهبردهای اساسی است. در این تحقیق بیشتر معیارها و راهبردهای IME که توسط متخصصان، برجسته شده‌اند قبلا در نظر گرفته نشده‌اند و برای اولین بار تجزیه و تحلیل می‌شوند. تجهیز عملیات معدنکاری به سیستم‌های هوشمند مبتنی بر صنایع ۴/۰ (به ویژه توسط ربات‌ها) یک راهبرد قابل قبول IME برای هوشمندسازی معادن بزرگ‌مقیاس است. در صورت مناسب بودن شرایط، می‌توان از انواع راهبردهای صنایع ۴/۰ در بخش‌های مختلف عملیات معدنکاری استفاده کرد. گاه، بعضی محدودیت‌های محیط زیستی اجازه نمی‌دهند که برخی از راهبردها قابل اجرا باشند. در این شرایط IME در شرایط سازگار با محیط زیست مورد توجه قرار می‌گیرد. استفاده از صنایع ۴/۰ در معادن سهم قابل توجهی در کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش تولید و افزایش کارآیی دارد، بنابراین این تحقیق بر استفاده از صنایع ۴/۰ به عنوان یکی از راهبردهای جدید IME برای بهبود اجتماعی- اقتصادی- فرهنگی تاکید کرده است.

۲-۲- تئوری فازی

نظریه مجموعه‌های فازی در ابتدا توسط پروفسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ ارایه شد [۳۵]. این نظریه یک راه حل ذاتی تعامل با مشکلاتی است که در آن عدم دقت، مقدار عضویت مشخص دارد. مقدمه مختصری از این نظریه به صورت زیر بیان می‌شود:

تعریف (۱). یک مجموعه فازی "A" به صورت معادله ۱ نشان داده می‌شود:

$$A = \{\langle x, \mu_A(x)\rangle \mid x \in X\} \quad (۱)$$

که در آن:

$A = \{\langle x, \mu_A(x)\rangle \mid x \in X\}$: تابع عضویت مجموعه A است. مقدار عضویت بیانگر درجه تعلق $x \in X$ را در مجموعه A است.

در شرایط فازی برای مشخص کردن نظرات کارشناسان از مجموعه‌های فازی خاص مانند اعداد فازی مثلثی (TFN) و اعداد فازی ذوزنقه‌ای (TrFN) استفاده می‌شود.

تعریف (۲). یک عدد فازی مثلثی را می‌توان با یک سه گانه مانند (a_1,a_2,a_3) مشخص کرد که تابع عضویت آن را می‌توان به به صورت معادله ۲ به دست آورد [۳۶]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in [-\infty, a_1] \\ \dfrac{x-a_1}{a_2-a_1}, & x \in [a_1, a_2] \\ \dfrac{c-x}{a_3-a_2}, & x \in [a_2, a_3] \\ 0, & x \in [a_3, +\infty] \end{cases} \quad (۲)$$

به طور مشابه، عدد فازی ذوزنقه‌ای را می‌توان با استفاده از توضیحات زیر تعیین کرد:

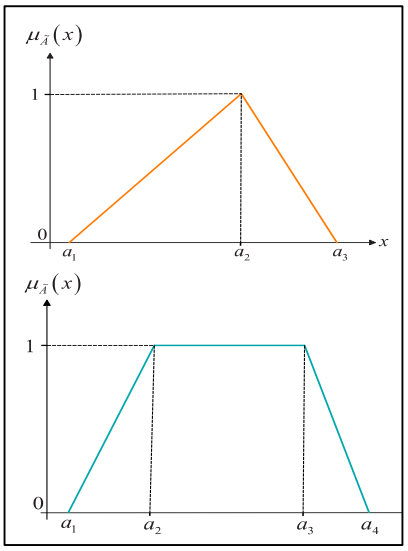
جدول ۱: مولفه‌های تصمیم‌گیری برای ارزیابی راهبردهای معدنکاری هوشمند

معیارها		گزینه‌ها	
C1	اشتغال	A1	ارائه مشوق‌های دولتی به معادن به منظور استفاده معادن از فن‌آوری‌های به‌روز
C2	مصرف انرژی	A2	توسعه همکاری معادن با مراکز پژوهشی و تحقیق و توسعه (D&R) با هدف توسعه فن‌آوری‌های جدید و مورد نیاز معادن
C3	مخاطرات	A3	سرمایه‌گذاری صاحبان معادن در تامین زیرساخت‌های موردنیاز (تکنولوژی‌های موردنیاز مانند تامین انرژی و ارتباط بدون سیم در معادن)
C4	منابع انسانی آموزش‌دیده	A4	توسعه معدنکاری سبز و بی‌خطر
C5	بازاریابی فروش	A5	آموزش و بهبود نیروی انسانی فعال در بخش معادن
C6	محیط زیست		
C7	ریسک		
C8	فرهنگ		
C9	تکنولوژی		
C10	کیفیت تولیدات معدنی		
C11	قوانین		

تعریف (۳). یک عدد فازی ذوزنقه‌ای را می‌توان با یک چهارگانه مانند (a_1,a_2,a_3,a_4) تعیین کرد:

$$\mu_{\tilde{A}}(x)=\begin{cases}0, & x\in[-\infty,a_1]\\ \dfrac{1}{a_2-a_1}x-\dfrac{a_1}{a_2-a_1}, & x\in[a_1,a_2]\\ 1, & x\in[a_2,a_3]\\ \dfrac{-1}{a_4-a_3}x+\dfrac{a_4}{a_4-a_3}, & x\in[a_3,a_4]\\ 0, & x\in[a_4,+\infty]\end{cases} \quad (۳)$$

عدد فازی مثلثی $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3)$ و ذوزنقه‌ای $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3,a_4)$ به همراه تابع عضویت آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: اعداد فازی مثلثی (بالا) و ذوزنقه‌ای (پایین)

۲-۳- نقشه شناختی فازی

نقشه شناختی فازی همان سیستم‌های دینامیکی فازی-عصبی‌اند و کاربرد آن‌ها در مدلسازی سیستم‌های پیچیده‌ای است که از دانش و تجربه انسان بهره می‌گیرد [۳۷]. این روش توسعه یافته نقشه شناختی اکسلرد[۲۹] است که اولین بار توسط کاسکو[۳۰] در سال ۱۹۸۶ معرفی شد. اجزای اصلی یک مدل نقشه شناختی گره‌ها، پیکان‌های بین گره‌ها و علامت روی پیکان‌ها هستند [۳۸].

انواع مختلف نقشه شناختی فازی بر اساس مفهوم آنالیز علت و معلولی در زمینه‌های مختلف استفاده شده است. در نقشه شناختی فازی مجموعه‌ای از عناصر و روابط یک پدیده پیچیده در قالب یک گراف هدایت شده نشان داده می‌شوند که بسیاری از محققان این مفهوم را در زمینه‌های مهندسی، مدیریت، پزشکی، جغرافیا، آموزش، برنامه‌ریزی و نظایر آن استفاده کرده‌اند. ایجاد چنین گرافی به ورودی‌هایی نیاز دارد که حاصل تجارب و تخصص افراد خبره در موضوع مورد مطالعه است. تجارب انباشته شده خبرگان با دانش موجود در حوزه‌ای که مدل برای آن ترسیم شده است، یکپارچه می‌شوند. بر این اساس روابط علت و معلولی بین اجزای تشکیل‌دهنده سیستم به دست می‌آید [۳۹].

در نقشه شناختی فازی مفاهیم (C_i) با روابط مستقیم یا غیرمستقیم با گره‌ها مشخص می‌شوند و پیکان‌ها (کمان‌ها) نشان‌دهنده پیوند علت و معلولی بین هر دو گره (W_{ij}) هستند. درجه علیت و نوع رابطه بین گره‌ها ممکن است منفی، مثبت یا خنثی باشد [۴۰]. رابطه بین مفاهیم بر اساس متغیرهای زبانی فازی یا مقداری در بازه [۱،۱-] یا [۰،۱] بررسی می‌شود. مقادیر یک گره در ابتدا به دست می‌آید و سپس مقدار سایر گره‌های متصل به آن با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌شوند که نشان‌دهنده یک سیستم ماتریسی است [۴۱]. معادله ۴ را می‌توان به صورت معادله ۵ بازنویسی کرد:

$$A_i^{(k+1)}=f\left(A_i^{(k)}+\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}W_{ji}A_j^{(k)}\right) \quad (۴)$$

$$A_{new}=f\left(A_{old}+\sum W\cdot A_{old}\right) \quad (۵)$$

که در آن:

$A_i^{(k+1)}$: مقدار مفاهیم C_i در تکرار $(k+1)$

$A_j^{(k)}$: مقدار مفاهیم C_i در تکرار (k) است.

معادله ۵ برای ادامه محاسبات نقشه شناختی فازی برای دستیابی به یکی از حالات زیر استفاده می‌شود:

۱) A_{new} و A_{old} برابر هستند یا اختلاف کمی دارند (حالت پایدار).

۲) یک رفتار بی‌نظم برای هر مقدار برای رسیدن به مقادیر مختلف تصادفی

۳) یک رفتار چرخه‌ای محدود برای مقادیر مفهومی که در یک دوره خاص به یک حلقه از مقادیر تبدیل می‌شوند.

پس از طراحی نقشه شناختی فازی، وزن دقیق مفاهیم از طریق نظرات متخصصان تخمین زده می‌شود، سپس از الگوریتم‌های یادگیری برای کاهش وابستگی به نظر کارشناس و خطاهای وزن‌دهی استفاده می‌شود. اصلی‌ترین الگوریتم‌های یادگیری الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت (الگوریتم‌های هبین[۳۱] و ترکیبی) هستند [۴۲].

۲-۴- روش VIKOR فازی

متخصصان غالبا در مواجهه با دانش ناقص و مبهم با مشکلات پیچیده‌ای روبه‌رو هستند. تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مشکلات پیچیده تصمیم‌گیری را حل می‌کند و همین ویژگی آن را به یکی از مشهورترین مفاهیم تصمیم‌گیری تبدیل کرده است [۴۳]. منطق فازی به عنوان یک تکنیک کارآمد و مفید در پرداختن به مسایل تصمیم‌گیری چندمعیاره در شرایط وجود اطلاعات غیردقیق و مبهم، مشکلات تصمیم‌گیری‌های همراه با عدم اطمینان را حل می‌کند. بدین منظور در این مطالعه از روش تصمیم‌گیری VIKOR فازی استفاده شد.

تکنیک VIKOR توسط اوپریکوویچ[۳۲] در سال ۱۹۹۸ ارایه شده است که مخفف عبارت "VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje" است [۴۴]. این روش به دلیل ترجیح دادن نزدیک‌ترین گزینه به راه‌حل برتر در گروه روش‌های سازگار در مدل‌های جبرانی طبقه‌بندی می‌شود. مراحل پیاده‌سازی روش VIKOR فازی در ادامه تشریح شده است.

مرحله ۱) تعریف متغیرهای زبانی

اولین اقدام تعریف متغیرهای زبانی استاندارد است تا متخصصان نظرات خود را بر اساس آن در یک پرسشنامه تعریف شده بیان کنند. منظور از متغیرهای زبانی، کلمات یا اصطلاحات کیفی یک زبان طبیعی است که بیانگر دیدگاه ذهنی یک متخصص در مورد معیارها یا گزینه‌ها است. وقتی متخصصان اصطلاح زبانی را وارد می‌کنند در واقع پاسخ تخصصی خود را بیان می‌کنند که به یک عدد فازی تبدیل می‌شود. اصطلاحات زبانی درج شده توسط متخصصان می‌توانند به یک عدد فازی مثلثی یا ذوزنقه‌ای تبدیل شوند [۴۵]. این مطالعه بر روی اعداد فازی مثلثی متمرکز است که بازه تغییرات این اعداد از ۱ تا ۱۰ است. مقیاس ارایه شده متغیرهای زبانی برای بیان نظرات کارشناسان طبق جدول ۲ به عدد فازی مثلثی تبدیل می‌شود. مقیاس تعریف شده به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

مرحله ۲) محاسبه مقدار ایده‌آل مثبت $\tilde{f}_j^*$ و منفی $\tilde{f}_j^-$

در این مرحله مقدار ایده‌آل مثبت $\tilde{f}_j^* = (a_j^*, b_j^*, c_j^*)$ و منفی $\tilde{f}_j^- = (a_j^-, b_j^-, c_j^-)$ به ترتیب از طریق روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند:

$$\tilde{f}_j^* = \begin{cases} max_i\, \tilde{x}_{ij} & for\ benefit\ criteria \\ min_i\, \tilde{x}_{ij} & for\ cost\ criteria \end{cases} \quad i = 1,2,...,m \qquad (۶)$$

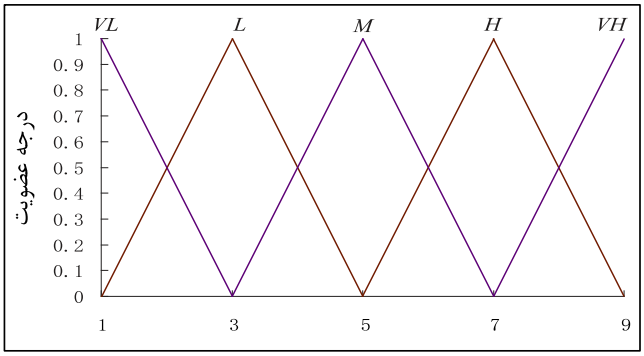
$$\tilde{f}_j^- = \begin{cases} min_i\, \tilde{x}_{ij} & for\ benefit\ criteria \\ max_i\, \tilde{x}_{ij} & for\ cost\ criteria \end{cases} \quad i = 1,2,...,m \qquad (۷)$$

مرحله ۳) ماتریس اختلاف فازی نرمال شده

اختلاف فازی نرمال شده ($\tilde{d}_{ij}$) بین $\tilde{x}_{ij}$ و ایده‌آل مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از معادلات ۸ و ۹ محاسبه می‌شود:

جدول ۲: متغیرهای زبانی و عدد فازی مثلثی متناظر با آن [۴۶]

عدد قطعی	متغیر زبانی	نماد	عدد فازی
۱	خیلی کم	VL	$\tilde{1} = (1,1,3)$
۳	کم	L	$\tilde{3} = (1,3,5)$
۵	متوسط	M	$\tilde{5} = (3,5,7)$
۷	زیاد	H	$\tilde{7} = (5,7,9)$
۹	خیلی زیاد	VH	$\tilde{9} = (7,9,9)$



شکل ۳: درجه عضویت متغیرهای زبانی اعداد فازی مثلثی

$$\tilde{d}_{ij}=\frac{\tilde{f}_j^*-\tilde{x}_{ij}}{c_j^*-a_j^-}\ ,\ i=1,2,...,m\ ,\ j=1,2,...,n \qquad (۸)$$

$$\tilde{d}_{ij}=\frac{\tilde{x}_{ij}-\tilde{f}_j^*}{c_j^--a_j^*}\ ,\ i=1,2,...,m\ ,\ j=1,2,...,n \qquad (۹)$$

مرحله ۴) محاسبه معیار حداکثر ابزار سودمندی گروه S و معیار حداقل اندازه پشیمانی R

از معادلات ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برای محاسبه ابزار سودمندی گروه $\tilde{S}_i=\left(S_i^a,S_i^b,S_i^c\right)$ و حداقل اندازه پشیمانی $\tilde{R}_i=\left(R_i^a,R_i^b,R_i^c\right)$ استفاده می‌شود [۴۷].

$$\tilde{S}_i=\sum_{j=1}^{n}\left(\tilde{w}_j\otimes\tilde{d}_{ij}\right) \qquad (۱۰)$$

$$\tilde{R}_i=\max_j\left(\tilde{w}_j\otimes\tilde{d}_{ij}\right) \qquad (۱۱)$$

مرحله ۵) محاسبه شاخص Q به وسیله وزن‌های به دست آمده در روش FCM با داشتن S_i و R_i

شاخص $\tilde{Q}_i=\left(a_i,b_i,c_i\right)$ با استفاده از معادله ۱۲ قابل محاسبه است [۴۸]:

$$\tilde{Q}_i=\nu\frac{\left(\tilde{S}_i-\tilde{S}^*\right)}{\left(S^--S^*\right)}\oplus(1-\nu)\frac{\left(\tilde{R}_i-\tilde{R}^*\right)}{\left(R^--R^*\right)}\ ,\ \nu\in[0,1] \qquad (۱۲)$$

که در آن:

$$\tilde{S}^*=min\left\{\tilde{S}_i\right\}$$
$$S^-=max_i\left\{\tilde{S}_i\right\}$$
$$\tilde{R}^*=min_i\left\{\tilde{R}_i\right\}$$
$$R^-=max_i\left\{\tilde{R}_i\right\}$$

$\tilde{S}^*$: بهترین مقادیر S

$\tilde{R}^*$: بهترین مقادیر R

ν : به عنوان وزنی برای گزینه حداکثر سودمندی استفاده می‌شود و نشان‌دهنده وزن مطلوبیت گروهی است که معمولا برابر ۰٫۵ در نظر گرفته می‌شود.

مرحله ۶) رتبه‌بندی گزینه‌ها (استراتژی‌ها)

در این مرحله با مرتب‌سازی مقادیر R، S و Q گزینه‌ها به ترتیب نزولی رتبه‌بندی می‌شوند. مقدار شاخص Q بهترین راه برای رتبه‌بندی گزینه‌ها است که هرچه مقدار آن کمتر باشد رتبه یک گزینه بهتر است.

مرحله ۷) بررسی شروط VIKOR

به عنوان آخرین مرحله، باید صحت رتبه‌بندی بررسی شود. گزینه‌ای با بهترین رتبه ($A^{(1)}$) باید در دو شرط زیر صدق کند:

شرط اول. ویژگی پذیرش

اگر گزینه A1 و A2 در میان m گزینه به ترتیب رتبه اول و دوم را داشته باشند، باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$Q\left(A^{(2)}\right)-Q\left(A^{(1)}\right)\geq\frac{1}{m-1} \qquad (۱۳)$$

شرط دوم. ثبات پذیرش در تصمیم‌گیری

گزینه A1 باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S به عنوان رتبه برتر شناخته شود.

در این حالت اگر فقط یکی از این شرایط برآورده نشود، راه حل‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

راه حل اول: اگر شرط اول برقرار نباشد، هر دو گزینه به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شوند.

راه حل دوم: اگر شرط دوم برقرار نباشد، گزینه اول و دوم به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شوند.

۲-۵- تئوری اعداد Z

قابلیت اطمینان یک مفهوم مهم است که در نظریه فازی به عنوان قابلیت اطمینان اطلاعات و تصمیمات[۳۳]، مورد توجه قرار نگرفت و اکنون به عنوان یک نقص در نظر گرفته شده است. برای حل این مشکل و برای توصیف اطلاعات نامطمئن و غیردقیق، تئوری اعداد Z توسط پروفسور لطفی‌زاده ارایه شد [۴۹].

عدد Z نسبت به اعداد فازی کلاسیک توانایی قابل توجهی در توصیف دانش بشر دارد. با توجه به ابهاماتی که در متغیرهای زبانی به وضوح وجود دارد، استفاده از مجموعه‌های فازی برای طبقه‌بندی صحیح متغیرها منطقی به نظر می‌رسد. با این حال مجموعه‌های فازی با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند که درجه اطمینان متغیرهای زبانی را در نظر نمی‌گیرند، بنابراین با اعمال مفهوم اعداد Z، به طور موثری این محدودیت رفع می‌شود. در واقع مفهوم اعداد Z مربوط به قابلیت اطمینان اطلاعات است. رویکرد عدد Z در مقایسه با اعداد فازی توانایی بیشتری در توصیف دانش بشر دارد. عدد Z دو بخش اصلی دارد که به صورت Z=(A,B) نشان داده می‌شود. مجموعه A زیرمجموعه‌ای فازی از دامنه متغیرها (دیدگاه متخصص)

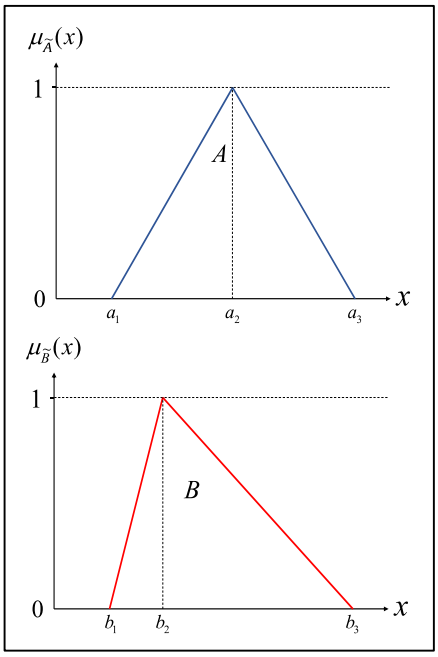
و مجموعه B مقدار اطمینان (قابلیت اطمینان) از مجموعه A را نشان می‌دهد. همچنین مولفه B نشان‌دهنده اطمینان، قدرت اعتقاد، اطمینان، احتمال و نظایر آن است [۵۰]. به طور معمول مجموعه‌های A و B در یک اصطلاح زبانی به صورت زیر بیان می‌شوند:

(A, B)= (اطمینان متوسط، خیلی زیاد)

اعداد Z ممکن است در زمینه‌های مختلف مانند اقتصاد، پیش‌بینی، ارزیابی ریسک و تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری استفاده شوند. عدد Z را می‌توان با اصطلاحات زبانی اعمال کرد و از طریق اعداد فازی مثلثی نشان داد. یک نمونه از عدد Z به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. تخمین‌های انجام شده توسط تیم متخصصان برای توصیف هر معیار نیاز به مجموعه اصطلاحات زبانی دارد (جدول ۳) که درجه عضویت آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

نکته قابل توجه نحوه تاثیر دادن قابلیت اطمینان (مولفه اول عدد Z) در محدودیت (مولفه دوم عدد Z) است. پس برای روشن شدن بیشتر، نحوه تبدیل مقادیر Z را به اعداد فازی کلاسیک بر اساس تحقیقات انجام شده بررسی می‌کنیم. فرض کنید که یک عدد Z به صورت Z=(A,B) باشد و $\left\{\tilde{A}=\left(x,\mu_{\tilde{A}}\right)\mid x\in[0,1]\right\},\left\{\tilde{B}=\left(x,\mu_{\tilde{B}}\right)\mid x\in[0,1]\right\}$ تابع عضویت مثلثی باشد. مولفه دوم عدد Z یعنی B با استفاده از معادله ۱۴ به عدد قطعی تبدیل می‌شود:

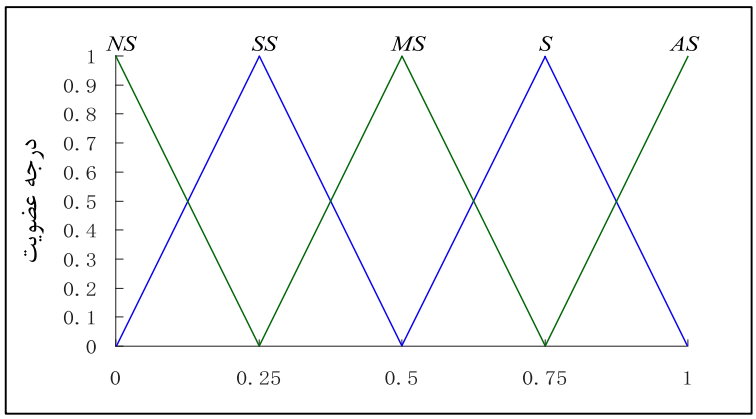
$$\alpha=\frac{\int^{x}\mu_B\,dx}{\int^{\mu_B}dx} \qquad (۱۴)$$



شکل ۴: یک نمونه عدد Z: محدویت (بالا) و قابلیت اطمینان (پایین)

جدول ۳: متغیرهای زبانی اعداد Z

عدد قطعی	متغیر زبانی	نماد	عدد Z
۱	نامطمئن	NS	(۰, ۰ ,۰/۲۵)
۳	اطمینان کم	SS	(۰, ۰/۲۵ ,۰/۵۰)
۵	اطمینان متوسط	MS	(۰/۲۵, ۰/۵۰ ,۰/۷۵)
۷	اطمینان زیاد	S	(۰/۵۰, ۰/۷۵ , ۱)
۹	کاملاً مطمئن	AS	(۰/۷۵, ۱ , ۱)



شکل ۵: درجه عضویت متغیرهای زبانی اعداد Z

سپس وزن بخش قابلیت اطمینان (مولفه دوم) در مولفه اول (محدودیت) تاثیر داده می‌شود. اعداد Z وزن‌دهی شده به صورت معادله ۱۵ نشان داده می‌شود:

$$\tilde{Z}^{\alpha} = \{(x, u_{\tilde{A}^{\alpha}}) \mid u_{\tilde{A}^{\alpha}}(x) = \alpha u_{\tilde{A}}(x),\ x \in [0,1]\} \quad (۱۵)$$

دستورالعمل‌های تبدیل مجموعه‌های زبانی تصمیم‌گیرندگان برای اعداد Z با استفاده از دستورات تبدیل (جدول ۲) و قابلیت اطمینان محدودیت‌ها (جدول ۳) محاسبه می‌شود.

به عنوان مثال اگر متخصص بیان خود را به صورت "کم" و با "اطمینان زیاد" درج کند، عدد Z به صورت زیر تاثیر داده می‌شود:

$$Z = [(1,3,5;1),(0.5,0.75,1)] \quad (۱۶)$$

ابتدا، قابلیت اطمینان مجموعه بر اساس معادله ۱۴ به یک عدد قطعی تبدیل می‌شود:

$$\alpha = \frac{\int^{x} \mu_B \, dx}{\int^{\mu_B} dx} = 0.75 \quad (۱۷)$$

سپس وزن قابلیت اطمینان برای محدودیت اعمال می‌شود:

$$\tilde{Z}^{\alpha} = (1,3,5;0.75) \quad (۱۸)$$

سرانجام، عدد Z وزن‌دار به عدد فازی معمولی تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} \tilde{Z}' &= (\sqrt{0.75}\times 1, \sqrt{0.75}\times 3, \sqrt{0.75}\times 5) \\ &= (0.87, 2.60, 4.33) \end{aligned} \quad (۱۹)$$

با تکرار یک فرآیند مشابه، همه عناصر جداول ۲ و ۳ به یک عدد فازی معمولی تبدیل می‌شوند که این تبدیل‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول ۴: تبدیل متغیرهای زبانی در اعداد Z

$\tilde{Z}'$	α	LTS		
		Z	B	A
(۰٫۲۹, ۰٫۲۹, ۰٫۸۷)	۰٫۰۸	(VL,NS)	NS	VL
(۰٫۵۰, ۰٫۵۰, ۱٫۵۰)	۰٫۲۵	(VL,SS)	SS	VL
(۰٫۷۱, ۰٫۷۱, ۲٫۱۲)	۰٫۵۰	(VL,MS)	MS	VL
(۰٫۸۷, ۰٫۸۷, ۲٫۶۰)	۰٫۷۵	(VL,S)	S	VL
(۰٫۹۶, ۰٫۹۶, ۲٫۸۷)	۰٫۹۲	(VL,AS)	AS	VL
(۰٫۲۹, ۰٫۸۷, ۱٫۴۴)	۰٫۰۸	(L,NS)	NS	L
(۰٫۵۰, ۱٫۵۰, ۲٫۵۰)	۰٫۲۵	(L,SS)	SS	L
(۰٫۷۱, ۲٫۱۲, ۳٫۵۴)	۰٫۵۰	(L,MS)	MS	L
(۰٫۸۷, ۲٫۶۰, ۴٫۳۳)	۰٫۷۵	(L,S)	S	L
(۰٫۹۶, ۲٫۸۷, ۴٫۷۹)	۰٫۹۲	(L,AS)	AS	L
(۰٫۸۷, ۱٫۴۴, ۲٫۰۲)	۰٫۰۸	(M,NS)	NS	M
(۱٫۵۰, ۳٫۵۰, ۳٫۵۰)	۰٫۲۵	(M,SS)	SS	M
(۲٫۱۲, ۳٫۵۴, ۴٫۹۵)	۰٫۵۰	(M,MS)	MS	M
(۲٫۶۰, ۴٫۳۳, ۶٫۰۶)	۰٫۷۵	(M,S)	S	M
(۲٫۸۷, ۴٫۷۹, ۶٫۷۰)	۰٫۹۲	(M,AS)	AS	M
(۱٫۴۴, ۲٫۰۲, ۲٫۶۰)	۰٫۰۸	(H,NS)	NS	H
(۲٫۵۰, ۳٫۵۰, ۴٫۵۰)	۰٫۲۵	(H,SS)	SS	H
(۳٫۵۴, ۴٫۹۵, ۶٫۳۶)	۰٫۵۰	(H,MS)	MS	H
(۴٫۳۳, ۶٫۰۶, ۷٫۷۹)	۰٫۷۵	(H,S)	S	H
(۴٫۷۹, ۶٫۷۰, ۸٫۶۲)	۰٫۹۲	(H,AS)	AS	H
(۲٫۰۲, ۲٫۶۰, ۲٫۶۰)	۰٫۰۸	(VH,NS)	NS	VH
(۳٫۵۰, ۳٫۵۰, ۴٫۵۰)	۰٫۲۵	(VH,SS)	SS	VH
(۴٫۹۵, ۶٫۳۶, ۶٫۳۶)	۰٫۵۰	(VH,MS)	MS	VH
(۶٫۰۶, ۷٫۷۹, ۷٫۷۹)	۰٫۷۵	(VH,S)	S	VH
(۶٫۷۰, ۸٫۶۲, ۸٫۶۲)	۰٫۹۲	(VH,AS)	AS	VH

۳- رتبه‌بندی راهبردهای صنایع ۴٫۰ با استفاده از رویکرد پیشنهادی

روش پیشنهادی در این مطالعه برای اولویت‌بندی راهبردهای IME با در نظر گرفتن معادن بزرگ‌مقیاس ایران اجرا شد. در حال حاضر معادن بزرگ‌مقیاس ایران از مولفه‌های صنایع ۴٫۰ استفاده نمی‌کنند و در بخش‌های مختلف عملیات استخراج مشکلات عمده‌ای وجود دارد که از طریق این رویکرد به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. در ادامه نتایج این تحقیق ارایه می‌شود.

۳-۱- محاسبه وزن معیارها با رویکرد اثرات علت و معلولی

در این بخش میزان اهمیت معیارهای مورد نیاز برای انتخاب راهبردهای صنایع ۴٫۰ مشخص و با استفاده از نقشه شناختی فازی یک وزن مشخص به هر کدام نسبت داده می‌شود. مزیت انجام این کار این است که میزان اهمیت بر اساس یک الگوریتم یادگیری شبیه‌سازی شده به دست می‌آید و از وابستگی به نظرات کارشناسان و خطای وزن‌دهی خارج می‌شود.

برای دستیابی به نتایج مطلوب پرسشنامه‌ای شامل پنج

راهبرد (گزینه) و ۱۱ معیار بر اساس ۵۵ سوال طراحی و در اختیار تیمی متشکل از هشت متخصص، شامل چهار استاد دانشگاه و چهار کارشناس با تجربه معدنکاری قرار گرفت. تخصص کارشناسان این تیم شامل دو نفر با تخصص اقتصاد و مدیریت معدنی با سابقه کاری ۲۰ و ۵ سال، سه نفر با تخصص استخراج معدن با سابقه کاری ۱۷ و ۲۵ سال، یک نفر با تخصص فناوری اطلاعات با سابقه کاری ۱۳ سال، یک نفر با تخصص صنایع با سابقه کاری ۸ سال و یک نفر دیگر با تخصص محیط‌زیست معدنی با سابقه کاری ۱۶ سال است که این کارشناسان در مورد معیارها و گزینه‌ها نظر دادند.

از میان پرسشنامه‌های ارسال شده به خبرگان، در نهایت هشت پرسشنامه دریافت و برای بررسی پایایی سوالات از ضریب آلفای کرونباخ[۳۴] استفاده شد. پاسخ‌های مربوط به وزن معیارها و ماتریس مقایسه‌های دوتایی به ترتیب ضرایب آلفای کرونباخ ۰٫۹۳۴ و ۰٫۹۵۷ دارد که نشانگر قابلیت اطمینان و اعتبار عالی است.

کارشناسان ارتباط علتی و معلولی بین معیارها را بیان کرده و در کنار هر پاسخ، میزان اطمینان خود را نیز بیان کردند که به ایجاد ماتریس اولیه منجر شد (جدول ۵). پس از آن میزان قابلیت اطمینان هر نظر خبره، در پاسخ آن تاثیر داده شد تا یک دیدگاه دقیق از نظر هر کدام به دست آید (جدول ۶). در نهایت ماتریس به دست آمده فازی زدایی شد (جدول ۷) تا در رویکرد نقشه شناختی فازی استفاده شود و وزن هر معیار با تکیه بر تکرار شبیه‌سازی به دست آید. در

جدول ۵: ماتریس اولیه قبل از تاثیر دادن قابلیت اطمینان

وزن	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
C1	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰,۰,۰٫۹,۰٫۲۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۹,۰٫۶۴,۰٫۷۱)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)
	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰,۰,۰)
C2	(۰,۱,۰٫۳,۰٫۵)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۶,۰٫۴۳,۰٫۶۱)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
	(۰,۱۱,۰٫۳۴,۰٫۵۶)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۶,۰٫۴۳,۰٫۶۱)	(۰,۰,۰)	(۰,۲۱,۰٫۳۵,۰٫۴۹)
C3	(۰,۳,۰٫۵,۰٫۷)	(۰,۱۱,۰٫۳۴,۰٫۵۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۳,۰٫۶۱,۰٫۷۸)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)
	(۰,۱,۰٫۳,۰٫۵)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
C4	(۰,۵,۰٫۷,۰٫۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)
C5	(۰٫۳۴,۰٫۵۶,۰٫۷۸)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۳,۰٫۶۱,۰٫۷۸)	(۰٫۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)
	(۰,۰,۱,۰٫۳)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰٫۹,۰٫۲۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۲۱,۰٫۳۵,۰٫۴۹)
C6	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰٫۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)
	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰٫۹,۰٫۲۶)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۹,۰٫۶۴,۰٫۷۱)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)
C7	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰,۰,۰)
	(۰,۱,۰٫۳,۰٫۵)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۶,۰٫۴۳,۰٫۶۱)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
C8	(۰,۱۱,۰٫۳۴,۰٫۵۶)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۶,۰٫۴۳,۰٫۶۱)	(۰,۰,۰)	(۰,۲۱,۰٫۳۵,۰٫۴۹)
	(۰,۳,۰٫۵,۰٫۷)	(۰,۱۱,۰٫۳۴,۰٫۵۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۳,۰٫۶۱,۰٫۷۸)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)
C9	(۰,۱,۰٫۳,۰٫۵)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
	(۰,۵,۰٫۷,۰٫۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
C10	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)
	(۰٫۳۴,۰٫۵۶,۰٫۷۸)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۳,۰٫۶۱,۰٫۷۸)	(۰٫۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)
C11	(۰,۰,۱,۰٫۳)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰٫۹,۰٫۲۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۲۱,۰٫۳۵,۰٫۴۹)
	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)

جدول ۶: ماتریس اولیه پس از تاثیر دادن قابلیت اطمینان

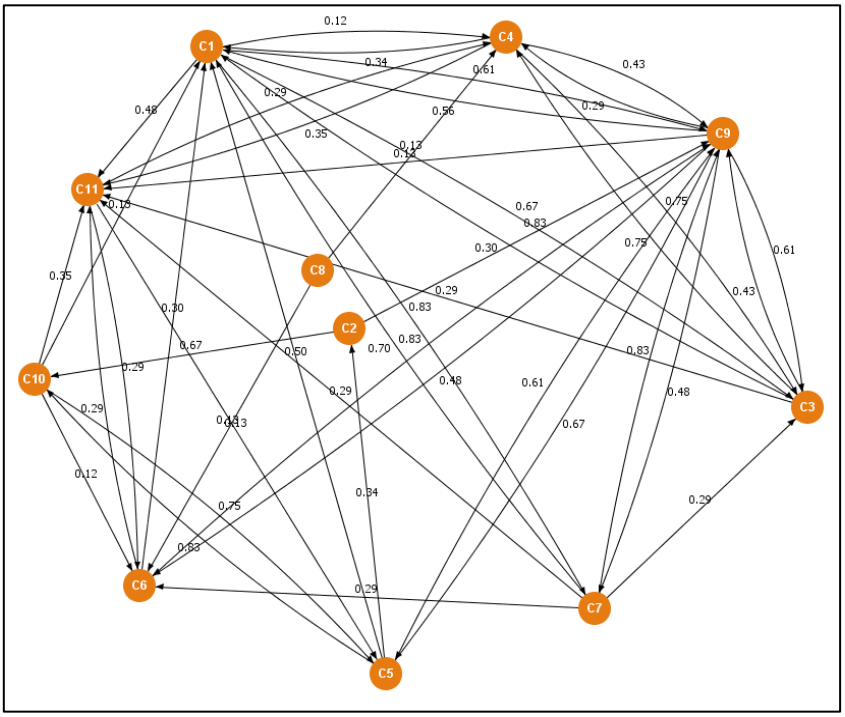
وزن	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
C1	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰,۰,۰٫۹,۰٫۲۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۹,۰٫۶۴,۰٫۷۱)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)
C2	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰,۰,۰)
C3	(۰,۱,۰٫۳,۰٫۵)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۶,۰٫۴۳,۰٫۶۱)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
C4	(۰,۱۱,۰٫۳۴,۰٫۵۶)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۲۶,۰٫۴۳,۰٫۶۱)	(۰,۰,۰)	(۰,۲۱,۰٫۳۵,۰٫۴۹)
C5	(۰,۳,۰٫۵,۰٫۷)	(۰,۱۱,۰٫۳۴,۰٫۵۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۳,۰٫۶۱,۰٫۷۸)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)
C6	(۰,۱,۰٫۳,۰٫۵)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
C7	(۰,۵,۰٫۷,۰٫۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۷,۰٫۸۶,۰٫۹۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)
C8	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)
C9	(۰٫۳۴,۰٫۵۶,۰٫۷۸)	(۰,۰,۰)	(۰٫۴۳,۰٫۶۱,۰٫۷۸)	(۰٫۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰٫۴۸,۰٫۶۷,۰٫۸۶)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)	(۰٫۲۹,۰٫۴۸,۰٫۶۷)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)
C10	(۰,۰,۱,۰٫۳)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۶۱,۰٫۷۸,۰٫۸۷)	(۰,۰,۰٫۹,۰٫۲۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۲۱,۰٫۳۵,۰٫۴۹)
C11	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰٫۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۱,۰٫۲۹)	(۰,۱,۰٫۲۹,۰٫۴۸)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۰)

شکل ۶ مدل مفهومی نقشه شناختی فازی برای معیارهای انتخاب راهبردهای صنایع ۴٫۰ نشان داده شده است. در این گراف هدایت شده، کمان‌ها به معنای تاثیر هر معیار بر روی معیار دیگر و مقادیر روی هر پیکان درجات نسبی یا همان مقادیر جدول ۷ است.

لازم به ذکر است که ماتریس وزنی حاصل از تاثیر قابلیت اطمینان، در نشان دادن تاثیر هر معیار بر دیگری بسیار خوب عمل کرده است. در ادامه این رویکرد، با استفاده از معادلات ۴ و ۵ شبیه‌سازی انجام و ماتریس اولیه به روزرسانی شد که در نهایت ماتریس نهایی به دست آمد. تغییرات وزن هر معیار در هر بار شبیه‌سازی تا رسیدن به تعامل در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: ماتریس نهایی وزن نسبی معیارها

وزن	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
C1	۰	۰	۰٫۶۷	۰٫۱۲	۰	۰	۰٫۸۳	۰	۰٫۶۱	۰	۰٫۴۸
C2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۸۳	۰٫۶۷	۰
C3	۰٫۳	۰	۰	۰٫۷۵	۰	۰	۰	۰	۰٫۴۳	۰	۰٫۲۹
C4	۰٫۳۴	۰	۰٫۷۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۴۳	۰	۰٫۳۵
C5	۰٫۵	۰٫۳۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶۱	۰٫۸۳	۰
C6	۰٫۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۸۳	۰	۰٫۲۹
C7	۰٫۷	۰	۰٫۲۹	۰	۰	۰٫۲۹	۰	۰	۰٫۸۳	۰	۰٫۲۹
C8	۰	۰	۰	۰٫۱۳	۰	۰٫۱۳	۰	۰	۰	۰	۰
C9	۰٫۵۶	۰	۰٫۶۱	۰٫۲۹	۰٫۶۷	۰٫۴۸	۰٫۴۸	۰	۰	۰	۰٫۱۳
C10	۰٫۱۳	۰	۰	۰	۰٫۷۵	۰٫۱۲	۰	۰	۰	۰	۰٫۳۵
C11	۰	۰	۰	۰٫۲۹	۰٫۱۳	۰٫۲۹	۰	۰	۰	۰	۰



شکل ۶: مدل مفهومی نقشه شناختی فازی

در جدول ۸ وزن نهایی هر معیار به همراه اولویت آن درج شده است. با توجه به این جدول معیار "تکنولوژی" بیشترین تاثیر و معیار "فرهنگ" کمترین تاثیر را بر روی راهبردهای صنایع ۴٫۰ دارد.

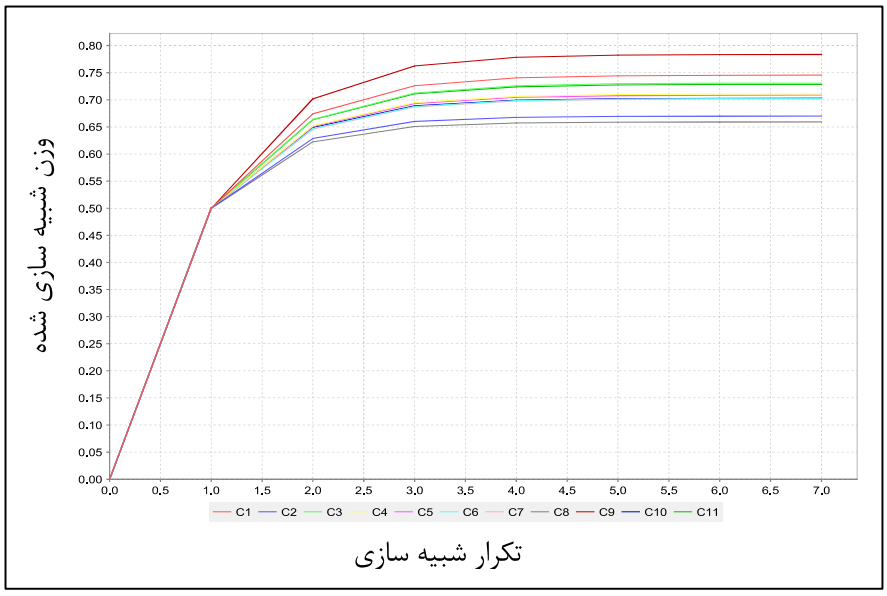
۳-۲- VIKOR فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها

در راهبردهای IME، هزینه‌های هوشمندسازی معدن باید بسیار ناچیز برنامه‌ریزی شود. همچنین دیدگاه‌های اقتصادی سیاست هوشمندسازی باید روشن شود. یکی از عوامل اساسی در پیاده‌سازی IME، فراهم کردن موقعیت‌های شغلی عالی و کسب سود پس از پایان فرآیند هوشمندسازی و شروع چرخه فعالیت معدن است. درآمد حاصل از راهبرد IME هزینه‌های هوشمندسازی را جبران می‌کند. علاوه بر جنبه‌های اقتصادی، ملاحظات محیط زیستی، مصرف بهینه انرژی، شرایط اجتماعی مناسب و فراهم کردن فرصت‌های شغلی، به ویژه برای افراد بومی باید در توجیه راهبرد IME مورد بررسی قرار گیرد.

در این بخش راهبردهای صنایع ۴٫۰ رتبه‌بندی می‌شوند. پس از محاسبه وزن هر معیار، باید ماتریس تصمیم‌گیری را با استفاده از نظرات متخصص ایجاد کرد. هشت متخصص باتجربه تیم از متغیرهای زبانی (جدول ۲) برای اتخاذ نظرات مشترک خود برای هر ماتریس تصمیم‌گیری و ماتریس مقایسه‌های زوجی استفاده کردند. پس از جمع‌آوری داده‌ها از طریق پرسشنامه طراحی شده، نظرات متخصصان با پیروی از دستورالعمل‌های یاد شده در جدول ۲ به اعداد فازی مثلثی تبدیل شدند. لازم به ذکر است که تمام نتایج ارایه شده در جداول پس از تاثیر دادن عدد Z در دیدگاه خبرگان است. ماتریس تصمیم اولیه که حاصل از ادغام نظرات کارشناسان است در جدول ۹ نشان داده شده است. در مرحله بعدی، معادلات ۶ و ۷ برای محاسبه ایده‌آل مثبت و منفی استفاده شد که در جدول ۱۰ درج شده است، سپس اختلاف فازی

جدول ۸: میزان اهمیت هر معیار و اولویت‌بندی اوزان

معیار	نماد	وزن نهایی	رتبه از نظر میزان اهمیت
اشتغال	C1	۰٫۷۴۵۴	۲
مصرف انرژی	C2	۰٫۶۶۹۸	۱۰
مخاطرات	C3	۰٫۷۳۰۸	۳
منابع انسانی آموزش‌دیده	C4	۰٫۷۱۰۶	۵
بازاریابی فروش	C5	۰٫۷۰۸۶	۶
محیط زیست	C6	۰٫۷۰۲۳	۸
ریسک	C7	۰٫۷۰۱۹	۹
فرهنگ	C8	۰٫۶۵۹۰	۱۱
تکنولوژی	C9	۰٫۷۸۳۶	۱
کیفیت تولیدات معدنی	C10	۰٫۷۰۲۸	۷
قوانین	C11	۰٫۷۲۵۸	۴



شکل ۷: تغییرات اوزان در هر بار تکرار شبیه‌سازی

نرمال شده طبق معادلات ۸ و ۹ محاسبه شد که در جدول ۱۰ بیان شده‌اند. پس از نرمال‌سازی ماتریس (جدول ۱۰)، شاخص S، R و Q با مراجعه به معادلات ۱۰ تا ۱۲ به دست آمد که در جدول ۱۱ نتایج درج شده است.

در نهایت هر مقدار در گروه خود به صورت نزولی رتبه‌بندی می‌شود (جدول ۱۲). با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان رتبه‌بندی راهبردهای صنایع ۴/۰ در گروه Q را به صورت زیر نشان داد:

$$A1>A3>A4>A5>A2 \quad (۲۰)$$

راهبرد اول (A1) یعنی "ارایه مشوق‌های دولتی به معادن برای استفاده معادن از فن‌آوری‌های به‌روز" دارای رتبه اول در هرسه گروه است. صحت این رتبه‌بندی باید بر اساس شروط روش VIKOR بررسی شود که در بخش روش‌شناسی مقاله به آن اشاره شد. همان‌طور که از جدول ۱۲ مشخص است، مقدار Q برای گزینه اول و دوم به ترتیب برابر صفر و ۰/۴۱۲ است. با استناد به معادله ۱۳ مشخص می‌شود که طرف راست معادله برابر ۰/۲۵ و طرف چپ برابر ۰/۴۱۲ است. با توجه به اینکه طرف چپ معادله بیشتر از طرف راست است، پس شرط اول برقرار است:

$$Q\left(A^{(2)}\right)=0.412 \quad (۲۱)$$

$$Q\left(A^{(1)}\right)=0 \quad (۲۲)$$

$$\frac{1}{m-1}=0.25 \quad (۲۳)$$

بر اساس مقادیر R و S همان‌طور که در جدول ۱۱ ارایه شده است، رتبه صعودی پنج راهبرد به عنوان معادلات ۲۴ و ۲۵ نشان داده شده است:

$$S1>S5>S4>S3>S2 \quad (۲۴)$$

$$R1>R3>R4>R2>R5 \quad (۲۵)$$

یعنی گزینه اول، دارای رتبه اول در هر دو گروه S و R نیز است، بنابراین شرط دوم نیز برقرار است.

نتایج اولویت‌بندی نشان می‌دهد که راهبرد "ارایه مشوق‌های دولتی به معادن برای استفاده معادن از فن‌آوری‌های به‌روز" به عنوان راهبرد ارجح انتخاب شده و دارای کمترین مقدار Q در بین راهبردهای IME در نظر گرفته شده است. بر

جدول ۹: ماتریس تصمیم حاصل از نظرات خبرگان پس از تاثیر عدد Z

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
A1	(۰,۸۶۶, ۴,۷۵۷, ۸,۶۱۷)	(۲,۱۲۱, ۶,۲۸۵, ۸,۶۱۷)	(۲,۱۲۱, ۶,۲۸۵, ۸,۶۱۷)	(۰,۸۶۶, ۳,۷۵۳, ۷,۷۹۴)	(۰,۸۶۶, ۲,۱۷۴, ۴,۹۵)	(۰,۷۰۷, ۲,۱۷۴, ۴,۹۵)	(۲,۱۲۱, ۵,۶۴۷, ۸,۶۱۷)	(۰,۷۰۷, ۱,۲۶۲, ۳,۵۳۶)	(۲,۸۷۲, ۶,۷۰۲, ۸,۶۱۷)	(۱,۵, ۴,۲۳۴, ۸,۶۱۷)	(۰,۸۶۶, ۲,۶۲۹, ۶,۰۶۲)
A2	(۲,۱۲۱, ۴,۲۳۴, ۶,۷۰۲)	(۲,۵۹۸, ۵,۹۱۱, ۸,۶۱۷)	(۲,۸۷۲, ۶,۰۶۴, ۸,۶۱۷)	(۰,۸۶۶, ۳,۱۷۵, ۷,۷۹۴)	(۰,۷۰۷, ۱,۹۶۸, ۴,۳۳)	(۲,۵۹۸, ۶,۵۵, ۸,۶۱۷)	(۲,۵۹۸, ۶,۵۵, ۸,۶۱۷)	(۰,۷۰۷, ۲,۳۸۶, ۶,۰۶۲)	(۰,۷۰۷, ۲,۳۸۶, ۶,۰۶۲)	(۳,۵۳۶, ۵,۳۳۱, ۷,۷۹۴)	(۰,۷۰۷, ۱,۳۳۱, ۳,۵۳۶)
A3	(۳,۵۹۸, ۵,۱۲۱, ۸,۶۱۷)	(۰,۹۵۷, ۴,۳۷, ۸,۶۱۷)	(۰,۹۵۷, ۵,۴۲۵, ۸,۶۱۷)	(۰,۹۵۷, ۳,۸۴۴, ۶,۰۶۲)	(۰,۸۶۶, ۱,۹۵۵, ۳,۵)	(۲,۱۲۱, ۵,۰۰۸, ۸,۶۱۷)	(۴,۳۳, ۶,۴۸۹, ۸,۶۱۷)	(۰,۸۶۶, ۲,۳۸۹, ۴,۵)	(۰,۹۵۷, ۵,۲۷۳, ۸,۶۱۷)	(۰,۷۰۷, ۲,۱۷۴, ۴,۹۵)	(۰,۷۰۷, ۳,۰۶۴, ۶,۳۶۴)
A4	(۰,۹۵۷, ۴,۱۳۹, ۸,۶۱۷)	(۰,۷۰۷, ۵,۳۴۲, ۸,۶۱۷)	(۴,۳۳, ۶,۶۴, ۷,۷۹۴)	(۰,۷۰۷, ۲,۶۲۲, ۶,۷۰۲)	(۰,۸۶۶, ۲,۶۲۹, ۷,۷۹۴)	(۰,۸۶۶, ۲,۶۲۹, ۷,۷۹۴)	(۲,۸۷۲, ۵,۶۳۷, ۷,۷۹۴)	(۲,۵۹۸, ۵,۹۱۱, ۸,۶۱۷)	(۲,۵۹۸, ۵,۹۱۱, ۸,۶۱۷)	(۰,۹۵۷, ۳,۸۴۴, ۶,۰۶۲)	(۲,۵۹۸, ۴,۴۸۲, ۶,۷۰۲)
A5	(۰,۹۵۷, ۴,۶۳۵, ۸,۶۱۷)	(۰,۹۵۷, ۵,۴۲۵, ۸,۶۱۷)	(۰,۹۵۷, ۳,۷۸۶, ۶,۳۶۴)	(۰,۷۰۷, ۴,۹۵, ۶,۳۶۴)	(۰,۹۵۷, ۳,۷۸۶, ۶,۳۶۴)	(۲,۸۷۲, ۵,۶۳۷, ۷,۷۹۴)	(۲,۵۹۸, ۶,۵۵, ۸,۶۱۷)	(۲,۱۲۱, ۵,۰۶۲, ۸,۶۱۷)	(۰,۹۵۷, ۲,۸۷۲, ۸,۶۱۷)	(۰,۸۶۶, ۳,۶۹۴, ۶,۳۶۴)	(۲,۵۹۸, ۵,۴۸۵, ۷,۷۹۴)

جدول ۱۰: ماتریس نرمال شده و ایده‌آل مثبت و منفی

معیار	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
f^*	۵/۴۵	۴/۶۵	۵	۴/۱۴	۳/۷۶	۷/۲۲	۵/۳۱	۵/۲۷	۶/۶	۵/۵۵	۵/۲۹
f^-	۴/۴۲	۵/۷۱	۶/۹۱	۳/۳۴	۲/۱۱	۵/۲۵	۶/۴۸	۱/۸۳	۴/۱۵	۲/۶۱	۱/۸۲
وزن	۰/۷۴۵	۰/۶۷	۰/۷۳۱	۰/۷۱۱	۰/۷۰۹	۰/۷۰۲	۰/۷۰۲	۰/۶۵۹	۰/۷۸۴	۰/۷۰۲۸	۰/۷۲۹
A1	۴/۷۵	۵/۶۷	۵/۱۵	۴/۱۴	۲/۶۱	۵/۹۲	۵/۴۶	۱/۸۳	۶/۶	۴/۷۸	۳/۱۹
A2	۴/۴۲	۵/۷۱	۵/۸۵	۳/۹۵	۲/۳۳	۵/۹۲	۵/۹۲	۳/۰۵	۶/۰۶	۵/۵۵	۱/۸۲
A3	۵/۴۵	۴/۶۵	۵	۳/۶۲	۲/۱۱	۵/۲۵	۵/۳۱	۲/۵۵	۴/۹۵	۲/۶۱	۳/۳۸
A4	۴/۵۷	۴/۸۹	۶/۹۱	۳/۳۴	۳/۷۶	۷/۲۲	۶/۴۸	۵	۵/۷۱	۳/۶۲	۴/۵۹
A5	۴/۷۴	۵	۶/۲۵	۴/۰۱	۳/۷	۵/۴۳	۵/۹۲	۵/۲۷	۴/۱۵	۳/۶۴	۵/۲۹

جدول ۱۱: ماتریس نرمال شده وزن‌دار و شاخص‌های S، R و Q

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	S	R	Q	R^*	R^-
A1	۰/۵۰۶	۰/۶۴۸	۰/۰۵۸	۰	۰/۴۹۳	۰/۴۶۲	۰/۰۹۱	۰/۶۵۹	۰	۰/۱۸۳	۰/۴۴۳	۳/۵۴۳	۰/۶۵۹	۰	۰/۷۸۳۶	۰/۶۵۹
A2	۰/۷۴۵	۰/۶۷	۰/۳۲۵	۰/۱۷۲	۰/۶۱۱	۰/۴۶۲	۰/۳۶۷	۰/۴۲۵	۰/۱۷۱	۰	۰/۷۲۹	۴/۶۷۸	۰/۷۴۵	۰/۸۴۷		
A3	۰	۰	۰	۰/۴۶۲	۰/۷۰۹	۰/۷۰۲	۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۸	۰/۷۰۳	۰/۴۰۲	۴/۰۲۷	۰/۷۰۹	۰/۴۱۲	S^*	S^-
A4	۰/۶۳۱	۰/۱۵۲	۰/۷۳۱	۰/۷۱۱	۰	۰	۰/۷۰۲	۰/۰۵۱	۰/۲۸۵	۰/۴۶۱	۰/۱۴۷	۳/۸۷	۰/۷۳۱	۰/۴۳۲	۴/۶۷۷۹	۳/۵۴۲۸
A5	۰/۵۱۳	۰/۲۲۲	۰/۴۷۹	۰/۱۱۷	۰/۰۲۶	۰/۶۳۶	۰/۳۶۷	۰	۰/۷۸۴	۰/۴۵۶	۰	۳/۶	۰/۷۸۴	۰/۵۲۵		

جدول ۱۲: رتبه‌بندی راهبردها در سه گروه S، R و Q

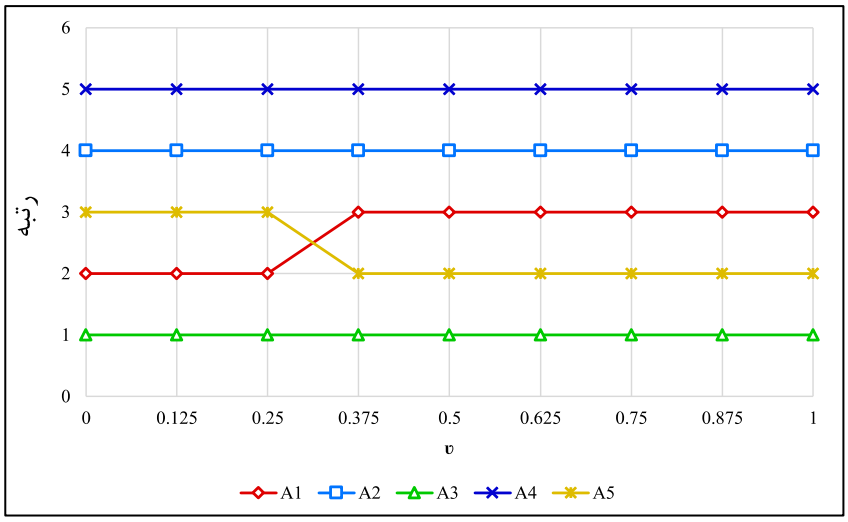
گزینه	S	R	Q	رتبه در S	رتبه در R	رتبه در Q
A1	۳/۵۴۳	۰/۶۵۹	۰	۱	۱	۱
A2	۴/۶۷۸	۰/۷۴۵	۰/۸۴۷	۵	۴	۵
A3	۴/۰۲۷	۰/۷۰۹	۰/۴۱۲	۴	۲	۲
A4	۳/۸۷	۰/۷۳۱	۰/۴۳۲	۳	۳	۳
A5	۳/۶	۰/۷۸۴	۰/۵۲۵	۲	۵	۴

این اساس، سیاست ارایه مشوق‌های دولتی به معادن به عنوان اولویت اصلی هوشمندسازی معادن بزرگ‌مقیاس در ایران قابل استنتاج است. در دو اولویت بعدی، سرمایه‌گذاری صاحبان معادن در تامین زیرساخت‌های مورد نیاز (تکنولوژی‌های مورد نیاز مانند تامین انرژی و ارتباط بدون سیم در معادن) و توسعه معدنکاری سبز و بی‌خطر قرار دارند که ممکن است بسیار موثر باشند. لازم به ذکر است که راهبردهای "توسعه همکاری معادن با مراکز پژوهشی و تحقیق و توسعه (R&D) با هدف توسعه فن‌آوری‌های جدید و مورد نیاز معادن" و "آموزش و بهبود نیروی انسانی فعال در بخش معادن" به عنوان دو اولویت آخر انتخاب شدند.

۳-۳- آنالیز حساسیت

در مطالعه حاضر، تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتری برای نشان دادن اثربخشی رویکرد ارایه شده انجام شده است. هدف اصلی از تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتری، ارزیابی تاثیر وزن راهبرد حداکثر سود گروه (v) به عنوان عملکرد وزن تصمیم‌گیرنده در رتبه‌بندی راهبردهای IME است که به طور کلی، در محاسبات مقدار v بین صفر تا ۱ انتخاب می‌شود. از این رو تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتری بر روی این پارامتر، نتایج نهایی حاصل از رتبه‌بندی را ارزیابی می‌کند [۵۱]. اگر v مقداری بین صفر تا ۰/۲۵ اختیار کند، راهبردهای IME بیشتر به R وابسته می‌شوند تا به S. اگر v مقداری بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ اختیار کند، راهبردهای IME بین S و R محاسبه می‌شوند. اگر v مقداری بین ۰/۷۵ تا ۱ اختیار کند، رتبه‌بندی راهبردها بیشتر به S بستگی دارد تا R [۵۲]. نتایج آنالیز حساسیت پارامتری در شکل ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، رتبه‌بندی سه راهبرد تحت تاثیر تغییرات v قرار نگرفت. این بدان معنی



شکل ۸: آنالیز حساسیت پارامتری

است که اولویت‌های راهبرد IME در R و S یکسان است. همچنین می‌توان دریافت که با افزایش مقدار v، گزینه‌های A1 و A5 به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. مقادیر محاسبه شده نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از مدل معرفی شده قابل اعتماد و دقیق هستند. بر این اساس، از این تجزیه و تحلیل حساسیت می‌توان نتیجه گرفت که روش ارایه شده یک مکانیسم ثابت برای راهبردهای IME در نظر می‌گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

اگرچه معدنکاری به عنوان یک فعالیت صنعتی مادر، تاثیر قابل توجهی در اقتصاد یک کشور ایفا می‌کند، اما در حوزه‌های مختلف مانند مخاطرات محیط زیستی، مخاطرات شغلی و بهره‌وری پایین با چالش‌های اساسی روبه‌رو است. کشورهای توسعه یافته بهره‌مند از منابع معدنی، سعی کرده‌اند با استفاده از تکنولوژی‌های جدید و روش‌های هوشمندانه تا حد ممکن چالش‌های موجود را کاهش دهند. بدون شک با توجه به اهمیت روزافزون صنعت معدنکاری در ایران برای فاصله گرفتن از اقتصاد نفتی، استفاده از صنایع ۴٫۰ می‌تواند یک گام مهم در مواجهه با چالش‌ها و افزایش تولید باشد، بنابراین در این مطالعه سعی شد یک چارچوب کلی برای پیاده‌سازی راهبردهای مرتبط با صنایع ۴٫۰ در معادن بزرگ‌مقیاس کشور ارایه شود. این مقاله با تلفیق روش VIKOR فازی و ئئوری اعداد Z، راهبردهای صنایع ۴٫۰ را ارزیابی و اولویت‌بندی کرد. بر این اساس، ۱۱ معیار اصلی یعنی اشتغال، مصرف انرژی، مخاطرات، منابع انسانی آموزش‌دیده، بازاریابی فروش، محیط زیست، ریسک، فرهنگ، تکنولوژی، کیفیت تولیدات معدنی و قوانین همراه با پنج راهبرد، با تاکید بر اجرای راهبردهای صنایع ۴٫۰ تعریف شد. برای تعیین میزان اهمیت معیارها و اولویت‌بندی اهمیت آن‌ها از رویکرد ترکیبی نقشه شناختی فازی و اعداد Z استفاده شد. نتایج این رویکرد نشان داد که معیار "تکنولوژی" بیشترین و معیار "فرهنگ" کمترین تاثیر را بر روی راهبردهای صنایع ۴٫۰ دارد. با اعمال روش پیشنهادی و حل ماتریس اولیه، مقادیر S، R، Q رتبه‌بندی و بهترین راهبردهای IME مشخص شدند. بر اساس نتایج اولویت‌بندی "ارایه مشوق‌های دولتی به معادن برای استفاده معادن از فن‌آوری‌های به‌روز" به عنوان مناسب‌ترین گزینه انتخاب شد.

همچنین نتایج آنالیزحساسیت نشان می‌دهد که رتبه‌بندی راهبردها تحت تاثیر مقدار v قرار نگرفت و فقط رتبه‌بندی راهبردهای اول و پنجم تغییر می‌کند. نتایج به دست آمده صحت رتبه‌بندی را اثبات کرد. بر اساس ارزیابی‌های انجام شده، گزینه انتخاب شده یک راه حل اساسی برای هوشمندسازی معادن بزرگ مقیاس ایران است.

۵- مراجع

[1] Thatcher, M. E., and Oliver, J. R. (2001). *"The impact of technology investments on a firm's production efficiency, product quality, and productivity"*. Journal of Management Information Systems, 18(2): 17-45. DOI: https://doi.org/10.1080/07421222.2001.11045685.

[۲] پورمیرزائی، ر.؛ ۱۳۹۶؛ "**بررسی نقش صنعت معدنکاری و منابع معدنی در توسعه پایدار کشور**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دوم، شماره ۳ ،ص ۱۲-۱.

[3] Sishi, M., and Telukdarie, A. (2020). *"Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry-a case study"*. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 11(1): 1-22.

[4] Lu, Y. (2017). *"Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues"*. Journal of Industrial Information Integration, 6,: 1-10.

[5] Vaidya, S., Ambad, P., and Bhosle, S. (2018). *"Industry 4.0–a glimpse"*. Procedia Manufacturing, 20: 233-238.

[6] Özdağoğlu, A., Özdağoğlu, G., Topoyan, M., and Damar, M. (2020). *"A predictive filtering approach for clarifying bibliometric datasets: an example on the research articles related to industry 4.0"*. Technology Analysis and Strategic Management, 32(2): 158-174.

[7] Wu, H. W., and Gillies, A. D. S. (2005). *"Real-time airflow monitoring and control within the mine production system"*. In Eighth International Mine Ventilation Congress, 383-389.

[8] Bai, M., Zhao, X., Hou, Z. G., and Tan, M. (2007). *"A wireless sensor network used in coal mines"*. In 2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 319-323.

[9] Niu, X., Huang, X., Zhao, Z., Zhang, Y., Huang, C., and Cui, L. (2007). *"The design and evaluation of a wireless sensor network for mine safety monitoring"*. In IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference, 1291-1295. IEEE.

[10] Li, M., and Liu, Y. (2009). *"Underground coal mine monitoring with wireless sensor networks"*. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 5(2): 1-29.

[11] Liu, Z., Li, C., Wu, D., Dai, W., Geng, S., and Ding, Q. (2010). *"A wireless sensor network based personnel positioning scheme in coal mines with blind areas"*. Sensors, 10(11): 9891-9918.

[12] Bo, C., Peng, Z., Da, Z., and Junliang, C. (2012). *"The complex alarming event detecting and disposal processing approach for coal mine safety using wireless sensor network"*. International Journal of Distributed Sensor Networks, 8(11): 280576.

[13] Moridi, M. A., Kawamura, Y., Sharifzadeh, M., Chanda, E. K., and Jang, H. (2014). *"An investigation of underground monitoring and communication system based on radio waves attenuation using ZigBee"*. Tunnelling and Underground Space Technology, 43: 362-369.

[14] Mahdavipour, O., Mueller-Sim, T., Fahimi, D., Croshere, S., Pillatsch, P., Merukh, J., Zegna Baruffa, V., Sabino, J., Tran, K., Alanis, G., Solomon, P., Wright, P., White, R. M., Gundel, L., and Paprotny, I. (2015, November). *"Wireless sensors for automated control of total incombustible content (TIC) of dust deposited in underground coal mines"*. IEEE SENSORS, Busan, Korea (South), 1-4. DOI: 10.1109/ICSENS.2015.7370353.

[15] Cheng, B., Cheng, X., and Chen, J. (2015). *"Lightweight monitoring and control system for coal mine safety using REST style"*. ISA Transactions, 54: 229-239.

[16] Zhou, G., Zhu, Z., Zhang, P., and Li, W. (2016). *"Node deployment of band-type wireless sensor network for underground coalmine tunnel"*. Computer Communications, 81: 43-51.

[17] Garriga, M., Mateos, C., Flores, A., Cechich, A., and Zunino, A. (2016). *"RESTful service composition at a glance: A survey"*. Journal of Network and Computer Applications, 60: 32-53.

[18] Ang, J. H., Goh, C., Saldivar, A. A. F., and Li, Y. (2017). *"Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment"*. Energies, 10(5): 610.

[19] Moktadir, M. A., Ali, S. M., Kusi-Sarpong, S., and Shaikh, M. A. A. (2018). *"Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection"*. Process Safety and Environmental Protection, 117: 730-741.

[20] Büyüközkan, G., Feyzioğlu, O., and Havle, C. A. (2019, July). *"Analysis of success factors in aviation 4.0 using integrated intuitionistic fuzzy MCDM methods"*. In International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems, Springer, Cham, 598-606.

[21] Bányai, T., Tamás, P., Illés, B., Stankevičiūtė, Ž., and Bányai, Á. (2019). *"Optimization of municipal waste collection routing: Impact of industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability"*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(4): 634.

[22] Li, Y., Dai, J., and Cui, L. (2020). *"The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model"*. International Journal of Production Economics, 229: 107777.

[23] Nara, E. O. B., da Costa, M. B., Baierle, I. C., Schaefer, J. L., Benitez, G. B., do Santos, L. M. A. L., and Benitez, L. B. (2021). *"Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of Brazil's plastic industry"*. Sustainable Production and Consumption, 25: 102-122.

[24] Bakhtavar, E., Aghayarloo, R., Yousefi, S., Hewage, K., and Sadiq, R. (2019). *"Renewable energy based mine reclamation strategy: a hybrid fuzzy-based network analysis"*. Journal of Cleaner Production, 230: 253-263.

[25] Wang, T. C., and Chang, T. H. (2005, April). *"Fuzzy VIKOR as a resolution for multicriteria group decision-making"*. In The 11th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Paris, France: Atlantis Press, 352-356.

[26] Shemshadi, A., Shirazi, H., Toreihi, M., and Tarokh, M. J. (2011). *"A fuzzy VIKOR method for supplier selection based on entropy measure for objective weighting"*. Expert Systems with Applications, 38(10): 12160-12167.

[27] Yücenur, G. N., and Demirel, N. Ç. (2012). *"Group decision making process for insurance company selection problem with extended VIKOR method under fuzzy environment"*. Expert Systems with Applications, 39(3): 3702-3707.

[28] Liu, H. C., Wu, J., and Li, P. (2013). *"Assessment of health-care waste disposal methods using a VIKOR-based fuzzy multi-criteria decision making method"*. Waste Management, 33(12): 2744-2751.

[29] Yang, Y. P. O., Shieh, H. M., and Tzeng, G. H. (2013). *"A VIKOR technique based on DEMATEL and ANP for information security risk control assessment"*. Information Sciences, 232: 482-500.

[30] Kahraman, C., Süder, A., and Kaya, İ. (2014). *"Fuzzy multicriteria evaluation of health research investments"*. Technological and Economic Development of Economy, 20(2): 210-226.

[31] Salimi, A. H., Noori, A., Bonakdari, H., Masoompour Samakosh, J., Sharifi, E., Hassanvand, M., ... and Agharazi, M. (2020). *"Exploring the role of advertising types on improving the water consumption behavior: An application of integrated fuzzy AHP and fuzzy VIKOR method"*. Sustainability, 12(3): 1232.

[32] Rathore, R., Thakkar, J. J., and Jha, J. K. (2020). *"Evaluation of risks in foodgrains supply chain using failure mode effect analysis and fuzzy VIKOR"*. International Journal of Quality and Reliability Management. DOI: 10.1108/IJQRM-02-2019-0070.

[33] Bahadori, M., Hosseini, S. M., Teymourzadeh, E., Ravangard, R., Raadabadi, M., and Alimohammadzadeh, K. (2020). *"A supplier selection model for hospitals using a combination of artificial neural network and fuzzy VIKOR"*. International Journal of Healthcare Management, 13(4): 286-294.

[34] Ayouni, S., Menzli, L. J., Hajjej, F., Maddeh, M., and Al-Otaibi, S. (2021). *"Fuzzy Vikor application for learning management systems evaluation in higher education"*. International Journal of Information and Communication Technology Education (IJICTE), 17(2): 17-35.

[35] Zadeh, L. A. (1965). *"Fuzzy sets"*. Information and Control, 8(3): 338-353.

[36] Chen, S. M. (1994). *"Fuzzy system reliability analysis using fuzzy number arithmetic operations"*. Fuzzy Sets and Systems, 64(1): 31-38.

[37] Papageorgiou, E. I., and Salmeron, J. L. (2014). *"Methods and algorithms for fuzzy cognitive map-based modeling"*. In Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering, Springer, Berlin, Heidelberg, 1-28.

[38] Kosko, B. (1986). *"Fuzzy cognitive maps"*. International Journal of Man-Machine Studies, 24(1): 65-75.

[39] Papageorgiou, E. I. (2011). *"Learning algorithms for fuzzy cognitive maps—a review study"*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 42(2): 150-163.

[40] Papageorgiou, E. I., Stylios, C., and Groumpos, P. P. (2006). *"Unsupervised learning techniques for fine-tuning fuzzy cognitive map causal links"*. International Journal of Human-Computer Studies, 64(8): 727-743.

[41] Stylios, C. D., and Groumpos, P. P. (2000). *"Fuzzy cognitive maps in modeling supervisory control systems"*. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 8(1): 83-98.

[42] Bakhtavar, E., Hosseini, S., Hewage, K., and Sadiq, R. (2021). *"Green blasting policy: simultaneous forecast of vertical and horizontal distribution of dust emissions using artificial causality-weighted neural network"*. Journal of Cleaner Production, 283: 124562.

[43] Kahraman, C. (Ed.). (2008). *"Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments"* (Vol. 16). Springer Science and Business Media.

[44] Opricovic, S. (1998). *"Multicriteria optimization of civil engineering systems"*. Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2(1): 5-21.

[45] Afful-Dadzie, E., Nabareseh, S., Oplatková, Z. K., and Klímek, P. (2016). *"Model for assessing quality of online health information: A fuzzy VIKOR based method"*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 23(1-2): 49-62.

[46] Chou, C. C. (2003). *"The canonical representation of multiplication operation on triangular fuzzy numbers"*. Computers and Mathematics with Applications, 45(10-

11): 1601-1610.

[47] Chang, T. H. (2014). *"Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan"*. Information Sciences, 271: 196-212.

[48] Opricovic, S. (2011). *"Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning"*. Expert Systems with Applications, 38(10): 12983-12990.

[49] Zadeh, L. A. (2011). *"A note on Z-numbers"*. Information Sciences, 181(14): 2923-2932.

[50] Azadeh, A., and Kokabi, R. (2016). *"Z-number DEA: A new possibilistic DEA in the context of Z-numbers"*. Advanced Engineering Informatics, 30(3): 604-617.

[51] Liu, H. C., You, J. X., You, X. Y., and Shan, M. M. (2015). *"A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method"*. Applied Soft Computing, 28: 579-588.

[52] Das, S., Dhalmahapatra, K., and Maiti, J. (2020). *"Z-number integrated weighted VIKOR technique for hazard prioritization and its application in virtual prototype based EOT crane operations"*. Applied Soft Computing, 94: 106419.

---

[1] Machine-human interplay (MHI)

[2] Coordinate robots

[3] CPS

[4] Wu

[5] Gillies

[6] Bai

[7] Niu

[8] Li

[9] Liu

[10] Bo

[11] Cheng

[12] Zhou

[13] Garriga

[14] Ang

[15] Moktadir

[16] Büyüközkan

[17] Bányai

[18] Nara

[19] Intelligent Mining Engineering (IME)

[20] Wang

[21] Chang

[22] Yücenur

[23] Demirel

[24] Yang

[25] Kahraman

[26] Rathore

[27] Ayouni

[28] FCM

[29] Axelrod

[30] Kosko

[31] Hebbian

[32] Opricovic

[33] Reliability of information and decisions

[34] Cronbach