

Ranking the geomechanical factors affecting the selection of underground mining methods using a combined technique of DEMATEL and ANP with a fuzzy approach

Zeinab Jahanbani¹, Ali Mortazavi², Majid Atae-pour^{3*}

1. Amirkabir University of Technology, Department of Mining Engineering, Iran
jahanbani1990@gmail.com
2. Nazarbayev University, School of Mining and Geosciences, Kazakhstan
ali.mortazavi@nu.edu.kz
3. Amirkabir University of Technology, Department of Mining Engineering, Iran
map60@aut.ac.ir

Received: 2023/09/02 - Accepted: 2024/07/24

Abstract

In the occurrence of geomechanical risks in underground mines and choosing a suitable underground mining method, one factor and a set of factors are closely related to each other. Studying, ranking, and determining the importance of the geomechanical and geological factors affecting the selection of underground mining methods from the point of view of the relationship and interaction between them helps to choose the best (the safest and the most profitable) mining method before starting the mining process. It can also help to design a better and safer mine and to reduce the subsequent risks. Therefore, according to the importance of the subject, in this research, using the fuzzy DANP method, ranking and determining the significance of the factors from the point of view of the existing relationships between them was done. To conduct the present study, first, the influential geomechanical and geological factors in the selection of underground mining methods were studied and recognized. Then, the fuzzy DANP method was used to rank and determine their importance. To implement this technique, questionnaires were designed and distributed among experts, and then 19 questionnaires were received to evaluate the factors. Finally, by implementing this method, the final weight of the criteria was calculated, and then they were ranked based on their obtained weights. The results show that the factors of rock mass tensile strength (0.115), discontinuity spacing (0.113), in-situ stresses (0.109), and geological structures of the deposit with a weight of 0.107 have the highest rank, respectively. Therefore, the abovementioned criteria are the most important among other factors.

Keywords

Geomechanical criteria, underground mining method selection, fuzzy DANP, ranking the factors.

* Corresponding Author



1- Introduction

Selecting an appropriate underground mining method to extract minerals from a deposit is one of the first and most important decisions in mining engineering activities from the perspective of safety, productivity, and economic issues. Different parts of an ore deposit normally vary widely in geological, physical, chemical, and structural aspects. Depending on the deposit's dip, depth, size, shape, and strength of the ore and host rock, several technically feasible methods may be adopted for a particular ore deposit. However, safety, financial, economic, and environmental parameters are the most important, and due attention should be paid to these parameters to select the safest and most profitable method. Therefore, choosing the most suitable method for an ore deposit is a critical and challenging task because it complies with a set of criteria [1]. The influencing criteria in selecting underground mining methods are interdependent, and a relationship exists between them. This issue can cause various operational and geomechanical risks like roof collapse, subsidence, rock burst, etc. [2]. Therefore, there is not a single factor but a set of factors related to each other that can lead to different accidents. Hence, finding and prioritizing these factors is vital to choosing the safest and most profitable underground mining method. In the present study, the fuzzy DANP technique, a hybrid approach of the fuzzy analytical network process (FANP) and fuzzy decision-making trial and laboratory methods has been used to study and rank the geomechanical factors affecting underground mining method selection.

2- Methods

This research identified the geomechanical factors influencing the selection of underground mining methods. Then, the fuzzy DEMATEL technique was utilized to examine the cause-and-effect relationship of the parameters. Finally, the fuzzy DANP technique was used to extract the mentioned criteria's weight and rank them [3, 4].

3- Findings and Argument

In this study, the Network Relation Map (NRM) was first drawn using the fuzzy DEMATEL method to show the interrelationship and dependence between the geomechanical criteria (Figure 1). In the second step, after calculating each geomechanical parameter's final weight, each factor's importance was determined and ranked based on the obtained weights. According to the results of the calculations and investigating ten geomechanical criteria, rock mass tensile strength and discontinuity spacing factors with a weight of 0.115 and 0.113 are the most important parameters, respectively (Figure 2).

4- Conclusions

Selecting the best underground mining method among many alternatives is a multicriteria decision-making problem. The important factors for mining method selection include geological and mineralogical factors, geometrical features of deposit, safety, environmental parameters, economic variables, geographic characteristics, and local considerations. The effective criteria in selecting underground mining methods are interdependent, and they have a relationship. This issue can cause various operational and geomechanical risks. Therefore, there is not a single factor but a set of factors related to each other that can lead to different accidents. Hence, finding and prioritizing these factors is vital to choosing the safest and most profitable underground mining method. In this study, the fuzzy DANP approach was used to rank and determine their importance after identifying the geomechanical factors in the selection of underground mining methods. The results show that rock mass tensile strength and discontinuity spacing are the most critical factors, with values of 0.115 and 0.113, respectively.

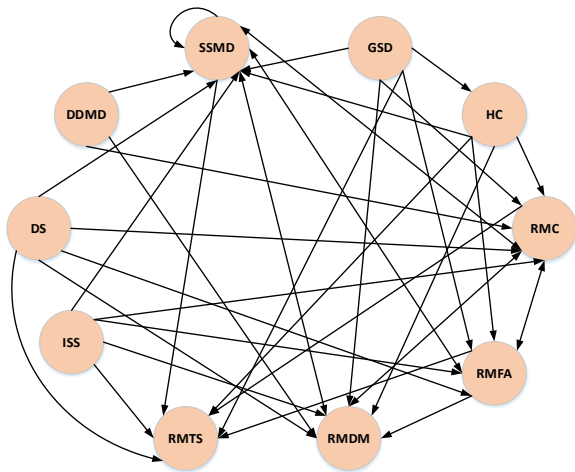


Figure 1. The Graphical display of dependence between criteria

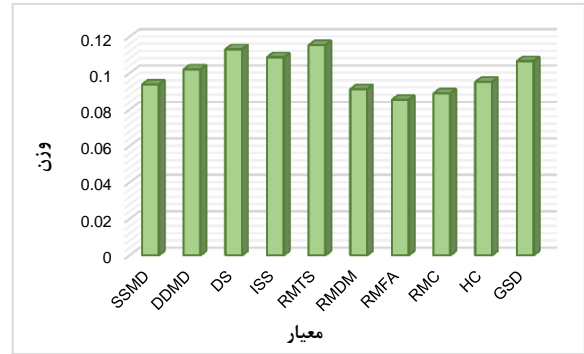


Figure 2. The final weight of the geomechanical criteria influencing the underground mining method selection

References

1. Gupta, S. and Kumar, U., 2012; "An analytical hierarchy process (AHP)-guided decision model for underground mining method selection", International Journal of Mining, reclamation, and Environment, vol. 26, no. 4, pp. 324-336.
2. Idris, M.A., 2014; "Probabilistic stability analysis of underground mine excavations", Luleå tekniska universitet.
3. Selerio Jr, E., Caladcad, J.A., Catamco, M. R., Capinpin, E. M. and Ocampo, L., 2022; "Emergency preparedness during the COVID-19 pandemic: Modelling the roles of social media with fuzzy DEMATEL and analytic network process", Socio-economic planning sciences, vol. 82, p. 101217.
4. Muhafidzah A. and Ramli, K., 2022; "Interdependency and Priority of Critical Infrastructure Information (Case Study: Indonesia Payment System)", Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi), vol. 6, no. 3, pp. 403-411.



مقاله پژوهشی

استفاده از روش ترکیبی دیمتل و فرآیند تحلیل شبکه با رویکرد فازی برای رتبه‌بندی مولفه‌های ژئومکانیکی تاثیرگذار بر انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

زینب جهانبانی^۱، علی مرتضوی^۲، مجید عطایی پور^{۳*}

۱. کاندیدای دکترا، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، jahanbani1990@gmail.com

۲. استاد، دانشکده معدن و علوم زمین، دانشگاه نظربایف، آستانا، قزاقستان، ali.mortazavi@nu.edu.kz

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، map60@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳

چکیده

در وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن و فضاهای زیرزمینی و همچنین در انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و ایمن نه یک فاکتور به‌تنهایی، بلکه مجموعه‌ای از فاکتورها در ارتباط با یکدیگر عمل می‌کنند. مطالعه، رتبه‌بندی و تعیین میزان اهمیت فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب از دیدگاه ارتباط و اندرکنش موجود میان آن‌ها، علاوه بر کمک به انتخاب بهترین (ایمن‌ترین و سودآورترین) روش استخراج قبل از شروع فرآیند معدنکاری، می‌تواند به طراحی بهتر و ایمن‌تر معدن نیز کمک کند و باعث کاهش ریسک‌های متعاقب شود. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق با استفاده از روش DANP فازی به رتبه‌بندی و تعیین میزان اهمیت فاکتورها از دیدگاه روابط موجود میان آن‌ها پرداخته شد. برای انجام این تحقیق، ابتدا فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی تاثیرگذار در انتخاب روش مناسب برای استخراج زیرزمینی مطالعه و شناسایی شدند. سپس برای بررسی و تعیین میزان اهمیت آن‌ها از روش DANP فازی استفاده شد. برای اجرای این روش، ابتدا پرسشنامه‌هایی طراحی و در میان متخصصان توزیع و ۱۹ پرسشنامه برای ارزیابی پارامترها دریافت شد. در نهایت با اجرای این روش، وزن نهایی فاکتورها محاسبه و سپس بر اساس وزن‌های به دست آمده رتبه‌بندی شدند. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهند که فاکتورهای مقاومت کششی توده‌سنگ (۰/۱۱۵)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (۰/۱۱۳)، تنش‌های برجا (۰/۱۰۹) و ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار با وزن ۰/۱۰۷، به ترتیب دارای بالاترین رتبه‌اند و بیشترین اهمیت در بین سایر فاکتورها را دارند.

کلمات کلیدی

معیارهای ژئومکانیکی، انتخاب روش استخراج زیرزمینی، DANP فازی، رتبه‌بندی فاکتورها.

۱- مقدمه

۲- پیشینه تحقیق

انتخاب روش استخراج زیرزمینی مناسب برای استخراج مواد معدنی از یک کانسار، یکی از اولین و مهم‌ترین تصمیم‌ها در فعالیت‌های مهندسی معدن از دیدگاه مسایل اقتصادی، ایمنی و بهره‌وری است. بخش‌های مختلف یک کانسار معمولاً از نظر زمین‌شناسی، فیزیکی، شیمیایی و ساختاری بسیار متفاوت است. بسته به میزان پارامترهایی مانند شیب، عمق، اندازه و شکل کانسار و همچنین مقاومت ماده معدنی و سنگ میزبان، ممکن است چندین روش برای استخراج یک کانسار خاص در نظر گرفته شود. از طرف دیگر پارامترهای ایمنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیز فاکتورهای مهمی‌اند و در انتخاب ایمن‌ترین و سودآورترین روش استخراج باید به آن‌ها توجه شود. بنابراین، فرآیند انتخاب بهترین روش برای استخراج یک کانسار به دلیل مطابقت آن با مجموعه‌ای از معیارها، مساله‌ای بسیار مهم و چالش‌برانگیز است. از طرف دیگر، پارامترهای موثر در انتخاب یک روش استخراج مناسب با یکدیگر در ارتباط و تعامل‌اند. این امر به نوبه خود می‌تواند منجر به وقوع حوادث ژئوتکنیکی مختلف در قالب ریزش سقف، نشست، انفجار سنگ^۱ و نظایر آن شود و در نتیجه تهدیدی برای ایمنی پرسنل و تجهیزات به‌شمار آید. بنابراین انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب از میان چندین روش ممکن، می‌تواند در پیشینه‌سازی سود و بازیابی از منابع معدنی، افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولید، افت ماده معدنی و در نهایت ایجاد یک محیط ایمن برای معدنکاران در زیر زمین بسیار مفید باشد [۱، ۲]. بنابراین شناسایی و رتبه‌بندی فاکتورهای ژئومکانیکی موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی با در نظر گرفتن اندرکنش موجود میان آن‌ها قبل از شروع یک عملیات معدنکاری ایمن، اهمیت زیادی دارد. روش DANP فازی^۲، یکی از روش‌هایی است که علاوه بر بررسی و تحلیل ساختار حاکم بر معیارها از نقطه‌نظر روابط علت/ معلولی و تعامل آن‌ها با یکدیگر، به تعیین وزن و اهمیت هر یک از فاکتورها نیز می‌پردازد. از این‌رو، در تحقیق حاضر، با کاربرد روش DANP فازی و با در نظر گرفتن اندرکنش و روابط درونی میان مولفه‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی به مطالعه، رتبه‌بندی و بررسی اهمیت هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

در راستای مطالعه پارامترهای مهم و موثر در انتخاب روش مناسب برای استخراج معادن، از دیرباز مطالعات فراوانی انجام شده است. اولین الگو یا راهنمای روش استخراج، روشی است که پیل^۳ در سال ۱۹۴۱ ارائه کرده است. پس از وی نیز محققان مختلفی از جمله بشکوف و رایت^۴ (۱۹۷۳)، موریسون^۵ (۱۹۷۶)، لابسشر^۶ (۱۹۸۱)، نیکلاس^۷ (۱۹۸۱)، هارتمن^۸ (۱۹۸۷)، پاکالنیس و همکاران^۹ (۱۹۹۵) و میچ و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۲) در مطالعات خود به منظور تصمیم‌گیری برای انتخاب روش استخراج از فاکتورهای مختلف بهره برده‌اند [۳]. آلپای و یاوز^{۱۱} در مطالعه خود (۲۰۰۷)، مشخصات مکانی کانسار، شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی، ویژگی‌های ژئوتکنیکی (سنگ و خاک)، ملاحظات اقتصادی، فاکتورهای فنی و مسایل زیست‌محیطی را به‌عنوان فاکتورهای تاثیرگذار در نظر گرفته‌اند [۴]. گوپتا و کومار^{۱۲} (۲۰۱۳)، فاکتورهای ذاتی و فاکتورهای خارجی (بیرونی) را در مطالعه خود استفاده کرده‌اند [۲]. بالوسا و سینگام^{۱۳} نیز در سال ۲۰۱۷ برای انتخاب روش مناسب استخراج، از فاکتورهای ضخامت کانسار، RMR کمربالا، شیب کانسار، شکل کانسار، RMR ماده معدنی، عیار ماده معدنی، یکنواختی ماده معدنی، بازیابی، تولید، RMR کمرپایین، تکنولوژی، عمق و اختلاط استفاده کرده‌اند [۵]. فو و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۸) در تحقیق خود پارامترهای بازده اقتصادی، پارامترهای فنی، مدیریت، شرایط ایمنی و امنیت و مسایل زیست‌محیطی و بالوسا و گورای^{۱۵} (۲۰۱۹) نیز فاکتورهای شیب، شکل، ضخامت، عمق، توزیع عیار، RMR ماده معدنی، RMR کمربالا، RMR کمرپایین، تولید، ترقیق، RSS ماده معدنی، RSS کمربالا، RSS کمرپایین، انعطاف‌پذیری و ایمنی را مهم‌ترین پارامترها در نظر گرفته‌اند [۶، ۷]. در سال ۲۰۲۰ برای انجام مطالعه‌ای با هدف انتخاب روش مناسب استخراج از

³ Peele⁴ Boshkov and Wright⁵ Morison⁶ Lubscher⁷ Nicholas⁸ Hartman⁹ Pakalnis et al.¹⁰ Meech et al.¹¹ Alpay & Yavuz¹² Gupta & Kumar¹³ Balusa & Singam¹⁴ Fu et al.¹⁵ Balusa & Gorai¹ Rock burst² Fuzzy DANP

فاکتورهای فنی، تولید و اقتصادی استفاده شده است [۸].
غذالی^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ برای انتخاب

روش استخراج با استفاده از روش UBC و ارزیابی پایداری کارگاه استخراج از پارامترهای هندسی، زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی کانسار استفاده کردند [۹]. ماهروس^۲ و جانگ-گووان^۳ در تحقیق خود از معیارهای شکل کانسار، ضخامت ماده معدنی، شیب، عمق، توزیع عیار، RQD (ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین) و RSS (ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین) برای انتخاب روش استخراج در معدن بولئو^۴ در مکزیک استفاده کردند (سال ۲۰۲۱) [۱۰]. صمیمی‌نمین^۵ و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای مروری بر کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۶ برای انتخاب روش استخراج انجام دادند [۱۱]. عبدالرسول^۷ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از فاکتورهای شکل و عمق کانسار، ضخامت ماده معدنی، شیب، توزیع عیار، RQD و RSS (ماده معدنی، کمربالا و کمرپایین) به رتبه‌بندی و انتخاب روش استخراج پرداختند [۱۲]. لی^۸ و همکاران نیز در سال ۲۰۲۳ برای انتخاب یک روش استخراج مناسب، معیارهای نرخ بازیابی ماده معدنی، ظرفیت تولید کارگاه استخراج، انعطاف‌پذیری، شرایط ایمنی کارگاه استخراج، نرخ اختلاط ماده معدنی، نرخ استخراج، نرخ دسترسی به نیروی کار ماهر و هزینه‌های کل را در نظر گرفتند [۱۳].

در انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و ایمن و همچنین ایجاد ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن و حفریه‌های زیرزمینی، فاکتورهای زیادی تأثیرگذارند که در ارتباط تنگاتنگ با یکدیگرند. از طرف دیگر با وجود مطالعاتی که در زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی انجام شده است، تاکنون پژوهشی به شناسایی، رتبه‌بندی و بررسی اهمیت هریک از مولفه‌های موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه روابط موجود میان آن‌ها نپرداخته است و این امر نیز بر ضرورت و اهمیت مطالعه حاضر می‌افزاید. از آنجا که روش

DANP فازی، ترکیبی از روش‌های دیمتل^۹ و فرآیند تحلیل شبکه^{۱۰} است، می‌توان آن را به عنوان یک راه برای حل مساله موجود بیان کرد. با استفاده از روش دیمتل می‌توان وجود اندرکنش میان فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی تأثیرگذار در انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی را در نظر گرفت. در مرحله بعد با کاربرد روش فرآیند تحلیل شبکه می‌توان به رتبه‌بندی فاکتورها پرداخت. همچنین به دلیل ماهیت معدنکاری و وجود عدم قطعیت همراه با این فاکتورها، استفاده از رویکرد فازی همراه با روش DANP می‌تواند راه‌گشا باشد. بنابراین در این مقاله، از روش DANP فازی برای مطالعه، تعیین ساختار و رتبه‌بندی این فاکتورها استفاده شده است.

شناسایی و رتبه‌بندی معیارهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب روش استخراج زیرزمینی از نقطه‌نظر ارتباط و اندرکنش موجود میان این فاکتورها، قبل از شروع معدنکاری، نه تنها امکان انتخاب بهترین و سودآورترین روش استخراج را فراهم می‌کند، بلکه به شناسایی خطرهای ریسک‌های بالقوه زیرزمینی و پیشگیری از حوادث نیز کمک بسیاری کرده و در نتیجه منجر به انتخاب ایمن‌ترین روش استخراج زیرزمینی نیز می‌شود.

۳- روش DANP فازی

فرآیند تحلیل شبکه‌ای یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در آن شبکه جایگزین ساختار سلسله مراتبی شده است و از روابط دوطرفه بین خوشه‌ها و نیز روابط درونی خوشه‌ها پشتیبانی می‌کند. روش دیمتل نیز بر پایه مقایسه زوجی است که با بهره‌مندی از قضاوت خبرگان و به‌کارگیری اصول فرضیه‌گراف‌ها، روابط علی/معلولی بین معیارها را به یک ساختار ملموس تبدیل می‌کند. از آنجا که روش دیمتل روابط علت و معلولی بین عوامل را مشخص می‌کند؛ بنابراین می‌توان این روش را با روش فرآیند تحلیل شبکه ترکیب کرد. در روش شبکه سطح وابستگی معیارها دوطرفه است که در روش دیمتل چنین نیست و به دنیای واقعی نزدیک‌تر است. پس برای رفع این نقص موجود در شبکه، از ماتریس ارتباط کامل^{۱۱} که از روش دیمتل به دست می‌آید برای محاسبه وزن معیارها استفاده می‌شود. بنابراین روش

¹ Ghazdali

² Mahrous

³ Jong-Gwan

⁴ Boleo mine

⁵ Samimi Namin

⁶ Multi Criteria Decision-Making (MCDM)

⁷ Abdelrasoul et al.

⁸ Li

⁹ Decision-Making Trial and Laboratory (DEMATEL)

¹⁰ Analytic Network process (ANP)

¹¹ Total Communications (TC) matrix

۳-۲- نرمال‌سازی ماتریس ارتباط مستقیم (ماتریس (\tilde{H}))

ماتریس (\tilde{H}) با نرمال‌سازی ماتریس ارتباطات مستقیم نهایی/ میانگین (\tilde{X}) به دست می‌آید. رابطه ۳، ماتریس \tilde{H} را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه ریاضیاتی این ماتریس به صورت رابطه ۴ است.

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{12} & \dots & \tilde{h}_{1n} \\ \tilde{h}_{21} & \tilde{h}_{22} & \dots & \tilde{h}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{h}_{n1} & \tilde{h}_{n2} & \dots & \tilde{h}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\tilde{h}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{r} = \left(\frac{x_{ij,l}}{r}, \frac{x_{ij,m}}{r}, \frac{x_{ij,u}}{r} \right) \quad (4)$$

که در آن:

\tilde{x}_{ij} هر درایه ماتریس میانگین.

r بیشینه مقدار از بین جمع سطرها و یا جمع ستون‌ها بوده و به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$r = \max \left[\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij,u}, \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n x_{ij,u} \right] \quad (5)$$

۳-۳- محاسبه ماتریس ارتباط کامل زیرمعیارها (\tilde{T}_C) و ترسیم گراف شبکه مساله

در مرحله بعد، ماتریس روابط کلی (\tilde{T}_C) محاسبه شده و اثر نسبی حاکم بر روابط مستقیم و غیرمستقیم به دست می‌آید. \tilde{T}_C یک ماتریس $n \times n$ بوده و به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$\tilde{T}_C = \tilde{H}(\tilde{I} - \tilde{H})^{-1} \quad (6)$$

هر درایه این ماتریس به صورت $\tilde{t}_{ij} = (t_{ij,l}, t_{ij,m}, t_{ij,u})$ است. در این رابطه هم‌چنین \tilde{I} ماتریس یکه فازی است.

این ماتریس به عنوان خروجی روش دیمتل فازی و ورودی روش فرآیند تحلیل شبکه فازی است. به عبارت دیگر تا این مرحله روش دیمتل فازی اجرا می‌شود و در مراحل بعدی برای محاسبه وزن نهایی زیرمعیارها و معیارهای مساله، روش فرآیند تحلیل شبکه فازی پیاده‌سازی می‌شود.

در این مرحله هم‌چنین نقشه روابط شبکه‌ای زیرمعیارها برای نشان دادن نوع ارتباط درونی بین آن‌ها ترسیم می‌شود. این گراف نیز یکی دیگر از خروجی‌های روش دیمتل فازی و یک فاکتور ورودی در روش فرآیند تحلیل شبکه فازی است.

DANP فازی، همان روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی مبتنی بر روش دیمتل است. این رویکرد با استفاده از ماتریس ارتباطات کل دیمتل، سوپرماتریس‌های ANP را تشکیل داده و به محاسبه وزن معیارهای پژوهش می‌پردازد. بنابراین در این تحقیق با استفاده از روش DANP فازی اقدام به محاسبه وزن مولفه‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و سپس رتبه‌بندی و تعیین میزان اهمیت هر یک از این فاکتورها شد. در شکل ۱ مراحل اجرای این روش ارائه شده است. در ادامه نیز به تشریح روش DANP فازی پرداخته می‌شود [۱۴-۲۰].

۳-۱- محاسبه ماتریس ارتباط مستقیم (\tilde{X})

در این روش، ابتدا مولفه‌های اصلی و عوامل (پارامتر یا متغیر) موثر بر آن‌ها شناسایی می‌شوند. برای این منظور می‌توان از روش طوفان ذهنی و مرور ادبیات استفاده کرد. سپس یک ماتریس مربعی با عوامل موثر در ردیف و ستون (ماتریس \tilde{Z}) تهیه (رابطه ۱) و در اختیار متخصصان قرار داده می‌شود تا میزان تاثیر مستقیم هر عامل بر سایر عوامل (شدت اثرها) با استفاده از متغیرهای زبانی امتیازدهی شود. در این ماتریس هر درایه به صورت یک عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است (در تحقیق حاضر).

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ C_1 \begin{bmatrix} 0 & \tilde{z}_{12} & \dots & \tilde{z}_{1n} \\ \tilde{z}_{21} & 0 & \dots & \tilde{z}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{z}_{n1} & \tilde{z}_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این ماتریس، $\tilde{z}_{ij} = (z_{ij,l}, z_{ij,m}, z_{ij,u})$ میزان تاثیر معیار C_i بر معیار C_j را نشان می‌دهد.

در گام بعد ماتریس میانگین (\tilde{X}) برای نشان دادن تاثیرات اولیه مستقیم یک معیار بر روی خود و سایر معیارها، محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

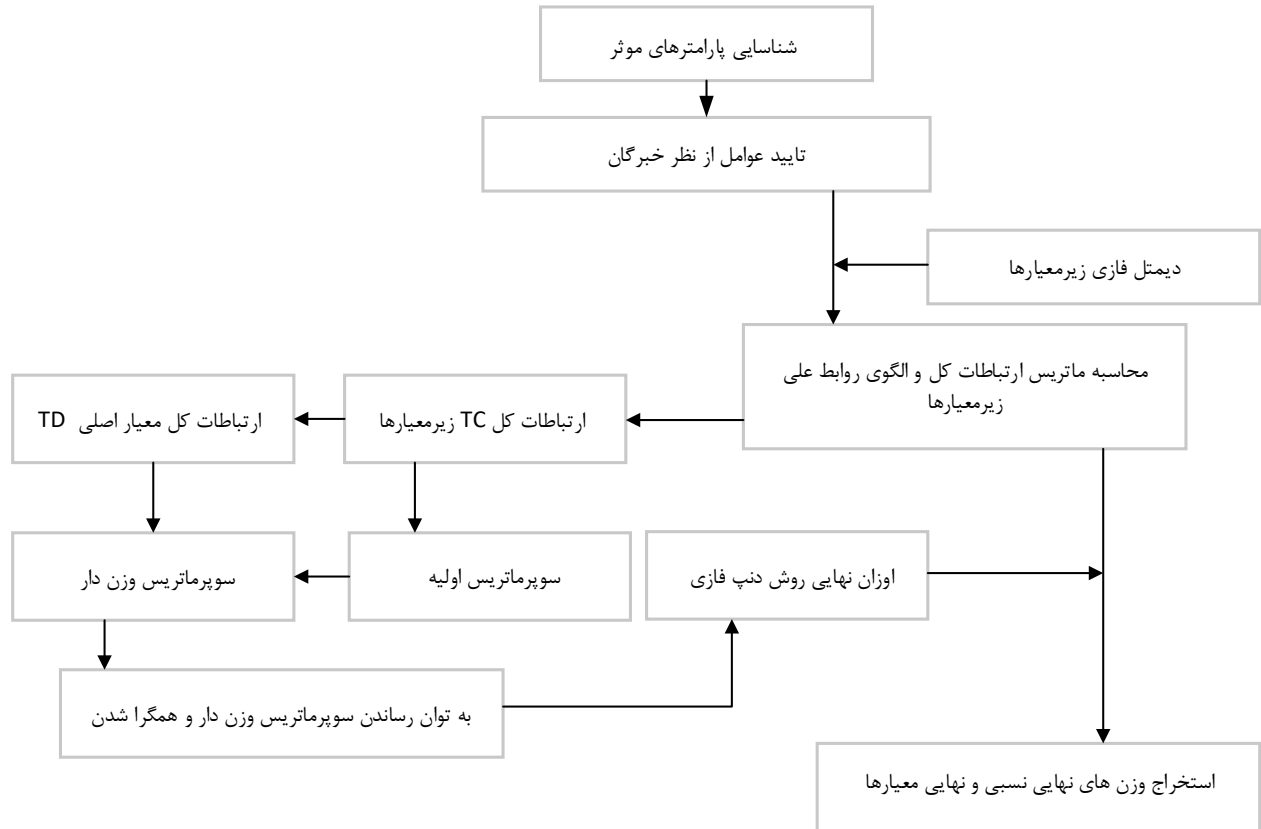
$$\tilde{x} = \frac{\tilde{z}^1 + \tilde{z}^2 + \tilde{z}^3 + \dots + \tilde{z}^p}{p} \quad (2)$$

که در آن:

p : تعداد خبرگان.

\tilde{z}^1 و \tilde{z}^2 به ترتیب ماتریس مقایسه زوجی کارشناس ۱، ۲ و p .

هر درایه ماتریس میانگین (\tilde{x}) نیز یک عدد فازی مثلثی و به صورت $\tilde{x}_{ij} = (x_{ij,l}, x_{ij,m}, x_{ij,u})$ است.



شکل ۱- مدل اجرایی پژوهش [۱۷]

مرحله بعد، از ضرب ماتریس \tilde{T}_D^α در ماتریس \tilde{W}_C (درایه‌های فازی مربوط به هر خوشه در ماتریس \tilde{T}_D^α در درایه‌های فازی مربوط به خوشه نظیر آن در ماتریس \tilde{W}_C ضرب می‌شوند)، سوپرماتریس وزن دار حاصل می‌شود (رابطه ۹).

$$\tilde{W}^\alpha = \tilde{T}_D^\alpha \tilde{W}_C \quad (9)$$

۳-۷- محدود کردن سوپرماتریس وزن دار و تشکیل سوپرماتریس کران دار (حدی)

مطابق رابطه ۱۰، سوپرماتریس وزن دار را تا زمانی که تمامی اعداد هر سطر همگرا شوند، به توان رسانده می‌شود. با انجام این محاسبات، سوپرماتریس کران دار و در نهایت وزن نهایی زیرمعیارها به دست خواهد آمد.

$$\tilde{W}^* = \lim_{z \rightarrow \infty} (\tilde{W}^\alpha)^z \quad (10)$$

۳-۸- نافازی کردن و تبدیل هر پارامتر به عدد قطعی

در نهایت نیز اعداد فازی مثلثی به دست آمده از مراحل قبلی با استفاده از روش مرکز گرانیگاه که دقیق‌ترین روش غیرفازی کردن است، نافازی می‌شوند (رابطه ۱۱) [۲۱، ۲۲].

۳-۴- محاسبه ماتریس ارتباط کامل معیارهای اصلی / ابعاد (\tilde{T}_D)

ابتدا باید ماتریس \tilde{T}_D را از ماتریس ارتباط کامل زیرمعیارها \tilde{T}_C استخراج کرد. به این ترتیب که هر درایه ماتریس \tilde{T}_D ، از میانگین درایه‌های موجود در هر خوشه در ماتریس \tilde{T}_C حاصل می‌شود.

۳-۵- نرمال سازی ماتریس ارتباط کامل زیرمعیارها (\tilde{T}_C^α) و تشکیل سوپرماتریس بدون وزن (\tilde{W}_C)

برای انجام این بخش از روش، ابتدا ماتریس \tilde{T}_C نرمال می‌شود. رابطه ۷، ماتریس نرمال شده (\tilde{T}_C^α) را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، از ترانهاده ماتریس \tilde{T}_C^α ، سوپرماتریس بدون وزن حاصل می‌شود (رابطه ۸).

$$\tilde{T}_C^\alpha = (T_{Cl}^\alpha, T_{Cm}^\alpha, T_{Cu}^\alpha) \quad (7)$$

$$\tilde{W}_C = (\tilde{T}_C^\alpha)' = (w_l, w_m, w_u) \quad (8)$$

۳-۶- نرمال سازی ماتریس ارتباط کامل معیارهای اصلی / ابعاد (\tilde{T}_D^α) و تشکیل سوپرماتریس وزن دار (\tilde{W}^α)

در این بخش نیز ابتدا ماتریس \tilde{T}_D نرمال می‌شود (\tilde{T}_D^α). در

انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی ایمن است. 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 نه یک فاکتور به تنهایی، بلکه مجموعه‌ای از فاکتورها در ارتباط با یکدیگرند و منجر به ایجاد حوادث ژئوتکنیکی خواهند شد.

در تحقیق حاضر با هدف شناسایی رتبه‌بندی مولفه‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه روابط میان آن‌ها، منابع موجود در این زمینه مورد مطالعه قرار گرفت و فاکتورهای موثر در آن‌ها بررسی شد. 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) [۱، ۲، ۴-۸، ۲۳-۴۸].

۵- اجرای روش DANP فازی و تحلیل نتایج

در این تحقیق با کاربرد روش DANP فازی و با در نظر گرفتن ساختار حاکم و اندرکنش موجود میان پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهم و تاثیرگذار در فرآیند انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و وقوع ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن زیرزمینی، وزن نهایی و میزان اهمیت فاکتورهای مورد نظر محاسبه و سپس اقدام به رتبه‌بندی آن‌ها شد. برای اجرای روش، ابتدا پرسشنامه‌هایی طراحی و در میان متخصصان توزیع و در نهایت ۱۹ پرسشنامه برای ارزیابی پارامترها دریافت شد. در شکل ۲، اطلاعات کارشناسان شرکت‌کننده در مطالعه براساس معیارهای زمینه‌تحصیلی، سطح تحصیلات و موقعیت شغلی آن‌ها آورده شده است. سپس برای امتیازدهی از کارشناسان خواسته شد تا میزان تاثیر مستقیم هر عامل بر سایر عوامل را بر اساس مقادیر قطعی معادل با متغیرهای زبانی مندرج در جدول ۲ (امتیازهای ۰ تا ۴) امتیازدهی کنند. در مرحله بعد برای پیاده‌سازی روش و انجام محاسبات، به جای کاربرد مقادیر قطعی متغیرهای زبانی درج شده توسط کارشناسان در پرسشنامه‌های مربوطه، از معادل فازی این اعداد در ستون سمت راست جدول ۲، استفاده شد. به عنوان مثال در انجام محاسبات و وارد کردن این امتیازات در نرم‌افزار، به جای عدد ۲ از معادل فازی آن به صورت (۰/۷، ۰/۵، ۰/۳) استفاده شد. سپس روش DANP فازی مورد استفاده قرار گرفت. برای پیاده‌سازی و انجام محاسبات از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شد.

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \quad (11)$$

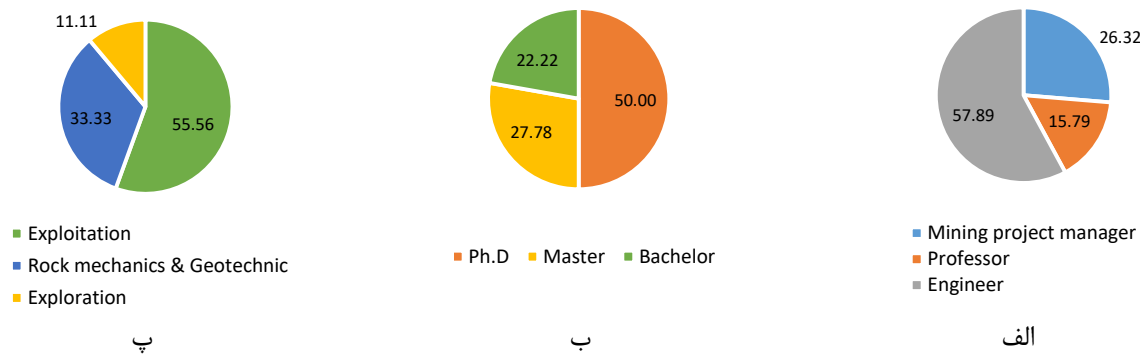
X^* مقدار نافازی شده هر عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ است.

جدول ۱- معیارهای ژئومکانیکی تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی در مطالعه حاضر

معیار	ردیف	زیرمعیار	نماد
فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی (ماده معدنی، کربنات و کربناتین)	۱	مقاومت برشی ناپیوستگی‌های اصلی (گسله‌ها و درزه‌های بزرگ)	SSMD
	۲	شیب/جهت شیب یا شیب/امتداد ناپیوستگی اصلی	DDMD
	۳	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها	DS
	۴	تنش‌های برجا	ISS
	۵	مقاومت کششی توده‌سنگ	RMTS
	۶	مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ	RMDM
	۷	زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ	RMFA
	۸	چسبندگی توده‌سنگ	RMC
	۹	شرایط هیدرولوژی (آب‌های سطحی و زیرزمینی)	HC
	۱۰	ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها)	GSD

۴- معیارهای تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

انتخاب روش استخراج یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی معدن است. هر کانسار با ویژگی‌های خاص خود همراه است. با افزایش عمق معدن و در نتیجه افزایش تعداد فاکتورهای دارای عدم قطعیت، فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی می‌تواند با خطرها و ریسک‌های دارای پیامدهای فاجعه‌بار همراه باشد. فاکتورهای بسیاری مانند ویژگی‌های مکانیکی توده‌های سنگی، جهت‌گیری و خواص ناپیوستگی‌ها، شرایط هیدرولوژیکی و شرایط تنش‌های القایی و برجا از جمله فاکتورهای تاثیرگذار بر پایداری حفاری‌ها و معادن زیرزمینی و از پارامترهای موثر در



شکل ۲- اطلاعات کارشناسان براساس الف) موقعیت شغلی، ب) سطح تحصیلات و پ) زمینه تحصیلی

جدول ۲- متغیرهای زبانی به کار رفته در تحقیق و مقادیر قطعی و فازی معادل آن‌ها

مقدار فازی ترم‌های زبانی	متغیر زبانی	معادل قطعی
(۰, ۰/۱, ۰/۳)	بدون تاثیر	۰
(۰/۱, ۰/۳, ۰/۵)	تاثیر خیلی کم (VL)	۱
(۰/۳, ۰/۵, ۰/۷)	تاثیر کم (L)	۲
(۰/۵, ۰/۷, ۰/۹)	تاثیر زیاد (H)	۳
(۰/۷, ۰/۹, ۱/۰)	تاثیر خیلی زیاد (VH)	۴

۵-۱- تعیین اهمیت و رتبه‌بندی معیارهای ژئومکانیکی تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی

در این بخش، ابتدا با استفاده از روش دیمتل فازی گراف شبکه مساله برای نشان دادن ارتباط درونی و وابستگی بین زیرمعیارها ترسیم شد (شکل ۳). در مراحل بعدی اجرای روش، پس از محاسبه وزن نهایی هر پارامتر، میزان اهمیت هر یک از آن‌ها تعیین و براساس وزن‌های به دست آمده، رتبه‌بندی شدند (شکل ۴). طبق نتایج حاصل از محاسبات و کمی‌سازی پارامترهای مورد نظر با استفاده از روش DANP فازی، فاکتورهای مقاومت کششی توده‌سنگ (۰/۱۱۵)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (۰/۱۱۳)، تنش‌های برجا (۰/۱۰۹) و ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها) با وزن ۰/۱۰۷ به ترتیب دارای بالاترین رتبه‌اند و اهمیت بیشتری در بین سایر فاکتورها دارند.

۶- نتیجه‌گیری

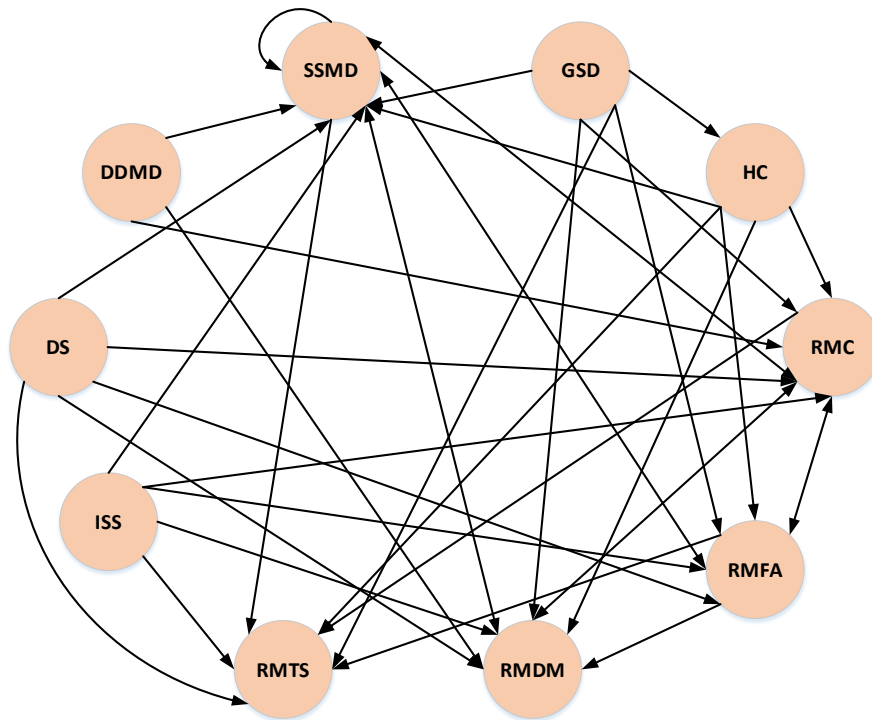
در انتخاب یک روش استخراج زیرزمینی مناسب و ایمن و همچنین ایجاد ریسک‌های ژئومکانیکی در معادن و حفریه‌های زیرزمینی، فاکتورهای زیادی تاثیرگذار بوده و در ارتباط نتگاتنگ با یکدیگرند. از طرف دیگر با وجود مطالعاتی که در

زمینه انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی انجام شده است، تاکنون پژوهشی به شناسایی، رتبه‌بندی و بررسی اهمیت هر یک از مولفه‌های موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی از دیدگاه روابط موجود میان آن‌ها نپرداخته است و این امر نیز بر ضرورت و اهمیت مطالعه حاضر می‌افزاید. بنابراین، هدف از نگارش مقاله حاضر رتبه‌بندی و بررسی اهمیت هر یک از مولفه‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی موثر در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی با در نظر گرفتن اندرکنش، روابط موجود و ساختار حاکم بر آن‌ها با استفاده از روش DANP فازی است. با رتبه‌بندی و تعیین میزان اهمیت پارامترها ضمن در نظر گرفتن روابط درونی و ریسک همراه با آن‌ها، می‌توان ایمن‌ترین و سودآورترین روش استخراج زیرزمینی را انتخاب کرد. برای انجام تحقیق، ابتدا فاکتورهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی تاثیرگذار در انتخاب روش مناسب برای استخراج زیرزمینی مطالعه و شناسایی شدند. سپس برای بررسی و تعیین میزان اهمیت آن‌ها از روش دنپ فازی استفاده شد. برای اجرای این روش، ابتدا پرسشنامه‌هایی طراحی و در میان متخصصان توزیع و ۱۹ پرسشنامه برای ارزیابی پارامترها دریافت شد. در نهایت با اجرای این روش، وزن نهایی فاکتورها محاسبه و سپس براساس وزن‌های به دست آمده رتبه‌بندی

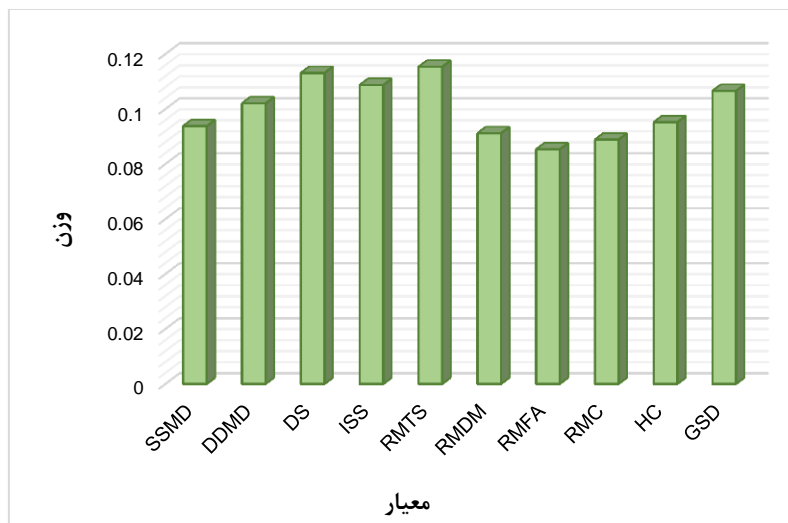
قبل از شروع عملیات معدنکاری در نظر گرفت و با رتبه‌بندی پارامترها و یافتن مهم‌ترین آن‌ها می‌توان علاوه بر انتخاب سودآورترین روش استخراج زیرزمینی، طراحی معدن را نیز به‌گونه‌ای انجام داد که شرایط کاری ایمن برای پرسنل درگیر در این صنعت مهم فراهم و از وارد آمدن خسارت‌های جانی و مالی جلوگیری شود.

شدند. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهند که فاکتورهای مقاومت کششی توده‌سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، تنش‌های برجا و ساختارهای اصلی زمین‌شناسی کانسار (درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، گسل‌ها، صفحات ضعیف و دایک‌ها) به ترتیب بیشترین اهمیت در بین سایر فاکتورها را دارند.

با استفاده از روش استفاده شده در مقاله حاضر، می‌توان ریسک موجود در پارامترهای موثر در انتخاب روش استخراج را



شکل ۳- نمایش گرافیکی وابستگی بین زیرمعیارها



شکل ۴- وزن نهایی فاکتورهای ژئومکانیکی تاثیرگذار در انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی و رده‌بندی آن‌ها

منابع

- Making (MCDM) towards mining method selection (MMS)*", Resources Policy, vol. 77, p. 102676.
12. Abdelrasoul, M. E., Wang, G., Kim, J. G., Ren, G., Abd-El-Hakeem Mohamed, M., Ali, M. A. and Abdellah, W.R., 2022; "Review on the development of mining method selection to identify new techniques using a cascade-forward backpropagation neural network", Advances in Civil Engineering, pp. 1-16.
 13. Li, S., Huang, Q., Hu, B., Pan, J., Chen, J., Yang, J. and Yu, H., 2023; "Mining method optimization of difficult-to-mine complicated orebody using Pythagorean fuzzy sets and TOPSIS method", Sustainability, 15(4), 3692.
 14. Kiani, M., Hosseini, S.H., Taji, M. and Gholinejad, M., 2021; "Mining of Mineral Deposits".
 15. Selerio Jr, E., Caladcad, J.A., Catamco, M. R., Capinpin, E. M. and Ocampo, L., 2022; "Emergency preparedness during the COVID-19 pandemic: Modelling the roles of social media with fuzzy DEMATEL and analytic network process", Socio-economic planning sciences, vol. 82, p. 101217.
 16. Muhafidzah A. and Ramli, K., 2022; "Interdependency and Priority of Critical Infrastructure Information (Case Study: Indonesia Payment System)", Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi), vol. 6, no. 3, pp. 403-411.
 17. Hamed, H. and Mehdiabadi, A., 2020; "Entrepreneurship resilience and Iranian organizations: application of the fuzzy DANP technique", Asia Pacific Journal of Innovation and Entrepreneurship, vol. 14, no. 3, pp. 231-247.
 18. Valmohammadi, C. and Khaki, M.M., 2019; "Determinants for selection of projects for exploitation of mines in Iran", Resources Policy, vol. 63, p. 101424.
 19. Baykasoğlu, A., Kaplanoğlu, V., Durmuşoğlu, Z.D. and Şahin, C., 2013; "Integrating fuzzy DEMATEL and fuzzy hierarchical TOPSIS methods for truck selection", Expert systems with applications, vol. 40, no. 3, pp. 899-907.
 20. Lin, C.-J. and Wu, W.-W., 2008; "A causal analytical method for group decision-making under fuzzy environment" Expert Systems with Applications, vol. 34, no. 1, pp. 205-213.
 21. Lavasani, S.M., Zendegani, A. and Celik, M., 2015; "An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry", Process Safety and Environmental
 1. Idris, M.A., 2014; "Probabilistic stability analysis of underground mine excavations", Luleå tekniska universitet.
 2. Gupta, S. and Kumar, U., 2012; "An analytical hierarchy process (AHP)-guided decision model for underground mining method selection", International journal of mining, reclamation and environment, vol. 26, no. 4, pp. 324-336.
 3. Namin, F.S., Shahriar, K., Bascetin, A. and Ghodsypour, S., 2009; "Practical applications from decision-making techniques for selection of suitable mining method in Iran", Gospodarka Surowcami Mineralnymi, vol. 25, pp. 57-77.
 4. Alpay, S. and Yavuz, M., 2007; "A decision support system for underground mining method selection", International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, Springer, pp. 334-343 .
 5. Balusa, B.C. and Singam, J., 2018; "Underground mining method selection using WPM and PROMETHEE", Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, vol. 99, no. 1, pp. 165-171.
 6. Fu, Z., Wu, X., Liao, H. and Herrera, F., 2018; "Underground mining method selection with the hesitant fuzzy linguistic gained and lost dominance score method", IEEE Access, vol. 6, pp. 66442-66458.
 7. Balusa, B.C. and Gorai, A.K., 2019; "Sensitivity analysis of fuzzy-analytic hierarchical process (FAHP) decision-making model in selection of underground metal mining method", Journal of Sustainable Mining, vol. 18, no. 1, pp. 8-17.
 8. Bajić, S., Bajić, D., Glušević, B. and Ristić Vakanjac, V., 2020; "Application of fuzzy analytic hierarchy process to underground mining method selection", Symmetry, vol. 12, no. 2, p. 192.
 9. Ghazdali, O., Moustadraf, J., Tagma, T., Alabjah, B. and Amraoui, F., 2021; "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, vol. 15, no. 3, pp. 31-38.
 10. Ali, M.A. and Kim, J.-G., 2021; "Selection mining methods via multiple criteria decision analysis using TOPSIS and modification of the UBC method", Journal of Sustainable Mining, vol. 20.
 11. Namin, F.S., Ghadi, A. and Saki, F., 2022; "A literature review of Multi Criteria Decision-

- and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method", Archives of Mining Sciences, vol. 54, no. 2, pp. 341-368.
33. Naghadehi, M. Z., Mikaeil, R. and Ataei, M., 2009; "The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran", Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 4, pp. 8218-8226.
 34. Popovic, G., Djordjevic, B. and Milanovic, D., 2019; "Multiple criteria approach in the mining method selection", Industrija, vol. 47, no. 4.
 35. Yavuz, M., 2015; "The application of the analytic hierarchy process (AHP) and Yager's method in underground mining method selection problem", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, vol. 29, no. 6, pp. 453-475.
 36. Yazdani-Chamzini, A., Haji Yakchali, S. and Kazimieras Zavadskas, E., 2012; "Using a integrated MCDM model for mining method selection in presence of uncertainty", Economic research-Ekonomska istraživanja, vol. 25, no. 4, pp. 869-904.
 37. Heidarzadeh, S., Saeidi, A. and Rouleau, A., 2020; "Use of probabilistic numerical modeling to evaluate the effect of geomechanical parameter variability on the probability of open-stope failure: a case Study of the Niobec Mine, Quebec (Canada)", Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 53, no. 3, pp. 1411-1431.
 38. Cai, M., 2011; "Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and cavern design", Rock mechanics and rock engineering, vol. 44, pp. 379-399.
 39. Langford, J.C., 2013; "Application of reliability methods to the design of underground structures", Queen's University (Canada).
 40. Brady, B.H. and Brown, E.T., 2006; "Rock mechanics: for underground mining", Springer science & business media.
 41. Milne, D.M., 1997; "Underground design and deformation based on surface geometry", University of British Columbia .
 42. Palmstrom, A. and Stille, H., 2007; "Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 22, no. 4, pp. 363-376.
 43. Rafiee, R., Ataei, M., Khalokakaie, R., Jalali, S.M.E. and Sereshki, F., 2015; "Determination and Protection, vol. 93, pp. 75-88.
 22. MIRI, L.M., Wang, J., Yang, Z. and Finlay, J., 2011; "Application of fuzzy fault tree analysis on oil and gas offshore pipelines".
 23. Alpay, S. and Yavuz, M., 2009; "Underground mining method selection by decision making tools", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 24, no. 2, pp. 173-18.
 24. Ataei, M., Jamshidi, M., Sereshki, F. and Jalali, S., 2008; "Mining method selection by AHP approach", Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 108, no. 12, pp. 741-749.
 25. Ataei, M., Shahsavany, H. and Mikaeil, R., 2013; "Monte Carlo Analytic Hierarchy Process (MAHP) approach to selection of optimum mining method", International Journal of Mining Science and Technology, vol. 23, no. 4, pp. 573-578.
 26. Balusa, B.C. and Gorai, A. K., 2019; "A comparative study of various multi-criteria decision-making models in underground mining method selection", Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, vol. 100, no. 1, pp. 105-121.
 27. Bogdanovic, D., Nikolic, D. and Ilic, I., 2012; "Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method", Anais da Academia Brasileira de Ciências, vol. 84, pp. 219-233.
 28. Dehghani, H., Siami, A. and Haghi, P., 2017; "A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods", Journal of Mining and Environment ,vol. 8, no. 1, pp. 49-60.
 29. Iphar M. and Alpay, S., 2019; "A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, vol. 33, no. 7, pp. 480-504.
 30. Karadogan, A., Kahriman, A. and Ozer, U., 2008; "Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method", Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 108, no. 2, pp. 73-79.
 31. Karimnia H. and Bagloo, H., 2015; "Optimum mining method selection using fuzzy analytical hierarchy process-Qapiliq salt mine, Iran", International Journal of Mining Science and Technology, vol. 25, no. 2, pp. 225-230.
 32. Mikaeil, R., Naghadehi, M.Z., Ataei, M. and Khalokakaie, R., 2009; "A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP)

- 2, pp. 152-166.
46. Pender, M. and Free, M., 1993; "*Stability assessment of slopes in closely jointed rock masses*", ISRM International Symposium-EUROCK 93, OnePetro .
47. Brown, E.T., 2012; "*Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview*", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 4, no. 3, pp. 193-204.
48. Brown, E.T., 2002; "*Block caving geomechanics*".
- assessment of parameters influencing rock mass cavability in block caving mines using the probabilistic rock engineering system*", Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 48, pp. 1207-1220.
44. Mishra, R., Kiuru, R., Uotinen, L., Janiszewski, M. and Rinne, M., 2019; "*Combining expert opinion and instrumentation data using Bayesian networks to carry out stope collapse risk assessment*", MGR 2019: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, Australian Centre for Geomechanics, pp. 85-96.
45. Antoniou, A.A. and Lekkas, E., 2010; "*Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini island, Greece*", Geomorphology, vol. 118, no. 1-