Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 56(3) (2024) 361-362
DOI: 10.22060/ceej.2024.22828.8056

Utilization of fuzzy Weighted Aggregated Sum Product Assessment technique to rank the underground mining methods

Zeinab Jahanbani[1], Majid Ataee-pour [1] *, Ali Mortazavi[2]

[1] Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
[2] School of Mining and Geosciences, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT: The need to use minerals in recent years has led to the development of the volume of mining operations and, as a result, increased mining depth. With the increase in the depth of mines and as a result the number of geotechnical/geomechanical parameters/variables with uncertainty, underground mining activities can be associated with hazards and risks with catastrophic consequences. Choosing an appropriate and safe underground mining method, studying, and ranking from the risk assessment viewpoint along with mine design from the early stages of mining can lead to the reduction of life and financial risks. It can also be effective in preventing accidents. Considering the importance of the subject, in this research, using the fuzzy WASPAS technique, it was being studied, ranked, and determined the importance of some of the most important underground mining methods from the perspective of risk assessment and taking into account the uncertainty and risk of geomechanical parameters. The research started with the design of a questionnaire and a survey of experts. Then the fuzzy WASPAS method was implemented. Finally, by performing relevant calculations, the final weights of underground mining methods were determined and they were ranked. The results of the research show that the methods of Room & Pillar, Sublevel Stoping, Cut & Fill, and Sublevel Caving have the highest weight, respectively. Therefore, compared to the other methods, the method of Room & Pillar has the highest and the method of Sublevel Caving has the lowest potential in creating risk and instability.

Review History:

Received: Nov. 26, 2023
Revised: Feb. 17, 2024
Accepted: Mar. 24, 2024
Available Online: Apr. 19, 2024

Keywords:

Geomechanical Criteria
Ranking of Underground Mining Methods
Risk Assessment
Fuzzy WASPAS

1- Introduction

Underground spaces and mines are usually complex projects with variable and uncertain geomechanical conditions; Hence, it is in an environment with high uncertainty and high risks. On the other hand, with the increase of mining depth in underground mining methods, the importance of risk and geomechanical uncertainties will also increase. The existence of uncertainty and various risks in underground mining will lead to the occurrence of potential accidents [1]. Therefore, choosing an appropriate and safe underground mining method, and studying and ranking these methods from the point of view of risk assessment can lead to the reduction of life and financial risks and be effective in preventing accidents. The Fuzzy Weighted Aggregated Sum-Product Assessment (WASPAS) technique is one of the methods that can be used to study, review, and rank underground mining methods according to the purpose of the problem. In this article, the fuzzy WASPAS technique is used to rank the underground mining methods (taking into account the uncertainty and risk of the influential geomechanical factors) from the point of view of risk assessment and analyze the results of its implementation.

2- Methodology

In order to determine the best and safest underground mining method, the fuzzy WASPAS technique is utilized in this study to calculate the weight/score of underground mining methods and determine the importance of each method [2]. The fuzzy WASPAS method is used after recognizing the important criteria and asking the experts for their opinions. After identifying and determining the weight of the contributing criteria, the final weight of underground mining methods is computed. Ultimately, the mining methods are ranked.

3- Results and Discussion

for each underground mining method, the K value was computed using the fuzzy WASPAS method. To determine the best and safest underground mining method, methods were ranked based on their importance and weighting factor. The calculated K values (weighting factor) for the underground mining methods are displayed in Table 1.

The findings indicate that the mining methods of Room-and-Pillar, Sublevel Stoping, Cut-and-Fill, and Sublevel Caving have the highest weights, respectively. The results show that the Room-and-Pillar method has a greater potential

*Corresponding author's email: map60@aut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Ranking the underground mining methods

Mining Method	K	Normalized K	Rank
Sublevel Caving	0.315	0.174	4
Sublevel Stoping	0.532	0.293	2
Room-and-Pillar	0.617	0.340	1
Cut-and-Fill	0.350	0.193	3

for risk occurrence compared to other mining methods. After the Room-and-Pillar method, Sublevel Stoping is ranked second, the Cut-and-Fill method is ranked third, and Sublevel Caving is ranked fourth in terms of the potential of the mining method to create risk and instability.

4- Conclusion

The existence of geomechanical uncertainties and various risks in underground mining will lead to the occurrence of potential accidents [1]. Choosing an appropriate and safe underground mining method, and studying and ranking these methods from the point of view of risk assessment can lead to the reduction of life and financial risks and be effective in preventing accidents. Therefore, the fuzzy WASPAS technique was used in this study to rank the underground mining methods. After identifying and determining the weight of the contributing criteria, the final weight of each mining method is computed. Finally, the mining methods were ranked based on their importance and K values. The findings indicate that the mining methods of Room-and-Pillar, Sublevel Stoping, Cut-and-Fill, and Sublevel Caving have the highest weights, respectively.

References

[1] M. Dunn, Uncertainty in ground support design and implementation in underground mining, in: Ground Support 2013: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Australian Centre for Geomechanics, 2013, pp. 345-358.

[2] Z. Turskis, E. Zavadskas, J. Antucheviciene, N. Kosareva, A novel hybrid model based on fuzzy AHP and fuzzy WASPAS for construction site selection, (2015).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Z. Jahanbani, M. Ataee-pour, A. Mortazavi, Utilization of fuzzy Weighted Aggregated Sum Product Assessment technique to rank the underground mining methods , Amirkabir J. Civil Eng., 56(3) (2024) 361-362.

DOI: 10.22060/ceej.2024.22828.8056

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۶، شماره ۳، سال ۱۴۰۳، صفحات ۳۶۳ تا ۳۷۴
DOI: 10.22060/ceej.2024.22828.8056

بهره‌گیری از تکنیک ارزیابی مرکب ضرب جمع وزنی فازی در تعیین اولویت روش‌های استخراج زیرزمینی

زینب جهانبانی[۱]، مجید عطایی‌پور[۱*]، علی مرتضوی[۲]

۱- گروه مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- دانشکده معدن و علوم زمین، دانشگاه نظربایف، آستانا، قزاقستان

خلاصه: نیاز به استفاده از مواد معدنی طی سال‌های اخیر، موجب توسعه حجم عملیات معدنی و در نتیجه افزایش عمق استخراج معادن شده است. با افزایش عمق معادن، تعداد متغیرها و پارامترهای ژئومکانیکی دارای عدم قطعیت نیز افزایش می‌یابد. از این‌رو فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی می‌توانند با ریسک‌های دارای پیامدهای فاجعه‌بار همراه باشند. انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و ایمن، مطالعه و رده‌بندی این روش‌ها از دیدگاه ارزیابی ریسک همراه با طراحی معدن و قبل از شروع معدنکاری، می‌تواند کاهش ریسک‌های جانی و مالی را در پی داشته و در پیشگیری از حوادث موثر باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش با استفاده از تکنیک ارزیابی مرکب ضرب جمع وزنی فازی اقدام به رده‌بندی و تعیین میزان اهمیت برخی از مهم‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه ارزیابی ریسک و با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار شد. از آنجایی که روش نوین ارزیابی مرکب ضرب جمع وزنی فازی تا به حال در حوزه مطالعات معدنی استفاده نشده است، بنابراین کاربرد آن را می‌توان یکی دیگر از نوآوری‌های پژوهش حاضر برشمرد. انجام تحقیق، با طراحی پرسشنامه و نظرسنجی از کارشناسان آغاز شد. سپس روش ارزیابی مرکب ضرب جمع وزنی فازی پیاده‌سازی و اجرا شد. در نهایت با انجام محاسبات مربوطه، میزان پارامتر K و ارزش نهایی روش‌های استخراج زیرزمینی تعیین و گزینه‌های استخراج رتبه‌بندی شدند. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهند که روش‌های اتاق و پایه، استخراج از طبقات فرعی، کندن و پرکردن و تخریب در طبقات فرعی به ترتیب دارای بیشترین میزان وزن می‌باشند. به این ترتیب روش اتاق و پایه در مقایسه با سایر روش‌های مورد مطالعه از بیشترین پتانسیل و روش تخریب در طبقات فرعی نیز از کمترین پتانسیل در ایجاد ریسک و ناپایداری برخوردار هستند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱

کلمات کلیدی:
مولفه‌های ژئومکانیکی
رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی
ارزیابی ریسک
ارزیابی مرکب ضرب جمع وزنی فازی

۱- مقدمه

فضاها و معادن زیرزمینی معمولاً پروژه‌های پیچیده با شرایط متغیر و نامطمئن ژئومکانیکی هستند؛ از این‌رو در محیطی با عدم قطعیت بالا قرار داشته و ریسک‌های بالایی را نیز به دنبال دارند [۱]. از طرف دیگر، با افزایش عمق معدنکاری در روش‌های استخراج زیرزمینی، بر اهمیت مسأله ریسک و عدم قطعیت‌های ژئومکانیکی افزوده می‌شود. وجود عدم قطعیت و ریسک‌های مختلف در معدنکاری زیرزمینی، زمینه‌ساز وقوع حوادث بالقوه در قالب ریزش سقف، نشست، انفجار سنگ[۱] و غیره خواهد بود که تهدیدی برای ایمنی پرسنل و تجهیزات به‌شمار می‌روند. به طور کلی هر حادثه می‌تواند دارای اثرات منفی بسیار مهمی در فعالیت‌های مختلف معدنکاری باشد. مهم‌ترین این تأثیرات عبارتند از: ۱) خسارت جانی وارده به پرسنل، ۲) خسارت وارده به تجهیزات، ۳) توقف فعالیت‌های تولیدی، ۴) از دست رفتن بخشی از ماده معدنی، ۵) صرف هزینه و وقت برای بازسازی محل حادثه، ۶) اثرات منفی بر جای مانده روحی و روانی پرسنل که باعث کاهش راندمان می‌شود. برآوردهای اولیه در این زمینه نشان داده که هزینه‌های غیر مستقیم یک حادثه بیشتر از چهار برابر هزینه‌های مستقیم مطالعه و جلوگیری از آن است [۲]. بنابراین، انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و ایمن، مطالعه و رده‌بندی این روش‌ها از دیدگاه ارزیابی ریسک همراه با طراحی معدن از مراحل اولیه معدنکاری، می‌تواند کاهش ریسک‌های جانی و مالی را در پی داشته و در پیشگیری از حوادث موثر باشد. تکنیک ارزیابی مرکب ضربجمع وزنی[۲] (WASPAS) فازی، یکی از روش‌هایی است که به کمک آن می‌توان به مطالعه، بررسی و رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی با

1 Rock burst

2 Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: map60@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

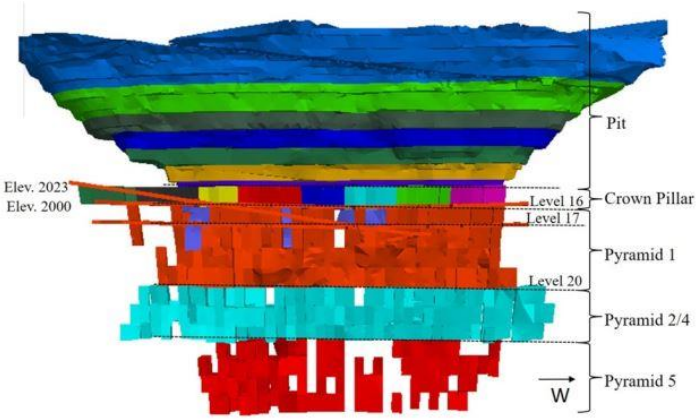
توجه به هدف مساله مورد نظر، پرداخت. از آنجایی که روش نوین ارزیابی مرکب ضربجمع وزنی فازی تا به حال در حوزه مطالعات معدنی استفاده نشده است، بنابراین کاربرد آن را می‌توان یکی دیگر از نوآوری‌های پژوهش حاضر به شمار آورد. از این‌رو، با توجه به اهمیت و ضرورت موضوع، در این مقاله با کاربرد تکنیک WASPAS فازی به رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی (با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار) از دیدگاه ارزیابی ریسک و تحلیل نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن، پرداخته شده است.

۲- پیشینه تحقیق

طی سال‌های متمادی پژوهش‌های مختلفی در زمینه انتخاب روش مناسب استخراج زیرزمینی انجام شده است. در این تحقیقات، به منظور انتخاب روش مناسب معدنکاری زیرزمینی از فاکتورها و تکنیک‌های متعددی استفاده شده است. اولین الگو یا راهنمای روش استخراج، در سال ۱۹۴۱ میلادی ارائه شده است [۳]. در ادامه محققان مختلفی در پژوهش‌های خود از روش‌های متفاوتی برای شناسایی و انتخاب بهترین روش استخراج بهره برده‌اند [۴-۱۰]. در سال ۲۰۰۸، محققان با انجام مطالعه‌ای دیگر، یک رویکرد جدید مبتنی بر تئوری مجموعه‌های فازی را برای انتخاب روش معدنکاری زیرزمینی در سیفتلان[1] (واقع در نزدیکی استانبول) ارائه دادند [۱۱]. عطایی و همکاران با انجام مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۸، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، به منظور توسعه روش مناسب استخراج برای کانسار گلبینی شماره ۸ در جاجرم استفاده کردند [۱۲]. هدف از تحقیق ارائه شده توسط میکائیل و همکاران (سال ۲۰۰۹)، توسعه یک مدل سلسله مراتبی برای انتخاب روش استخراج بهینه در معدن بوکسیت جاجرم بود. محققان برای انتخاب روش استخراج مناسب در این معدن، روشی ترکیبی مبتنی بر تکنیک تحلیل سلسله مراتبی فازی[2] و روش تاپسیس[3] را پیشنهاد دادند [۱۳]. آلپای[4] و یاووز[5] (سال ۲۰۰۹) در پژوهش خود، از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره شامل تکنیک تحلیل سلسله مراتبی و روش یاگر[6]، برای انتخاب بهترین روش استخراج زیرزمینی (با در نظر گرفتن معیارهای مسأله شامل مشخصات مکانی کانسار، شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژی، ویژگی‌های ژئوتکنیکی، ملاحظات اقتصادی، فاکتورهای فنی و محدودیت‌های زیست‌محیطی) استفاده کردند [۱۴]. در سال ۲۰۱۱، پژوهشگرانی در مقاله خود به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش استخراج در معدن زیرزمینی کوکا مارین[7] (در صربستان)، رویکردی را با کاربرد همزمان روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و پرومته[8] ارائه کرده‌اند [۱۵]. استفاده از ارزیابی ریسک معمول در گذشته، نقش مهمی در پیش‌بینی و پیشگیری از حوادث در صنایع پرخطر مانند نفت و حمل و نقل هوایی ایفا کرده است. به همین منظور میشرا و راین[9] در سال ۲۰۱۵ یک سیستم طبقه‌بندی برای عملیات معدنکاری زیرزمینی را بر اساس سطوح ریسک ژئوتکنیکی آنها ارائه کردند. طبقه‌بندی بر اساس نوع روش استخراج و توده‌سنگی است که در آن عملیات معدنکاری انجام می‌شود [۱۶]. محققان در سال ۲۰۱۸، برنامه‌ای را برای انتخاب مناسب‌ترین روش معدنکاری زیرزمینی با استفاده از روش‌های شناخته‌شده در تصمیم‌گیری چند معیاره مانند تاپسیس، ویکور[10]، الکتر[11]، تصمیم‌گیری چند شاخصه فازی[12] و پرومته، توسعه دادند [۱۷]. پژوهشگران در سال ۲۰۱۸، مطالعه مقایسه‌ای را با استفاده از پنج مدل تصمیم‌گیری چند معیاره (شامل تاپسیس، ویکور، الکتر بهبود یافته، پرومته II و WPM[13]) و با هدف انتخاب روش استخراج انجام دادند [۱۸]. هدف از مطالعه صورت گرفته توسط بالوسا و گورای[14] (سال ۲۰۱۹)، تحلیل حساسیت در تصمیم‌گیری برای انتخاب یک روش مناسب معدنکاری زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی است. مدل پیشنهادی، شانزده معیار را برای انتخاب مناسب‌ترین روش استخراج از بین هفت روش معدنکاری زیرزمینی در نظر می‌گیرد [۱۹]. کالن‌چوک[15] و همکاران (سال ۲۰۱۹) در مطالعات خود بیان کردند که کانسار سانتونیو[16] در معدن پینوز آلتوس[17] از سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش استخراج روباز و معدنکاری زیرزمینی در حال تولید است. طبق این تحقیق بین سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ مطالعه‌ای گسترده، استراتژی استخراج پایه تاج[18] در سانتونینو

1 Ciftalan Lignite Site
2 Fuzzy Analytic Hierarchical Process (FAHP)
3 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
4 Alpay
5 Yavuz
6 Yager's method

7 Coca Marin Mine
8 Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)
9 Mishra and Rinne
10 Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR)
11 The Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE)
12 Fuzzy Multiple Attribute Decision Making (FMADM)
13 Weighted Product Method (WPM)
14 Balusa and Gorai
15 Kalenchuk
16 Santo Niño ore body
17 Pinos Altos Mine
18 Crown Pillar



شکل ۱. مقطع طولی از معدن سانتونینو که نشان‌دهنده موقعیت نسبی کاواک، حفاری‌های زیرزمینی و پایه تاج می‌باشد [۲۰]

Fig. 1. Longitudinal section of the Santo Niño mine showing the relative position of the pit, underground excavations and crown pillar

را مورد ارزیابی قرار داد (شکل ۱). قبل از تهیه یک برنامه جامع برای استخراج پایه تاج سانتونینو با استفاده از کارگاه استخراج زیرزمینی[1]، تیم پروژه آگنیکو ایگل[2] خطرات ژئومکانیکی، عملیاتی، ایمنی و اقتصادی را مورد ارزیابی قرار دادند. درنهایت تصمیم بر آن شد که برای استخراج پایه تاج از روش استخراج از طبقات فرعی با چال‌های بلند[3] استفاده شود [۲۰]. غزدالی[4] و همکاران در سال ۲۰۲۱، برای انتخاب روش استخراج از روش UBC [5] استفاده کردند [۲۱]. صمیمی‌نمین و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای مروری بر کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[6] برای انتخاب روش استخراج انجام دادند [۲۲].

با بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در این بخش، می‌توان بیان کرد که محققان مختلف در هر مطالعه با استفاده از فاکتورهای مختلفی سعی در انتخاب روش مناسب استخراج زیرزمینی داشته‌اند. از طرف دیگر، با وجود مطالعاتی که در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی انجام‌شده است، تاکنون پژوهشی در زمینه رده‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار، انجام نشده است. بررسی پژوهش‌های انجام شده، هم‌چنین نشان می‌دهد که تاکنون از روش WASPAS فازی نه تنها در حوزه مطالعات معدنی، بلکه در هیچ یک از مطالعات بررسی شده در زمینه انتخاب روش استخراج زیرزمینی (برای رتبه‌بندی یا حتی انتخاب بهترین گزینه استخراج) نیز استفاده نشده است. موارد اشاره شده علاوه بر افزودن بر ضرورت و اهمیت مطالعه حاضر، نوآوری‌های آن را نیز نشان می‌دهند. از آنجایی‌که روش WASPAS فازی یکی از تکنیک‌های نوین تصمیم‌گیری است، در نتیجه یکی دیگر از اهداف پژوهش حاضر تلاش در جهت پاسخ به این سوال است که آیا انجام یک تحقیق با کاربرد این روش امکان‌پذیر است یا خیر.

از این‌رو در تحقیق حاضر، با کاربرد روش WASPAS فازی به مطالعه و اولویت‌بندی برخی از مهم‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه ارزیابی ریسک و با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار پرداخته شده است. رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی، قبل از شروع معدنکاری، نه تنها امکان انتخاب بهترین و سودآورترین روش استخراج را فراهم خواهد کرد، بلکه به شناسایی خطرها و ریسک‌های بالقوه زیرزمینی و پیشگیری از حوادث نیز کمک بسیاری کرده و درنتیجه منجر به انتخاب ایمن‌ترین روش استخراج زیرزمینی نیز خواهد شد.

۳- تکنیک WASPAS فازی

تکنیک WASPAS، یکی از روش‌های جدید تصمیم‌گیری چند شاخصه بوده و در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است. این روش، ترکیبی از مدل مجموع

1 Underground Stoping
2 Agnico Eagle
3 Long-hole Stoping
4 Ghazdali
5 University of British Columbia
6 Multi Criteria Decision-Making (MCDM)

وزنی (WSM[1]) و مدل ضرب وزنی (WPM[2]) بوده و دارای دقت بیشتری در مقایسه با روش‌های مستقل است. یکی از پارامترهایی که می‌تواند در انتخاب روش تصمیم‌گیری چند معیاره مورد توجه قرار گیرد، میزان دقت این مدل‌ها است. از این‌رو، زاوادسکاس و ترسکیس[3] پیشنهاد می‌کنند ترکیب دو مدل می‌تواند میزان دقت روش WASPAS را بالا ببرد [۲۳]. نتایج مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه WSM و مدل WPM از میزان دقت نسبتاً خوبی برخوردار هستند. نتایج بررسی‌های محققان تاکید کرده است میزان دقت مدل‌های ترکیبی در مقایسه با میزان دقت این مدل‌ها قبل از ترکیب شدن خیلی بالاتر است. روش WASPAS که یکی از مدل‌های ترکیبی است، می‌تواند در مسائل پیچیده، تصمیم‌گیری کارایی بالایی داشته باشد و همچنین نتایج حاصل از این مدل از دقت بالایی برخوردار است.

تکنیک WASPAS فازی نیز در سال ۲۰۱۵، ارائه شد. الگوریتم این روش تقریباً مشابه روش WASPAS است، با این تفاوت که این روش در محیط فازی پیاده‌سازی می‌شود [۲۴]. هدف از ارائه این روش، رتبه‌بندی گزینه‌های مساله مورد تحقیق بر اساس معیارها و شاخص‌های طراحی‌شده مساله است. این رویکرد با استفاده از دو مدل مجموع وزنی و ضرب وزنی، ارزش نهایی هر گزینه را تعیین و در نهایت به رتبه‌بندی آنها می‌پردازد. بنابراین در این تحقیق با استفاده از تکنیک WASPAS فازی اقدام به محاسبه وزن/ امتیاز روش‌های استخراج زیرزمینی و سپس رتبه‌بندی و تعیین میزان اهمیت هر یک از این آنها شد. در ادامه، مراحل اجرای این روش تشریح شده است [۲۴]:

۳- ۱- تشکیل ماتریس تصمیم و نرمال‌سازی آن

ابتدا ماتریس تصمیم موجود بر اساس معیارها و شاخص‌های طراحی‌شده مساله تشکیل می‌شود. در ماتریس تصمیم، معیارها در ستون و گزینه‌ها در سطر قرار دارند و هدف، رتبه‌بندی گزینه‌های مساله مورد تحقیق است. در مرحله بعد ماتریس تصمیم براساس طیف‌های مختلف فازی امتیازدهی می‌شوند. سپس به نرمال‌سازی ماتریس تصمیم براساس روابط ۱ و ۲ پرداخته می‌شود. اگر معیار موردنظر جنبه مثبت داشته باشد، از رابطه ۱ و اگر معیار جنبه منفی داشته باشد، از رابطه ۲ برای نرمال‌سازی استفاده می‌شود.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\max_i \tilde{x}_{ij}} \quad (۱)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i \tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_{ij}} \quad (۲)$$

که در این روابط $\tilde{x}_{ij}$ معیار فازی مساله و $\bar{x}_{ij}$ معیار مورد نظر در ماتریس تصمیم فازی نرمال است.

۳- ۲- تعیین مقادیر جمع وزنی (محاسبه ماتریس فازی Q)

در روش WASPAS، یک معیار مشترک از بهینه‌سازی به دنبال دو معیار بهینه است. اولین معیار بهینه‌سازی، یعنی معیار میانگین موفقیت وزنی، مشابه روش WSM است. این روش، یک رویکرد محبوب و قابل قبول تصمیم‌گیری چند معیاره است که برای ارزیابی تعدادی از گزینه‌ها در رابطه با مجموعه‌ای از معیارهای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس روش WSM اهمیت نسبی کل i امین گزینه به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود (ماتریس Q از ضرب وزن معیار در ماتریس نرمال حاصل می‌شود).

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} \bar{\tilde{x}}_{ij} \tilde{w}_j \quad (۳)$$

که در این رابطه w_j وزن j امین معیار است.

۳- ۳- تعیین مقادیر ضرب وزنی (محاسبه ماتریس فازی P)

ماتریس P از درایه‌های ماتریس فازی نرمال به توان وزن فازی حاصل می‌شود. در واقع، طبق روش WPM، ارزش نسبی کل گزینه‌ها با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$P_i = \prod_{j=1}^{n} (\bar{\tilde{x}}_{ij})^{\tilde{w}_j} \quad (۴)$$

۳- ۴- غیرفازی کردن مقادیر Q_i و P_i

در گام بعد مقادیر Q_i و P_i با استفاده از روابط ۵ و ۶ غیرفازی

1 Weighted Sum Model (WSM)
2 Weighted Product Model (WPM)
3 Zavadskas and Turskis

می‌شوند.

$$Q_i = \frac{1}{3}(Q_{i\alpha} + Q_{i\beta} + Q_{i\gamma}) \quad (۵)$$

$$P_i = \frac{1}{3}(P_{i\alpha} + P_{i\beta} + P_{i\gamma}) \quad (۶)$$

$Q_{i\alpha}$، $Q_{i\beta}$ و $Q_{i\gamma}$ در رابطه ۵، به ترتیب حد بالا، محتمل‌ترین مقدار و حد پایین عدد فازی مثلثی Q_i هستند. پارامترهای $P_{i\alpha}$، $P_{i\beta}$ و $P_{i\gamma}$ در رابطه ۶ نیز به ترتیب حد بالا، محتمل‌ترین مقدار و حد پایین عدد فازی مثلثی P_i هستند.

۳- ۵- تعیین ارزش/ امتیاز نهایی هر گزینه و رتبه‌بندی آنها

در نهایت یک معیار کلی برای ادغام روش‌های WSM و WPM به صورت رابطه ۷ خواهد بود. به این ترتیب با محاسبه میزان K برای هر گزینه، می‌توان آنها را رتبه‌بندی کرد.

$$K_i = \lambda Q_i + (1-\lambda)P_i = \lambda\sum_{j=1}^{n}\bar{x}_{ij}w_j + (1-\lambda)\prod_{j=1}^{n}(\bar{x}_{ij})^{w_j} \quad (۷)$$

بر اساس مقادیر مختلف λ، شاخص Q_i مقادیر مختلف اختیار می‌کند. اگر $\lambda = 0$ باشد، مدل WASPAS به مدل WPM تبدیل می‌شود. و اگر $\lambda = 1$ باشد، مدل WASPAS به مدل WSM تبدیل خواهد شد. برای مسائل تصمیم‌گیری، مقدار بهینه λ از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{m} P_i}{\sum_{i=1}^{m} P_i + \sum_{i=1}^{m} Q_i} \quad (۸)$$

۴- معیارهای ژئومکانیکی مؤثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

با افزایش عمق معادن و درنتیجه افزایش تعداد فاکتورهای دارای عدم قطعیت، فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی می‌تواند با خطرها و ریسک‌های دارای پیامدهای فاجعه‌بار همراه باشند. فاکتورهای بسیاری مانند «خصوصیات مکانیکی توده‌های سنگی»، «جهت‌گیری و خواص ناپیوستگی‌ها»، «شرایط هیدرولوژیکی» و «شرایط تنش‌های القایی و برجا» ازجمله فاکتورهای تأثیرگذار بر پایداری حفاری‌ها و معادن زیرزمینی و از پارامترهای مؤثر در انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی ایمن هستند. مطالعات زیادی در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی نیز نشان می‌دهند که این فرآیند به معیارهای بیشماری بستگی دارد. تحقیقات مختلف همچنین نشان می‌دهند که در وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی مجموعه‌ای از فاکتورها در ارتباط با یکدیگر بوده و منجر به ایجاد حوادث ژئوتکنیکی خواهند شد.

در تحقیق حاضر با هدف رتبه‌بندی و شناسایی میزان اهمیت برخی از مهم‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی، منابع موجود در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفت. سپس با توجه به هدف مطالعه، معیارهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهم و تاثیرگذار در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی، شناسایی شدند (جدول ۱) [۱۱-۱۵, ۱۷, ۱۹, ۲۵-۳۵].

روش‌های زیرزمینی وقتی به کار گرفته می‌شوند که عمق کانسار، نسبت باطله‌برداری یا هر دو از مقادیر مشابه در استخراج سطحی فراتر رود. پس از آن که عوامل اقتصادی، معدنکاری زیرزمینی را تأیید کند، انتخاب روش استخراج مناسب اساساً منوط است به: ۱) تعیین نوع نگهداری زمین (در صورت لزوم) و ۲) طراحی بازکننده‌های مناسب و مراحل استخراج؛ به نحوی که با مشخصات فضایی کانسار سازگاری داشته باشد.

با توجه به اهمیت نگهداری زمین، روش‌های استخراج زیرزمینی بر اساس میزان نگهداری به کار گرفته شده، به سه دسته تقسیم می‌شوند (شکل ۲). این سه دسته عبارتند از: روش‌های بدون نگهداری[1]، با نگهداری[2] و تخریبی[3]. روش‌های بدون نگهداری اساساً خودنگهدار هستند و نیاز چندانی به سیستم‌های نگهداری مصنوعی برای تحمل بار فشاری ندارند و بار بر دیواره‌های فضاها و پایه‌های طبیعی اعمال می‌شود (بار فشاری شامل وزن روباره و هر نیروی تکتونیکی که در عمق عمل می‌کند، می‌باشد).

هنگامی که فضاهای بهره‌برداری نتوانند برای مدت زمان قابل پیش‌بینی و لازم، بدون استفاده اساسی از سیستم‌های نگهداری مصنوعی باز نگه داشته شوند یا پایدار بمانند، روش‌های استخراج با نگهداری به کار گرفته می‌شوند.

1 Naturally Supported Methods
2 Artificially Supported Methods
3 Unsupported or Caving Methods

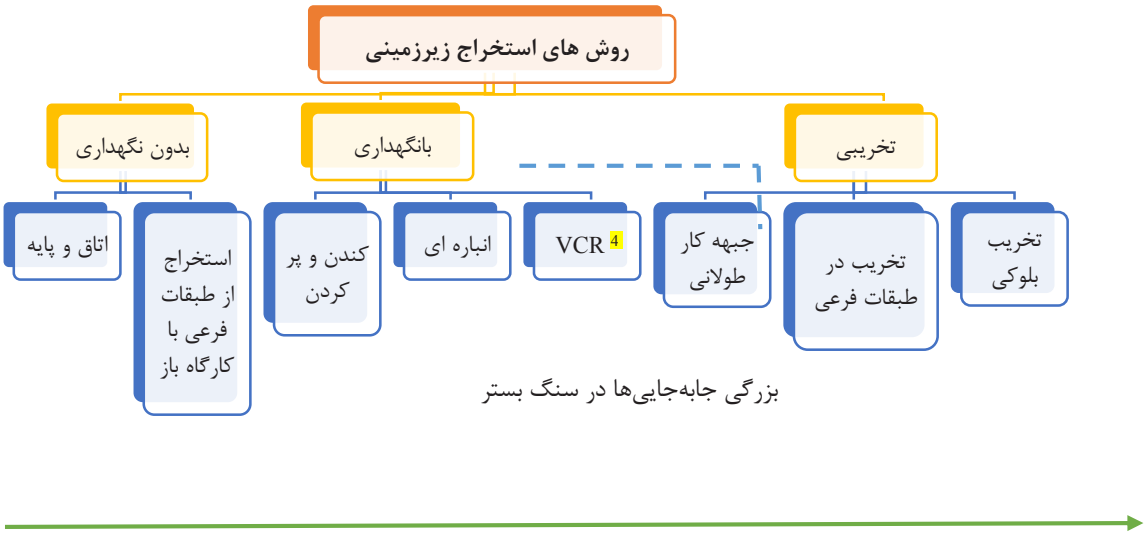
4 Vertical Crater Retreat

جدول ۱. معیارهای ژئومکانیکی تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

Table 1. Geomechanical criteria influencing the underground mining method selection

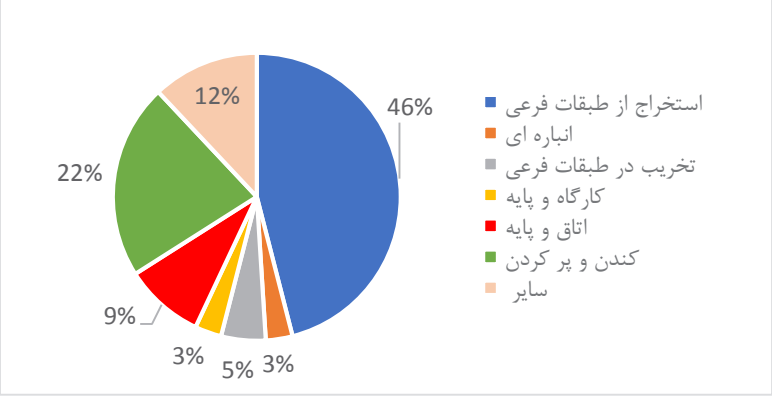
معیار	ردیف	زیرمعیار
فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی (ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین)	۱	RSS[1] (نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری به فشار سنگ‌های پوششی)
	۲	RMR[2]
	۳	TFC (شامل فاکتورهای زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ، چسبندگی توده‌سنگ، مقاومت کششی توده‌سنگ)
	۴	ISDM (شامل فاکتورهای تنش برجا، تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ)

[1] Rock Substance Strength
[2] Rock Mass Rating



شکل ۲. طبقه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی [۳۶]

Fig. 2. Classification of underground mining methods



شکل ۳. پرکاربردترین روش‌های استخراج در معادن زیرزمینی سراسر دنیا [۳۸]

Fig. 3. The most widely used extraction methods in underground mines around the world

جدول ۲. گزینه‌های استخراج زیرزمینی مورد مطالعه

Table 2. The studied underground mining alternatives

ردیف	زیرمعیار	نماد
۱	استخراج از طبقات فرعی	SS
۲	کندن و پر کردن	C&F
۳	اتاق و پایه	R&P
۴	تخریب در طبقات فرعی	SC

اگر کانسار و سنگ‌های فراگیر به میزان کافی ضعیف و نشست نیز قابل قبول باشد، از نگهداری فضا خودداری و در صورت لزوم با ایجاد زیربرش، یک روش تخریبی به کار برده می‌شود [۴].

مطالعات مختلف انجام شده در زمینه ریسک‌های ژئومکانیکی موجود در معدنکاری زیرزمینی نشان می‌دهند که مسائل ژئومکانیکی مربوط به معادن زیرزمینی در مقایسه با معادن سطحی به طور قابل توجهی پیچیده‌تر و رویدادهای بزرگ یا شرایط ناپایدار اغلب مبهم بوده و از لحاظ کمّی‌سازی نیز مشکل‌تر است و به همین دلیل مدیریت ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن سطحی در مقایسه با معادن زیرزمینی اغلب آسان‌تر می‌باشد. قابلیت پایش و نظارت بیشتر و بهتر ناپایداری‌ها و تأثیر آنها بر محیط اطراف در معادن سطحی را می‌توان یکی از دلایل مهم پیشرفت مدیریت ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن روباز نسبت به معادن زیرزمینی دانست [۳۷].

در تحقیق حاضر با هدف رتبه‌بندی گزینه‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه ارزیابی ریسک، برخی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های استخراج زیرزمینی انتخاب شدند. همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، روش‌های استخراج از طبقات فرعی[1]، کندن و پر کردن[2]، اتاق و پایه[3] و تخریب در طبقات فرعی[4]، پرکاربردترین روش‌های استخراج در معادن زیرزمینی سراسر دنیا هستند [۳۸]. از این‌رو، در این پژوهش نیز روش‌های استخراج مذکور برای انجام تحقیق انتخاب شدند (جدول ۲).

1 Sublevel Stoping
2 Cut & Fill
3 Room & Pillar
4 Sublevel Caving

۵- اجرای روش WASPAS فازی و تحلیل نتایج

در این تحقیق به مطالعه، رتبه‌بندی و شناسایی میزان اهمیت برخی از مهم‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه ارزیابی ریسک و با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار پرداخته شد. برای اجرای روش، ابتدا پرسشنامه‌هایی، طراحی و در میان متخصصان توزیع و در نهایت ۸ پرسشنامه برای رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی دریافت شد. برای امتیازدهی از کارشناسان خواسته شد تا میزان تاثیر هر معیار ژئومکانیکی تاثیرگذار در ایجاد ریسک در هر روش استخراج زیرزمینی را براساس مقادیر مندرج در جدول ۳ (امتیازهای ۱ تا ۵)، امتیازدهی کنند. در واقع هر سلول از ماتریس تشکیل شده، ارزیابی یک گزینه (روش استخراج) از نظر هر معیار است. در مرحله بعد برای پیاده‌سازی روش و انجام محاسبات، به‌جای کاربرد مقادیر قطعی متغیرهای زبانی درج شده توسط کارشناسان در پرسشنامه‌های مربوطه، از معادل فازی این اعداد در ستون سمت راست جدول ۳، استفاده شد. به عنوان مثال در انجام محاسبات و وارد کردن این امتیازات در نرم‌افزار، به جای عدد ۱ از معادل فازی آن به صورت (۳، ۱، ۱) استفاده شد. سپس روش WASPAS فازی مورد استفاده قرار گرفت. شایان ذکر است که برای پیاده‌سازی و انجام محاسبات، از نرم‌افزارهای Excel 2016 و MATLAB 2019 استفاده شده است.

۵- ۱- رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی با در نظر گرفتن مولفه‌های ژئومکانیکی تاثیرگذار

در این بخش به منظور رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، تکنیک WASPAS فازی مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب، پس از محاسبه وزن نهایی روش‌های استخراج زیرزمینی، میزان اهمیت هریک از روش‌ها تعیین و براساس وزن‌های به‌دست آمده، رتبه‌بندی شدند. نتایج حاصل در جدول ۴ و شکل ۴ نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۴ و شکل ۴ ملاحظه می‌شود روش‌های (گزینه‌های) اتاق و پایه، استخراج از طبقات فرعی، کندن و پرکردن و تخریب در طبقات فرعی به ترتیب دارای بیشترین مقدار K یا بیشترین میزان

جدول ۳. متغیرهای زبانی به‌کار رفته در تحقیق و مقادیر قطعی و فازی معادل آنها

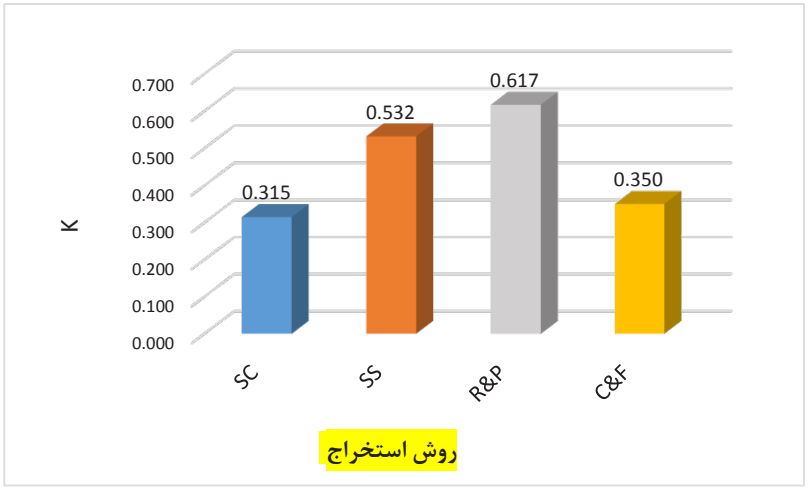
Table 3. Linguistic terms used in the research, and their fuzzy and crisp equivalent values

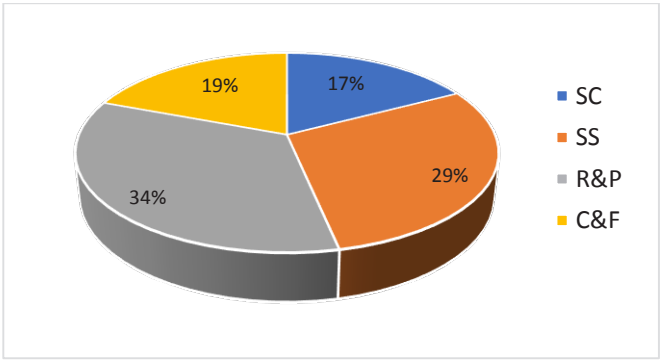
مقدار فازی ترم‌های زبانی	متغیر زبانی	معادل قطعی
(۳، ۱، ۱)	خیلی کم	۱
(۵، ۳، ۱)	کم	۲
(۷، ۵، ۳)	متوسط	۳
(۹، ۷، ۵)	زیاد	۴
(۱۱، ۹، ۷)	خیلی زیاد	۵

جدول ۴. رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی مورد مطالعه

Table 4. Ranking the underground mining methods

روش استخراج	K	درصد	رتبه
تخریب در طبقات فرعی (SC)	۰/۳۱۵	۱۷٪	۴
استخراج از طبقات فرعی (SS)	۰/۵۳۲	۲۹٪	۲
اتاق و پایه (R&P)	۰/۶۱۷	۳۴٪	۱
کندن و پر کردن (C&F)	۰/۳۵۰	۱۹٪	۳





شکل ۴. وزن نهایی روش‌های استخراج زیرزمینی مورد مطالعه و اولویت‌بندی آنها

Fig. 4. Final weight of underground mining methods and ranking them

وزن می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که روش اتاق و پایه در مقایسه با سایر روش‌های مورد مطالعه از پتانسیل بیشتری برای وقوع ریسک برخوردار است. در روش "اتاق و پایه" با افزایش میزان عمق کانسار، مقدار فاکتور تنش نیز افزایش و میزان پایداری کاهش می‌یابد. در این صورت برای افزایش پایداری و ایمنی کارگاه‌ها باید پایه‌های بزرگتری بر جای گذاشته شود. در این شرایط، با افزایش ابعاد پایه‌ها، میزان بازیابی و تولید ماده معدنی نیز کاهش خواهد یافت. در این روش همچنین، با افزایش فاکتور شیب کانسار، نگهداری کارگاه‌های استخراج مشکل‌تر و پایداری نیز کاهش می‌یابد. فاکتور عمق کانسار و فاکتور تنش در بخش‌های ماده معدنی و کمربالا می‌توانند دارای میزان اهمیت خیلی زیادی در ایجاد ریسک و ناپایداری در روش اتاق و پایه باشند. فاکتور شیب کانسار نیز می‌تواند از میزان اهمیت زیادی در وقوع ریسک در این روش برخوردار باشد. بنابراین با توجه به توضیحات فوق کاملاً طبیعی است که روش اتاق و پایه از پتانسیل بیشتری در وقوع ریسک و ناپایداری برخوردار باشد.

پس از روش اتاق و پایه، روش استخراج از طبقات فرعی در رتبه دوم، روش کندن و پر کردن در رتبه سوم و روش تخریب در طبقات فرعی در جایگاه چهارم از نظر پتانسیل روش استخراج در ایجاد ریسک و ناپایداری، قرار گرفته‌اند. در روش کندن و پر کردن، کارگاه‌های استخراج بعد از استخراج ماده معدنی به وسیله مواد پرکننده، پر می‌شوند. به این ترتیب کارگاه‌های استخراج از پایداری خوب و بالایی برخوردار هستند و این روش در مقایسه با دو روش دیگر استخراج، دارای پتانسیل کمتری در ایجاد ریسک و ناپایداری است.

همچنین، از آنجایی که ماهیت روش تخریب در طبقات فرعی، قابلیت تخریب و شکسته شدن ماده معدنی و کمربالا برای استخراج ماده معدنی است، بنابراین ایجاد نشست در سطح زمین امری طبیعی و پذیرفته شده در این روش استخراج است. به همین دلیل این موضوع نیز کاملاً منطقی است که روش تخریب در طبقات فرعی در مقایسه با روش‌های اتاق و پایه، استخراج از طبقات فرعی و کندن و پرکردن، از پتانسیل کمتری در ایجاد ریسک و ناپایداری برخوردار باشد.

۶- نتیجه‌گیری

افزایش جمعیت جهان و به دنبال آن رشد سطح رفاه جامعه طی سال‌های اخیر، موجب افزایش نیاز به استفاده از مواد معدنی و در نتیجه افزایش عمق استخراج معادن شده است. با افزایش عمق معادن و در نتیجه افزایش تعداد متغیرها و پارامترهای ژئوتکنیکی/ ژئومکانیکی دارای عدم قطعیت، فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی می‌تواند با خطرها و ریسک‌های دارای پیامدهای فاجعه‌بار همراه باشند. لذا، آگاهی از شرایط انجام پروژه و شناخت پارامترهای دارای عدم قطعیت در تمامی مراحل انجام یک پروژه ژئوتکنیکی نکته‌ای مهم و کلیدی است. هم‌چنین، انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی ایمن همراه با مدیریت عدم قطعیت و ریسک در برنامه‌ریزی و طراحی باعث می‌شود که طرح و برنامه ارائه شده معدن دارای قابلیت اعتماد و انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با شرایط محیطی ناشناخته باشد. با وجود تحقیقاتی که طی سال‌های متمادی در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی انجام‌شده است، پژوهش‌های کمتری به مطالعه در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و رده‌بندی این روش‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار پرداخته‌اند. بنابراین این امر نیز بر ضرورت و اهمیت تحقیق حاضر می‌افزاید. از این‌رو در پژوهش حاضر، با کاربرد روش WASPAS فازی به مطالعه، اولویت‌بندی و تعیین میزان اهمیت برخی از مهم‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه ارزیابی ریسک و با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار پرداخته شد. انجام تحقیق، با طراحی پرسشنامه و نظرسنجی از کارشناسان و متخصصان آغاز و سپس روش WASPAS فازی پیاده‌سازی شد. در نهایت با انجام محاسبات مربوطه، میزان پارامتر K و ارزش (امتیاز) نهایی روش‌های استخراج زیرزمینی تعیین و گزینه‌های استخراج رتبه‌بندی شدند. نتایج به دست آمده از پژوهش نشان می‌دهند که روش اتاق و پایه دارای بیشترین میزان وزن (۰/۶۱۷) می‌باشد. پس از روش اتاق و پایه، روش استخراج از طبقات فرعی (با وزن ۰/۵۳۲) در رتبه دوم، روش کندن و پر کردن (با وزن ۰/۳۵۰) در رتبه سوم و روش تخریب در طبقات فرعی (با وزن ۰/۳۱۵) در جایگاه چهارم از نظر پتانسیل روش استخراج در ایجاد ریسک و ناپایداری، قرار گرفته‌اند. به این ترتیب روش اتاق و پایه در مقایسه با سایر روش‌های مورد مطالعه از بیشترین پتانسیل و روش تخریب در طبقات فرعی نیز از کمترین پتانسیل در ایجاد ریسک و ناپایداری برخوردار هستند. از آنجایی‌که انجام مطالعه حاضر با اجرای این روش، تحلیلی منطقی و درست از نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد، بنابراین می‌توان بیان کرد که انجام یک تحقیق با بهره‌گیری از روش WASPAS فازی امکان‌پذیر بوده و کاربرد آن نتایجی واقعی و منطقی را ارائه خواهد داد. علاوه بر این، دستاوردهای حاصل از پژوهش نشان می‌دهند که رتبه‌بندی روش‌های استخراج زیرزمینی با استفاده از تکنیک WASPAS فازی، از دیدگاه ارزیابی ریسک و با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ریسک پارامترهای ژئومکانیکی تاثیرگذار، قبل از شروع معدنکاری، نه تنها امکان انتخاب بهترین و سودآورترین روش استخراج را فراهم خواهد کرد، بلکه به شناسایی خطرها و ریسک‌های بالقوه زیرزمینی و پیشگیری از حوادث نیز کمک بسیاری کرده و در نتیجه منجر به انتخاب ایمن‌ترین روش استخراج زیرزمینی نیز خواهد شد.

در تحقیقات آتی می‌توان با اضافه کردن فاکتورهای اجرایی/ عملیاتی، زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی وغیره، به فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مورد مطالعه در این پژوهش، و با درنظر گرفتن ریسک‌های ناشی از آنها، مانند ریسک‌های جانی، مالی و زیست محیطی، روش‌های استخراج را رتبه‌بندی کرده و یک تحقیق جامع و کامل‌تر ارائه کرد.

منابع

[1] M. Dunn, Uncertainty in ground support design and implementation in underground mining, in: Ground Support 2013: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Australian Centre for Geomechanics, 2013, pp. 345-358.

[2] S. Behraftar, Management of geotechnical risks in stopes of underground mines in Iran, Tehran University, 2008.

[3] R. Peele, Mining engineering hand, John Wiley & Sons, INC., 1941.

[4] H.L. Hartman, J.M. Mutmansky, Introductory mining engineering, John Wiley & Sons, 2002.

Anais da Academia Brasileira de Ciências, 84 (2012) 219-233.

[16] R.K. Mishra, M. Rinne, Geotechnical Risk Classification for Underground Mines/Klasyfikacja Poziomu Zagrożenia Geotechnicznego W Kopalniach Podziemnych, Archives of Mining Sciences, (2015).

[17] M. Iphar, S. Alpay, A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33(7) (2019) 480-504.

[18] B.C. Balusa, A.K. Gorai, A comparative study of various multi-criteria decision-making models in underground mining method selection, Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 100 (2019) 105-121.

[19] B.C. Balusa, A.K. Gorai, Sensitivity analysis of fuzzy-analytic hierarchical process (FAHP) decision-making model in selection of underground metal mining method, Journal of sustainable mining, 18(1) (2019) 8-17.

[20] K. Kalenchuk, V. Falmagne, A. Gelover, I. Montiel, J. Luzania, Risk evaluation, design, implementation, instrumentation, and verification for crown pillar extraction at Pinos Altos mine, Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(12) (2019) 4997-5011.

[21] O. Ghazdali, J. Moustadraf, T. Tagma, B. Alabjah, F. Amraoui, Study and evaluation of the stability of underground mining method used in shallow-dip vein deposits hosted in poor quality rock, Mining of Mineral Deposits, 15(3) (2021) 31-38.

[22] F.S. Namin, A. Ghadi, F. Saki, A literature review of Multi Criteria Decision-Making (MCDM) towards mining method selection (MMS), Resources Policy, 77 (2022) 102676.

[23] E.K. Zavadskas, Z. Turskis, J. Antucheviciene, A. Zakarevicius, Optimization of weighted aggregated sum product assessment, Elektronika ir elektrotechnika, 122(6) (2012) 3-6.

[24] Z. Turskis, E. Zavadskas, J. Antucheviciene, N. Kosareva, A novel hybrid model based on fuzzy AHP and fuzzy WASPAS for construction site selection, (2015).

[5] R.G.K. Morrison, A philosophy of ground control: A bridge between theory and practice, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, 1976.

[6] D.H. Laubscher, Selection of mass underground mining methods, Design and operation of caving and sublevel stoping mines, (1981) 23-38.

[7] D. Nicholas, J. Mark, Feasibility study–selection of a mining method integrating rock mechanics and mine planning, in: 5th Rapid Excavation and Tunneling Conference. San Francisco, 1981, pp. 1018-1031.

[8] H.L. Hartman, S.G. Britton, J.M. Mutmansky, D.W. Gentry, W.J. Schlitt, M. Karmis, M.M. Singh, SME mining engineering handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Denver, 1992.

[9] L. Miller-Tait, R. Panalkis, R. Poulin, UBC mining method selection, in: Proceeding of the mine planning and equipment selection symposium, 1995, pp. 163-168.

[10] C. Clayton, R. Pakalnis, J. Meech, A knowledge-based system for selecting a mining method, in: IPPM conference, Canada, 2002, pp. 161-178.

[11] A. Karadogan, A. Kahriman, U. Ozer, Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(2) (2008) 73-79.

[12] M. Ataei, M. Jamshidi, F. Sereshki, S. Jalali, Mining method selection by AHP approach, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(12) (2008) 741-749.

[13] R. Mikaeil, M.Z. Naghadehi, M. Ataei, R. Khalokakaie, A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method, Archives of Mining Sciences, 54(2) (2009) 341-368.

[14] S. Alpay, M. Yavuz, Underground mining method selection by decision making tools, Tunnelling and Underground Space Technology, 24(2) (2009) 173-184.

[15] D. Bogdanovic, D. Nikolic, I. Ilic, Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method,

of open-stope failure: a case Study of the Niobec Mine, Quebec (Canada), Rock Mechanics and Rock Engineering, 53(3) (2020) 1411-1431.

[33] R. Rafiee, M. Ataei, R. Khalokakaie, S.M.E. Jalali, F. Sereshki, Determination and assessment of parameters influencing rock mass cavability in block caving mines using the probabilistic rock engineering system, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48 (2015) 1207-1220.

[34] R. Mishra, R. Kiuru, L. Uotinen, M. Janiszewski, M. Rinne, Combining expert opinion and instrumentation data using Bayesian networks to carry out stope collapse risk assessment, in: MGR 2019: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, Australian Centre for Geomechanics, 2019, pp. 85-96.

[35] E.T. Brown, Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 4(3) (2012) 193-204.

[36] E.T. Brown, A book in Block caving geomechanics, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 2002.

[37] J. Hadjigeorgiou, Understanding, managing and communicating geomechanical mining risk, Mining Technology, 129(3) (2020) 159-173.

[38] M. Janiszewski, S. Pontow, M. Rinne, Industry survey on the current state of stope design methods in the underground mining sector, Energies, 15(1) (2021) 240.

[25] S. Bajić, D. Bajić, B. Gluščević, V. Ristić Vakanjac, Application of fuzzy analytic hierarchy process to underground mining method selection, Symmetry, 12(2) (2020) 192.

[26] B.C. Balusa, A.K. Gorai, A comparative study of various multi-criteria decision-making models in underground mining method selection, Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 100(1) (2019) 105-121.

[27] B.C. Balusa, J. Singam, Underground mining method selection using WPM and PROMETHEE, Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 99(1) (2018) 165-171.

[28] H. Dehghani, A. Siami, P. Haghi, A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods, Journal of Mining and Environment, 8(1) (2017) 49-60.

[29] Z. Fu, X. Wu, H. Liao, F. Herrera, Underground mining method selection with the hesitant fuzzy linguistic gained and lost dominance score method, IEEE Access, 6 (2018) 66442-66458.

[30] G. Popovic, B. Djordjevic, D. Milanovic, Multiple criteria approach in the mining method selection, Industrija, 47(4) (2019).

[31] M.A. Idris, Probabilistic stability analysis of underground mine excavations, Luleå tekniska universitet, 2014.

[32] S. Heidarzadeh, A. Saeidi, A. Rouleau, Use of probabilistic numerical modeling to evaluate the effect of geomechanical parameter variability on the probability

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Jahanbani, M. Ataee-pour, A. Mortazavi, Utilization of fuzzy Weighted Aggregated Sum Product Assessment technique to rank the underground mining methods , Amirkabir J. Civil Eng., 56(3) (2024) 363-374.

DOI: 10.22060/ceej.2024.22828.8056