



Imam Khomeini International University  
Vol. 10, No. 1, Spring 2025



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

## Research Paper

# Roof Failure Risk Assessment in Longwall Mining Using Fuzzy Event Tree Analysis

Mahdevari S.<sup>1\*</sup>, Shahriar K.<sup>2</sup>, Bahadorbeigi A.<sup>3</sup>

1- Assistant professor, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

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

3- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 26 Oct. 2023

Accepted: 11 Dec. 2023

**Abstract:** In longwall mining, after extracting each slice from the coal seam and advancing the face, a severe stress concentration is formed in the vicinity of the roof and coalface due to the stress disturbance and also the caving of the immediate roof, which resulted in roof displacement, cracks propagation, and roof failure. Due to the caving of the immediate roof and the displacement of the overburden layers by face advancement, there is a possibility of propagating the fractures and instability of the roof in the coalface. The roof failure in a longwall face will bring adverse consequences such as the stoppage of mining operations, damage to equipment, injuries, and fatalities. In this research, the critical events that are effective on the roof failure in the  $E_3$  panel at the Tabas coal mine were identified, and the risk of roof failure was evaluated using the fuzzy event tree analysis approach through filling out the questionnaire by the mining experts and faculties. In this way, ten scenarios were examined to analyze the risk of roof failure by checking the roof failure or non-failure, and then the probability of critical events was calculated. Based on the results, the probabilities of roof failure in the fourth, tenth, and seventh scenarios are respectively 5.68, 4.21, and 1.70 percent, and the risk values in these three scenarios are respectively 28.42, 21.05, and 8.51. Therefore, the most critical scenario in this research is the fourth one, in which the preventive measures should be taken through the timely control of critical events to reduce or prevent the risk of roof failure.

**Keywords:** Roof failure risk, Fuzzy event tree analysis, Longwall mining method, Tabas coal mine.

### How to cite this article

Mahdevari, S., Shahriar, K., and Bahadorbeigi, A. (2025). "Roof failure risk assessment in longwall mining using fuzzy event tree analysis". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(1): 41-59.

DOI: [10.30479/JMRE.2024.19507.1670](https://doi.org/10.30479/JMRE.2024.19507.1670)

\*Corresponding Author Email: [satar.mahdevari@aut.ac.ir](mailto:satar.mahdevari@aut.ac.ir)

### COPYRIGHTS



©2025 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

Roof failure in underground coal mines is affected by many factors such as geological structures, regional stress field, thickness and strength of the immediate roof strata and the coal seam, depth of the mine, the rate of face advancement, the mine layout, and the mechanism of mining operations. Although it is not possible to accurately predict the cause of roof failure, it may be determined to a large extent after the roof collapse by examining the collapsed dome, the conditions of the roof strata, and the geotechnical conditions [1]. Therefore, in order to control the roof stability in a coalface, it is necessary to assess the risk of roof failure by knowing the geological and geomechanical conditions, and then design a suitable support system to protect the immediate roof strata [2].

The continuous monitoring of the roof stability and the timely caving of the immediate roof by face advancement may lead to an increase in productivity of the mining operations. The unexpected roof failures not only endangers the safety of miners, but also may postpone the coal extraction by causing damage to the coalface and mining equipment. The fuzzy event tree analysis as a quantitative risk analysis model is presented in this research to assess the risk of roof failure in longwall mining. In the proposed model, all kinds of sequences or scenarios resulting from the occurrence of the initial event (roof failure) are quantitatively analyzed in a tree structure to identify high-risk events and consequently provide a practical solution for the timely control of the roof failure.

## METHODS

In order to analyze the risk of roof failure in longwall face and identify the main factors affecting the instability of the roof strata, in this research, the fuzzy set theory and the event tree analysis are combined to develop the fuzzy event tree analysis model.

Fuzzy set theory was proposed in order to quantitatively express the subjective and ambiguous concepts in human judgments [3]. One of the simplest ways of expressing a fuzzy set is the triangular fuzzy numbers, in which the fuzzy number  $A = (a, b, c)$  is defined as a fuzzy subset with left membership function  $f_A^L$  and right membership function  $f_A^R$ . In this way, by defining  $\lambda$  as the cut set of the triangular fuzzy number  $A$ , then  $A^\lambda = \{A_L^\lambda, A_R^\lambda\} = [(b-a)\lambda + a, (b-c)\lambda + c]$  [4,5].

In general, the occurrence of any incident is the result of the occurrence of consecutive events. Therefore, in order to identify critical events in Tabas underground mine, the research method is carried out as follows:

**1) Defining the initial event:** The roof failure in the longwall face is selected as the initial event.

**2) Investigating the records of roof failures:** To identify the critical events, it is necessary to understand the entire development process of the events that have already occurred. Therefore, a questionnaire was designed in our research, which was filled out by the faculties and mine engineers as experts, based on the reports related to the roof failure in the  $E_3$  panel.

**3) Identifying the critical events:** According to the field investigations and the experiences of the technical office of the mine, five critical events influencing the occurrence of roof failure were identified as the presence of water flow, the immediate roof strength, the immediate roof thickness, the instability of the intersections, and the support systems resistance.

**4) Defining success or failure:** Success of an event means preventing the occurrence of the initial event (roof stability), and failure of an event means the occurrence of the initial event (roof failure). After determining the critical events affecting the initial event, the event tree is created. Each of the critical events is divided into two opposite branches, each of which has a certain probability that indicates the success or failure of that event (S: Success and F: Failure). If the probability of success or failure of a critical event is expressed by  $P_S$  and  $P_F$ , respectively, then  $P_S = 1 - P_F$  [6].

In order to evaluate and calculate the probability of each of the critical events, five steps have been taken as follows:

**A) Defining the fuzzy linguistic terms for experts:** Fuzzy linguistic terms are used in the form of triangular fuzzy number and cut set ( $\lambda$ ) to evaluate the probability of occurrence of each of the critical events [7].

**B) Weighing the opinions of experts:** Since the results of the evaluation of experts are subjective, to avoid the possible mistakes, the opinions of at least three experts have been used in each subject. Also,

the experts record, especially their age, work experience, education level, etc., have been taken into consideration to evaluate their viewpoints.

**C) Cut set for experts' judgment:** The cut sets correspond to the fuzzy linguistic terms and the general relation are defined as  $e_i\lambda + f_i, g_i\lambda + h_i$ , where  $e_i, f_i, g_i$ , and  $h_i$  are real numbers ( $1 \leq i \leq n$ ).

**D) Probability of occurrence of any critical event:** After calculating  $I_L(A)$  and  $I_R(A)$ , the probability of occurrence of any critical event ( $P_{U_i} = I_i, 1 \leq i \leq n$ ) will be obtained.

**E) Calculating the risk in each scenario:** Finally, the risk  $R = P \times L$  is calculated in each scenario, taking into account the conditional probability of the occurrence of any critical event in each scenario (P) and the severity of its probable consequences (L).

### RESULTS AND DISCUSSION

By determining the critical events affecting the initial event, the event tree is developed based on the probability of success and the probability of failure. To evaluate the probability of occurrence of each of the critical events, the triangular fuzzy numbers and the cut sets are used. Considering that the maximum eigenvalue in the judgment matrix is 11.2559, the consistency index will be 0.139544, and the random consistency index is equal to 1.49. The consistency ratio will then be equal to 0.093654, which is less than 0.1, indicting the consistency of the judgment matrix. The probability of failure of each of the critical events ( $P_{U_i}^\lambda$ ) is now calculated based on the fuzzy linguistic expressions  $I_L(F_i)$  and  $I_R(F_i)$  for each event, and is summarized in Table 1. In the next step, the probability of each scenario, which is obtained from the product of the probability of each of the critical events involved in that scenario, is calculated as shown in Table 2.

**Table 1.** Fuzzy expressions related to the probability of failure in each event

Probability of failure	$I_R(F_i)$	$I_L(F_i)$	$P_{F_i}^\lambda = I(F_i)$
$F_1$	0.57506	0.37506	0.47506
$F_2$	0.72264	0.54687	0.63476
$F_3$	0.68479	0.48684	0.58582
$F_4$	0.65680	0.46160	0.55920
$F_5$	0.80674	0.61995	0.71335
$F_6$	0.54938	0.34938	0.44938
$F_7$	0.53797	0.33797	0.43797
$F_8$	0.49913	0.29912	0.39913
$F_9$	0.59040	0.39039	0.49040

**Table 2.** Probability of occurrence in each of the scenarios

Scenario	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	8 <sup>th</sup>	9 <sup>th</sup>	10 <sup>th</sup>
Probability	0.5249	0.0719	0.0448	0.0568	0.0476	0.0218	0.0170	0.1293	0.0438	0.0421

As shown in Figure 1, ten scenarios are created in the event tree, which are related to the roof failure or the roof stability. As seen, the result for the fourth, seventh, and tenth scenarios is the roof failure, while for the other ones is the roof stability. The most critical situation was observed in the fourth scenario, in which the risk of roof failure will be 28.42 provided that the probabilities of four critical events including the presence of water flow, the immediate roof strength, the instability of the intersections, and the support systems resistance, are equal to 0.47506, 0.36524, 0.58582, and 0.55920, respectively. In the tenth scenario, the risk of roof failure will be 21.05 provided that the probabilities of five critical events including the presence of water flow, the immediate roof strength, the immediate roof thickness, the instability of the intersections, and the support systems resistance, are equal to 0.47506, 0.63476, 0.71335, 0.39913, and 0.49040, respectively. Also, in the seventh scenario, the risk of roof failure will be 8.51 provided that the

probabilities of five critical events including the presence of water flow, the immediate roof strength, the immediate roof thickness, the instability of the intersections, and the support systems resistance, are equal to 0.47506, 0.63476, 0.28665, 0.44938, and 0.43797, respectively.

Therefore, in order to succeed in mining operations in a longwall face, it is necessary to control the interaction between the hydraulic support systems, the roof stability especially at the intersections, the abutment pressures, and the coal seam strength through the continuous monitoring of the rock displacements and deformations, and the mechanism of roof caving by face advancement.

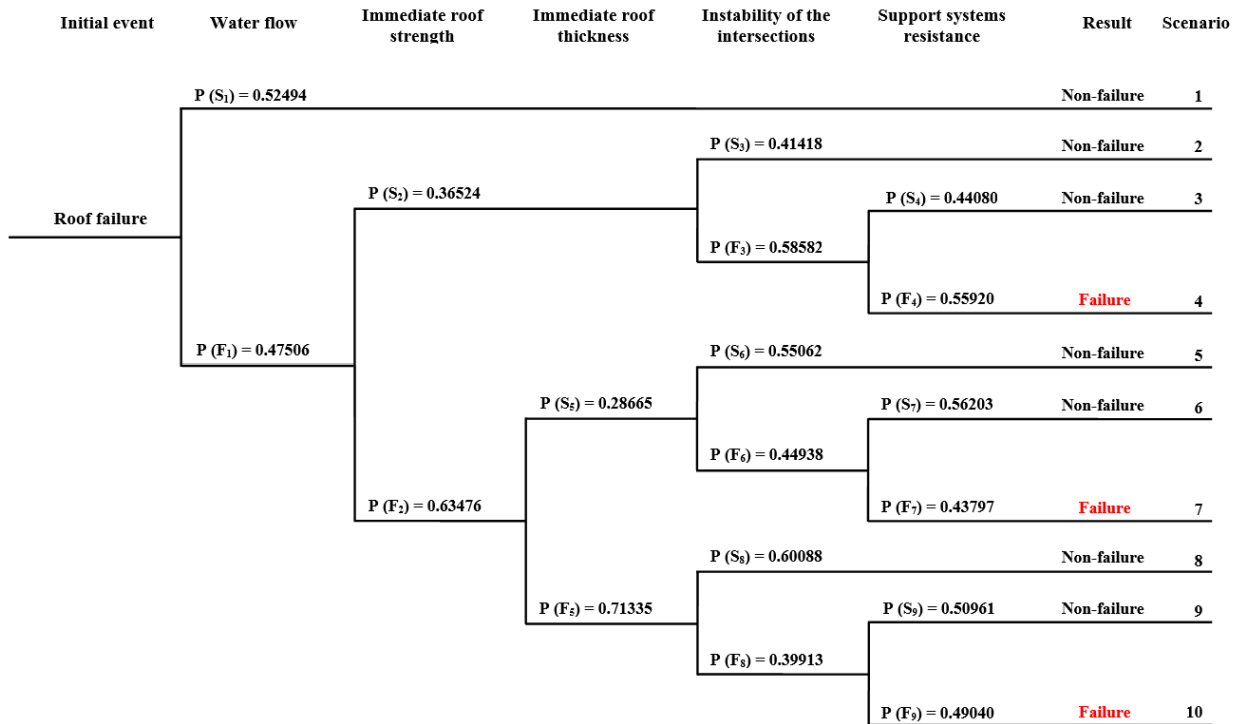


Figure 1. Diagram of the event tree analysis related to the roof failure

## CONCLUSIONS

In order to assess the risk of roof failure in the  $E_3$  panel at Tabas coal mine, a fuzzy event tree analysis model was presented. At first, a questionnaire was prepared based on the reports related to the roof failure and the roof falling in this panel, which was filled out by ten experts including faculties and mine engineers. Thereafter, the qualitative responses were converted into quantitative values using the fuzzy sets, and the risk of roof failure in the coalface was investigated. Ten scenarios were created in the fuzzy event tree to check the roof failure or the roof stability. According to the results, the fourth, tenth, and seventh scenarios resulted in roof failure, while the other ones showed stable conditions. The most critical situation was observed in the fourth scenario, in which the risk of roof failure will be 28.42 provided that the probabilities of four critical events including the presence of water flow, the immediate roof strength, the instability of the intersections, and the support systems resistance, are equal to 0.47506, 0.36524, 0.58582, and 0.55920, respectively. The instability of the intersections and the thickness of immediate roof will play a key role in the fourth and tenth scenarios, respectively. The proposed fuzzy event tree analysis method introduced a practical risk index to describe the priority level of scenarios based on the identified risks and critical events affecting them. Consequently, it will be possible to develop a proper planning to respond to the high risk events and reduce the severity of adverse consequences.

## REFERENCES

- [1] Molinda, G., and Mark, C. (2010). "Ground failures in coal mines with weak roof". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15: 1-42.

- [2] Xu, T., Hong Yang, T., Feng Chen, C., Lei Liu, H., and Lei Yu, Q. (2015). "Mining induced strata movement and roof behavior in underground coal mine". *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 1(3-4): 79-89.
- [3] Xie, T., and Gong, Z. (2019). "A Hesitant Soft Fuzzy Rough Set and its Applications". *IEEE Access*, 7: 167766-167783.
- [4] Dubois, D., and Prade, H. (1978). "Operations on fuzzy numbers". *International Journal of Systems Science*, 9(6): 613-626.
- [5] Jain, R. (1977). "A procedure for multiple-aspect decision making using fuzzy sets". *International Journal of Systems Science*, 8(1): 1-7.
- [6] Aven, T. (2008). "Risk Analysis: Assessing Uncertainties beyond Expected Values and Probabilities". John Wiley & Sons, Ltd, pp. 208. DOI: 10.1002/9780470694435.
- [7] Piadeh, F., Ahmadi, M., and Behzadian, K. (2018). "Reliability assessment for hybrid systems of advanced treatment units of industrial wastewater reuse using combined event tree and fuzzy fault tree analyses". *Journal of Cleaner Production*, 201: 958-973.



## ارزیابی ریسک شکست سقف کارگاه در روش جبهه کار طولانی با تحلیل درخت رویداد فازی

ستار مهدوری<sup>۱</sup>، کورش شهریار<sup>۲</sup>، علیرضا بهادریگی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۴

### چکیده

در روش استخراج جبهه کار طولانی پس از استخراج هر برش از لایه زغال سنگ و پیشروی جبهه کار، تمرکز تنش شدیدی بلافاصله در محدوده سقف کارگاه و پیشانی جبهه کار به علت اغتشاش تنش و نیز تخریب سقف به وجود می آید که به صورت جابه جایی سقف، انتشار ترک ها و شکست سقف پدیدار می شود. به علت تخریب سقف بلافاصله و نیز جابه جایی لایه های روباره همزمان با پیشروی جبهه کار، امکان گسترش شکستگی ها و ناپایداری سقف کارگاه وجود دارد. شکست سقف در یک کارگاه جبهه کار طولانی پیامدهای نامطلوبی از جمله توقف عملیات استخراج، خسارت به تجهیزات، جراحات و مرگومیر پرسنل معدن را به همراه خواهد داشت. در این پژوهش، رویدادهای بحرانی که بر شکست سقف کارگاه  $E_3$  معدن زغال سنگ پروده طبس موثر هستند، شناسایی شدند و با تکمیل پرسشنامه توسط کارشناسان معدن و اساتید دانشگاه، ریسک شکست سقف کارگاه با استفاده از رویکرد تحلیل درخت رویداد فازی ارزیابی شد. به این ترتیب برای تحلیل ریسک شکست سقف کارگاه، ده سناریو برای بررسی شکست یا عدم شکست سقف بررسی و احتمال وقوع رویدادهای بحرانی محاسبه شد. بر اساس نتایج حاصل، احتمال وقوع شکست سقف در سناریوهای چهارم، دهم و هفتم به ترتیب  $5,68$ ،  $4,21$  و  $1,70$  درصد و مقدار ریسک در این سه سناریو به ترتیب  $28,42$ ،  $21,05$  و  $8,51$  است، بنابراین بحرانی ترین سناریو در این کارگاه، سناریو چهارم است که باید با کنترل به موقع رویدادهای بحرانی موثر بر این سناریو، اقدامات پیشگیرانه برای کاهش ریسک یا جلوگیری از وقوع شکست سقف اتخاذ شود.

### کلمات کلیدی

ریسک شکست سقف، تحلیل درخت رویداد فازی، روش استخراج جبهه کار طولانی، معدن زغال سنگ طبس.

### استناد به این مقاله

مهدوری، س.، شهریار، ک.، بهادریگی، ع.؛ ۱۴۰۴؛ "ارزیابی ریسک شکست سقف کارگاه در روش جبهه کار طولانی با تحلیل درخت رویداد فازی".  
نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۱، ص ۵۹-۴۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2024.19507.1670



## ۱- مقدمه

شکست سقف در معادن زیرزمینی زغال سنگ متأثر از عوامل متعددی از قبیل عارضه‌های زمین‌شناسی، میدان تنش منطقه، ضخامت و مقاومت لایه‌های سقف بلافاصله و لایه زغال سنگ، عمق معدن، آهنگ پیشروی جبهه کار، طرح معدن و نحوه اجرای عملیات استخراج است. اگر چه نمی‌توان علت شکست سقف کارگاه را به صورت دقیق پیش‌بینی کرد، ولی پس از وقوع ریزش در سقف کارگاه می‌توان تا حد زیادی علت آن را با بررسی حفره ریزش، وضعیت لایه‌های سقف و شرایط ژئوتکنیکی مشخص کرد [۱]. از طرف دیگر، مشکلات ناشی از شکست سنگ به ویژه در کمربالای جبهه کار، با افزایش عمق معدن و افزایش طول کارگاه به شدت افزایش خواهد یافت که نیازمند بررسی سازوکار شکست سنگ سقف، ارزیابی شدت ناپایداری و تعیین جهت‌یافتگی شکست‌های قریب‌الوقوع است [۲].

یکی از مهم‌ترین عوامل منجر به شکست سقف، افزایش فشار تکیه‌گاهی جلویی است که با افزایش تمرکز تنش‌های القایی در محدوده سقف کارگاه پدیدار می‌شود و به تبع آن تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های توده‌سنگ در اثر توزیع مجدد میدان تنش در اطراف کارگاه استخراج گسترش می‌یابند [۳]. اگر چه شدت اغتشاش تنش در جلوی کارگاه استخراج و توزیع مجدد آن نیز تابع عوامل مختلفی از جمله شرایط زمین‌شناسی منطقه، شرایط ژئومکانیکی لایه‌های روباره، ابعاد پهنه، عمق و ضخامت لایه زغال سنگ و سرعت پیشروی کارگاه است، ولی پدیده شکست سقف کارگاه در همه کارگاه‌های جبهه کار طولانی متداول است و در صورت عدم کنترل به موقع عواقب جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت [۴]. این موضوع در کارگاه‌های جبهه کار طولانی مکانیزه به نحوی است که بیشترین جابه‌جایی‌های سقف در محدوده تقاطع کارگاه با راهرو خروجی رخ می‌دهد و علت آن اغتشاش تنش ناشی از استخراج پهنه مجاور است [۵].

با پیشروی جبهه کار در کارگاه‌های مکانیزه و تخریب سقف بلافاصله، مادامی که تنش القایی بیش از مقاومت بحرانی لایه است، شکستگی‌های سقف به سمت بالا گسترش یافته و تا رسیدن به یک لایه مستحکم پیش می‌رود که سبب نشست لایه‌های زمین، ریزش و ناپایداری سقف کارگاه، ایجاد حفره در سقف کارگاه، نشست آب‌های زیرزمینی و انتشار جریان گاز به درون کارگاه می‌شود [۶]. بنابراین مطالعه سازوکار توسعه

شکستگی‌های سقف پس از استخراج لایه زغال سنگ و ارزیابی ریسک آن برای ادامه فعالیت بهره‌برداری معدن ضروری است. حوادث متعدد ناشی از ریزش و شکست سقف در معادن زیرزمینی زغال سنگ حاکی از آن است که در اکثر موارد سقف بلافاصله مقاومت کمی داشته و علت شکست آن مقاومت کم لایه‌های سقف کارگاه گزارش شده است؛ به طوری که در برخی موارد بخشی از لایه زغال سنگ برای جلوگیری از هوازدهی سقف بلافاصله استخراج نمی‌شود، بنابراین برای کنترل پایداری سقف کارگاه، باید با شناخت شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی منطقه به ارزیابی ریسک شکست و سپس طراحی سیستم نگهداری متناسب برای تقویت سقف بلافاصله اقدام کرد [۷]. کنترل مداوم پایداری سقف کارگاه همزمان با پیشروی جبهه کار و تخریب به موقع سقف بلافاصله بعد از پیشروی جبهه کار، به افزایش بهره‌وری در عملیات استخراج معدن منجر می‌شود، زیرا ریزش غیرمنتظره سقف کارگاه نه تنها ایمنی کارکنان را به خطر می‌اندازد بلکه با وارد شدن خسارت به کارگاه و تجهیزات معدن سبب توقف عملیات استخراج می‌شود [۸].

از این رو در این پژوهش مدل تحلیل درخت رویداد فازی<sup>۱</sup> به عنوان یک مدل تحلیل ریسک کمی بر مبنای روش تحلیل درخت رویداد<sup>۲</sup> و نظریه اعداد فازی برای ارزیابی ریسک شکست سقف کارگاه استخراج در روش استخراج جبهه کار طولانی ارائه شده است. در مدل پیشنهادی انواع توالی‌ها یا سناریوهای حاصل از وقوع رویداد آغازین<sup>۳</sup> (شکست سقف کارگاه استخراج) در یک ساختار درختی و به صورت کمی بررسی می‌شوند تا بر اساس نتایج آن امکان شناسایی عوامل پریسک و ارائه راهکار عملی برای کنترل به موقع شکست سقف کارگاه استخراج فراهم شود. برای ارزیابی ریسک شکست سقف کارگاه استخراج مجموعه‌ای از سناریوهای مختلف در شاخه‌های درخت رویداد ایجاد و احتمال وقوع هر سناریو از طریق حاصل ضرب احتمال شرطی رویدادها در هر شاخه درخت محاسبه شده است.

این پژوهش از پنج بخش شامل مقدمه، مرور ادبیات، روش تحقیق، بحث و نتایج و نتیجه‌گیری تشکیل شده است.

## ۲- مرور ادبیات

با توجه به اینکه بعد از پیشروی کارگاه جبهه کار طولانی، سقف بلافاصله با هدف کنترل زمین تخریب می‌شود، تامین شرایط پایداری سقف در موفقیت عملیات استخراج حیاتی

زغال سنگ که در منطقه تسلیم (پیشانی جبهه کار) قرار دارد، نقش اصلی را در پایداری سقف بلافاصله که خود نقش تیر را دارد، ایفا می کند. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، اغتشاش تنش ناشی از فشار تکیه گاهی در دو حالت فشار افزایشی  $(q_{dc}(x))$  و فشار کاهششی  $(q_{ic}(x))$  طبق روابط ۱ و ۲ خلاصه می شود [۱۴]:

(۱)

$$q_{ic}(x) = q_g + \frac{q_{max} e}{l_{ic}} (-x + l_y + l_{ic}) e^{\frac{x - l_y - l_{ic}}{l_{ic}}}, \quad (-l_g \leq x \leq l_y)$$

(۲)

$$q_{dc}(x) = q_c + \frac{(q_{max} + q_g - q_c) e}{l_{dc}} (x - l_y + l_{dc}) e^{\frac{-x + l_y - l_{dc}}{l_{dc}}}, \quad (l_y < x)$$

که در این روابط:

$q_g$ : فشار ثابت در بالای منطقه تخریب

$q_{max}$ : حداکثر فشار روباره

$l_{ic}$ : فاکتور کنترلی فشار روباره افزایشی

$l_y$ : طول محدوده تسلیم شده لایه زغال سنگ

$l_g$ : منطقه تخریب در محدوده وسط طول کارگاه

$q_c$ : فشار ثابت در بالای لایه زغال سنگ تسلیم نشده

(تنش برجا)

$l_{dc}$ : فاکتور کنترلی فشار روباره کاهششی است.

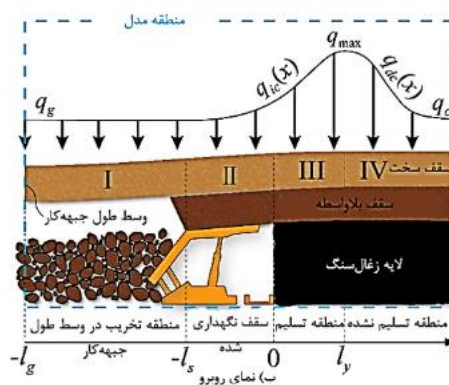
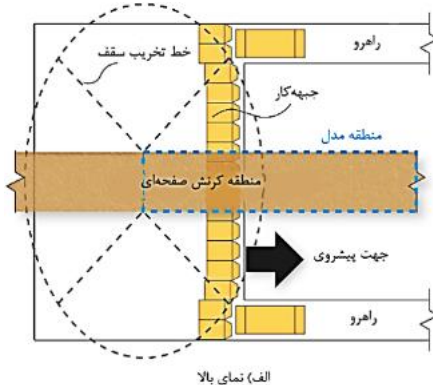
همان طور که مشاهده می شود، با افزایش فاصله از منطقه

تسلیم، بار وارد بر سیستم نگهداری، گشتاور خمشی و چگالی انرژی کرنشی به طور قابل توجهی کاهش می یابد [۱۴]. بنابراین تغییرات توزیع تنش در منطقه تسلیم به صورت زون پلاستیک بوده که با پیشروی جبهه کار تشدید می شود. علاوه بر این، لایه های سنگی سقف تحت تاثیر فشارهای تجمعی

است؛ به ویژه اینکه در بیشتر مواقع وجود شرایط زمین شناسی پیچیده و مقاومت ضعیف لایه ها چالش های قابل توجهی را به همراه خواهد داشت [۹].

سوابق تحقیقات نشان می دهد که مطالعات زیادی برای بررسی نوع و نحوه شکست سقف اصلی و سقف بلافاصله در معادن زیرزمینی زغال سنگ انجام شده است. در دهه ۱۹۹۰، نظریه "لایه کلیدی" ارائه شد که بینش عمیقی در مورد شرایط شکست سقف اصلی و تاثیر آن بر رفتار لایه های روباره ارائه کرد [۱۰]. بر اساس این نظریه، با پیشروی جبهه کار، سقف اصلی به صورت یک تیر طره ای با تغییر شکل زیاد از محل اتصال جدا شده و به دلیل تمرکز تنش بالا در لولای تیر، به سمت پایین منحرف می شود. همزمان با شکست سقف اصلی، گشتاور خمشی نیز به تدریج افزایش می یابد [۱۱]. برای تحلیل این مساله، مدل تیر طره ای توسط ایوانز<sup>۵</sup> برای مطالعه پایداری سقف کارگاه پیشنهاد شد و سپس مدل های قوس فشار و تیر طره ای چندمفصلی نیز بر اساس آن توسعه یافتند [۱۲، ۱۳]. بنابراین سقف کارگاه در محدوده پیشانی جبهه کار و همچنین لایه های کلیدی در اطراف قوس فشار نقش قابل توجهی در پایداری کارگاه ایفا می کنند.

در روش های تحلیلی برای بررسی وضعیت شکست لایه های سقف بلافاصله حین پیشروی جبهه کار، معمولاً از مدل های تحلیل تیرهای مکانیکی استفاده می شود که روابط پیچیده و چندین پارامتر مجهول دارند. برای کاهش حجم محاسبات و زمان حل چنین مسایلی، بخشی از سقف کارگاه در واحد طول کارگاه به صورت یک تیر ساده با ضخامت اندک فرض شده و برای حل آن از روش برهم نهی استفاده می شود. در این صورت برای کنترل رفتار صحیح لایه ها، بخشی از لایه



شکل ۱: ساختار مکانیکی شکست سقف بلافاصله [۱۴]



آغازین و علل احتمالی وقوع آن را در نظر نمی‌گیرند. برای رفع این مشکل در پژوهش‌های گذشته از روش تحلیل درخت رویداد برای تحلیل ایمنی و بهبود شرایط طراحی سیستم‌ها استفاده شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. سابانف<sup>۶</sup> و همکاران برای مقایسه استخراج انتخابی یا غیرانتخابی با هدف کاهش افت استخراج ذخایر شیل نفتی از روش تحلیل درخت رویداد استفاده کردند و نشان دادند با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و عملیاتی استخراج معدن، امکان استفاده از تجهیزات مکانیزه برای استخراج انتخابی وجود دارد [۲۲]. پاستاروس<sup>۷</sup> و همکاران موفقیت یا شکست آزمون بار نقطه‌ای در تعیین مقاومت و پیش‌بینی ظرفیت تاب‌آوری پایه‌ها در کارگاه‌های اتاق و پایه را به روش تحلیل درخت رویداد بررسی کردند [۲۳]. واجتل<sup>۸</sup> و همکاران با استفاده از رویکرد تحلیل درخت رویداد، احتمال تغییر نفوذپذیری ناشی از جابه‌جایی لایه‌های روباره پس از استخراج لایه زغال‌سنگ در زیر سطح ایستایی را بررسی و فاصله ایمن را پیشنهاد کردند [۲۴].

ریسک ایمنی ناشی از وقوع انفجار گاز متان در معدن از طریق تعریف سناریوهای مختلف بر اساس علل احتمالی وقوع رویداد آغازین با استفاده از تحلیل درخت رویداد ارزیابی و محاسبه شده است [۲۵]. همچنین برای تحلیل ریسک کمی و ارزیابی خطر سقوط سنگ در امتداد یک بزرگراه که دارای زمین‌شناسی پیچیده و توده‌سنگ‌های ضعیف است، از تحلیل درخت رویداد استفاده شده است [۲۶].

ازفیرات<sup>۹</sup> و همکاران با شناسایی سه رویداد آغازین در کارخانه‌های سنگبری شامل فرسودگی و پارگی زنجیر بالابر، فرسودگی و بریدن سیم‌برش الماسه و نوسان برق و خرابی موتورهای الکتریکی از روش تحلیل درخت رویداد برای محاسبه ریسک وقوع این رویدادها و احتمال وقوع هر کدام استفاده کردند [۲۷].

ریزش سقف یک پدیده متداول در معادن زیرزمینی فلزی و غیرفلزی چین است که به راحتی با استفاده از روش تحلیل درخت رویداد قابل تحلیل و بررسی است. در این خصوص ونگ<sup>۱۰</sup> و همکاران برای بررسی ریزش سقف در معادن زیرزمینی یک چارچوب شش مرحله‌ای به کمک مدل درخت رویداد با دو پیامد زنده ماندن و مرگ در سیزده سناریوی مختلف ارائه دادند [۲۸].

اسپینوزا<sup>۱۱</sup> و همکاران برای ارزیابی ریسک شکست مطالعات

ناشی از برهم‌نهی پیشروی جبهه‌کار و اثر طول جبهه‌کار، به تدریج جابه‌جا، شکسته و تخریب می‌شوند [۱۵].

طبق نظریه لایه‌های کلیدی، توزیع شکستگی‌های سقف کارگاه بسته به مقاومت لایه‌های روباره و آهنگ پیشروی جبهه‌کار به صورت تابع گوسی بوده که تمرکز تنش‌ها و شکستگی‌ها در جلوی جبهه‌کار را نشان می‌دهد [۱۶]. سرعت پیشروی جبهه‌کار یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر گسترش شکستگی‌ها در سقف بلافاصله و ناپایداری آن است، به طوری که با افزایش سرعت پیشروی جبهه‌کار، فاصله گام تخریب (اولیه و دوره‌ای) سقف اصلی و لایه کلیدی روند افزایش داشته ولی جابه‌جایی سقف، نشست لایه‌های روباره و زاویه شکستگی به تدریج کاهش خواهند یافت [۱۷]. از نظر نحوه توزیع میزان شکستگی‌های روباره در منطقه تخریب، شکست سنگ سقف در جهت افقی به صورت گوسی و در جهت عمودی به صورت لگاریتمی است که با افزایش فاصله از لایه زغال‌سنگ، کاهش می‌یابد [۱۸]. وجود جریان آب نیز بر کاهش مقاومت ناپوستگی‌ها و گسترش ناپایداری‌ها در سنگ سقف بلافاصله و حتی سقف اصلی به ویژه در سنگ‌های ضعیف تاثیر بسزایی دارد [۱۹]. مقاومت لایه زغال‌سنگ و عمق آن نیز تاثیر مستقیم بر شکست سقف کارگاه دارد و بر اساس مدل‌های الاستیک-پلاستیک، پارامترهای عمق، ضخامت و مقاومت لایه زغال‌سنگ به عنوان عوامل کلیدی موثر بر پایداری کارگاه تعیین شده‌اند [۲۰].

نتایج شبیه‌سازی فیزیکی نیز موید همین نتیجه است. مطالعه مدل فیزیکی کارگاه جبهه‌کار طولانی حین پیشروی عملیات استخراج نشان می‌دهد که شکستگی‌های لایه‌های روباره در ابتدا به صورت آهسته گسترش می‌یابد ولی پس از ناپایداری سقف بلافاصله، آهنگ رشد شکستگی‌ها به سرعت بیشتر می‌شود [۲۱]. حال اگر ناپایداری سقف بلافاصله و گسترش جابه‌جایی‌ها به درستی کنترل نشود، طیف گسترده‌ای از عواقب نامطلوب رخ می‌دهد که در نهایت به شکست سقف کارگاه منجر خواهند شد.

تقریباً همه سیستم‌های معدن مانند سیستم تهویه، سیستم نگهداری، سیستم روشنایی، تجهیزات ایمنی و نظایر آن‌ها در معرض شرایط عملیاتی پویا مانند تغییرات مداوم تنش، رطوبت، گرد و غبار، دما و نظایر آن‌ها هستند و بهتر است بهبود ایمنی چنین سیستم‌هایی در مرحله برنامه‌ریزی و طراحی انجام شود. با این حال، روش‌های تحلیل ایمنی موجود صراحتاً رویداد

که در آن:

$I$  : مقدار غیرفازی شده عدد فازی

$I_L(A)$  : مقدار صحیح وارون تابع عضویت چپ  $f_A^L$

$I_R(A)$  : مقدار صحیح وارون تابع عضویت راست  $f_A^R$

$\alpha \in [0,1]$  : شاخص خوش بینی<sup>۱۵</sup> است.

زمانی که  $\alpha$  برابر صفر یا یک باشد،  $I$  به ترتیب برابر با  $I_L(A)$  یا  $I_R(A)$  است. همچنین اگر  $\alpha$  برابر با ۰٫۵ باشد، مقدار غیرفازی سازی عدد فازی برابر است با:

$$I = \frac{1}{2} [I_R(A) + I_L(A)] \quad (۴)$$

بنابراین برای عدد فازی مثلثی  $A$ ، عبارت‌های  $I_L(A)$  و  $I_R(A)$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_L(A) = \frac{1}{2} \left[ \sum_{\lambda=0.1}^1 n^\lambda \Delta\lambda + \sum_{\lambda=0}^{0.9} n^\lambda \Delta\lambda \right] \quad (۵)$$

$$I_R(A) = \frac{1}{2} \left[ \sum_{\lambda=0.1}^1 m^\lambda \Delta\lambda + \sum_{\lambda=0}^{0.9} m^\lambda \Delta\lambda \right] \quad (۶)$$

که در این روابط:

$$\Delta\lambda = 0.1$$

$$n^\lambda : \text{کران پایین } A^\lambda$$

$$m^\lambda : \text{کران بالای } A^\lambda$$

$\lambda = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$  است.

### ۳-۲- تحلیل درخت رویداد

به طور کلی وقوع هر حادثه نتیجه وقوع رویدادهای متوالی است. به همین خاطر برای شناسایی رویدادهای بحرانی در معدن زیرزمینی طبس، روش تحقیق به صورت زیر انجام شده است:

(۱) **تعریف رویداد آغازین:** در این پژوهش، شکست سقف کارگاه به عنوان رویداد آغازین انتخاب شده است.

(۲) **بررسی سابقه ریزش سقف کارگاه:** برای شناسایی رویدادهای بحرانی، درک فرآیند توسعه کل حوادثی که قبلاً رخ داده‌اند، ضروری است. برای انجام این پژوهش از نظر اساتید دانشگاه و کارکنان معدن به ویژه افرادی که حادثه ریزش سقف را تجربه کرده‌اند، استفاده شده است. همچنین گزارش‌های مربوط به شکست و ریزش سقف در کارگاه E<sub>۲</sub>

اکتشافی در معادن زیرزمینی طلا، از رویکرد تحلیل درخت رویداد استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که احتمال درآمد منفی در مقابل مثبت، با حفظ ترتیب بزرگی تفاوت بین بدترین و بهترین سناریوها، ۸۳ درصد در مقابل ۱۷ درصد است که به معنای ریسک بالای اکتشافات تکمیلی در معادن عمیق و کوچک مقیاس طلا است [۲۹].

همچنین مومنی و همکاران برای ارزیابی خطر مرگ ناشی از حفاری‌های شهری از روش المان محدود مجموعه تصادفی<sup>۱۲</sup> و تحلیل درخت رویداد استفاده کردند [۳۰]، بنابراین با توجه به کاربرد گسترده روش تحلیل درخت رویداد، در این پژوهش مدل تحلیل درخت رویداد فازی با هدف ارزیابی ریسک شکست سقف کارگاه در معادن جبهه کار طولانی ارایه شده است.

### ۳- روش تحقیق

برای تحلیل ریسک شکست سقف و شناسایی عوامل اصلی تاثیرگذار بر ناپایداری سقف کارگاه از رویکرد ترکیبی روش‌های نظریه اعداد فازی و تحلیل درخت رویداد استفاده و مدل تحلیل درخت رویداد فازی ارایه شده است.

### ۳-۱- اعداد فازی

نظریه اعداد فازی برای بیان کمی مفاهیم ذهنی و مبهم در قضاوت‌های انسان مطرح شده است که روش‌های مختلفی برای محاسبه آن وجود دارد [۳۱]. یکی از ساده‌ترین روش‌های بیان اعداد فازی، اعداد فازی مثلثی است که در آن عدد فازی  $A = (a, b, c)$  به صورت یک زیرمجموعه فازی با تابع عضویت چپ  $f_A^L$  و تابع عضویت راست  $f_A^R$  تعریف می‌شود. به این ترتیب اگر  $\lambda$  مجموعه برش<sup>۱۳</sup> عدد فازی مثلثی  $A$  باشد، آنگاه [۳۲، ۳۳]:

$$A^\lambda = \{A_L^\lambda, A_R^\lambda\} = [(b-a)\lambda + a, (b-c)\lambda + c]$$

پس از انجام محاسبات و تجزیه و تحلیل کمی امکان وقوع یک رویداد، یک عدد فازی باید به یک مقدار معین تبدیل شود که در واقع غیرفازی‌سازی می‌شود. در این پژوهش، فرآیند غیرفازی‌سازی با استفاده از روش مقدار صحیح<sup>۱۴</sup> انجام شده است. به این صورت که اگر  $A$  یک عدد فازی با توابع عضویت  $f_A^L$  و  $f_A^R$  باشد، آنگاه مقدار غیرفازی آن طبق رابطه ۳ به دست می‌آید [۳۴]:

$$I = \alpha I_R(A) + (1-\alpha)I_L(A) \quad (۳)$$

**الف) تعریف اصطلاحات زبانی فازی برای خبرگان:** در این پژوهش از اصطلاحات زبانی فازی به صورت عدد فازی مثلثی و مجموعه برش ( $\lambda$ ) برای ارزیابی احتمال وقوع هر کدام از رویدادهای بحرانی استفاده شده است که در جدول ۱ خلاصه شده است [۳۶-۳۸].

**ب) وزن دهی به نظرات خبرگان:** از آنجا که نتایج ارزیابی خبرگان ذهنی (غیرعینی) است، برای جلوگیری از اشتباه احتمالی یک خبره، از نظرات حداقل سه خبره در هر موضوع استفاده شده است. همچنین سوابق خبرگان به ویژه سن، سابقه اشتغال، سطح تحصیلات و نظایر آن نیز برای ارزیابی دیدگاه آنها در نظر گرفته شده است، سپس از روش مقیاس<sup>۱۶</sup> برای تعیین وزن هر خبره ( $W_i$ ) بر اساس درجه اهمیت  $Q_a$  نسبت به  $Q_b$  طبق جدول ۲ استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود، از طریق مقایسه نظر  $n$  کارشناس با یکدیگر و نیز محاسبه حداکثر مقدار ویژه ( $\sigma_{\max}$ ) و بردار ویژه ( $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ )، می توان ماتریس قضاوت  $T_{n \times n}$  را به صورت زیر تشکیل داد [۲۸]:

جدول ۱: اصطلاحات زبانی فازی

اصطلاح زبانی	عدد فازی مثلثی	مجموعه برش $\lambda$
بسیار کم	(۰/۳ و ۰/۱ و ۰/۰)	$[0.1\lambda, -0.2\lambda + 0.3]$
کم	(۰/۵ و ۰/۳ و ۰/۱)	$[0.2\lambda + 0.1, -0.2\lambda + 0.5]$
متوسط	(۰/۷ و ۰/۵ و ۰/۳)	$[0.2\lambda + 0.3, -0.2\lambda + 0.7]$
زیاد	(۰/۹ و ۰/۷ و ۰/۵)	$[0.2\lambda + 0.5, -0.2\lambda + 0.9]$
بسیار زیاد	(۱/۰ و ۰/۹ و ۰/۷)	$[0.2\lambda + 0.7, -0.1\lambda + 1.0]$

معدن به تفصیل بررسی و در نهایت یک پرسشنامه طراحی شد که توسط خبرگان تکمیل شده است.

**۳) شناسایی رویدادهای بحرانی:** پس از بررسی گزارش های موجود و مشورت با کارشناسان دفتر فنی معدن طبس، پنج رویداد مهم که احتمال وقوع رویداد آغازین (شکست سقف) را افزایش می دهند، شناسایی شد که شامل وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ضخامت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطع ها و مقاومت سیستم های نگهداری هستند.

**۴) تعریف موفقیت یا شکست:** موفقیت یک رویداد به معنی جلوگیری از وقوع رویداد آغازین (پایداری سقف کارگاه) و شکست یک رویداد به معنی وقوع رویداد آغازین (شکست سقف کارگاه) است. لازم به ذکر است که احتمال هر رویداد به صورت احتمال شرطی در درخت رویداد محاسبه خواهد شد. پس از تعیین رویدادهای بحرانی موثر بر رویداد آغازین، درخت رویداد ایجاد می شود. هر یک از رویدادهای بحرانی به دو شاخه کاملاً متضاد که هر کدام احتمال مشخصی دارد، تفکیک می شود که نشان دهنده موفقیت یا عدم موفقیت آن رویداد است (S: موفقیت و F: شکست). اگر احتمال موفقیت یا شکست یک رویداد بحرانی به ترتیب با  $P_S$  و  $P_F$  بیان شود، آنگاه  $P_S = 1 - P_F$  است [۳۵]. در این پژوهش چون تحلیل ریسک شکست سقف انجام می شود، تنها  $P_F$  برای هر رویداد حساب خواهد شد.

### ۳-۳- محاسبه احتمال شرطی اصطلاحات زبانی فازی

برای ارزیابی و محاسبه احتمال وقوع هر یک از رویدادهای بحرانی، چهار مرحله به شرح زیر طی شده است:

جدول ۲: اهمیت  $Q_a$  نسبت به  $Q_b$  در روش مقیاس

مقدار ( $Q$ )	درجه اهمیت بین $Q_a$ و $Q_b$	مقدار ( $Q$ )	درجه اهمیت بین $Q_a$ و $Q_b$
۱	اهمیت $a$ نسبت به $b$ یکسان است.	۱	اهمیت $a$ نسبت به $b$ یکسان است.
$\frac{1}{3}$	اهمیت $a$ نسبت به $b$ کمتری دارد.	۳	اهمیت $a$ نسبت به $b$ بیشتری دارد.
$\frac{1}{5}$	اهمیت $a$ نسبت به $b$ شدیداً کمتر است.	۵	اهمیت $a$ نسبت به $b$ مشهود است.
$\frac{1}{7}$	اهمیت $a$ نسبت به $b$ بی نهایت کمتر است.	۷	اهمیت $a$ نسبت به $b$ زیاد است.
$\frac{1}{9}$	درجه اهمیت در بازه بین مقادیر فرد	۹	اهمیت $a$ نسبت به $b$ اهمیت خیلی زیادی دارد.

محاسبه می‌شود که در این رابطه  $P_{U_i}^{\lambda}$  احتمال شکست هر یک از رویدادهای بحرانی است.

(ت) احتمال وقوع هر رویداد بحرانی: پس از محاسبه  $I_L(A)$  و  $I_R(A)$  (طبق روابط ۵ و ۶)، احتمال وقوع هر رویداد بحرانی ( $P_{U_i} = I_i, 1 \leq i \leq n$ ) به دست خواهد آمد.  
(ث) محاسبه ریسک در هر سناریو: در نهایت برای محاسبه مقدار ریسک در هر سناریو، شدت نتایج محتمل در پنج دسته به صورت کیفی و مقدار عددی متناظر در جدول ۴ ارائه شده است.

بنابراین با در نظر گرفتن احتمال شرطی وقوع هر رویداد بحرانی در هر سناریو و شدت نتایج محتمل آن، رابطه ۱۱ بیانگر مقدار ریسک است:

$$R = P \times L \quad (11)$$

که در آن:

R: مقدار ریسک در هر سناریو  
P: احتمال شرطی وقوع آن سناریو  
L: شدت نتایج محتمل است.

#### ۴- نتایج و بحث

برای ارزیابی ریسک شکست سقف در کارگاه  $E_3$  معدن زغال سنگ طبس، در ابتدا یک پرسشنامه بر اساس گزارش‌های مربوط به شکست و ریزش سقف در این کارگاه تهیه و توسط

$$\begin{aligned} P_{U_i}^{\lambda} &= \omega_1 \times [e_1 \lambda + f_1, g_1 \lambda + h_1] + \omega_2 \times [e_2 \lambda + f_2, g_2 \lambda + h_2] + \dots + \omega_n \times [e_n \lambda + f_n, g_n \lambda + h_n] \\ &= [\omega_1 \times (e_1 \lambda + f_1) + \omega_2 \times (e_2 \lambda + f_2) + \dots + \omega_n \times (e_n \lambda + f_n), \omega_1 \times (g_1 \lambda + h_1) + \omega_2 \times (g_2 \lambda + h_2) + \dots + \omega_n \times (g_n \lambda + h_n)] \quad (10) \\ &= \left[ \sum_{i=1}^n \omega_i (e_i \lambda + f_i), \sum_{i=1}^n \omega_i (g_i \lambda + h_i) \right] \end{aligned}$$

جدول ۳: مقدار میانگین شاخص سازگاری تصادفی [۳۹]

۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	N
۱,۴۹	۱,۴۵	۱,۴۱	۱,۳۲	۲۴۱	۱,۱۲	۰,۹	۰,۵۸	۰	۰	RCI

جدول ۴: مقدار عددی شدت شکست سقف کارگاه

شدت	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
مقدار	۱	۲	۳	۴	۵

$$T_{n \times n} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \dots & t_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

علاوه بر این، برای صحت‌سنجی ماتریس  $T_{n \times n}$ ، مقدار میانگین شاخص سازگاری تصادفی<sup>۱۷</sup> (RCI) طبق جدول ۳ و شاخص سازگاری<sup>۱۸</sup> (CI) طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود، سپس بر اساس رابطه ۹ و جدول ۳، نسبت سازگاری<sup>۱۹</sup> (CR) به دست می‌آید:

$$CI = \frac{\sigma_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (9)$$

برای تایید سازگاری ماتریس قضاوت خبرگان ( $T_{n \times n}$ ) باید CR کمتر از ۰/۱ باشد ( $CR < 0.1$ )، در غیراینصورت باید ماتریس  $T_{n \times n}$  مجدداً ایجاد شود.

(پ) مجموعه برش برای قضاوت خبرگان: با فرض این که تعداد خبرگان  $n$  باشد و با توجه به جدول ۱، مجموعه برش با اصطلاحات زبانی فازی متناظر است و رابطه عمومی آن به صورت  $e_i \lambda + f_i, g_i \lambda + h_i$  تعریف می‌شود که  $e_i, f_i, g_i, h_i$  اعداد حقیقی هستند و  $1 \leq i \leq n$  است، بنابراین اصطلاح جامع زبانی فازی برای  $n$  خبره که در مورد یک رویداد بحرانی مشخص اظهار نظر می‌کنند، طبق رابطه ۱۰

پنج عاملی که در وقوع شکست سقف کارگاه بیشترین تاثیر را دارند شامل وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ضخامت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطعها و مقاومت سیستم‌های نگهداری هستند. به این ترتیب این پنج عامل به عنوان رویدادهای بحرانی، یک درخت رویداد نه مرحله‌ای را تشکیل می‌دهند که احتمال شکست سقف در هر مرحله از این درخت رویداد به صورت کیفی در جدول ۶ خلاصه شده است. همچنین ماتریس مقایسه زوجی وزن‌دهی خبرگان به صورت ماتریس  $T_{10 \times 10}$  طبق جدول ۷ به دست خواهد آمد.

ده نفر از خبرگان شامل اساتید دانشگاه و مهندسان معدن تکمیل شد که جزئیات آماری آنها در جدول ۵ ارائه شده است. خبرگان به نحوی برای تکمیل پرسشنامه و وزن‌دهی به نظرات انتخاب شده‌اند که دارای سابقه کاری مستقیم در معدن زغال‌سنگ طبرس باشند. سپس نتایج کیفی از طریق نظریه اعداد فازی به مقادیر کمی تبدیل شد و با فراخوانی در نرم‌افزار Ideas Modeler ریسک شکست سقف مورد بررسی قرار گرفت.

طبق مطالعات میدانی و نیز تجربیات دفتر فنی این معدن،

جدول ۵: جزئیات آماری خبرگان

رشته تحصیلی	گرایش	سطح تحصیلات	پست سازمانی	سن (سال)	سابقه کاری مرتبط (سال)
مهندسی معدن	استخراج معدن	دکتری	عضو هیأت علمی دانشگاه	۷۵	۳۹
مهندسی معدن	مکانیک سنگ	دکتری	عضو هیأت علمی دانشگاه	۶۲	۳۰
مهندسی معدن	مکانیک سنگ	دکتری	عضو هیأت علمی دانشگاه	۴۱	۵
مهندسی معدن	استخراج معدن	دکتری	عضو هیأت علمی دانشگاه	۳۸	۱۲
مهندسی معدن	استخراج معدن	دکتری	مشاور دفتر فنی معدن	۳۶	۸
مهندسی معدن	مکانیک سنگ	کارشناسی ارشد	کارشناس طراحی و مهندسی معدن	۴۹	۱۸
مهندسی معدن	استخراج معدن	کارشناسی ارشد	کارشناس استخراج معدن	۴۵	۱۸
مهندسی معدن	استخراج معدن	کارشناسی ارشد	کارشناس طراحی و مهندسی معدن	۴۰	۱۶
مهندسی معدن	استخراج معدن	کارشناسی	رئیس کارگاه استخراج	۴۴	۱۶
مهندسی معدن	استخراج معدن	کارشناسی	کارشناس استخراج معدن	۴۰	۱۴
			بیشینه	۷۵	۳۹
			کمینه	۳۶	۵
			میانگین	۴۷	۱۷٫۶
			انحراف معیار	۱۲٫۳	۱۰٫۱

جدول ۶: خلاصه نظرات کیفی خبرگان

وزن	احتمال شکست سقف در هر مرحله از درخت رویداد									کارشناس
	$F_9$	$F_8$	$F_7$	$F_6$	$F_5$	$F_4$	$F_3$	$F_2$	$F_1$	
۰٫۱۳۹۳۹	کم	کم	زیاد	متوسط	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	متوسط	اول
۰٫۱۱۷۲۱	کم	کم	کم	کم	زیاد	کم	کم	متوسط	متوسط	دوم
۰٫۰۸۱۰۸	کم	کم	کم	کم	زیاد	زیاد	زیاد	کم	زیاد	سوم
۰٫۱۱۰۳۴	زیاد	کم	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	چهارم
۰٫۰۸۱۷۸	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	پنجم
۰٫۱۲۴۹۶	زیاد	کم	کم	متوسط	خیلی زیاد	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	ششم
۰٫۰۶۸۵۸	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	کم	خیلی زیاد	کم	هفتم
۰٫۰۹۶۰۳	کم	متوسط	کم	کم	متوسط	خیلی کم	متوسط	کم	کم	هشتم
۰٫۰۴۱۱۹	متوسط	متوسط	کم	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	کم	نهم
۰٫۱۳۹۴۵	متوسط	متوسط	کم	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	دهم

جدول ۷: ماتریس مقایسه زوجی وزن‌دهی خبرگان

۱	۰٫۲۵	۲	۲	۳	۰٫۵	۱	۲	۱	۱
۴	۱	۲	۳	۲	۳	۱	۳	۱	۲
۰٫۵	۰٫۵	۱	۱	۱	۰٫۳۳	۰٫۳۳	۱	۰٫۵	۱
۰٫۵	۰٫۳۳	۱	۱	۳	۲	۰٫۵	۲	۰٫۳۳	۳
۰٫۳۳	۰٫۵	۱	۰٫۳۳	۱	۰٫۳۳	۲	۱	۱	۰٫۵
۲	۰٫۳۳	۳	۰٫۵	۳	۱	۲	۳	۲	۱
۱	۱	۳	۲	۰٫۵	۰٫۵	۱	۲	۱	۲
۰٫۵	۰٫۳۳	۱	۰٫۵	۱	۰٫۳۳	۰٫۵	۱	۰٫۳۳	۰٫۳۳
۱	۱	۲	۳	۱	۰٫۵	۱	۳	۱	۳
۱	۰٫۵	۱	۰٫۳۳	۲	۱	۰٫۵	۳	۰٫۳۳	۱

جدول ۸: عبارتهای فازی مربوط به احتمال شکست هر رویداد

$P_{F_i}^{\lambda} = I(F_i)$	$I_R(F_i)$	$I_L(F_i)$	احتمال شکست
۰٫۴۷۵۰۶	۰٫۵۷۵۰۶	۰٫۳۷۵۰۶	$F_1$
۰٫۶۳۴۷۶	۰٫۷۲۲۶۴	۰٫۵۴۶۸۷	$F_2$
۰٫۵۸۵۸۲	۰٫۶۸۴۷۹	۰٫۴۸۶۸۴	$F_3$
۰٫۵۵۹۲۰	۰٫۶۵۶۸۰	۰٫۴۶۱۶	$F_4$
۰٫۷۱۳۳۵	۰٫۸۰۶۷۴	۰٫۶۱۹۹۵	$F_5$
۰٫۴۴۹۳۸	۰٫۵۴۹۳۸	۰٫۳۴۹۳۸	$F_6$
۰٫۴۳۷۹۷	۰٫۵۳۷۹۷	۰٫۳۳۷۹۷	$F_7$
۰٫۳۹۹۱۳	۰٫۴۹۹۱۳	۰٫۲۹۹۱۲	$F_8$
۰٫۴۹۰۴۰	۰٫۵۹۰۴۰	۰٫۳۹۰۳۹	$F_9$

جدول ۹: احتمال وقوع هر یک از سناریوها

احتمال	سناریو
۰٫۵۲۴۹۴	اول
۰٫۰۷۱۸۶۷	دوم
۰٫۰۴۴۸۰۶	سوم
۰٫۰۵۶۸۴۱	چهارم
۰٫۰۴۷۵۹۶	پنجم
۰٫۰۲۱۸۳۲	ششم
۰٫۰۱۷۰۱۳	هفتم
۰٫۱۲۹۲۵۳	هشتم
۰٫۰۴۳۷۵۲	نهم
۰٫۰۴۲۱۰۳	دهم

بردار ویژه این ماتریس نیز در ستون آخر جدول ۶ ارایه شده است. برای اطمینان از استقلال و سادگی رویدادهای بحرانی، از روش دلفی<sup>۲۰</sup> [۴۰] استفاده شده است که پس از چهار دور بازخورد، کارشناسان به اتفاق نظر رسیدند. پس از تعیین رویدادهای بحرانی موثر بر رویداد آغازین، برای ایجاد درخت رویداد در نرم‌افزار، احتمال موفقیت با  $P_S$  و احتمال شکست با  $P_F$  نشان داده شده است. برای ارزیابی احتمال وقوع هر یک از رویدادهای بحرانی نیز از اعداد فازی مثلثی و مجموعه برش که در جدول ۱ ارایه شد، استفاده شده است. با توجه به اینکه مقدار ویژه بیشینه ماتریس برابر ۱۱٫۲۵۵۹ است، بنابراین مقدار شاخص سازگاری ۰٫۱۳۹۵۴۴ خواهد شد. مقدار RCI نیز طبق جدول ۳ معادل ۱٫۴۹ به دست آمده است. در نتیجه نسبت سازگاری معادل ۰٫۰۹۳۶۵۴ خواهد شد که کمتر از ۰٫۱ است، بنابراین ماتریس  $T_{10 \times 10}$  سازگار است. اکنون با استفاده از بردار ویژه و طبق رابطه ۱۰، احتمال شکست هر یک از رویدادهای بحرانی ( $P_{U_i}^{\lambda}$ ) محاسبه می‌شود که برای این منظور اصطلاحات زبانی فازی به صورت عبارتهای  $I_L(F_i)$  و  $I_R(F_i)$  برای هر رویداد (روابط ۵ و ۶) محاسبه شده‌اند و در نهایت پارامتر  $I$  طبق رابطه ۴ به دست می‌آید. نتیجه این محاسبات در جدول ۸ خلاصه شده است.

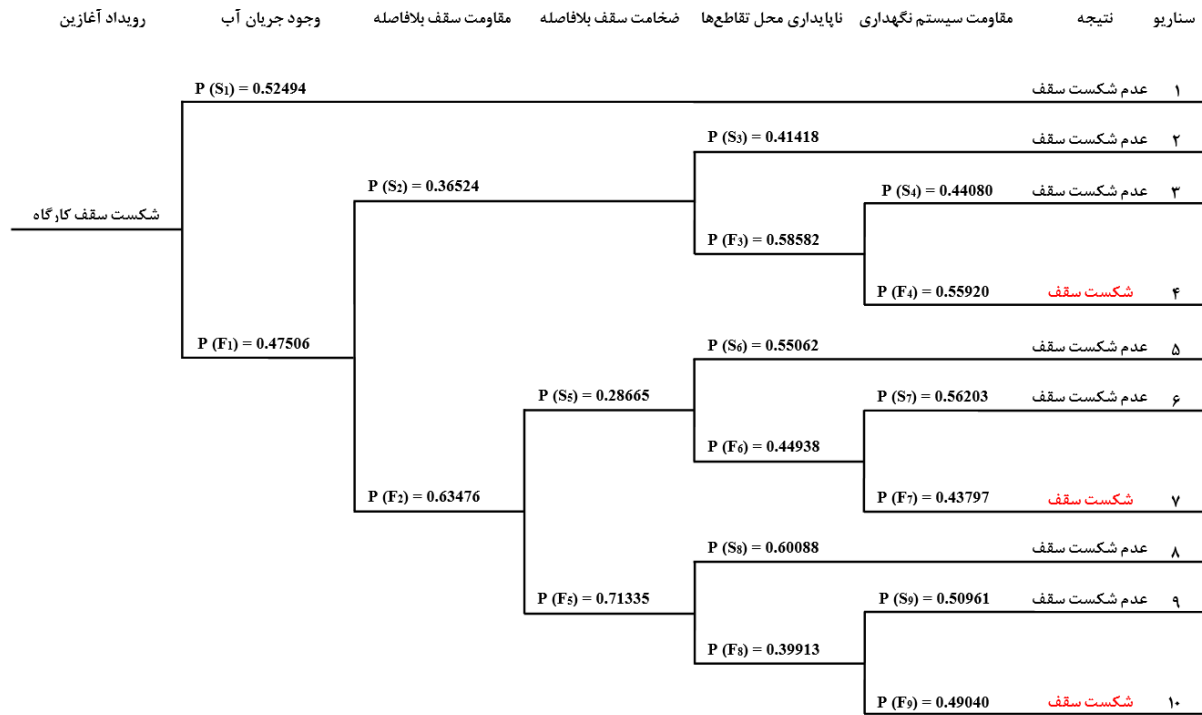
در مرحله بعد، احتمال وقوع هر سناریو که از حاصل ضرب احتمال هر یک از رویدادهای بحرانی دخیل در آن سناریو به دست می‌آید، محاسبه می‌شود و نتایج آن در جدول ۹ آمده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ده سناریو در درخت رویداد ایجاد شده است که مربوط به شکست سقف یا پایداری سقف هستند. بر این اساس، نتیجه سناریوهای چهارم، هفتم و دهم شکست سقف و نتیجه سایر سناریوها پایداری سقف است.

در هر سناریو، حداکثر ۵ رویداد بحرانی و حداقل ۱ رویداد بحرانی دخیل هستند که روند کامل هر سناریو و رویدادهای بحرانی موثر بر وقوع آن در شکل مشخص است، بنابراین برای محاسبه احتمال وقوع شکست سقف در سناریوهای چهارم، هفت و ده خواهیم داشت:

$$P_4 = P_{F_1} \times P_{S_2} \times P_{F_3} \times P_{F_4}$$

$$P_7 = P_{F_1} \times P_{F_2} \times P_{S_5} \times P_{F_6} \times P_{F_7}$$

$$P_{10} = P_{F_1} \times P_{F_2} \times P_{F_5} \times P_{F_8} \times P_{F_9}$$



شکل ۲: نمودار تحلیل درخت رویداد مربوط به شکست سقف کارگاه

ترتیب برابر با  $0,47506$ ،  $0,36524$ ،  $0,28665$  و  $0,55920$  باشد، ریسک شکست سقف  $28,42$  خواهد بود.

در سناریو شماره هفت نیز در صورتی که احتمال وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ضخامت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطع‌ها و مقاومت سیستم‌های نگهداری به ترتیب برابر با  $0,47506$ ،  $0,63476$ ،  $0,28665$ ،  $0,44938$  و  $0,43797$  باشد، ریسک شکست سقف  $8,51$  خواهد بود. همچنین در سناریو شماره ده در صورتی که احتمال وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ضخامت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطع‌ها و مقاومت سیستم‌های نگهداری به ترتیب برابر با  $0,47506$ ،  $0,63476$ ،  $0,28665$ ،  $0,44938$  و  $0,43797$  باشد، ریسک شکست سقف  $21,05$  خواهد بود.

در سناریو شماره چهار ناپایداری محل تقاطع‌ها نقش کلیدی در شکست سقف خواهد داشت. در سناریو شماره ده نیز ضخامت سقف بلافاصله نقش کلیدی در شکست سقف کارگاه دارد؛ زیرا اگر سقف بلافاصله بعد از پیشروی جبهه‌کار ریزش نکند، به علت افزایش وزن و طول تیر طره‌ای، گشتاور و تنش در آن به شدت افزایش یافته و فشار بسیار زیادی به سقف کارگاه (محل لولای تیر و پیشانی جبهه‌کار) وارد خواهد

برای تحلیل ریسک شکست سقف در سناریوهای چهار، هفت و ده در ابتدا لازم است شدت شکست سقف طبق جدول ۴ تعریف شود که با توجه به شرایط معدن طبس شدت شکست سقف در این پژوهش به صورت خیلی زیاد در نظر گرفته شده است، بنابراین نتایج مربوط به مقادیر ریسک در این سه سناریو در جدول ۱۰ ارایه شده است.

جدول ۱۰: ریسک سه سناریو منجر به شکست سقف

ریسک	سناریو
۲۸,۴۲	چهار
۸,۵۱	هفت
۲۱,۰۵	ده

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار ریسک مربوط به سناریو شماره چهار است و بنابراین بحرانی‌ترین وضعیت شکست سقف در این سناریو اتفاق می‌افتد. در این سناریو اگر احتمال وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطع‌ها و مقاومت سیستم‌های نگهداری به

## ۵- نتیجه‌گیری

برای ارزیابی ریسک شکست سقف در کارگاه  $E_3$  معدن زغال سنگ طبس، مدل تحلیل درخت رویداد فازی ارائه شده است. در ابتدا بر اساس گزارش‌های مربوط به شکست و ریزش سقف در این کارگاه یک پرسشنامه تهیه و توسط ده نفر از خبرگان شامل اساتید دانشگاه و کارکنان معدن تکمیل شد، سپس طبق بررسی‌های صورت گرفته و تجربیات دفتر فنی این معدن، پنج رویداد بحرانی شامل وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ضخامت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطع‌ها و مقاومت سیستم‌های نگهداری که بر وقوع شکست سقف موثر هستند، شناسایی شد. همچنین نتایج کیفی از طریق نظریه اعداد فازی به مقادیر کمی تبدیل شد و ریسک شکست سقف کارگاه مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج حاصل، ده سناریو برای بررسی شکست سقف یا پایداری سقف در درخت رویداد ایجاد شد و نتیجه سناریوهای چهارم، هفتم و دهم شکست سقف و نتیجه سایر سناریوها پایداری سقف بود. بحرانی‌ترین وضعیت شکست سقف در سناریو شماره چهار مشاهده شد. در این سناریو اگر احتمال وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطع‌ها و مقاومت سیستم‌های نگهداری به ترتیب برابر با  $0.47506$ ،  $0.36524$ ،  $0.58582$  و  $0.55920$  باشد، ریسک شکست سقف  $28.42$  خواهد بود. همچنین در سناریو شماره ده در صورتی که احتمال وجود جریان آب، مقاومت سقف بلافاصله، ضخامت سقف بلافاصله، ناپایداری محل تقاطع‌ها و مقاومت سیستم‌های نگهداری به ترتیب برابر با  $0.47506$ ،  $0.63476$ ،  $0.71335$ ،  $0.39913$  و  $0.49040$  باشد، ریسک شکست سقف  $21.05$  خواهد بود. در سناریو شماره چهار ناپایداری محل تقاطع‌ها نقش کلیدی در شکست سقف خواهد داشت. در سناریو شماره ده نیز ضخامت سقف بلافاصله نقش کلیدی در شکست سقف کارگاه دارد، بنابراین برای موفقیت در اجرای عملیات استخراج کارگاه‌های جبهه کار طولانی لازم است تعامل بین سیستم نگهداری هیدرولیکی، پایداری سقف به ویژه در محل تقاطع‌ها، فشارهای تکیه‌گاهی و مقاومت لایه زغال سنگ از طریق پایش مداوم تغییرشکل لایه‌های سقف و نحوه تخریب سقف بلافاصله کنترل شود. روش تحلیل درخت رویداد فازی یک شاخص ریسک کاربرد برای توصیف سطح اولویت سناریوها بر اساس ریسک‌های شناسایی شده و رویدادهای بحرانی موثر بر آنها معرفی می‌کند، بنابراین می‌توان یک برنامه‌ریزی مناسب برای پاسخ به ریسک و کاهش شدت عواقب نامطلوب تهیه کرد.

شد [۴۱]. از طرف دیگر، انتخاب آرایش نامناسب سیستم نگهداری یا نصب و تنظیم دیرنگام آن ممکن است به حوادثی، از جمله شکست سقف، آماس کف و ریزش جبهه کار منجر شود که سبب اختلال در عملیات استخراج یا افزایش جراحات و تلفات می‌شود [۹]، بنابراین برای موفقیت در اجرای عملیات استخراج کارگاه‌های جبهه کار طولانی لازم است تعامل بین سیستم نگهداری هیدرولیکی، پایداری سقف به ویژه در محل تقاطع‌ها، فشارهای تکیه‌گاهی و مقاومت لایه زغال سنگ از طریق پایش مداوم تغییرشکل لایه‌های سقف و نحوه تخریب سقف بلافاصله کنترل شود [۴۲]. در صورت ناکافی بودن سیستم نگهداری، ناپایداری جبهه کار به راحتی گسترش می‌یابد، بنابراین مطالعه رفتار لایه کمر بالا قبل و حین عملیات استخراج و نیز تحلیل ریسک شکست آن ضروری است. علاوه بر این، ارزیابی و تحلیل ریسک مستمر شکست سقف کارگاه به افزایش آگاهی و شناخت کافی از شدت و گستردگی محدوده شکست منجر می‌شود که در ارزیابی مسایل متعدد مرتبط با عملیات استخراج معدن از جمله پایش فشارهای تکیه‌گاهی، پایداری کارگاه، پایداری محل تقاطع‌ها، کنترل ناپیوستگی‌ها، نشست گاز متان و حتی نشست روباره مفید خواهد بود.

رویکرد تحلیل درخت رویداد فازی که در این تحقیق برای ارزیابی ریسک شکست سقف کارگاه پیشنهاد شده است، ابزاری مناسب برای تعریف سناریوهای مختلف و پیاده‌سازی آنها با احتمالات شرطی و شدت‌های متفاوت است، زیرا احتمال وقوع هر سناریو در این روش از طریق حاصل ضرب احتمال همه رویدادهای بحرانی موثر بر وقوع آن سناریو محاسبه می‌شود [۴۳]. این روش یک شاخص ریسک کاربردی برای توصیف سطح اولویت سناریوها بر اساس ریسک‌های شناسایی شده و رویدادهای بحرانی موثر بر آنها معرفی می‌کند، بنابراین می‌توان یک برنامه‌ریزی مناسب برای پاسخ به ریسک و کاهش شدت عواقب نامطلوب تهیه کرد.

در روش تحلیل درخت رویداد فازی به علت اینکه توالی رویدادهای بحرانی مد نظر است، ماهیت وابسته به زمان رویدادها در هر سناریو نادیده گرفته می‌شود، بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی وابستگی زمانی رویدادها، با روش‌های دیگر همچون رویکرد درخت رویداد دینامیکی<sup>۲۱</sup> مورد مطالعه قرار گیرد.



Conditions". Sustainability, 14(3): 1036.

- [10] Xu, J. L., Qian, M. G., and Zhu, W. B. (2005). "Study on influences of primary key stratum on surface dynamic subsidence". Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(5): 787-791.
- [11] Yang, S., Wang, J., Li, X., Ning, J., and Qiu, P. (2019). "In situ investigations into mining-induced hard main roof fracture in longwall mining: A case study". Engineering Failure Analysis, 106: 104188.
- [12] Li, Y. (2019). "Analytical examination for the stability of a competent stratum and implications for longwall coal mining". Energy Science & Engineering, 7(2): 469-477.
- [13] Gong, T., Xia, B., Lu, Y., Luo, Y., and Hu, H. (2020). "Study on the maximum pressure-causing stratum in longwall mining stope and its mechanics analysis". Arabian Journal of Geosciences, 13: 566.
- [14] Ji, S., He, H., and Karlovšek, J. (2021). "Application of superposition method to study the mechanical behaviour of overlying strata in longwall mining". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 146: 104874.
- [15] Rui, P., Meiling, F., Ruile, R., Jianming, Z., Qifeng, Z., and Zhenhua, O. (2022). "Study on the Law of Earth's Surface Movement on Ultra-Long Working Face". Geotechnical and Geological Engineering, 40(2): 587-603.
- [16] Bai, E., Guo, W., Tan, Y., Guo, M., Wen, P., Liu, Z., Ma, Z., and Yang, W. (2022). "Regional Division and Its Criteria of Mining Fractures Based on Overburden Critical Failure". Sustainability, 14(9): 5161.
- [17] Han, P., Zhang, C., Ren, Z., He, X., and Jia, S. (2021). "The influence of advance speed on overburden movement characteristics in longwall coal mining: insight from theoretical analysis and physical simulation". Journal of Geophysics and Engineering, 18(1): 163-176.
- [18] Shi, X., and Zhang, J. (2021). "Characteristics of overburden failure and fracture evolution in shallow buried working face with large mining height". Sustainability, 13(24): 13775.
- [19] Ding, K., Wang, L., Wang, W., Wang, K., Ren, B., and Jiang, C. (2021). "Study on the Development Height of Overburden Water-Flowing Fracture Zone of the Working Face". Geofluids, 2021: 5570884.
- [20] Fu, B., Li, J., Tu, M., and Jin, N. (2022). "Study on the Synchronous Instability Mechanism of the Coal Wall and Direct Roof of High Soft Coal Seam". Geofluids,

## ۶- سپاس‌گذاری

از اساتید محترم دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اساتید محترم دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران و پرسنل محترم معدن زغال‌سنگ پروده طبس به ویژه جناب آقای مهندس بشری برای همکاری در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

## ۷- مراجع

- [1] Molinda, G., and Mark, C. (2010). "Ground failures in coal mines with weak roof". Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15: 1-42.
- [۲] مهدوری، س.، شهریار، ک.، شریف‌زاده، م.؛ ۱۳۹۶؛ "ارزیابی مکانیزم شکست سقف کارگاه‌های جبهه‌کار طولانی با تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی". نشریه مهندسی معدن، دوره ۱۲، شماره ۳۷، ص ۳۹-۵۲.
- [۳] مهدوری، س.، شهریار، ک.، شریف‌زاده، م.؛ ۱۳۹۸؛ "تخمین تنش‌های اصلی القایی در کارگاه‌های جبهه‌کار طولانی از طریق وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای". روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره ۱۸، ص ۳۱-۴۷.
- [4] Feng Ren, H., Cao, P., and Wen Zhao, X. (2021). "Strata movement and fracture evolution characteristics in adjacent seam mining". Arabian Journal of Geosciences, 14(6): 1-14.
- [5] Mahdevari, S., and Hayati, M. (2021). "Finite-difference based response surface methodology to optimize tailgate support systems in longwall coal mining". Scientific Reports, 11(1): 2321.
- [6] Cao, J., Su, H., Li, J., Wu, X., and Wang, E. (2023). "Research on Development Mechanism and Criterion of Upward Fractures in Longwall Face Mining". Mathematical Problems in Engineering, 2023: 1-11.
- [7] Xu, T., Hong Yang, T., Feng Chen, C., Lei Liu, H., and Lei Yu, Q. (2015). "Mining induced strata movement and roof behavior in underground coal mine". Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 1(3-4): 79-89.
- [8] Ardehjani, E. A., Ataei, M., and Rafiee, R. (2020). "Estimation of First and Periodic Roof Weighting Effect Interval in Mechanized Longwall Mining Using Numerical Modeling". International Journal of Geomechanics, 20(2): 1-13.
- [9] Mao, P., Hashikawa, H., Sasaoka, T., Shimada, H., Wan, Z., Hamanaka, A., and Oya, J. (2022). "Numerical Investigation of Roof Stability in Longwall Face Developed in Shallow Depth under Weak Geological

- numbers". International Journal of Systems Science, 9(6): 613-626.
- [33] Jain, R. (1977). "A procedure for multiple-aspect decision making using fuzzy sets". International Journal of Systems Science, 8(1): 1-7.
- [34] Liou, T. S., and Wang, M. J. J. (1992). "Ranking fuzzy numbers with integral value". Fuzzy Sets and Systems, 50(3): 247-255.
- [35] Aven, T. (2008). "Risk Analysis: Assessing Uncertainties beyond Expected Values and Probabilities". John Wiley & Sons, Ltd, pp. 208. DOI: 10.1002/9780470694435.
- [36] Piadeh, F., Ahmadi, M., and Behzadian, K. (2018). "Reliability assessment for hybrid systems of advanced treatment units of industrial wastewater reuse using combined event tree and fuzzy fault tree analyses". Journal of Cleaner Production, 201: 958-973.
- [37] Fan, Y. W., Yu, G., Liao, X., Sun, J. J., and Xi, Y. W. (2018). "Application of fault tree analysis method in risk analysis of freezing damage in tunnels of cold regions based on fuzzy numbers". Safe Environment Engineering, 25(6): 146-151.
- [38] Li, M., Wang, H., Wang, D., Shao, Z., and He, S. (2020). "Risk assessment of gas explosion in coal mines based on fuzzy AHP and bayesian network". Process Safety and Environmental Protection, 135: 207-218.
- [39] Piantanakulchai, M., and Saengkhaio, N. (2003). "Evaluation of alternatives in transportation planning using multi-stakeholders multi-objectives AHP modeling". Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 4, October 2003, 1613-1628.
- [40] Dalkey, N., and Helmer, O. (1963). "An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts". Management Science, 9(3): 458-467.
- [41] Kang, H., Lou, J., Gao, F., Yang, J., and Li, J. (2018). "A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining". International Journal of Coal Geology, 188: 25-36.
- [42] Arasteh, H., Esmacili, K., Saeedi, G., and Ebrahimi Farsangi, M. A. (2022). "Discontinuous modeling of roof strata caving in a mechanized longwall mine in tabas coal mine". International Journal of Geomechanics, 22(5): 4022040.
- [43] Abad, F., and Naeni, L. M. (2020). "A hybrid framework to assess the risk of change in construction projects using fuzzy fault tree and fuzzy event tree analysis". International Journal of Construction Management, 22(12): 2385-2397.
- 2022: 4703957.
- [21] Li, C., He, Y., Sun, X., and Fu, Y. (2023). "Fracture Evolution Characteristics and Deformation Laws of Overlying Strata during the Initial Period of Longwall Mining: Case Study". Sustainability, 15(11): 8596.
- [22] Sabanov, S., Nikitin, O., and Pastarus, J. R. (2008). "Risk assessment of feasibility of roadheaders in estonian underground mining". Oil Shale, 25(2): 153-162.
- [23] Pastarus, J., Sabanov, S., Shestakova, J., and Nikitin, O. (2009). "Risk Analysis of the Pillar Strength in the Estonia Mine". Environment Technology Resources, Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference, Vol. 1, Aug. 2009, 19-23.
- [24] Wachtel, T., Quaranta, J., van Zyl, D., and Siriwardane, H. (2014). "Event tree analysis for room and pillar mining affecting permeability beneath surface bodies of water". Georisk, 8(2): 106-116.
- [25] Kumar, R., and Ghosh, A. K. (2017). "Mines Systems Safety Improvement Using an Integrated Event Tree and Fault Tree Analysis". Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 98(1): 101-108.
- [26] Mineo, S., Pappalardo, G., Urso, A. D., and Calcaterra, D. (2017). "Event tree analysis for rockfall risk assessment along a strategic mountainous transportation route". Environmental Earth Sciences, 76(17): 1-21.
- [27] Özfirat, M. K., Özkan, E., Kahraman, B., Şengün, B., and Yetkin, M. E. (2017). "Integration of risk matrix and event tree analysis: a natural stone plant case". Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, 42(10): 1741-1749.
- [28] Wang, J., Hu, B., Dong, L., Chang, J., and Wang, W. P. (2020). "Safety pre-control of stope roof fall accidents using combined event tree and fuzzy numbers in China's underground noncoal mines". IEEE Access, 8: 177615-177622.
- [29] Espinoza, C., Seccatore, J., and Herrera, M. (2020). "Chilean artisanal mining: a gambling scenario". REM-International Engineering Journal, 73(2): 241-246.
- [30] Momeni, E., Poormoosavian, M., Salmani Tehrani, H., and Fakher, A. (2021). "Reliability analysis and risk assessment of deep excavations using random-set finite element method and event tree technique". Transportation Geotechnics, 29: 100560.
- [31] Xie, T., and Gong, Z. (2019). "A Hesitant Soft Fuzzy Rough Set and its Applications". IEEE Access, 7: 167766-167783.
- [32] Dubois, D., and Prade, H. (1978). "Operations on fuzzy

<sup>10</sup> Wang

<sup>11</sup> Espinoza

<sup>12</sup> Random Set Finite Element Method (RS-FEM)

<sup>13</sup> Cut set

<sup>14</sup> Integral value method

<sup>15</sup> Index of optimism

<sup>16</sup> Scale method

<sup>17</sup> Random Consistency Index (RCI)

<sup>18</sup> Consistency Index (CI)

<sup>19</sup> Consistency Ratio (CR)

<sup>20</sup> Delphi

<sup>21</sup> Dynamic Event Tree (DET)

---

<sup>1</sup> Fuzzy-Event Tree Analysis (F-ETA)

<sup>2</sup> Event Tree Analysis

<sup>3</sup> Initiating Event (IE)

<sup>4</sup> Key stratum

<sup>5</sup> Evans

<sup>6</sup> Sabanov

<sup>7</sup> Pastarus

<sup>8</sup> Wachtel

<sup>9</sup> Özfirat