Journal of Health and Safety at Work 2023; 12(4): 854-871

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Improving the Calculation of RPN in the FMEA Method by Combining a Nonlinear Model with Revised TOPSIS and Fuzzy Logic

Mehri Mangeli Kamsefidi[1], Alireza Shahraki[1,], Faranak Hosseinzadeh Saljooghi[2]*

[1] *Department of Industrial Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Iran.*
[2] *Department of Mathematics, University of Sistan and Baluchestan, Iran.*

Received: 2017-10-29 Accepted: 2018-09-22

ABSTRACT

Introduction: Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is a structured way to find and understand the states of a system's failure and to calculate the resulting effects. In this method, which has been criticized by many researchers, the risk priority number is obtained for each failure mode based on the multiplication of the three parameters of occurrence (O), severity (S) and detection (D). In order to overcome the disadvantages of the traditional method of FMEA, such as ranking the failure and weighting the parameters, this research proposes a model in the fuzzy set.

Material and Methods: The model proposed in this paper is a nonlinear model for weighting the parameters of the FMEA and the revised TOPSIS method for ranking the failures, which is used for the first time to improve the FMEA method.

Results: The proposed model was presented in the Copper Complex of Shahr-e-Babak to assess safety risks. Based on the results of the study, it was found that in this proposed model, the weights of severity and detection were 0.479 and 0.186, respectively, and the results of the ranking showed that the risks of falling from height and getting stuck between objects had the highest and lowest priorities, respectively.

Conclusion: In the proposed model, based on Logarithmic Fuzzy Preference Programming and the revised TOPSIS method, the definite weights of the parameters were presented without any fuzzy number ranking and risk ranking with more criteria, respectively. Therefore, the proposed model has a higher ability compared to the traditional FMEA, and its application can be recommended to determine the ranking of risks.

Keywords: *Failure Mode and Effects Analysis, risk assessment, fuzzy logic, Logarithmic Fuzzy Preference Programming, revised TOPSIS*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Mangeli Kamsefidi M, Shahraki A, Hosseinzadeh Saljooghi F. Improving the Calculation of RPN in the FMEA Method by Combining a Nonlinear Model with Revised TOPSIS and Fuzzy Logic, J Health Saf Work. 2023; 12(4): 854-871.

1. INTRODUCTION

One of the common methods of risk evaluation is Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Many researchers have criticized this method due to its weaknesses, despite its wide application in risk evaluation. In the present study, a hybrid model is proposed to overcome the disadvantages of the traditional method. Since FMEA is a method of group risk evaluation, there are different types of uncertainties, such as ambiguity and inaccuracy in mental and qualitative evaluations of team members. All evaluations have been performed in a fuzzy environment to solve the problem of uncertainties in the evaluation of failure and weighted modes of parameters. Another problem with the FMEA method is that the parameters are not of the same importance. So, in this study, a nonlinear method named Logarithmic Fuzzy Preference Programming (LFPP) is used for the first time, in which the definite weights of the parameters are determined without the fuzzy number ranking step. Since the FMEA method is

* Corresponding Author Email: *shahrakiar@hamoon.usb.ac.ir*

Copyright © 2023 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

decision-issued, one needs to prioritize the risks; in other words, risk rating is mandatory. Given that the equivalence of different options in a fuzzy environment is one of the problems in decision-making, it is necessary to make further distinctions to identify all the options. Therefore, in this study, the revised fuzzy TOPSIS method has been used to rank the risks for the first time. In the revised fuzzy TOPSIS method and the closeness coefficient, two criteria of average value and shape value are also used to rank the risks.

2. MATERIAL AND METHODS

To overcome the disadvantages of the traditional FMEA method, such as the same importance of the factors and risk rating, this paper proposes a model in a fuzzy environment, whose conceptual model is shown in Figure 1. The proposed model includes the three methodologies of nonlinear LFPP model, fuzzy logic, and revised fuzzy TOPSIS. This is the first time such a combination is used to improve the FMEA method. The proposed model can be described as follows.

Phase 1: A decision-making team consisting of experts identified system failure modes, and the estimation of parameters dependent on the FMEA method was done for each risk.

Phase 2: In this phase, the weights of the parameters were estimated by the LFPP model, and the failure modes were ranked by the revised fuzzy TOPSIS method in a fuzzy environment.

Also, in this section, the efficiency and performance of the proposed model for risk assessment are revealed. For this purpose, safety and occupational accidents risks were done using this model in the warehouse unit of Shahr-e-Babak Copper Complex.

In the first phase of the proposed model, several risks have been identified, first with the opinion of five safety experts and specialists in accordance with the occurred incidents. These risks included falling from height (Risk 1), slipping (Risk 2), getting stuck between objects (Risk 3), collisions with moving objects (Risk 4), collisions with stationary objects (Risk 5), and high muscle tension during working with objects (Risk 6).

In the first stage of the second phase of our proposed model, the LFPP method was used to determine the weights of parameters dependent on the FMEA method. In this method, paired comparisons were performed between three parameters by linguistic variables with triangular fuzzy numbers (TFN) corresponding to them, according to the research conducted by Wang et al. (2016), as shown in Table 1. After polls and pairwise comparisons by the experts, the arithmetic mean of the comments was calculated, as shown in Table 2. Finally, by using the data in Table 2 and the LFPP model, the weight of each of the parameters related to the FMEA method was calculated with

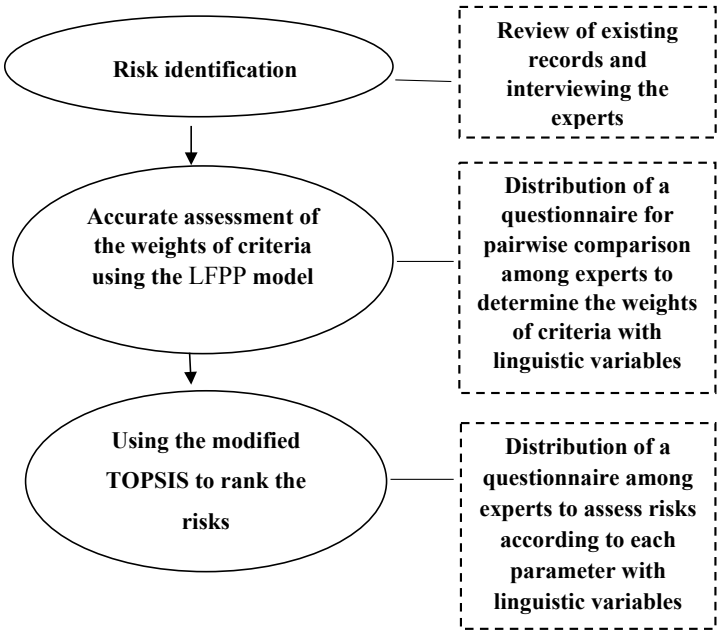


Fig. 1: Conceptual model of the proposed approach

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]
[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

Lingo software version 9, as shown in Table 4. Table 4 shows the consistency index with variable λ, and the weights of the parameters of occurrence, severity, and detection obtained from solving the LFPP model by the variables W2, W1 and W3, respectively.

In the second stage of the second phase, with a survey of system experts, the risk of the parameter was formed in each of the failure modes according to the parameters of severity, occurrence, and detection, and using matrix language variables, so that the rows indicated the risks and the columns represented the parameters. Table 3 shows the linguistic variables used in this step and the fuzzy numbers assigned to each, defined with the help of the experts and previous articles. Table 5 shows the parameter risk matrix in which Table 3 is used to determine each parameter, occurrence, severity and detection related to each risk. Also, the closeness coefficient, mean value and shape value were calculated for each risk in the revised fuzzy TOPSIS method, and then the risks were compared and ranked using these values.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Due to the limitations and disadvantages of the traditional FMEA method, many researchers have tried to improve its performance. The main problems in the assessment of risks by the FMEA method can be stated as follows:

- Evaluation of the parameters of failure modes, and numerically weighting the parameters (between 1 and 10).
- Consideration of the same weights for the parameters (severity, occurrence, and detection).
- Prioritization of the risks based on the RPN number; in some cases, these numbers are the same, or if they are close to each other, risk prioritization is difficult.

Having in mind the first problem and that FMEA is a method of group risk assessment; there are different types of uncertainties such as ambiguity and inaccuracy of opinions in the mental and qualitative assessments of team members. In order to solve the problem of uncertainties in evaluating the parameters of failure and weighted modes, all evaluations in the fuzzy environment are performed in the form of triangular fuzzy numbers. The use of fuzzy numbers and their corresponding qualitative expressions are more consistent with their subjective judgments and can counter the ambiguities in the subjective judgments of experts and the lack of uncertainty in the system. As a result, the accuracy of the risk assessment results increases.

Another problem with the FMEA method is that the parameters are not of the same importance. So, in the present study, the LFPP method is used for the first time. This method provides the definitive weights of the criteria without the fuzzy number ranking step. After solving the nonlinear LFPP model by Lingo software, the results are presented in Table 4, in which λ denotes the objective function and W2, W1 and W3 are the weights of occurrence, severity and detection, respectively. If 0 <λ, then the expert judgments and comparisons are consistent. Also, the values of W1, W2 and W3 are 0.335, 0.479 and 0.186, respectively, which are the maximum and minimum weight values for severity

Table 1: Fuzzy evaluation scores for rating the risk factor weights

Reciprocal scale of TFN	Triangular fuzzy number	Crisp scale of traditional AHP	Linguistic variable
(1,1,1)	(1 ،1 ،1)	1	Equally important
(2/3, 1, 2)	(1/2, 1, 3/2)	2	Weakly important
(1/2, 2/3, 1)	(1, 3/2, 1)	3	Fairly important
(2/5, 1/2, 2/3)	(3/2, 2, 5/2)	4	Strongly important
(1/3, 2/5, 1/2)	(2, 2/5, 3)	5	Very Strongly important
(2/7, 1/3, 2/5)	(5/2, 3, 7/2)	6	Extremely important

Table 2: Aggregated importance weights of risk factors suggested by the five members of the FMEA team

	Occurrence(O)	Severity (S)	Detection (D)
Occurrence (O)	(1, 1, 1)	(0.51, 0.7, 1.13)	**(1.8, 2.3, 2.8)**
Severity (S)	(1, 1.5, 2)	(1, 1, 1)	**(1.6, 2.1, 2.6)**
Detection (D)	(0.39, 0.51, 0.78)	(0.42, 0.55, 0.85)	**(1, 1, 1)**

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

and detection, respectively. One of the reasons for the high importance of the severity parameter (W2 = 0.479) compared to the occurrence parameter in Table 4 is the high severity and intensity of injuries to personnel in the studied industry. On the other hand, the occurrence parameter has the second importance (W1 = 0.335) due to the high prevalence of accidents in the studied industry. Also, the reason for the low importance of the detection parameter (W3 = 0.186) compared to the other two parameters, according to the experts, is that the equipment and sites of this industry are equipped with risk identification devices and daily visits.

The advantage of the LFPP method used in the proposed model over the fuzzy AHP method is that it provides the definite weights of the parameters without the fuzzy number ranking step, while the AHP method requires the fuzzy number ranking step. In addition, different methods of ranking fuzzy numbers can lead to different results. Also, in the AHP method, the comparison matrix must be completed and consistent; otherwise, this method cannot be used, or we will get wrong answers. But in the LFPP model, such limitations do not exist. On the other hand, in this method, unlike the fuzzy AHP method, it is not needed to normalize the decision matrix, and a fixed and definite model is used to obtain the weight and compatibility criteria.

Since the FMEA method is decision-issued, one needs to prioritize the risks; in other words, risk rating is mandatory. Therefore, in the present study, the revised fuzzy TOPSIS method has been used for the first time to compare the risks with the three criteria of closeness coefficient, mean value and shape value, the values of which are presented in Table 5. On the other hand, as shown in Table 5, the risk ratings obtained using the traditional method and the proposed approach are different. More precisely, the ranking done in the traditional method has the same priority for some of the risks, so that the risks of falling from height and high muscle tension have the first priority, while the risks of collision with stationary objects and getting stuck between objects have the fourth priority.

Also, according to Table 5, the revised fuzzy TOPSIS method used in the proposed approach can be compared with conventional TOPSIS. Thus, according to the conventional TOPSIS method, which only uses the closeness coefficient to compare options, after calculating the closeness coefficient, it was observed that the first risk had the first priority, and the second, fourth, fifth and sixth risks had the second priority because their closeness coefficients were the same. Moreover, the third risk had the third priority.

However, in the proposed method of the present study, the risks are carefully ranked according to the importance of parameters and risk assessment by experts, and each has a specific priority (between 1 and 6). In the proposed method, due to the importance of the parameters, only two risks will get the same rating if all the conditions mentioned in steps 5 to 7 of the revised

Table 3: Linguistic variables used for rating the parameters dependent on the FMEA

D	S	O	Triangular fuzzy number	Crisp scale	Symbol	Linguistic variable
Very few failures	First Aid Case	0 to 5 percent	(0, 0, 2)	1,2	VL	**Very Low**
Relatively few failures	Medical Treatment Case	5 to 10 percent	(1, 3, 5)	3,4	L	**Low**
Occasional failures	Partial Permanent Disablement	10 to 15 percent	(3, 5, 7)	5,6,7	M	**Medium**
The number of failures is high	Fatality	15 to 20 percent	(5, 7, 9)	8,9	H	**High**
Repeated failures	Multiple Fatality	Up to 20 percent	(8, 10, 10)	10	VH	**Very High**

Table 4. Weights of risk factors obtained by the LFPP method

Λ	W_1	W_2	W_3
0.489	0.335	0.479	**0.186**

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]
[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

Table 5: FMEA analysis using revised TOPSIS, the LFPP method, and the traditional method

parameters / Risk	Severity W_2=0.479	Occurrence W_1 =0.335	Detection W_3=0.186	Traditional method					Proposed method			
				Severity	Occurrence	Detection	RPN	Priority	Closeness coefficient	Mean	Shape	Priority
Falling from height	VH	L	M	10	3	5	150	1	0.6425	2.242	9.1835	**1**
Slipping	L	VL	VL	4	2	2	16	3	0.5	0.479	0.8938	**4**
Getting stuck between objects	M	VL	VL	5	1	2	10	4	0.3127	1.443	5.0542	**6**
Collisions with moving objects	L	VL	M	2	4	7	56	2	0.5	0.789	1.8415	**3**
Collisions with stationary objects	VL	VL	M	1	2	5	10	4	0.5	0.31	0.7183	**5**
High muscle tension	VH	M	L	10	5	3	150	1	0.5	2.341	5.6516	**2**

fuzzy TOPSIS method are met. Thus, in the revised fuzzy TOPSIS method, after calculating the closeness coefficient, it was observed that the first risk had the first priority, the second, fourth, fifth, and sixth risks had the second priority due to the same closeness coefficient, and the third risk had the third priority. Considering the similarity of the closeness coefficients of risks number 2, 4, 5, and 6, we go to the next step and calculate the mean criterion for these risks. After calculating the mean criterion, as shown in Table 5, the mean of the sixth risk is more than that of the fourth risk, the mean of the fourth risk is more than that of the second risk, and the mean of the second risk is more than that of the fifth risk. Therefore, the final ranking of the risks is Risk1 ≺Risk 6≺Risk4≺ Risk2≺ Risk 5 ≺Risk 3.

One of the features of the proposed model is that it can be used to assess safety, environmental and health risks in all organizations. The proposed model was presented in Shahr-e-Babak Copper Complex to assess safety risks. The research results show that in this model, impact severity and detectability parameters have the highest and lowest weights, respectively, with a positive compatibility index. The ranking results also show that risk 1 has the highest priority, and the third risk has the lowest priority.

4. CONCLUSION

In order to overcome the disadvantages of the traditional FMEA method, such as ranking the failure modes and weighting of parametric heights, this study proposed a model in a fuzzy environment. The LFPP model was used to eliminate the uniformity of weights related to risk assessment parameters in the traditional method. Also, to prioritize the risks, the revised fuzzy TOPSIS method was used. Triangular fuzzy membership functions were used to solve the problem of uncertainty in the data. In order to show the superiority of the proposed method over the existing methods, the risks introduced by the safety unit of Shahr-e-Babak Copper Complex were examined. This study showed that the proposed method could prioritize the risks and overcome the limitations of the traditional FMEA method.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful for the guidance of the staff of the Safety and Research Unit of Shahr-e-Babak Copper Complex.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

بهبود محاسبه RPN در روش FMEA با استفاده از ترکیب مدل غیرخطی، TOPSIS تجدیدنظر شده و منطق فازی

مهری منگلی کمسفیدی[۱]، علیرضا شهرکی[۱*]، فرانک حسین زاده سلجوقی[۲]

[۱] گروه مهندسی صنایع، دانشکده شهید مهندسی نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
[۲] گروه ریاضی، دانشکده ریاضی، آمار و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

چکیده

مقدمه: روش FMEA، یک روش ساختار یافته جهت پیدا کردن و شناخت حالات شکست یک سیستم و محاسبه اثرات ناشی از آن می‌باشد. در این روش، عدد اولویت ریسک برای هر حالت شکست بر اساس ضرب سه پارامتر احتمال وقوع، شدت اثر و قابلیت کشف بدست می‌آید که مورد انتقاد بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این تحقیق به منظور رفع معایب این روش نظیر رتبه بندی حالات شکست و وزن دهی پارامترها یک مدل پیشنهادی در محیط فازی ارائه گردید.

روش کار: مدل پیشنهادی در این مقاله شامل مدل غیرخطی میخایلوف برای وزن دهی پارامترهای روش FMEA و مدل تاپسیس تجدیدنظر شده برای رتبه بندی حالات شکست می‌باشد که از این ترکیب برای اولین بار به منظور بهبود روش تجزیه و تحلیل خطرات و اثرات ناشی از آن استفاده شد.

یافته ها: مدل پیشنهادی در مجتمع مس شهربابک به منظور ارزیابی ریسک‌های ایمنی ارائه گردید بر اساس نتایج حاصل از تحقیق مشخص گردید که در این مدل پیشنهادی پارامتر شدت اثر و قابلیت کشف به ترتیب دارای وزن ۰/۴۷۹ و ۰/۱۸۶ می‌باشند و نتایج رتبه بندی نشان داده است که ریسک سقوط از ارتفاع از بالاترین و گیر افتادن بین اجسام از کمترین اولویت برخوردار می‌باشند.

نتیجه گیری: درمدل پیشنهادی با اتکا به روش‌های برنامه ریزی غیرخطی میخایلوف و تاپسیس تجدید نظر شده به ترتیب وزن قطعی پارامترها بدون مرحله رتبه بندی اعداد فازی و رتبه بندی ریسک‌ها با معیارهای بیشتری ارائه گردید؛ لذا مدل پیشنهادی از توانایی بالاتری نسبت به FMEA سنتی برخوردار می‌باشد و کاربرد آن برای تعیین رتبه بندی ریسک‌ها توصیه می گردد.

کلمات کلیدی: *تجزیه و تحلیل خطرات و آثار آن، ارزیابی ریسک، منطق فازی، برنامه ریزی غیرخطی فازی میخایلوف، تاپسیس تجدید نظر شده*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *shahrakiar@hamoon.usb.ac.ir*

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

مقدمه

امروزه مدیریت ریسک یکی از مهم ترین ابزارهای تصمیم گیری برای مدیران است به طوری که بسیاری از متخصصان و مدیران بر این باورند که بدون ارزیابی ریسک نمی‌توان تصمیم درستی در سیستم داشت. امروزه استفاده از روش‌های ارزیابی ریسک در صنایع مختلف رو به گسترش است به طوری که در حال حاضر بیش از ۷۰ نوع روش ارزیابی ریسک کمی و کیفی وجود دارد که هریک از صنایع بسته به نیاز خود می‌تواند یکی از روش‌ها را انتخاب کند (۱).

یکی از روش‌های متداول در ارزیابی ریسک روش تجزیه و تحلیل خطرات و اثرات ناشی از آن یا FMEA[1] می‌باشد که اولین بار در صنعت هوافضا در سال ۱۹۶۰ معرفی شد (۲). FMEA بر پایه کار گروهی به عنوان یک ابزار نظام یافته با هدف تعریف، شناسایی، پیشگیری، کنترل حالات شکست، علل و اثرات خطاهای بالقوه در سیستم به کار گرفته می‌شود و پیش از آن که خدمات نهایی به دست مشتری برسد، اجرا و مستندسازی این فعالیت‌ها را مدیریت می‌کند (۳). روش FMEA سنتی، حالات شکست در یک سیستم را با شاخص عدد اولویت ریسک (RPN[2]) ارزیابی می‌کند. RPN در این روش از حاصل ضرب سه پارامتر احتمال وقوع (O^3) ، شدت اثر (S^4) و قابلیت کشف (D^5) به دست می‌آید که هر چه مقدار RPN بالاتر باشد، میزان ریسک مرتبط با حالت شکست نیز بیشتر می‌باشد (۴). علی رغم کاربرد وسیع این روش در ارزیابی ریسک، به دلیل کاستی‌ها و نواقصی که دارد مورد انتقاد بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله این کاستی‌ها و نواقص را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

۱. وزن پارامترهای وابسته روش FMEA در مسائل واقعی با کاربردهای مختلف، ممکن است متفاوت باشد اما در روش FMEA سنتی وزن پارامترها یکسان در نظر گرفته می‌شود (۵).

۲. اعضای تیم FMEA ممکن است ارزیابی‌های متفاوتی را برای پارامترهای وابسته روش FMEA، به دلایل مختلف مانند عدم تجربه، داده‌های ناکافی و فراموش شدن برخی مسائل داشته باشند که در این صورت تعیین دقیق پارامترها با مشکل مواجه می‌باشد (۶).

۳. استفاده از عامل ضرب در محاسبه RPN سؤال برانگیز است و به شدت نسبت به تغییرات کوچک معیارهای سه گانه حساس می‌باشد (۷).

۴. ممکن است ترکیب‌های مختلف از پارامترهای وابسته به روش FMEA، بدون توجه به مفهوم پنهان ریسک به عدد اولویت ریسک یکسانی منجر شود (۸).

با توجه به محدودیت‌ها و نواقص روش FMEA سنتی، محققان از روش‌های مختلف برای برطرف کردن این معایب استفاده کرده‌اند.

چن و همکاران در سال ۲۰۰۹، یک رویکرد مبتنی بر استدلال شهودی (ER[6]) را برای اتخاذ نظرات مختلف اعضای تیم FMEA و رتبه بندی حالات شکست در شرایط مختلف عدم قطعیت مانند ارزیابی ناقص، مبهم بودن و ناآگاهی پیشنهاد کردند (۹). گوم و همکاران در سال ۲۰۱۱، یک رویکرد سیستماتیک برای شناسایی و ارزیابی حالات بالقوه با استفاده از FMEA مخصوص خدمات و تجزیه و تحلیل رابطه‌ای خاکستری پیشنهاد دادند. تکنیک FMEA مخصوص خدمات با ۳ بعد و ۱۹ زیر بعد ویژگی خدمات را بیان می‌کند و سپس با تئوری گری عدد اولویت هر حالت شکست محاسبه می‌شود (۱۰). سیدحسینی و همکاران در سال ۲۰۰۶، به منظور رفع عیب اولویت بندی حالات شکست در روش FMEA از تکنیک دیمتل استفاده کردند (۱۱). تای و لیم در سال ۲۰۰۶، به منظور ساده سازی FMEA در یک محیط فازی، با کاهش تعداد قوانین مورد نیازی که باید توسط کاربر FMEA برای مدل سازی عدد اولویت ریسک فازی (که آن را با FRPN نمایش می‌دهند) تولید شود، روش عمومی ارائه نمودند. آن‌ها نتایج مدل خود را

1 Failure Mode and Effect Analysis
2 Risk Priority Number
3 Occurence
4 Severity
5 Detection
6 Evidential Reasoning

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]
[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

در یک کارخانه ساخت قطعات نیمه هادی پیاده سازی کردند و به هر قانون فازی، وزنی متناسب با میزان اهمیت آن تخصیص دادند (۱۲). شارما و همکاران در سال ۲۰۰۸، پیلای و وانگ در سال ۲۰۰۳ و چانگ و همکاران در سال ۱۹۹۹ از روش فازی و تئوری گری در تکنیک FMEA استفاده کردند؛ به طوری که از متغیرهای زبانی فازی برای ارزیابی فاکتورهای ریسک و تجزیه و تحلیل خاکستری برای تعیین عدد اولویت حالت‌های شکست استفاده شد (۱۵-۱۳). لئو و همکاران در سال ۲۰۱۰، با استفاده از استدلال استنتاجی فازی FER و تئوری گری[1] رویکردی جدید از FMEA ارائه کردند تا معایب روش سنتی FMEA را بهبود بخشند (۱۶). لئو و همکاران در سال ۲۰۱۵، به منظور بهبود روش FMEA و رفع معایب رتبه بندی و وزن یکسان معیارهای سه گانه از تکنیک‌های تصمیم گیری چند معیاره استفاده کردند. آن‌ها در روش خود برای رتبه بندی از روش تصمیم گیری چندمعیاره ویکور فازی استفاده کردند و همچنین به منظور وزن دهی از روش ترکیبی آنتروپی شانون و تحلیل سلسله مراتبی در محیط فازی استفاده کردند (۱۷).

آبدلگاواد و فایک در سال ۲۰۱۰، به طور هم زمان از روش منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی برای بیان محدودیت‌ها و کاستی‌های روش سنتی FMEA در صنعت ساخت و ساز استفاده کردند؛ به طوری که از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به منظور وزن دهی به معیارها استفاده شد. همچنین نتایج نشان داد که تلفیق این دو تکنیک توانایی رفع عیوب روش سنتی را دارد (۱۸). لئو و همکاران در سال ۲۰۱۲، به منظور برطرف کردن معایب روش سنتی FMEA از تکنیک تصمیم گیری چند معیاره ویکور فازی استفاده کردند. در روش آن ها برای بیان هر یک از فاکتورهای ریسک و اهمیت نسبی آن ها از اعداد فازی مثلثی یا ذوزنقه‌ای استفاده شده است. همچنین آن ها برای اثبات کاربردی بودن مدل پیشنهادی خود، این مدل را در فرایند بیهوشی استفاده کردند (۱۹).

در این تحقیق به منظور رفع معایب روش سنتی، یک مدل ترکیبی پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه FMEA یک روش ارزیابی ریسک گروهی می‌باشد، بنابراین انواع مختلفی از عدم قطعیت‌ها نظیر مبهم بودن و غیر دقیق بودن نظرات در ارزیابی‌های ذهنی و کیفی افراد تیم وجود دارد. به منظور رفع مشکل عدم قطعیت‌ها در ارزیابی پارامترهای حالات شکست و وزن دهی پارامترها، تمامی ارزیابی‌ها در محیط فازی انجام شده است (۲۰). یکی از مشکلات دیگر در روش FMEA این است که اهمیت پارامترها یکسان نمی‌باشد، لذا در این تحقیق از روش غیر خطی میخایلوف (LFPP[2]) برای اولین بار استفاده شده است که در این روش وزن قطعی معیارها بدون مرحلهٔ رتبه بندی اعداد فازی ارائه می‌دهد (۲۱).

از آنجایی که روش FMEA یک مسئله تصمیم گیری می‌باشد، بنابراین باید در مورد اولویت بندی ریسک‌ها تصمیم گیری شود و به عبارت دیگر رتبه بندی ریسک‌ها الزامی می‌باشد. با توجه به اینکه معادل بودن گزینه‌های مختلف در محیط فازی یکی از مشکلات مسائل تصمیم گیری می‌باشد، بنابراین انجام تفکیک‌های بیشتر به منظور تشخیص همه گزینه‌ها ضروری می‌باشد. لذا در این تحقیق برای اولین بار از روش تاپسیس تجدیدنظر شده به منظور رتبه بندی ریسک‌ها استفاده شده است که در آن علاوه بر معیار ضریب نزدیکی از دو معیار مقدار میانگین و شکل نیز برای رتبه بندی ریسک‌ها استفاده می‌شود (۲۲).

روش کار

مدل پیشنهادی

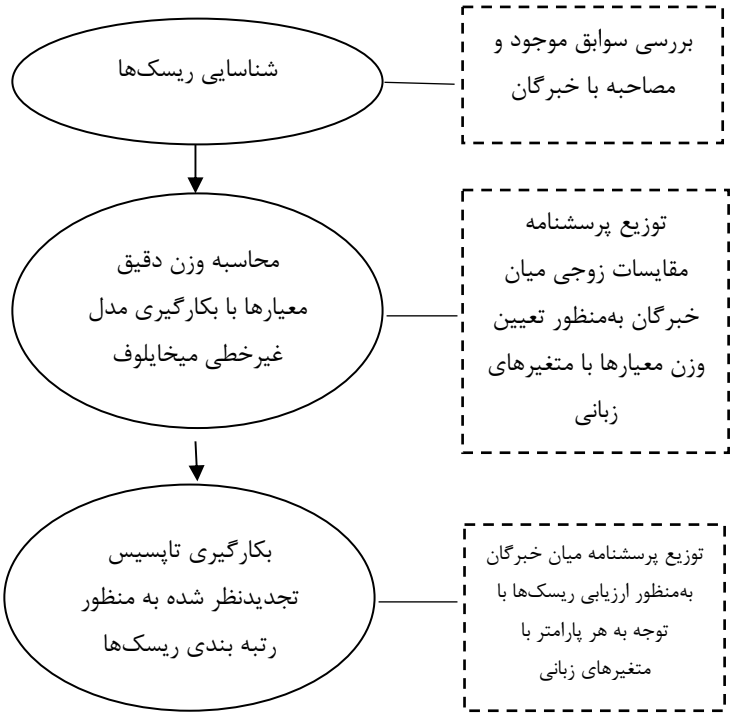
در این تحقیق به منظور رفع معایب روش سنتی FMEA نظیر رتبه بندی حالات شکست و وزن دهی پارامترها یک مدل پیشنهادی در محیط فازی ارائه گردیده است که مدل مفهومی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل پیشنهادی شامل سه متدلوژی مدل غیرخطی میخایلوف (LFPP)، منطق فازی و تاپسیس تجدیدنظر شده می‌باشد که از این ترکیب برای اولین بار

1 Gray

2 Logarithmic fuzzy preference programming

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]



شکل ۱. مدل مفهومی رویکرد پیشنهادی

به منظور بهبود روش FMEA استفاده شده است. این مدل پیشنهادی به شرح زیر ارائه گردید:

فاز اول: تیم تصمیم گیری متشکل از متخصصان به منظور شناسایی حالات شکست سیستم مورد بررسی و برآورد پارامترهای وابسته به روش FMEA برای هر ریسک مشخص گردید.

فازدوم: در این فاز برآورد وزن پارامترها با مدل غیرخطی میخایلوف و رتبه بندی حالات شکست با روش تاپسیس تجدیدنظر شده در محیط فازی انجام شده است.

تئوری مجموعه فازی

زاده برای بیان مفاهیم تقریبی و متغیرهای زبانی به صورت کمی، تئوری مجموعه فازی را مطرح نمود (۲۳). این تئوری بیان می‌کند که اگر X مجموعهٔ مرجع باشد، آنگاه مجموعهٔ فازی $\tilde{A}$ در X به صورت مجموعهٔ x, $\tilde{A}=\{(x,\mu_{\tilde{A}}(x))\mid x\in X\}$ بیان می‌شود که $\mu_{\tilde{A}}(x)$ بیانگر درجه عضویت x در مجموعهٔ فازی $\tilde{A}$ و عددی بین صفر و یک است. به عبارت دیگر x جز مجموعهٔ فازی $\tilde{A}$ با یک درجهٔ عضویت است. مهم‌ترین مسأله در منطق فازی تعریف تعداد، نوع و تعداد پارامترهای توابع عضویت است (۲۴).

تعریف ۱: تابع عضویت تابعی است که هم برای اعداد ورودی و خروجی تعریف می‌شود و توسط آن اعداد به عددی بین صفر و یک تبدیل می‌شوند. توابع مختلفی برای توابع عضویت مانند سیگموئید، گوسی، زنگوله‌ای، S شکل، مثلثی و ذوزنقه‌ای وجود دارد (۲۵).

تعریف ۲: عدد فازی مثلثی (TFN[1]): یک عدد فازی است که با سه عدد حقیقی به صورت $\tilde{a}=(l,m,u)$ نمایش داده می‌شود. کران بالا که با u نشان داده می‌شود بیشینه مقداری است که عدد فازی می‌تواند اختیار کند. کران پایین که با l نشان داده می‌شود کمینه مقداری است که عدد فازی a می‌تواند اختیار کند. مقدار m محتمل‌ترین مقدار یک عدد فازی است. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی به صورت رابطه ۱ می‌باشد (۲۶).

1 Triangular Fuzzy Number

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]
[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

رابطه ۱
$$\mu_{\tilde{A}}(x)=\begin{cases}0 & x<l\\ \frac{x-l}{l-m} & l\le x\le m\\ \frac{u-x}{u-m} & m\le x\le u\\ 0 & x>u\end{cases}$$

تعریف ۳: همانطور که عملیات جبری جمع، ضرب، تفریق و تقسیم در مجموعه‌های کلاسیک بر روی اعداد صورت می‌پذیرد، در مجموعه‌های فازی نیز این عملیات چهارگانه بر روی اعداد فازی مثلثی صورت می‌گیرد. عملیات جبری متفاوتی را می‌توان برای اعداد فازی تعریف کرد. اگر $a_1=(l_1, m_1, u_1)$ و $a_2=(l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند در این صورت عملیات جبری در روابط ۲-۵ آورده شده است (۲۷).

رابطه ۲
$$a_1 + a_2 = (l_1+l_2, m_1+m_2, u_1+u_2)$$

رابطه ۳
$$a_1 - a_2 = (l_1-u_2, m_1-m_2, u_1-l_2)$$

رابطه ۴
$$r\times a_1 =(rl_1, rm_1, ru_1)$$

رابطه ۵
$$a_1 \times a_2 = (l_1\times l_2, m_1\times m_2, u_1\times u_2)$$

مدل برنامه ریزی غیر خطی فازی میخایلوف

روش‌های تصمیم گیری چند معیاره به مسئله انتخاب بهترین گزینه از بین گزینه‌های موجود می‌پردازد. از میان روش‌های تصمیم گیری چند معیاره روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی یا AHP در حل بسیاری از مسائل استفاده شده است. روش AHP برای اولین بار توسط توماس آل ساعتی ابداع گردید. این روش به دلیل عدم اطمینان ذاتی ادراک تصمیم گیرندگان برای اولین بار با جایگزینی اعداد فازی مثلثی در ماتریس مقایسه‌های زوجی به حوزه فازی توسعه داده شد (۲۸). روش AHP فازی به دلیل نیاز به یک مرحله رتبه بندی اعداد فازی و ماتریس مقایسات زوجی کامل و سازگار مورد انتقاد قرار گرفت. میخایلوف مدلی را ارائه داد که شاخص سازگاری و بردار وزن را به صورت حقیقی ارائه می‌دهد و نیازی به توابع رتبه بندی فازی نمی‌باشد. در مدل برنامه‌ریزی غیر خطی ترجیحات فازی فرض کنید قضاوت‌های اولیه به صورت (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) باشد، در این صورت برای محاسبه اوزان از رابطه ۳-۱ استفاده می‌کنیم به‌طوری‌که نسبت وزن دو معیار در فاصله کران پایین و کران بالای قضاوت دو معیار قرار گیرد (۲۱).

رابطه ۶
$$l_{ij}\le\frac{W_i}{W_j}\le u_{ij}$$

به جای تبدیل عبارت فوق به دو نامعادله ساده خطی، می‌توان برای هر قضاوت تابع عضویتی مطابق با رابطه ۷ بسازیم که نسبت $\frac{W_i}{W_j}$ خطی باشد.

رابطه ۷
$$\mu_{ij}(\frac{w_i}{w_j})=\begin{cases}\dfrac{(\frac{w_i}{w_j}-l_{ij})}{m_{ij}-l_{ij}}, & \dfrac{w_i}{w_j}\le m_{ij}\\ \dfrac{(\mu_{ij}-\frac{w_i}{w_j})}{\mu_{ij}-l_{ij}}, & \dfrac{w_i}{w_j}\ge m_{ij}\end{cases}$$

تابع فوق در فاصله $(-\infty, m_{ij})$به طور خطی افزایشی و در فاصله $(m_{ij}, +\infty)$به طور خطی کاهش می‌یابد. در صورتی که $\frac{W_i}{W_j}>u_{ij}$ یا $\frac{W_i}{W_j}<l_{ij}$ باشد، تابع فوق مقدار منفی و در سایر موارد مقدار مثبت به خود می‌گیرد. بیشترین مقدار این تابع زمانی است که $\frac{W_i}{W_j}=m_{ij}$ باشد. اکنون منطقه موجهی را که از فصل مشترک محدودیت‌ها و با استفاده از عملگر min تعیین کرده و با استفاده از رویکرد max جواب مسئله را مطابق مدل رابطه ۸ بدست می آوریم (۲۱).

رابطه ۸
$$\begin{cases}Max\ \ \lambda\\ s.t\\ (m_{ij}-l_{ij})\lambda w_j-w_i+l_{ij}w_j\le 0\\ (\mu_{ij}-m_{ij})\lambda w_j-w_i-\mu_{ij}w_j\le 0\\ \sum_{k=1}^{n}w_k=1\\ w_k\succ 0, k=1,2,...,n; i=1,2,...,n-1; j=2,3,...,n; j\succ i\end{cases}$$

به علت غیر خطی بودن مدل، حل آن به روش

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

سیمپلکس امکان پذیر نیست و باید آن را با استفاده از روش‌های مقداری و نرم افزارهای مناسب مانند لینگو حل کرد. مقادیر بهینه مثبت برای شاخص λ نشان دهنده این است که تمامی قضاوت‌ها سازگار می‌باشد اما در صورت منفی بودن این شاخص، می‌توان فهمید که قضاوت‌ها قویاً ناسازگار می‌باشند.

تاپسیس تجدید نظر شده

پس از معرفی روش تاپسیس فازی، این روش به بسیاری از قلمروهای کاربردی مانند مدیریت، منابع انسانی، لجستیک و ساخت و تولید گسترش یافت. با وجود گسترش روز افزون روش تاپسیس سنتی و فازی این روش‌ها دارای کمبودها و نواقصی می‌باشند. یکی از مشکلات در مسائل تصمیم گیری در محیط فازی معادل بودن گزینه‌های مختلف است، در صورتی که اعداد فازی مثلثی متناظر با آن‌ها متفاوت می‌باشد؛ بنابراین، انجام تفکیک‌های بیشتر به منظور تشخیص همه گزینه‌ها ضروری می‌باشد. با محاسبه ضریب نزدیکی یا مقادیر فاصله از PIS و NIS نمی‌توان همه گزینه‌ها با ارزیابی‌های زبانی مختلف را رتبه بندی کرد؛ بنابراین، روش تاپسیس به منظور رتبه بندی بهتر در مسائل تصمیم گیری چند معیاره باید بهبود داده شود. بدین منظور، برای بهبود رتبه بندی در روش تاپسیس فازی، از دو روش مکمل مقدار میانگین و شکل اعداد فازی مثلثی استفاده کرده است. اگر $\tilde{S} = (S_l, S_m, S_r)$ یک عدد فازی مثلثی باشد، در این صورت مقدار فاصله تا PIS، فاصله تا NIS، ضریب نزدیکی (R_i)، میانگین و شکل به ترتیب از روابط ۹ تا ۱۳ بدست می‌آیند (۲۲).

رابطه ۹ $$d(Ai,PIS)=\sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)[(S_l-1)^2+(S_m-1)^2+(S_r-1)^2}$$

رابطه ۱۰ $$d(Ai,NIS)=\sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)[S_l^2+S_m^2+S_r^2]}$$

رابطه ۱۱ $$R(A_i)=\frac{d(Ai,NIS)}{d(Ai,NIS)+d(Ai,PIS)}$$

رابطه ۱۲ $$Mean\ (\tilde{S}) = S_m$$

رابطه ۱۳ $$Shape\ (\tilde{S}) = S_l^2+S_r^2$$

مراحل این روش به صورت زیر می‌باشد:

۱. در نظر گرفتن وزن پارامترها و ماتریس تصمیم گیری گزینه-معیار تشکیل شده

۲. تشکیل ماتریس وزن دار گزینه-معیار با ضرب وزن هر یک از معیارها در ستون مربوط به آن معیار در ماتریس تصمیم گیری

۳. در نظر گرفتن اعداد فازی مثلثی (۱، ۱، ۱) و (۰، ۰، ۰) به ترتیب برای راه حل ایده آل مثبت فازی (FPIS[1]) و راه حل ایده آل منفی فازی (FNIS[2])

۴. محاسبه مقدار میانگین (Mean)، مقدار شکل (Shape) مقادیر فاصله تا PIS، فاصله تا NIS و مقدار ضریب نزدیکی (R) برای گزینه‌های مختلف

۵. مقایسه مقادیر ضرایب نزدیکی تمامی گزینه‌ها را با هم و دادن رتبه و اولویت بالاتر به گزینه‌ای که بیشترین مقدار ضریب نزدیکی را داشته باشد. در صورت یکسان بودن ضریب نزدیکی گزینه ها، مرحله ۶ انجام خواهد گرفت.

۶. مقایسه مقادیر میانگین (Mean) دو گزینه با ضرایب نزدیکی یکسان و دادن رتبه و اولویت بالاتر به گزینه‌ای که بیشترین مقدار میانگین را داشته باشد. در صورت یکسان بودن میانگین گزینه ها، مرحله ۷ انجام خواهد گرفت.

۷. مقایسه مقادیر شکل (Shape) دو گزینه دارای میانگین یکسان و دادن رتبه و اولویت بالاتر به گزینه‌ای که بیشترین مقدار را داشته باشد. در صورت یکسان بودن شکل دو گزینه، آن دو گزینه دارای رتبه یکسانی خواهند بود.

مطالعه موردی

در این بخش کارایی و عملکرد مدل پیشنهادی، جهت ارزیابی ریسک نشان داده شده است. بدین منظور ارزیابی

1 Fuzzy positive ideal solution
2 Fuzzy negative ideal solution

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

جدول ۱. متغیرهای کلامی جهت تعیین وزن هر پارامتر (۲۹)

متغیر (اصطلاح) زبانی	درجه اهمیت به‌صورت عدد قطعی	درجه اهمیت به‌صورت عدد فازی مثلثی	معکوس عدد فازی مثلثی
اهمیت یکسان	۱	(۱، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۱)
کمی مهم‌تر (اهمیت ضعیف)	۲	(۱، ۳/۲، ۱/۲)	(۲/۳، ۱، ۲)
نسبتاً مهم	۳	(۱، ۳/۲، ۲)	(۱/۲، ۲/۳، ۱)
اهمیت زیاد	۴	(۳/۲، ۲، ۵/۲)	(۲/۵، ۱/۲، ۲/۳)
اهمیت خیلی زیاد	۵	(۲، ۲/۵، ۳)	(۱/۳، ۲/۵، ۱/۲)
کاملاً مهم‌تر	۶	(۵/۲، ۳، ۷/۲)	(۲/۷، ۱/۳، ۲/۵)

جدول ۲. میانگین حسابی مقایسات زوجی بین معیارها توسط کارشناسان

	معیار احتمال وقوع (O)	معیار شدت اثر (S)	معیار قابلیت کشف (D)
معیار احتمال وقوع (O)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۵۱، ۰/۷، ۱/۱۳)	**(۱/۸، ۲/۳، ۲/۸)**
معیار شدت اثر (S)	(۱، ۱/۵، ۲)	(۱، ۱، ۱)	**(۱/۶، ۲/۱، ۲/۶)**
معیار قابلیت کشف (D)	(۰/۳۹۸، ۰/۵۱، ۰/۷۸)	(۰/۴۲، ۰/۵۵، ۰/۸۵)	**(۱، ۱، ۱)**

ریسک‌های ایمنی و حوادث شغلی در واحد انبار مجتمع مس شهربابک با استفاده از این مدل انجام شده است.

یافته ها

در فاز اول مدل پیشنهادی، ابتدا با نظر ۵ نفر از کارشناسان و متخصصان ایمنی و مطابق با حوادث اتفاق افتاده، تعدادی ریسک مشخص شده‌اند. این ریسک‌ها عبارت‌اند از سقوط از ارتفاع (ریسک ۱)، لغزش و سرخوردن افراد (ریسک ۲)، گیر کردن افراد بین اجسام (ریسک ۳)، برخورد با اشیا متحرک (ریسک ۴)، تصادم با اجسام ساکن (ریسک ۵) و تنش‌های ماهیچه‌ای زیاد هنگام کار با اجسام (ریسک ۶).

در اولین مرحله از فاز دوم مدل پیشنهادی به منظور تعیین وزن پارامترهای وابسته به روش FMEA، از روش وزن‌دهی غیر خطی میخایلوف استفاده شده است. در این روش، مقایسات زوجی میان سه پارامتر با نظرسنجی از متخصصان و کارشناسان ایمنی و با استفاده از متغیرهای زبانی انجام شده است که اعداد فازی مثلثی (TFN) متناظر با متغیرهای زبانی مطابق با تحقیق وانگ و همکاران (۲۰۱۶)، در جدول ۱ نمایش داده شده است (۲۹). پس از نظرسنجی و مقایسات زوجی توسط هر یک از کارشناسان، میانگین حسابی نظرات، محاسبه شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. در نهایت با استفاده از داده‌های جدول ۲ و با استفاده از مدل وزن دهی غیرخطی میخایلوف مطابق با رابطه ۸، وزن هریک از پارامترهای وابسته به روش FMEA با نرم افزار لینگو ورژن ۹ محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است. جدول۳ ، شاخص سازگاری با متغیر λ و وزن پارامترهای احتمال وقوع، شدت اثر و قابلیت کشف بدست آمده از حل مدل غیرخطی میخایلوف را نشان می‌دهد که به ترتیب با متغیرهای W_1, W_2 و W_3 نشان داده شده‌اند.

در دومین مرحله از فاز دوم با نظرسنجی از متخصصان و کارشناسان ایمنی، ماتریس ریسک-پارامتر را با استفاده از متغیرهای زبانی تشکیل داده به طوری که سطرها نشان دهندهٔ ریسک‌های شناسایی شده و ستون‌ها نشان دهنده پارامترهای احتمال وقوع، شدت اثر و قابلیت کشف می‌باشند. جدول ۴، متغیرهای زبانی مورد استفاده در این مرحله و اعداد فازی تخصیص داده شده به هر یک را که با کمک متخصصان و مقالات گذشته تعریف شده است، نمایش می‌دهد (۳۰). جدول ۵، ماتریس ریسک-

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

جدول ۳. نتایج بدست آمده از مدل غیرخطی میخایلوف

W_3	W_2	W_1	λ
۰/۱۸۶	۰/۴۷۹	۰/۳۳۵	۰/۴۸۹

جدول ۴. متغیرهای زبانی تعریف شده برای پارامترهای وابسته در روش FMEA (۳۰)

متغیرهای زبانی	نماد	رتبه به صورت عدد قطعی	رتبه به صورت عدد فازی مثلثی	O	S	D
خیلی کم	VL	۱ و ۲	(۲، ۰، ۰)	۰ تا ۵ درصد	بی خطر	قابل شناسایی
کم	L	۳ و ۴	(۵، ۳، ۱)	۵ تا ۱۰ درصد	خطر کم	احتمال بالا در شناسایی
متوسط	M	۵ و ۶، ۷	(۷، ۵، ۳)	۱۰ تا ۱۵ درصد	خطر متوسط	احتمال ۵۰-۵۰ در شناسایی
زیاد	H	۸ و ۹	(۹، ۷، ۵)	۱۵ تا ۲۰ درصد	خطر زیاد	احتمال کم
خیلی زیاد	VH	۱۰	(۱۰، ۱۰، ۸)	بیش از ۲۰ درصد	شدید	غیر قابل شناسایی

جدول ۵. ماتریس ریسک-پارامتر برای هر ریسک با توجه به پارامترها

پارامترها	شدت اثر	احتمال وقوع	قابلیت کشف	رویکرد سنتی				رویکرد پیشنهادی				
ریسک‌های ایمنی	W_2 =۰.۴۷۹	W_1 =۰.۳۳۵	W_3 =۰.۱۸۶	شدت اثر	احتمال وقوع	قابلیت کشف	RPN	اولویت	ضریب نزدیکی (R)	میانگین (Mean)	شکل (Shape)	اولویت
سقوط از ارتفاع	VH	L	M	۱۰	۳	۵	۱۵۰	۱	۰/۶۴۲۵	۲/۲۴۲	۹/۱۸۳۵	۱
لغزش و سرخوردن افراد	L	VL	VL	۴	۲	۲	۱۶	۳	۰/۵	۰/۴۷۹	۰/۸۹۳۸	۴
گیرکردن افراد بین اجسام	M	VL	VL	۵	۱	۲	۱۰	۴	۰/۳۱۲۷	۱/۴۴۳	۵/۰۵۴۲	۶
برخورد با اشیا متحرک	L	VL	M	۲	۴	۷	۵۶	۲	۰/۵	۰/۷۸۹	۱/۸۴۱۵	۳
تصادم با اجسام ساکن	VL	VL	M	۱	۲	۵	۱۰	۴	۰/۵	۰/۳۱	۰/۷۱۸۳	۵
تنش‌های ماهیچه‌ای زیاد	VH	M	L	۱۰	۵	۳	۱۵۰	۱	۰/۵	۲/۳۴۱	۵/۶۵۱۶	۲

پارامتر را نشان می‌دهد که در آن برای تعیین هر یک از پارامترها، احتمال وقوع، شدت اثر و قابلیت کشف مربوط به هر ریسک از جدول ۴ استفاده شده است. همچنین مقادیر ضریب نزدیک، میانگین و شکل در روش تاپسیس تجدیدنظر شده بر اساس معادلات ۹ تا ۱۳ برای هر ریسک محاسبه شده است و سپس ریسک‌ها با استفاده از این مقادیر با هم مقایسه و رتبه‌بندی شده‌اند.

بحث

با توجه به محدودیت‌ها و معایب روش سنتی FMEA، تحقیقات بسیاری با هدف توسعه و بهبود عملکرد آن انجام شده است. همانطور که در بخش مقدمه ذکر گردید، سه مشکل اساسی در ارزیابی ریسک به روش FMEA، به ترتیب شامل ۱- ارزیابی پارامترهای حالات شکست و وزن دهی پارامترها به صورت عددی (بین ۱

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

تا ۱۰)، ۲- در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای هر یک از پارامترها (شدت اثر، احتمال وقوع و قابلیت کشف) و ۳- اولویت بندی ریسک‌ها بر اساس عدد RPN می‌باشد که در برخی از این موارد این اعداد با هم یکسان بوده یا دارای فاصله کم می باشند که اولویت بندی ریسک‌ها را با مشکل مواجه می کند.

با توجه به اولین مشکل مطرح شده و اینکه FMEA یک روش ارزیابی ریسک گروهی می‌باشد، بنابراین انواع مختلفی از عدم قطعیت‌ها نظیر مبهم بودن و غیر دقیق بودن نظرات در ارزیابی‌های ذهنی و کیفی افراد تیم وجود دارد. به منظور رفع مشکل عدم قطعیت‌ها در ارزیابی پارامترهای حالات شکست و وزن دهی پارامترها، تمامی ارزیابی‌ها در محیط فازی در قالب اعداد فازی مثلثی انجام شده است. استفاده از اعداد فازی و عبارات کیفی متناظر با آن‌ها بر قضاوت‌های ذهنی آنان منطبق‌تر است و می‌تواند با ابهامات موجود در قضاوت‌های ذهنی خبرگان و همچنین با نبود قطعیت موجود در سیستم مقابله کند؛ در نتیجه دقت و درستی نتایج ارزیابی ریسک افزایش می‌یابد (۶).

یکی از مشکلات دیگر در روش FMEA این است که اهمیت پارامترها یکسان نمی‌باشد، لذا در این تحقیق از روش برنامه ریزی غیر خطی میخایلوف (LFPP) برای اولین بار استفاده شده است؛ که در این روش وزن قطعی معیارها بدون مرحلهٔ رتبه بندی اعداد فازی ارائه می‌شود (۲۱و۲۹). پس از حل مدل غیر خطی میخایلوف توسط نرم افزار لینگو، نتایج در جدول ۳آورده شده است که مقدار λ به عنوان تابع هدف و مقادیر W_1, W_2 و W_3 به ترتیب وزن پارامترهای احتمال وقوع، شدت اثر و قابلیت کشف می‌باشد. مقدار $\lambda>0$، نشان دهنده این موضوع است که قضاوت و مقایسات زوجی کارشناسان با هم سازگار می‌باشند. همچنین، مقادیر W_1، W_2 و W_3 به ترتیب ۰/۳۳۵، ۰/۴۷۹ و ۰/۱۸۶ می‌باشد که برای پارامترهای شدت اثر و قابلیت کشف به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار وزن بدست آمده است. یکی از دلایل بالا بودن مقدار اهمیت پارامتر شدت اثر (W_2=۰/۴۷۹) نسبت به پارامتر احتمال وقوع در جدول ۳، بالا بودن وخامت و شدت صدمات وارد شده به پرسنل در صنعت مورد مطالعه می‌باشد. از سوی دیگر، پارامتر احتمال وقوع به دلیل شیوع زیاد حوادث در صنعت مورد مطالعه اهمیت دوم (W_1=۰/۳۳۵) را به خود اختصاص داده است. همچنین دلیل پایین بودن اهمیت پارامتر قابلیت کشف (W_3=۰/۱۸۶) نسبت به دو پارامتر دیگر بر اساس نظر متخصصین، مجهز بودن تجهیزات و سایت‌های این صنعت به وسایل شناسایی خطر و بازدیدهای روزانه می‌باشد.

مزیت روش LFPP به کار گرفته شده در این مدل پیشنهادی نسبت به روش AHP فازی این است که وزن قطعی پارامترها را بدون مرحله رتبه‌بندی اعداد فازی ارائه می‌دهد؛ در حالی‌که در روش AHP فازی نیاز به مرحلهٔ رتبه‌بندی اعداد فازی می‌باشد تا اعداد فازی بدست آمده رتبه‌بندی شوند. روش‌های مختلف رتبه‌بندی اعداد فازی می‌تواند منجر به نتایج مختلف شود. همچنین در روش AHP، ماتریس مقایسات باید کامل و سازگار باشد؛ در غیر اینصورت نمی‌توان از این روش استفاده کرد و یا به جواب‌های اشتباه خواهیم رسید، در حالی که در مدل LFPP با این محدودیت‌ها روبرو نیستیم. از سوی دیگر، در این روش بر خلاف روش AHP فازی به نرمال سازی ماتریس تصمیم‌گیری نیاز نمی‌باشد و برای به‌دست آوردن وزن و شاخص سازگاری از یک مدل ثابت و قطعی استفاده شده است (۲۱).

از آنجایی که روش FMEA یک مسئله تصمیم گیری می‌باشد، بنابراین باید در مورد اولویت بندی ریسک‌ها تصمیم گیری شود و به عبارت دیگر رتبه بندی ریسک‌ها الزامی می‌باشد. لذا در این تحقیق برای اولین بار از روش تاپسیس تجدید نظر شده استفاده شده است که در آن با سه معیار ضریب نزدیکی، میانگین و شکل به مقایسه بین ریسک‌ها می‌پردازد (۲۲). این مقادیر در جدول ۵ آورده شده است. از طرف دیگر، همان گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، رتبه بندی ریسک‌ها با استفاده از روش سنتی و رویکرد پیشنهادی با یکدیگر متفاوت می‌باشد؛ به عبارت دیگر، رتبه بندی انجام شده در روش سنتی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

برای برخی از ریسک‌ها دارای اولویت یکسان می‌باشد؛ به این ترتیب که ریسک تنش‌های ماهیچه‌ای زیاد و سقوط از ارتفاع هر دو در اولویت برابر با رتبه اول و همچنین ریسک‌های تصادم با اجسام ساکن و گیر کردن افراد بین اجسام در اولویت برابر با رتبه چهارم قرار گرفتند.

همچنین، با توجه به نتایج جدول ۵ می‌توان روش تاپسیس تجدیدنظرشده مورد استفاده در این رویکرد پیشنهادی را با تاپسیس معمولی مقایسه کرد. بدین صورت مطابق روش تاپسیس معمولی که تنها از ضریب نزدیکی برای مقایسه گزینه‌ها استفاده می‌شود پس از محاسبه ضرایب نزدیکی مطابق رابطه ۱۱ مشاهده شد که ریسک اول دارای اولویت اول، ریسک‌های دوم، چهارم، پنجم و ششم به دلیل یکسان بودن ضرایب نزدیکی در اولویت دوم و ریسک سوم در اولویت سوم می‌باشند.

این در حالی است که در روش پیشنهادی این تحقیق، ریسک‌ها با دقت و با توجه به اهمیت پارامترها و ارزیابی متخصصین از ریسک‌ها، رتبه بندی شده‌اند و هر کدام دارای یک اولویت اختصاصی (بین ۱ تا ۶) می‌باشند. در روش پیشنهادی، با توجه به اهمیت پارامترها تنها در صورتی دو ریسک رتبه بندی یکسان کسب می‌کنند که تمامی شرایط ذکر شده در گام‌های ۵ تا ۷ از روش تاپسیس تجدیدنظر شده را دارا باشند. بدین صورت که در روش تاپسیس تجدید نظر شده پس از محاسبه ضرایب نزدیکی مطابق رابطه ۱۱ مشاهده شد که ریسک اول دارای اولویت اول، ریسک‌های دوم، چهارم، پنجم و ششم به دلیل یکسان بودن ضرایب نزدیکی در اولویت دوم و ریسک سوم در اولویت سوم می‌باشند. با توجه به یکسان بودن ضرایب نزدیکی ریسک‌های شماره دوم، چهارم، پنجم و ششم به گام بعدی رفته و معیار میانگین را مطابق رابطه ۱۲ برای این ریسک‌ها محاسبه می‌کنیم. پس از محاسبه معیار میانگین، همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، میانگین ریسک ششم بیشتر از ریسک چهارم، میانگین ریسک چهارم بیشتر از ریسک دوم، میانگین ریسک دوم بیشتر از ریسک پنجم می‌باشند؛ بنابراین رتبه بندی نهایی ریسک‌ها به این صورت است که ریسک ۱ ≺ ریسک ۶ ≺ ریسک ۴ ≺ ریسک ۲ ≺ ریسک ۵ ≺ ریسک ۳ می‌باشند.

از ویژگی‌های مدل پیشنهادی این است که برای ارزیابی ریسک‌های ایمنی، زیست محیطی و بهداشتی در تمامی سازمان‌ها قابل استفاده می‌باشد. مدل پیشنهادی در مجتمع مس شهربابک به منظور ارزیابی ریسک‌های ایمنی ارائه گردید و نتایج تحقیق نشان داده است که در این مدل پارامتر شدت اثر و قابلیت کشف بترتیب دارای بیشترین و کمترین وزن با شاخص سازگاری مثبت می‌باشند. همچنین نتایج رتبه بندی نشان داده است که ریسک یک از بالاترین و ریسک سوم از کمترین اولویت برخوردار می‌باشند.

نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور رفع معایب روش سنتی FMEA نظیر رتبه بندی حالات شکست و وزن دهی پارامترها یک مدل پیشنهادی در محیط فازی ارائه گردیده است. از مدل غیر خطی میخایلوف جهت حذف مشکل یکسان بودن وزن‌های مربوط به پارامترهای ارزیابی ریسک در روش سنتی استفاده شد. همچنین، جهت اولویت بندی ریسک‌ها، از روش تاپسیس تجدید نظر شده استفاده گردید. جهت برطرف نمودن مشکل عدم قطعیت موجود در داده‌ها از توابع عضویت فازی مثلثی استفاده شد. به منظور نشان دادن برتری روش پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود، ریسک‌های معرفی شده توسط واحد ایمنی مجتمع مس شهربابک توسط روش پیشنهاد شده در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان دادند، روش پیشنهادی توانایی اولویت بندی ریسک‌ها و حذف محدودیت‌های ذکر شده در روش FMEA سنتی را دارا می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله کمال تشکر و قدردانی را از راهنمایی‌های کارکنان واحد ایمنی مجتمع مس شهربابک دارند.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

REFERENCES

1. Marhavilas PK, Koulouriotis DE. A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and realaccidents' data: Application in an aluminum extrusion industry. J Loss Prev Process Ind. 2008 Nov 30; 21(6): 596-603.
2. Morelli P, Vinci A, Galetto L, Magon G, Maniaci V, Banfi G. FMECA methodology applied to two pathways in an orthopaedic hospital in Milan. J Prev Med Hyg. 2007 Jun 2; 48(2).
3. Maleki A, Zohour A, EbadifardAzar F, Rezaee K, Ebadin M. Design and modelind of integrated structure QFD. FMEA in health care centers. 2010; 2:117-30. [Persian]
4. Sharma RK, Kumar D, Kumar P. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. International Journal of Quality & Reliability Management. 2005 Dec 1; 22(9): 986-1004.
5. Chanamool N, Naenna T. Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department. Appl Soft Comput. 2016 Jun 30; 43: 441-53.
6. Liu HC, Liu L, Liu N, Mao LX. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. Expert Systems with Applications. 2012 Dec 1; 39(17): 12926-34.
7. Kutlu AC, Ekmekçioğlu M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. Expert Systems with Applications. 2012 Jan 31; 39(1): 61-7.
8. Zhang X, Jin F, Liu P. A grey relational projection method for multi-attribute decision making based on intuitionistic trapezoidal fuzzy number. Appl Math Model. 2013 Mar 1; 37(5): 3467-77.
9. Chin KS, Wang YM, Poon GK, Yang JB. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. Computers & Operations Research. 2009 Jun 30; 36(6): 1768-79.
10. Geum Y, Cho Y, Park Y. A systematic approach for diagnosing service failure: Service-specific FMEA and grey relational analysis approach. Mathematical and Computer Modelling. 2011 Dec 31; 54(11):3126-42.
11. Seyed-Hosseini SM, Safaei N, Asgharpour MJ. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. Reliab Eng Syst Saf. 2006 Aug 31; 91(8): 872-81.
12. Tay K, Lim C. A Guided Rule Reduction System for Prioritization of Failures in Fuzzy FMEA. Applications of Soft Computing. 2006: 301-10.
13. Sharma RK, Kumar D, Kumar P. Modeling system behavior for risk and reliability analysis using KBARM. Quality and Reliability Engineering International. 2007 Dec 1; 23(8): 973-98.
14. Pillay A, Wang J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. Reliability Engineering & System Safety. 2003 Jan 1; 79(1): 69-85.
15. Chang CL, Wei CC, Lee YH. Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. Kybernetes. 1999 Dec 1; 28(9): 1072-80.
16. Liu HC, Liu L, Bian QH, Lin QL, Dong N, Xu PC. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. Expert Systems with Applications. 2011 Apr 30; 38(4): 4403-15.
17. Liu HC, Liu L, Bian QH, Lin QL, Dong N, Xu PC. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. Expert Systems with Applications. 2011 Apr 30;38(4):4403-15.
18. Abdelgawad M, Fayek AR. Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. J Constr Eng Manag. 2010 Feb 26;136(9):1028-36.
19. Liu HC, Liu L, Liu N, Mao LX. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. Expert Systems with Applications. 2012 Dec 1;39(17):12926-34.
20. Zadeh L.A. A note on a Z-Numbers. Journal of Information Sciences. 2011;181(14):2923-32.
21. Wang YM, Chin KS. Fuzzy analytic hierarchy process: A logarithmic fuzzy preference programming methodology. Int J Approx Reason. 2011 Jun 1;52(4):541-53.
22. Pei Z. A note on the TOPSIS method in MADM problems with linguistic evaluations. Appl Soft Comput. 2015 Nov 30;36:24-35.
23. Zadeh LA. Fuzzy sets. Information and control. 1965 Jun 1;8(3):338-53.
24. Yager RR, Zadeh LA. An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
25. Chen CT. A fuzzy approach to select the location of the distribution center. Fuzzy Sets Syst. 2001 Feb 16;118(1):65-73.
26. Tadić S, Zečević S, Krstić M. A novel hybrid MCDM

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]

model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy VIKOR for city logistics concept selection. Expert Systems with Applications. 2014 Dec 15;41(18):8112-28.

27. Rezaei J, Fahim PB, Tavasszy L. Supplier selection in the airline retail industry using a funnel methodology: Conjunctive screening method and fuzzy AHP. Expert Systems with Applications. 2014 Dec 15;41(18):8165-79.

28. Chang DY. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. Eur J Oper Res. 1996 Dec 20;95(3):649-55.

29. Wang Q, Wang H, Qi Z. An application of nonlinear fuzzy analytic hierarchy process in safety evaluation of coal mine. Saf Sci. 2016 Jul 31;86:78-87.

30. Liu HT, Tsai YL. A fuzzy risk assessment approach for occupational hazards in the construction industry. Saf Sci. 2012 Apr 30;50(4):1067-7

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2025-02-07]

[DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.10.6]