



## Risk assessment using failure modes and effects analysis on the basis of SWARA-RE-VIKOR fuzzy multi-criteria decision-making methods: A case study of the city gate gas pressure reduction station

**Rajabali Hokmabadi**, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran and Faculty member of Health School, North Khorasan University of Medical Sciences, Bojnurd, Iran  
**Esmail Zarei**, Department of Safety Science, College of Aviation, Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, AZ, 86301, USA and Robertson Safety Institute (RSI), Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott, AZ, 86301, US.

✉ **Ali Karimi**, (\*Corresponding author), Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. [a\\_karimi@sina.tums.ac.ir](mailto:a_karimi@sina.tums.ac.ir)

### Abstract

**Background and aims:** Failure modes and effects analysis (FMEA) is a risk-management method used in industries promote the safety of processes and systems. Fuzzy multi-criteria decision methods are methods that choose the best option from several different criteria. The purpose of this article is to assess the risk using the FMEA method based on stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) - relative-entropy (RE) - ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) fuzzy multi-criteria decision-making (MCDM) methods in an urban gateway gas pressure reduction station.

**Methods:** In this descriptive-analytical study, SWARA fuzzy methods were used to determine the weight of risk factors, RE was used to weigh team members, and VIKOR was employed to rank failure modes, such that these modes were identified and evaluated based on the opinion of four experts with at least five years of experience. At the end, the sensitivity and comparative analysis of the proposed approach was performed.

**Results:** Six failure modes were identified in the main equipment of Darveza Shahri gas pressure reduction station. The failure mode of the regulator, filter, and the odorize system ranked first, second, and third in terms of risk priority. The risk intensity index had a higher priority than other indices. Twelve sensitivity analysis tests were performed, and the failure mode of the regulator and the heater were the least and the most sensitive, respectively. Furthermore, the results of the sensitivity and comparative analysis supported the validity of the proposed approach.

**Conclusion:** According to the results of SWARA, RE and VIKOR fuzzy methods, the proposed approach eliminates the problem of the same weights of risk factors, the uncertainty in the data (experts' opinions) and the prioritization of failure modes, compared to the traditional FMEA method. It can also prioritize risks more effectively.

**Conflicts of interest:** None

**Funding:** None

### Keywords

Multi-criteria decision making (MCDM)

Fuzzy set

SWARA method

Entropy method

VIKOR method

FMEA method

Received: 2022/06/1

Accepted : 2022/12/29

## INTRODUCTION

In the gas industry, the reliability of data, including failure of the equipment and the sequence of these events and accidents, is of substantial importance for securing system availability and production continuity. In industrial contexts, datasets are collected and stored under various conditions, contributing to the growing challenge for identifying and assessing truly valuable data and information to improve decision quality, particularly in relation to safety-related risks. Different industries including the gas industry face various operational problems, complexities, uncertainties, and high risk; Hence, risk assessment can play a significant role in identifying, prioritizing, and assessing hazards and taking precautionary measures in this regard. City gate stations (CGS) are crucial facilities in the gas transportation system at the consumption point of industrial towns, major industries, factories, and cities. Any malfunction in the operation of such systems can cause financial losses and casualties. Therefore, in order to prevent undesired events, it is important to carry out a safety and risk analysis of the CGS operations. The safety and risk analysis includes scientific and systematic tools for the prediction, identification and prioritization of the main risks of equipment in industrial and process systems.

The failure mode and effect analysis (FMEA) has been widely adopted to define, identify, and remove potential and recognized hazards and can help to improve the safety indicators of a given system. This tool is essentially used for qualitative analysis, which examines the systems or subsystems to identify the probable faults of system constituents and attempts to evaluate the effects of probable faults on other components of the system.

Despite the widespread use of this method, traditional FMEA has the following limitations: (1) Crisp values are used to rate the risk levels of failure modes with respect to risk factors, however, obtaining precise numerical judgments for qualitative factors are difficult or even impossible in many practical applications because of the limitations in individuals' expertise and data. In addition, the approach fails to appropriately address the uncertainty and subjectivity inherent to team members, in judgments. (2) The three risk factors, namely, occurrence, severity, and detection, are assigned equal importance weights in the risk calculation process, however, different

weights may lead to different risk priorities. Thus, the traditional FMEA is unsuitable for addressing problems in which the risk factors have different importance weights. (3) The use of multiplication for the risk priority number (RPN) is debatable because its mathematical formula is strongly sensitive to variations in the evaluations of risk factors.

Thus, it is necessary to seek approaches that can compensate for the limitations of the traditional FMEA method and strengthen the assessment capability for ranking failure modes according to the three relevant risk factors. To overcome one or more limitations and improve the effectiveness of the traditional FMEA methods, an increasing number of approaches have been developed.

Fuzzy stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) and fuzzy relative-entropy (RE) are suitable tools to obtain the weights of criteria and experts in terms of criteria, respectively. However, to the best of our knowledge, no investigation has integrated fuzzy multi-criteria decision-making (MCDM) methods with fuzzy SWARA and RE, especially for the assessment of failure in FMEA. The current study fills this gap and proposes an integrated approach for FMEA. In the proposed framework, fuzzy SWARA and fuzzy RE are employed to obtain the weights of risk factors and the weights of FMEA team members with respect to each risk factor, respectively. The fuzzy Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) method is used to prioritize the risk levels of potential failure modes.

## METHODOLOGY

In this descriptive-analytical study, SWARA fuzzy methods were used to determine the weight of risk factors, Proximity Entropy Weight (PEW) and Similarity Entropy Weight (SEW) were employed to weight team members, and VIKOR was used to rank failure situations. Failures were identified based on the opinions of four decision makers with at least five years of experience, in order to evaluate the weight of risk factors and strategies using linguistic variables. Finally, a case study of a CGS pressure reducing station in North Khorasan Province was presented to demonstrate the potential applications and benefits of the proposed approach. Sensitivity analyses and matching the results were also carried out to show the advantages and validity of the proposed approach. The flowchart of the proposed FMEA model is shown in Figure 1.

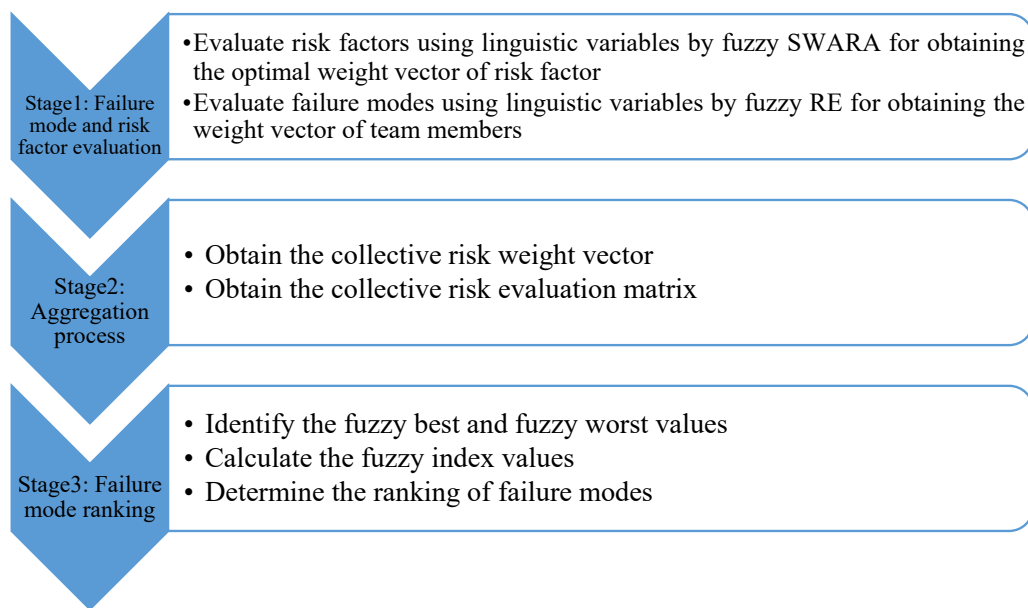


Figure 1. Assessment framework of the proposed approach

Table 1. FMEA for the considered CGS

No	Failure mode	Failure case	Failure effect
FM <sub>1</sub>	Filter failure	Filter corrosion, dirty inlet gas, filter blockage, defective outlet valve, dirt filter, filter element rupture	Disruption of gas filtration, dirty gas, damage to the filter body, gas leakage
FM <sub>2</sub>	Heater failure	Heater chamber failure, failure gas pipes, fire failure, chimney failure, failure water expansion tank, fuel supply and control system failure	Increase of the exhaust gas temperature, perforation of helical tubes, creation of sediment in spiral pipes, rust and perforation of the wall, gas leakage
FM <sub>3</sub>	Regulator failure	Disability and physical breakdown, rupture of the main diagram	Increase of gas pressure for the consumer, damage to the station equipment
FM <sub>4</sub>	Counter failure	Burning of bearings, unbalanced turbine and axis, increase gas speed, gas pressure drops	Incorrect display of the gas flow rate, the amount of gas is not displayed
FM <sub>5</sub>	Safety equipment failure	Damage to the diaphragm or disk, spring breakdown, malfunction of the input adjustment screw	Disconnection of the gas through the pressure shut-off valve and safety valve, damage to station equipment,
FM <sub>6</sub>	Odorize failure	Improper operation of the injection pump, inadequate diameter of the orifice, orifice closure	Toxic and harmful gas leakage, possibility of not detecting gas leakage, possibility of fire and explosion

## RESULTS

In reality, many failure modes and causes are related to the CGS station. Six failure modes of the station's main equipment were selected based on the available maintenance and repair reports of the station's equipment, which were expressed as FM<sub>1</sub>, FM<sub>2</sub>...FM<sub>6</sub> in this study. These failure modes, the causes, and the possible effects are described in Table 1.

In this study, the importance weights of risk factors, and the qualitative assessments of failure modes with respect to risk factors are expressed as linguistic variables. These linguistic variables

are shown in Tables 2, and 3.

Evaluations of the importance of the weights of the risk factors (severity, occurrence, and detection) by team members are presented in Tables 4, and 5.

The following steps were then taken to achieve the main goal and develop an effective decision-making model. Different phases of the fuzzy SWARA-RE-VIKOR methods must be completed consecutively to prioritize the identified risks. Hence, a summary of the step-by-step application of important phases of this technique is presented

**Table 2.** Linguistic variables for evaluating the weights of risk factors.

Linguistic variables	Very low (VL)	Low (L)	Medium (M)	High (H)	Very high (VH)
Triangular fuzzy numbers	(0,0,0.25)	(0,0.25,0.5)	(0.25,0.5,0.75)	(0.5,0.75,1)	(0.75,1,1)

**Table 3.** Linguistic variables for rating the failure modes with respect to risk factors

Linguistic variables	Very low (VL)	(L) Low	Slightly low (SL)	Medium (M)	Slightly high (SH)	High (H)	Very high (VH)
Triangular fuzzy numbers	(0,0,1)	(0,1,3)	(1,3,5)	(3,5,7)	(5,7,9)	(7,9,10)	(9,10,10)

**Table 4.** Evaluations of failure modes with respect to risk factors by team members

	Severity				Occurrence				Detection			
	TM <sub>1</sub>	TM <sub>2</sub>	TM <sub>3</sub>	TM <sub>4</sub>	TM <sub>1</sub>	TM <sub>2</sub>	TM <sub>3</sub>	TM <sub>4</sub>	TM <sub>1</sub>	TM <sub>2</sub>	TM <sub>3</sub>	TM <sub>4</sub>
FM <sub>1</sub>	SH	H	H	SH	H	M	SH	SH	SL	M	M	SL
FM <sub>2</sub>	H	H	VH	VH	M	M	SL	SL	VL	VL	L	L
FM <sub>3</sub>	H	VH	H	VH	SH	SH	H	H	M	SH	M	SL
FM <sub>4</sub>	M	SH	SH	SH	M	SL	SL	M	M	VL	SL	M
FM <sub>5</sub>	SH	SH	H	H	SL	M	M	SL	M	M	SL	SL
FM <sub>6</sub>	SH	H	VH	VH	SH	SH	H	H	SL	M	SL	SL

**Table 5.** Evaluations of the importance of the weights of the risk factors (severity, occurrence, and detection) by team members

	TM <sub>1</sub>	TM <sub>2</sub>	TM <sub>3</sub>	TM <sub>4</sub>
Severity	H	H	H	VH
Occurrence	M	H	M	M
Detection	L	L	L	L

in the following:

- 1) Calculation of the weight of risk factors by fuzzy SWARA
- 2) Determining the weight of team members ( $\alpha = 0.5$  is considered)
- 3) Determining the risk assessment matrix and cumulative fuzzy weighted vector of risk factors
- 4) Determining the best and worst fuzzy values for all criteria
- 5) Calculation of fuzzy index values
- 6) Determining the ranking of failure modes (ranking all the failure modes by descending these crisp values). The ranking results are shown in Table 6. In this step, the alternatives are sorted by the values S, R, and Q in three groups from small to large. The best alternative is the one with the smallest Q value provided. The ranking of all the failure modes is  $Q_r < Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 < Q_5 < Q_6$ . The comprehensive evaluation results indicate that the most serious failure mode is  $FM_r$ , and it

should be assigned the highest risk priority.

#### Sensitivity analysis

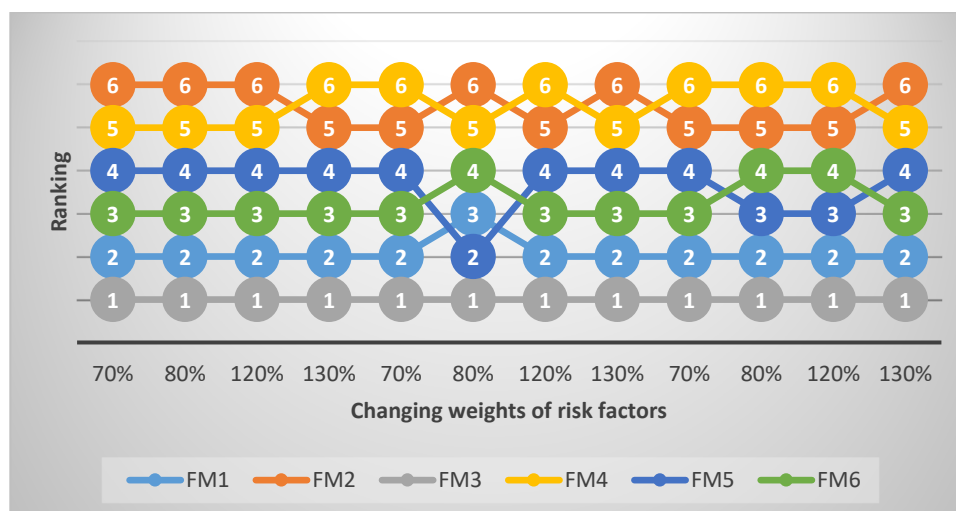
The sensitivity analysis in this subsection contains three main parts. First, an analysis is conducted on the control parameter  $\alpha$  to explore the influence of changing values of  $\alpha$  on the final ranking of failure modes. Then, an analysis of risk factors is performed to explore the influence of importance of the weights fluctuation on the performance of failure modes. Finally, two test criteria are used to evaluate the proposed ranking approach.

1) Sensitivity analysis of the control parameter  $\alpha$  and the risk factors: The process shows a good sensitivity in the final ranking in this work. The control parameter  $\alpha$  must be used to combine PEW and SEW in determining the weights of team members.

2) Analysis of risk factors to investigate the effect of weight fluctuations of importance on the

**Table 6.** Ranking of failure modes

	Utility value	Regret value	Final VIKOR index	Ranking
FM <sub>1</sub>	0.18274	0.077333	0.286939886	2
FM <sub>2</sub>	0.07347667	0.013583	0.820662632	6
FM <sub>3</sub>	0.30763333	0.0987	0.10483871	1
FM <sub>4</sub>	0.00781	0.03124	0.804408799	5
FM <sub>5</sub>	0.13297167	0.036333	0.630176387	4
FM <sub>6</sub>	0.14493333	0.065	0.340199727	3



**Figure 2.** Ranking the results of sensitivity analysis by changing the weights of risk factors

**Table 7.** Ranking of failure modes with different methods

	Traditional FMEA		SWARA-VIKOR		Proposed approach	
	RPN	Ranking	Q	Ranking	Q	Ranking
FM <sub>1</sub>	20	2	0.235	2	0.286939886	2
FM <sub>2</sub>	12	4	0.630	6	0.820662632	6
FM <sub>3</sub>	28	1	0.109	1	0.10483871	1
FM <sub>4</sub>	4	5	0.445	4	0.804408799	5
FM <sub>5</sub>	15	3	0.580	5	0.630176387	4
FM <sub>6</sub>	12	4	0.335	3	0.340199727	3

performance of failure situations: For three risk factors, twelve sensitivity analysis experiments are conducted, as shown in Figure 2. It is revealed that failure mode FM<sub>3</sub> retains the highest risk priority by changing the values of risk factor weights. Meanwhile, failure mode FM<sub>2</sub> possesses the lowest risk priority in most experiments.

#### Comparative analysis

To verify the advantages of the proposed approach, a comparative analysis is conducted between the proposed method and two other methods, namely, the traditional FMEA and SWARA-VIKOR. The results yielded by different

methods are shown in Table 7. It shows that despite some differences in the ranking of failure modes, the failure mode with the highest risk level is still FM<sub>3</sub>. This finding validates the results obtained by the proposed approach to some degree.

#### CONCLUSION

This paper presents a new risk priority model for FMEA, which integrates SWARA, RE, and VIKOR in fuzzy environment. The fuzzy environment method is used to express imprecise or uncertain risk evaluation information. Fuzzy SWARA is used to obtain the weights of risk

factors. Moreover, a combination of PEW and SEW is used to obtain the weights of FMEA team members with respect to each risk factor, thereby, allowing for their different knowledge backgrounds. Subsequently, the fuzzy VIKOR method is used to rank the failure modes. Finally, a case study of a CGS station in Iran is provided to illustrate the potential application and benefits of the proposed FMEA approach. Sensitivity and comparative analyses are then conducted to demonstrate the advantages and validity of the proposed FMEA.

The results of sensitivity, validity and adaptive analyses revealed that the proposed approach has good stability, validity and adaptability, therefore, it can overcome the shortcomings of the FMEA method, improve the effectiveness of the FMEA method, and provide useful information to help manage equipment risks. Finally, an appropriate framework for improving the risk assessment of safety requirements was implemented through FMEA, which recommends the necessary guidance for conducting risk analysis in similar industries.

One of the strengths of this research was the novelty of implementing this method in combination with one of the important and sensitive centers of gas transmission lines. Although this study eliminated some of the

limitations of the FMEA method, there are still limitations that need to be considered. It is suggested that future studies focus on the following aspects: First, it would be intriguing to use fuzzy and linguistic Z numbers to obtain qualitative risk assessment information in a very complex decision environment. Second, other MCDM methods, such as MULTIMOORA, GRA, and WASPAS, can be applied to the FMEA method. Finally, the proposed model for FMEA can be easily applied to other risk analysis problems.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The present study is taken from a PhD dissertation on occupational health with the code of ethics (IR.TUMS.SPH.REC.1400.151), approved by Tehran University of Medical Sciences. The authors of this article would like to thank the National Iranian Gas Company and the Department of Research Assistant of Tehran University of Medical Sciences for their cooperation and financial support of the present study.

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this manuscript.

#### How to cite this article:

Rajabali Hokmabadi, Esmail Zarei, Ali Karimi. Risk assessment using failure modes and effects analysis on the basis of SWARA-RE-VIKOR fuzzy multi-criteria decision-making methods: A case study of the city gate gas pressure reduction station. *Iran Occupational Health*. 2023 (01 Mar);19:33.

**\*This work is published under CC BY-NC 4.0 licence**



## ارزیابی ریسک با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی SWARA-RE-VIKOR: مطالعه موردی ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه شهری (CGS)

**رجبعلی حکم آبادی:** گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران و عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران.

**اسماعیل زارعی:** دپارتمان علوم ایمنی، دانشکده هوانوردی، دانشگاه هوافضا امبری ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا و انیستیتو ایمنی رابرت سان، دانشگاه هوافضا امبری ریدل، پرسکات، آریزونا، آمریکا.

**علی کریمی:** (\* نویسنده مسئول) گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران. a\_karimi@sina.tums.ac.ir

### چکیده

#### کلیدواژه‌ها

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره  
مجموعه فازی  
روش SWARA  
روش آنتروپی  
روش VIKOR  
روش FMEA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۸

**زمینه و هدف:** FMEA یک روش شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی حالات شکست بوده که در صنایع به منظور ارتقاء ایمنی سیستم‌ها استفاده می‌شود. روش‌های فازی تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش‌هایی هستند که از بین چندین معیار مختلف، بهترین گزینه را انتخاب می‌کنند؛ لذا، هدف این مقاله، ارزیابی ریسک با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی SWARA-RE-VIKOR در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه شهری است.

**روش بررسی:** در این مطالعه توصیفی-تحلیلی، از روش‌های فازی SWARA برای تعیین وزن ریسک فاکتورها، RE جهت وزن دهی اعضاء تیم و VIKOR برای رتبه‌بندی حالات شکست استفاده گردید به طوری که حالات شکست بر اساس نظر چهار کارشناس با حداقل پنج سال سابقه، شناسایی و ارزیابی شد. در انتها، آنالیز حساسیت و تطبیقی رویکرد پیشنهادی انجام گرفت. **یافته‌ها:** شش حالت شکست در تجهیزات اصلی ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه شهری شناسایی گردید. حالت شکست رگلاتور، فیلتر و سیستم بودارکننده، رتبه‌های اول، دوم و سوم اولویت ریسک را به خود اختصاص دادند. شاخص شدت ریسک از اولویت بالاتری نسبت به سایر شاخص‌ها برخوردار بود. دوازده تست آنالیز حساسیت انجام گرفت که حالت شکست رگلاتور و گرمکن، به ترتیب کمترین و بیشترین حساسیت را داشتند. همچنین، نتایج آنالیز حساسیت و تطبیقی نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی معتبر است.

**نتیجه‌گیری:** رویکرد پیشنهادی با توجه به کاربرد روش‌های فازی SWARA، RE و VIKOR، به ترتیب مشکل یکسان بودن وزن‌های مربوط به ریسک فاکتورها، عدم قطعیت موجود در داده‌ها (نظرات متخصصان) و اولویت‌بندی حالت‌های شکست را حذف نموده و نسبت به روش FMEA سنتی از توانایی بالاتری در اولویت‌بندی ریسک‌ها برخوردار است.

**تعارض منافع:** گزارش نشده است.  
**منبع حمایت‌کننده:** ندارد.

شیوه استناد به این مقاله:

Rajabali Hokmabadi, Esmaeil Zarei, Ali Karimi. Risk assessment using failure modes and effects analysis on the basis of SWARA-RE-VIKOR fuzzy multi-criteria decision-making methods: A case study of the city gate gas pressure reduction station. Iran Occupational Health. 2023 (01 Mar);19:33.

\*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC 4.0 صورت گرفته است

## مقدمه

بهترین-بدترین (BWM<sup>5</sup>)، آنتروپی نسبی (RE<sup>6</sup>) و روش ویکور (VIKOR<sup>7</sup>) برای ارزیابی خطرات استفاده کردند. قوشچی و همکاران (۱۷)، یک رویکرد جدید برای FMEA بر اساس روش‌های BWM و روش بهینه‌سازی چند هدفه با تحلیل نسبت (MOORA<sup>8</sup>) پیشنهاد کردند.

در دهه‌های گذشته، مسائل مربوط به رویکردهای اولویت ریسک، توجهات پژوهشی قابل توجهی را به خود معطوف داشته و توسعه‌های مختلفی برای غلبه بر عیوب مدل‌های کلاسیک FMEA پیشنهاد شده است. مطالعات بسیار، روش‌های مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی را مقوله‌ای مؤثر و محبوب برای اولویت‌بندی سطوح ریسک در FMEA گزارش کرده‌اند (۱۸-۲۶). از محدودیت‌های روش FMEA می‌توان به ارزیابی ذهنی کارشناسان، عدم وجود مقادیر وزنی پارامترهای ریسک و در نظر نگرفتن شرطی بودن بین رویدادهای شکست اشاره کرد (۹،۱۱،۱۶،۲۷،۲۸)؛ در نتیجه، باید به دنبال رویکردهایی بود تا بتوان کمبود روش FMEA را جبران نمود. بر این اساس، مطالعه حاضر، این شکاف پژوهشی را در نظر گرفته و با استفاده از روش‌های MCDM فازی به دنبال رفع این محدودیت‌ها است.

تعداد فزاینده‌ای از روش‌ها جهت رفع محدودیت‌های روش FMEA توسعه یافته است (۲۷). در بین این رویکردها، مقوله‌ای که اغلب مورد مطالعه قرار می‌گیرد، رویکردهای مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی است (۲۹-۳۱) که می‌توان به روش‌های AHP (۳۴-۳۲)، DEMATEL<sup>9</sup> (۳۵-۳۷)، GRA<sup>10</sup> (۳۸-۴۰)، PROMETHEE<sup>11</sup> (۴۱-۴۴)، VIKOR (۴۵-۴۶)، MULTIMOORA (۴۷)، Z-MOORA (۱۷)، ELECTRE<sup>13</sup> (۵۰) و Z-WASPAS<sup>12</sup> اشاره کرد.

با توجه به اینکه از یک سو، قضاوت‌های افراد در مورد ارجحیت‌ها اغلب برای تخمین ارزش عددی دقیق، غیرشفاف بوده و از سوی دیگر، منطق فازی برای به دست آوردن مسائل دارای ابهام و عدم قطعیت، مفید

قابلیت اطمینان تجهیزات در صنایع گاز، جهت تأمین امنیت، قابلیت دسترسی سیستم و تداوم تولید از اهمیت قابل توجهی برخوردار است (۱). در صنایع، کلیه داده‌ها تحت شرایط مختلف، جمع‌آوری و ذخیره شده که شناسایی و ارزیابی دقیق آن‌ها می‌تواند اطلاعات مفیدی را جهت بهبود کیفیت تصمیم‌گیری، به‌ویژه در ارتباط با ارزیابی ریسک ایمنی صنایع، ارائه دهد (۲). صنایع مختلف از جمله صنعت گاز با مشکلات گوناگون عملیاتی، پیچیدگی‌ها، عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های بالایی مواجه هستند؛ بنابراین، ارزیابی ریسک می‌تواند نقش بسزایی در شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه در این زمینه داشته باشد (۳).

ایستگاه تقلیل فشار دروازه شهری (CGS<sup>1</sup>)، یکی از تأسیسات بسیار مهم در سیستم حمل‌ونقل گاز در نقاط مصرف شهرک‌های صنعتی، صنایع بزرگ، کارخانجات و شهرها به شمار می‌رود (۴،۵). هرگونه اختلال در عملکرد چنین سیستمی می‌تواند منجر به خسارات مالی و تلفات جانی شود (۴،۶)؛ بنابراین، انجام تجزیه و تحلیل ایمنی و ریسک عملیات این ایستگاه‌ها به منظور پیشگیری از رویدادها و حوادث ناخواسته دارای اهمیت است (۴،۷). آنالیز ریسک، ابزاری علمی و سیستماتیک برای پیش‌بینی، شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های اصلی تجهیزات در سیستم‌های صنعتی و فرآیندی است (۴،۸).

تکنیک تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA<sup>2</sup>) به‌طور گسترده برای پیش‌بینی، شناسایی و حذف خطرات بالقوه، شناخته شده که می‌تواند در بهبود شاخص‌های ایمنی یک سیستم مؤثر واقع شود (۹-۱۱). بسیاری از نویسندگان، از این روش در صنعت گاز استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، لیو و همکاران (۱۲)، وزدانی و همکاران (۱۳) و قاسمی و همکاران (۱۴) از روش FMEA برای مدیریت ریسک استفاده کردند. بورال و همکاران (۱۵)، یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM<sup>3</sup>) با فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP<sup>4</sup>) را با تحلیل مقایسه‌ای واقعی ایده آل فازی چند ویژگی اصلاح‌شده پیشنهاد کردند. تیان و همکاران (۱۶) از روش ترکیبی

5 Bešt-Worst Method

6 Relative-Entropy

7 ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

8 Multi-Objective Optimization Method by Ratio Analysis

9 DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory

10 Grey Relational Analysis

11 Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation

12 Z-Weighted Aggregates Sum Product Assessment

13 ELimination Et Choice Translating REality

1 City Gate Station

2 Failure Mode and Effect Analysis

3 Multiple-criteria decision-making

4 fuzzy analytic hierarchy process



شکل ۱. چارچوب کلی رویکرد پیشنهادی

روش SWARA فازی یکی از روش‌های تعیین مقادیر وزنی است که در فرآیند تصمیم‌گیری نقش مهمی ایفا می‌کند. این روش توسط کرزولیین و همکارانش تهیه شده است و ویژگی اصلی آن امکان ارزیابی نظر خبرگان در مورد اهمیت معیارها در فرآیند تعیین وزن آن‌ها می‌باشد که دارای هفت مرحله است که به شرح زیر است (۵۳، ۵۲):

مرحله ۱) تعیین و دسته‌بندی معیارهای ارزیابی: معیارهای ارزیابی در این مرحله با توجه به عواملی مانند نوع و اهداف پروژه تعیین گردید و سپس، معیارها به ترتیب اهمیت ارزیابی شدند. به مهم‌ترین معیارها، رتبه بالاتر و کم‌اهمیت‌ترین آن‌ها رتبه پایین‌تری تعلق گرفت. مرحله ۲) مرتب کردن معیارها بر اساس اهمیت مورد انتظار: ابتدا، شاخص‌های مدنظر تصمیم‌گیرندگان نهایی بر اساس درجه اهمیت، انتخاب و مرتب شدند. بر این اساس، بحرانی‌ترین شاخص‌ها در رده‌های بالاتر و کم‌اهمیت‌ترین شاخص‌ها در رتبه‌های پایین قرار گرفتند. مرحله ۳) اهمیت مقایسه‌ای: در این مرحله، تصمیم‌گیرنده اهمیت نسبی شاخص‌ها را برای هر شاخص را در ارتباط با شاخص قبلی 1- تعیین نمود. مرحله ۴) تعیین ضریب اهمیت مقایسه‌ای: در این مرحله، اهمیت مقایسه شده هر شاخص با شاخص قبلی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مقایسه شاخص دوم به بعد می‌بایست اهمیت مقایسه‌ای شاخص اول را با مقدار یک، جمع کرد (فرمول ۱).

است، لذا از روش‌های فازی SWARA و RE جهت تعیین وزن ریسک فاکتورها و اعضای تیم استفاده گردید. روش VIKOR یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره توافقی بوده به طوری که معیار رتبه‌بندی در این روش بر اساس درجه نزدیکی آن‌ها به جواب ایده آل است. این روش می‌تواند یک مقدار ماکزیمم مطلوبیت گروهی را برای اکثریت و یک مینیمم تأثیر انفرادی را برای مخالفت ارائه نماید. این روش از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بوده که هدف آن، انتخاب بهترین گزینه است؛ لذا هدف از این مطالعه، ارائه رویکردی جهت ارزیابی و اولویت‌بندی حالات شکست با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی SWARA-RE- VIKOR در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه شهری است. وزن‌دهی ریسک فاکتورها اولویت‌بندی رتبه‌بندی

### روش بررسی

این مطالعه توصیفی-تحلیلی در سال ۱۴۰۰ و با هدف بهبود ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های فازی تصمیم‌گیری چندمعیاره SWARA-RE- VIKOR در یکی از ایستگاه‌های تقلیل فشار دروازه شهری استان خراسان شمالی انجام گرفت. چارچوب کلی رویکرد پیشنهادی بر اساس شکل ۱ است.

در مرحله اول، وزن‌دهی ریسک فاکتورها با روش SWARA فازی و متخصصان با روش RE فازی انجام گرفت.

$$5) \quad R_l = \sum_{i=1}^n \left| w_i^l \times \ln \left( \frac{w_i^l}{w_i} \right) \right|$$

هرچه نظر فردی  $e^l$  به گروه نزدیکتر باشد،  $R_l$  کوچکتر است.  $R_l$  را می‌توان برای نشان دادن نزدیکی  $e^l$  فردی به قضاوت گروه استفاده کرد.  $R_l = 0$ ، زمان یکسان بودن بردار اولویت هر فرد است.

- محاسبه مجموع مقادیر مطلق RE بین  $e^l$  فردی و سایر اعضای گروه

$$6) \quad R_l' = \sum_{h=1, h \neq l}^m \cdot \sum_{i=1}^n \left| w_i^l \times \ln \left( \frac{w_i^l}{w_i^h} \right) \right|$$

هرچه نظر  $e^l$  فردی، به سایر اعضای گروه بیشتر باشد،  $R_l'$  کوچکتر است.  $R_l'$  می‌تواند برای نشان دادن شباهت  $e^l$  فردی به قضاوت سایر اعضای گروه استفاده شود.  $R_l' = 0$ ، زمان یکسان بودن بردار اولویت هر فرد است.

- محاسبه  $e^l$  فردی بر اساس شاخص‌های وزن دهی PEW و SEW

انتظار می‌رود نظر هر یک از متخصصان درنهایت با هم همگرا شود زیرا همه کارشناسان تمایل مشترکی برای رسیدن به اجماع دارند. هرچه انحراف نظر فرد از قضاوت گروهی کمتر باشد، نزدیکی قضاوت او به نظر گروهی، بیشتر بوده و در نتیجه، وزن بالاتری دارد. بر این اساس، تعریف PEW فرد به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$7) \quad f_1 = \frac{x_1}{\sum_{i=1}^m x_i}, \quad \text{where } x_1 = 1 - \frac{R_l}{\sum_{i=1}^m R_l}$$

به‌ویژه،  $R_l = 0$  نشان می‌دهد بردار اولویت  $e^l$  فردی با بردار اولویت گروه، یکسان است. پس از آن، به راحتی می‌توان ثابت کرد نظر فردی نشان‌دهنده ارزش میانگین گروه است و می‌تواند به عنوان نظر گروه در نظر گرفته شود. به‌طور کلی، هرچه انحراف نظر افراد از نظر گروه بیشتر باشد، PEW آن کوچکتر است؛ اما برای پیشگیری از تأثیر نظر برخی از کارشناسان، وزن کارشناسان باید با توجه به میزان اطلاعات ارائه شده توسط افراد تعیین گردد. هرچه انحراف نظر فرد از قضاوت سایر اعضای گروه کمتر باشد، شباهت قضاوت او با سایر اعضای گروه بیشتر بوده و وزن بیشتری دارد؛ بنابراین، SEW فرد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$1) \quad k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases}$$

مرحله ۵) محاسبه وزن: در این مرحله، وزن‌های غیر نرمال محاسبه می‌شود (فرمول ۲).

$$2) \quad q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{x_j - 1}{k_j} & j > 1 \end{cases}$$

مرحله ۶) نرمال سازی: در این مرحله، نرمال شده  $z$  امین شاخص محاسبه شد (فرمول ۳).

$$3) \quad w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k}$$

مرحله ۷) تعیین وزن قطعی: در این مرحله، وزن قطعی هر شاخصی محاسبه گردید؛ هر شاخص با مقدار بیشتر دارای اهمیت بیشتری است. از روش مرکز ناحیه (COA) برای تعیین وزن قطعی استفاده گردید که بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$4) \quad W_j^{non} = \frac{(w_j^u - w_j^l) + (w_j^m - w_j^l) + (w_j^l)}{3}$$

روش RE فازی، روشی برای اندازه‌گیری فاصله بین دو توزیع احتمال گسسته است. با توجه به اینکه بردار اولویت وزن دهی کارشناسان را می‌توان به عنوان توزیع احتمال گسسته در نظر گرفت، این روش می‌تواند جهت اندازه‌گیری اختلاف بین بردار اولویت گروهی و فردی و اختلاف بین بردار اولویت فردی استفاده شود (۵۴، ۵۵). بر اساس این ایده، چانگ و همکاران (۵۶)، دو نوع شاخص وزن دهی اعضای تیم را بر اساس RE فازی ارائه دادند که شامل وزن آنترپوی مجاروتی ( $PEW^1$ ) و وزن آنترپوی تشابهی ( $SEW^2$ ) فازی هستند. با توجه به اینکه اعضای تیم در زمینه‌های خاصی مهارت داشتند، تعیین وزن‌های مختلف برای اعضای تیم با توجه به هر ریسک فاکتور، معقول است (۵۷). تعیین شاخص‌های وزن دهی PEW و SEW بر اساس مراحل زیر انجام گرفت:

- محاسبه مجموع مقادیر مطلق RE بین  $e^l$  فردی و گروه:

1 Proximity Entropy Weight  
2 Similarity Entropy Weight

که در آن،  $\tilde{X}_{ij}$  رتبه گزینه نام در ارتباط با شاخص  $z$  ام و  $\tilde{w}_j$  وزن اهمیت زامین شاخص هستند. این مقادیر، متغیرهای کلامی بوده که می‌توانند توسط اعداد فازی مثلثی، تقریب زده شوند.

- گام دوم: گزینه‌های ایده آل مثبت و منفی بر اساس قواعد زیر تعیین می‌گردد:

$$11) \quad \tilde{x}_j^* = \max \tilde{x}_{ij} \quad , \quad \tilde{x}_j^- = \min \tilde{x}_{ij}$$

- گام سوم: مقدار مطلوبیت و عدم مطلوبیت گزینه‌ها محاسبه می‌شود:

$$12) \quad \tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{w}_j \left( \frac{\tilde{x}_j^* - \tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_j^* - \tilde{x}_j^-} \right), \quad \tilde{R}_i = \max \left[ \tilde{w}_j \left( \frac{\tilde{x}_j^* - \tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_j^* - \tilde{x}_j^-} \right) \right]$$

- گام چهارم: محاسبه شاخص VIKOR فازی: ابتدا باید  $v$  را که عددی بین 0 تا 1 است، تعیین کنیم. تعیین این شاخص به نظر تصمیم‌گیرنده بستگی دارد (آن را معمولاً 0.5 در نظر می‌گیرند).

$$13) \quad \tilde{Q}_i = v \left( \frac{\tilde{S}_i - \tilde{S}^+}{\tilde{S}^+ - \tilde{S}^-} \right) + (1 - v) \left( \frac{\tilde{R}_i - \tilde{R}^+}{\tilde{R}^+ - \tilde{R}^-} \right)$$

$$\tilde{S}^+ = \max \tilde{S}_i, \tilde{S}^- = \min \tilde{S}_i, \tilde{R}^+ = \max \tilde{R}_i, \tilde{R}^- = \min \tilde{R}_i$$

- گام پنجم: رتبه‌بندی مقادیر  $\tilde{S}_i$ ،  $\tilde{R}_i$  و  $\tilde{Q}_i$ ، به ترتیب نزولی است به طوری که مقدار حداقل، متوسط و حداکثر هر آیت، تعیین شده و بر اساس رابطه زیر، مقدار نهایی آیت‌ها جهت تعیین اولویت به کار گرفته شد:

$$14) \quad S(\tilde{a}) = \frac{1}{6} (\tilde{a}_l + 4\tilde{a}_m + \tilde{a}_u)$$

### نتایج

این مطالعه در یکی از ایستگاه‌های تقلیل فشار دروازه شهری استان خراسان شمالی انجام گرفت. این ایستگاه با توجه به میزان تقلیل فشار گاز (فشار ورودی به خروجی) و ظرفیت آن، دارای جزئیات فیزیکی و هندسی خاصی در اجزاء خود است. با این حال، به طور کلی همه این ایستگاه‌ها از نظر ظاهر و نوع اجزاء یکسان هستند. اجزاء اصلی این ایستگاه‌ها شامل موارد زیر است:

$$8) \quad f_i' = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^m y_i}, \quad \text{where } y_i = 1 - \frac{R_i'}{\sum_{i=1}^m R_i'}$$

$R_i' = 0$  نشان می‌دهد بردار اولویت هر دو فرد، یکسان است؛ یعنی نظرات همه افراد یکسان است. در این حالت، SEWهای همه افراد یکسان است و بردار اولویت فردی، بردار اولویت گروهی نهایی است. PEW با توجه به نزدیکی نظر یک فرد به نظر اولیه گروه داده می‌شود و با وزن اولیه فرد مرتبط است در حالی که SEW با توجه به شباهت نظر یک فرد به فرد دیگر به وزن اولیه فرد ارتباطی ندارد؛ بنابراین، وزن دهی خطی در ادغام PEW و SEW برای به دست آوردن وزن نهایی فرد، ضروری است.

$$9) \quad \lambda_i = \alpha \times f_i + (1 - \alpha) \times f_i'$$

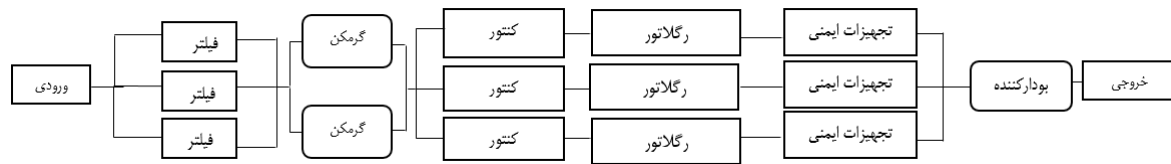
جایی که  $\alpha$  ضریب وزنی خطی و بین [0، 1] متغیر است. به طور کلی،  $\alpha = 0.5$  را می‌توان در کاربرد عملی در نظر گرفت. عملکرد ایجاد تعادل بین PEW و SEW از طریق تعیین وزن است. مقادیر مختلف  $\alpha$  ممکن است بر وزن متخصص نهایی و اولویت گروه تأثیر بگذارد. در مرحله دوم، ماتریس ارزیابی ریسک تجمعی و بردار وزن فازی تجمعی ریسک فاکتورها تعیین گردید. در این مرحله از مقادیر به دست آمده از مرحله اول، ماتریس ارزیابی ریسک تجمعی و بردار وزن فازی تجمعی تعریف شد.

در مرحله سوم، رتبه‌بندی حالات شکست بر اساس روش VIKOR فازی انجام شد، این روش به عنوان روشی کاربردی برای مقابله با مشکلات MCDM که دارای معیارهای غیرقابل مقایسه و متضاد هستند، معرفی شده است. روش VIKOR فازی، توسعه‌ای از روش VIKOR بوده که از عبارات زبانی برای ارزیابی رتبه‌بندی عملکرد گزینه‌ها توسط معیارها و برای داده‌هایی که دقت کافی را ندارند و قطعی نیستند، استفاده می‌شود (56، 58). مراحل اجرای روش VIKOR فازی در زیر ارائه شده است (62-58).

- گام اول: ماتریس تصمیم بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از مسئله تشکیل می‌شود به طوری که اعداد داخل جدول تصمیم به صورت اعداد فازی مثلثی هستند:

$$10) \quad \tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11} & \tilde{X}_{12} & \dots & \tilde{X}_{1n} \\ \tilde{X}_{21} & \tilde{X}_{22} & \dots & \tilde{X}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{X}_{m1} & \tilde{X}_{m2} & \dots & \tilde{X}_{mn} \end{bmatrix}, \quad \tilde{w} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n)$$

شکل ۲. دیاگرام ساده فرایند تقلیل فشار در یک ایستگاه CGS



جدول ۱. حالات شکست، علل مربوطه و اثرات احتمالی آن‌ها برای ایستگاه تقلیل فشار CGS

شکست	حالت شکست	علل شکست	اثرات شکست
FM <sub>۱</sub>	نقص فیلتر	خوردگی فیلتر، ورود گاز کثیف، انسداد فیلتر، عیب درجه خروجی، کثیفی فیلتر، پارگی المنت فیلتر	اختلال در فیلتراسیون گاز، کثیف شدن گاز مصرفی، آسیب به بدنه فیلتر، نشتی گاز
FM <sub>۲</sub>	نقص سیستم گرمکن	خرابی تیوپ، خرابی لوله‌های گاز، خرابی آتشدان، خرابی دودکش، خرابی مخزن انبساط آب، خرابی سیستم تأمین سوخت و کنترل	افزایش دمای گازهای خروجی، سوراخ شدن لوله‌ها، ایجاد رسوب در لوله‌های مارپیچ، زنگ‌زدگی و سوراخ شدن دیوار، نشتی گاز
FM <sub>۳</sub>	نقص رگلاتور	پارگی دیافراگم، خوردگی رگلاتور، خرابی اسلیو، خرابی اورینگ	عبور گاز با فشار بالا و هدررفت گاز از طریق شیر اطمینان، خرابی تجهیزات
FM <sub>۴</sub>	نقص کنترل	فرسودگی و خرابی بلبرینگ‌ها، بالانس نبودن توربین و محور آن، افزایش سرعت گاز، افت فشار گاز	نمایش نادرست میزان جریان گاز، افزایش یا کاهش میزان جریان گاز
FM <sub>۵</sub>	نقص تجهیزات ایمنی	خرابی دیافراگم یا دیسک، خرابی فنر، خرابی پیچ تنظیم ورودی، خرابی اورینگ، خرابی سیت، خرابی پیچ تنظیم خرابی پین ریست‌کننده	افزایش فشار و آسیب به تجهیزات، نشت گاز حریق و انفجار
FM <sub>۶</sub>	نقص سیستم بودارکننده	عملکرد نادرست پمپ تزریق، تنظیم نبودن میزان تزریق، عدم وجود مقدار کافی مایع در مخزن بودارکننده، گرفتگی جزئی صافی ورودی به پمپ تزریق بودارکننده (گرفتگی مسیر بودارکننده)، نامناسب بودن قطر اورفیس، نقص اتصالات	نشت گازهای سمی و مضر، هدررفت مرکاپتان، احتمال حریق و انفجار، احتمال سایش اورفیس و لوله، تزریق کمتر ادورانت، احتمال عدم تشخیص نشت گاز

جدول ۲. متغیرهای زبانی برای ارزیابی اهمیت ریسک فاکتورها (۱۶)

متغیرهای زبانی	خیلی مهم (VH)	مهم (H)	متوسط (M)	کم (L)	خیلی کم (VL)
اعداد فازی مثلثی	(۰/۷۵, ۱, ۱)	(۰/۱۵, ۰/۷۵, ۱)	(۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵)	(۰, ۰/۲۵, ۰/۵)	(۰, ۰, ۰/۲۵)
	H: ترجیح با اهمیت قوی یا مهم	L: کم مرجح یا کمتر مهم‌تر	M: ترجیح یا اهمیت متوسط		
		VH: کاملاً مرجح یا مهم‌تر			

استفاده از متغیرهای زبانی ارائه‌شده در جدول ۲ و ۳ انجام گرفت. ارزیابی اهمیت ریسک فاکتورها (شکل ۴) و ارزیابی حالات شکست با توجه به ریسک فاکتورها (جدول ۵) توسط متخصصان انجام گرفت.

در ادامه، مراحل زیر به منظور دستیابی به هدف اصلی و اجرای یک مدل تصمیم‌گیری معنادار انجام شد. مراحل مختلف روش‌های فازی SWARA-RE-VIKOR باید به‌طور متوالی و با هدف اولویت‌بندی ریسک‌های شناسایی‌شده انجام شود. از این‌رو، خلاصه‌ای از کاربرد گام‌به‌گام مراحل مهم این رویکرد در ادامه آورده شده است:

(۱) محاسبه وزن ریسک فاکتورها توسط SWARA

فیلتر - گرمکن - رگلاتور - کنترل - تجهیزات ایمنی - بودارکننده  
 نمودار جریان فرآیند ساده‌شده ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه شهری در شکل ۲ نشان داده شده است. شش حالت شکست تجهیزات اصلی ایستگاه بر اساس اسناد موجود گزارش‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات ایستگاه انتخاب گردید که در این مطالعه با FM<sub>۱</sub>، ...، FM<sub>۶</sub>، FM<sub>۲</sub>، نشان داده شدند. این حالات شکست، علل مربوطه و اثرات احتمالی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس نظر چهار کارشناس با حداقل پنج سال سابقه، ارزیابی اهمیت ریسک فاکتورها و ارزیابی حالات شکست بر اساس ریسک فاکتورها (شدت، احتمال، کشف) با

**جدول ۳.** متغیرهای زبانی برای ارزیابی حالات شکست بر اساس ریسک فاکتورها

متغیرهای زبانی	خیلی کم (VL)	کم (L)	نسبتاً کم (SL)	متوسط (M)	نسبتاً زیاد (SH)	زیاد (H)	خیلی زیاد (VH)
اعداد فازی مثلثی	(۰,۰,۱)	(۰,۱,۳)	(۱,۳,۵)	(۳,۵,۷)	(۵,۷,۹)	(۷,۹,۱۰)	(۹,۱۰,۱۰)

VL: اثر جزئی دارد (شدت)، ۱ در ۱۵۰۰۰۰۰ (احتمال)، به احتمال ناچیزی با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود (کشف).  
 L: وخامت خیلی کم ولی بیشتر افراد آن را احساس می‌کنند، مثل نشت گاز (شدت)، ۱ در ۱۵۰۰۰ (احتمال)، به احتمال خیلی کم با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود (کشف).  
 SL: وخامت کم است، مثل ضرب‌دیدگی (شدت)، ۱ در ۲۰۰۰ (احتمال)، به احتمال کم با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود (کشف).  
 M: وخامت متوسط است، مثل شکستگی (شدت)، ۱ در ۴۰۰ (احتمال)، در نیمی از موارد با کنترل موجود ردیابی می‌شود (کشف).  
 SH: وخامت زیاد مثل آتش گرفتن تجهیزات، سوختگی بدن (شدت)، ۱ در ۸۰ (احتمال)، به احتمال نسبتاً زیاد با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود (کشف).  
 H: وخامت زیاد، مثل آتش گرفتن تجهیزات، سوختگی (شدت)، ۱ در ۲۰ (احتمال)، به احتمال زیاد با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود (کشف).  
 VH: وخامت، جبران‌ناپذیر است، مثل از دست دادن یک عضو بدن یا مرگ (شدت)، ۱ در ۸ یا کمتر (احتمال)، تقریباً به‌طور حتم با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود (کشف).

**جدول ۴.** ارزیابی وزن‌های اهمیت ریسک فاکتورها (شدت، احتمال و کشف) توسط اعضاء تیم

ریسک فاکتور	TM <sub>۱</sub>	TM <sub>۲</sub>	TM <sub>۳</sub>	TM <sub>۴</sub>
شدت	H	H	H	VH
احتمال	M	H	M	M
کشف	L	L	L	L

L: کم مرجح یا کمتر مهم تر M: ترجیح یا اهمیت متوسط H: ترجیح یا اهمیت قوی  
 یا مهم VH: کاملاً مرجح یا مهم تر TM<sub>i</sub>: کارشناسان

**جدول ۵.** ارزیابی حالات شکست با توجه به ریسک فاکتورهای ارزیابی‌شده توسط اعضاء تیم FMEA

حالات شکست	شدت				احتمال				کشف			
	TM <sub>۱</sub>	TM <sub>۲</sub>	TM <sub>۳</sub>	TM <sub>۴</sub>	TM <sub>۱</sub>	TM <sub>۲</sub>	TM <sub>۳</sub>	TM <sub>۴</sub>	TM <sub>۱</sub>	TM <sub>۲</sub>	TM <sub>۳</sub>	TM <sub>۴</sub>
FM <sub>۱</sub>	SH	H	H	SH	H	M	SH	SH	SL	M	M	SL
FM <sub>۲</sub>	H	H	VH	VH	M	M	SL	SL	VL	VL	L	L
FM <sub>۳</sub>	H	VH	H	VH	SH	SH	H	H	M	SH	M	SL
FM <sub>۴</sub>	M	SH	SH	SH	M	SL	SL	M	M	VL	SL	M
FM <sub>۵</sub>	SH	SH	H	H	SL	M	M	SL	M	M	SL	SL
FM <sub>۶</sub>	SH	H	VH	VH	SH	SH	H	H	SL	M	SL	SL

FM<sub>i</sub>: حالات شکست TM<sub>i</sub>: کارشناسان

**جدول ۶.** وزن‌های فازی ریسک فاکتورها

ریسک فاکتور	متغیرهای زبانی ریسک فاکتورها	وزن فازی ریسک فاکتورها	وزن قطعی ریسک فاکتورها
شدت	H	(۰/۵, ۰/۷۵, ۱)	۰/۴۲
احتمال	M	(۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵)	۰/۳۳
کشف	L	(۰, ۰/۲۵, ۰/۵)	۰/۲۵

نشان داده شده است. وزن‌های قطعی با روش مرکز سطح (COA) محاسبه شد.

(۲) تعیین وزن اعضاء تیم FMEA (مقدار  $\alpha=0.5$  در نظر گرفته شده است): از معادلات (۵-۹) برای به دست آوردن PEW و SEW فردی استفاده گردید. پس از آن، معادله (۹) برای محاسبه وزن نهایی اعضاء تیم با توجه به ریسک فاکتورها به کار گرفته شد که نتایج آن در جدول

فازی: اعضاء تیم از متغیرهای زبانی ذکر شده در جدول ۲ و ۳، استفاده کردند. طبق SWARA فازی، ارزیابی اعضاء تیم در متغیرهای زبانی برای به دست آوردن وزن‌های اهمیت ریسک فاکتور، مطابق جدول ۵ انجام گرفت و وزن ریسک فاکتورها بر اساس معادلات ۴-۱ محاسبه و تعیین گردید. جهت تعیین وزن فازی هر عامل، متغیرهای زبانی به اعداد فازی مثلثی تبدیل شدند که در جدول ۶

۵) محاسبه مقادیر شاخص فازی: پس از شناسایی بهترین و بدترین مقدار فازی، مهم‌ترین گام شامل تعیین مطلوبیت و عدم مطلوبیت و محاسبه شاخص VIKOR بر اساس معادلات (۱۲) و (۱۳) بوده که نتایج آن در جدول ۹ آورده شده است.

۶) تعیین رتبه‌بندی حالات شکست: از معادله ۱۴ برای محاسبه مقادیر قطعی مقادیر مطلوبیت، عدم مطلوبیت و شاخص VIKOR استفاده گردید. نتایج در جدول ۱۰ نشان داده شده است. در این مرحله، گزینه‌های جایگزین بر اساس مقادیر میران مطلوبیت، عدم مطلوبیت و شاخص VIKOR، در سه گروه از کوچک به بزرگ مرتب شده‌اند. بهترین جایگزین، گزینه‌ای است که کمترین مقدار شاخص را داشته باشد. رتبه‌بندی همه حالات شکست

۷ آورده شده است.

۳) تعیین ماتریس ارزیابی ریسک و بردار وزنی فازی تجمعی ریسک فاکتورها: از معادله (۱۰) به منظور تشکیل ماتریس ارزیابی ریسک و بردار وزن فازی تجمعی ریسک فاکتورها استفاده گردید به طوری که نتایج آن در جدول ۸ نشان داده شده است.

۴) تعیین بهترین و بدترین مقدار فازی برای همه معیارها: از آنجاکه شدت، احتمال و کشف، معیارهای اصلی هستند، بهترین و بدترین مقادیر فازی بر اساس معادله (۱۱) به صورت زیر محاسبه شد:

$$\begin{aligned} \bar{x}_S^* &= (1, 9.5, 10), \bar{x}_D^* = (6, 8, 9.5), \bar{x}_D^- = (2, 4, 7), \\ \bar{x}_S^- &= (4.5, 6.5, 8.5), \bar{x}_D^- = (2, 2.5, 6), \bar{x}_D^+ = (0.5, 3.25, 2) \end{aligned}$$

جدول ۷. وزن اعضاء تیم FMEA با توجه به ریسک فاکتورها

	PEW			SEW			$\lambda(a=0, 5)$		
	شدت	احتمال	کشف	شدت	احتمال	کشف	شدت	احتمال	کشف
TM <sub>۱</sub>	۰/۲۲۶۰	۰/۲۰۷۸	۰/۲۰۶۰	۰/۲۳۰۵	۰/۲۵۱۵	۰/۲۵۸۶	۰/۲۲۸۲	۰/۲۲۹۶	۰/۲۳۲۳
TM <sub>۲</sub>	۰/۲۲۶۵	۰/۲۴۸۲	۰/۲۳۹۲	۰/۲۳۵۱	۰/۲۳۳۵	۰/۲۱۸۹	۰/۲۳۰۰	۰/۲۴۰۸	۰/۲۲۹۱
TM <sub>۳</sub>	۰/۲۶۵۵	۰/۲۷۴۵	۰/۲۹۶۵	۰/۲۶۸۵	۰/۲۵۸۰	۰/۲۶۷۳	۰/۲۶۷۰	۰/۲۶۶۲	۰/۲۸۱۹
TM <sub>۴</sub>	۰/۲۸۲۵	۰/۲۶۹۵	۰/۲۵۶۵	۰/۲۶۵۶	۰/۲۵۷۱	۰/۲۵۵۲	۰/۲۷۴۵	۰/۲۶۳۳	۰/۲۵۵۸

جدول ۸. ماتریس ارزیابی ریسک و بردار وزن فازی تجمعی ریسک فاکتورها

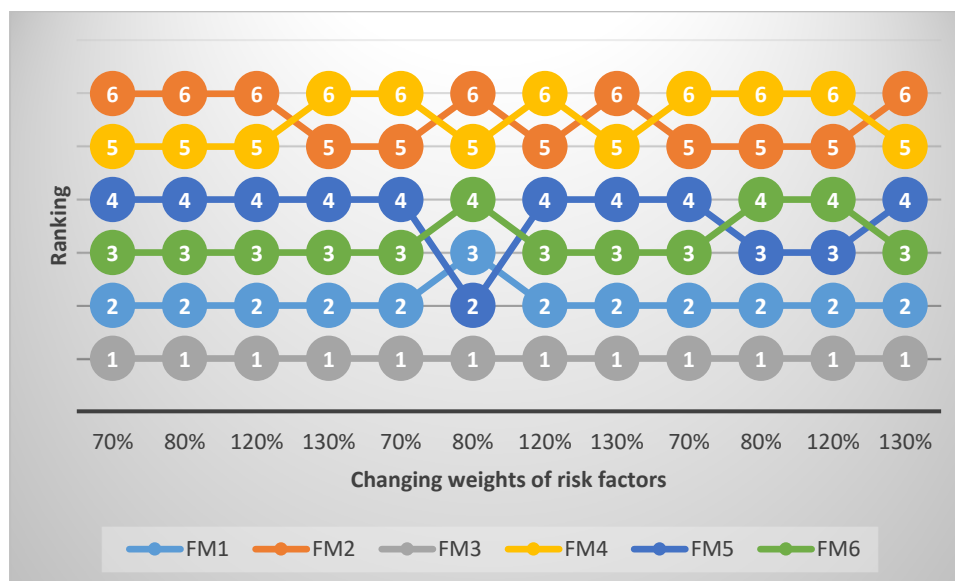
حالات شکست	شدت			احتمال			کشف		
	پایین	متوسط	بالا	پایین	متوسط	بالا	پایین	متوسط	بالا
FM <sub>۱</sub>	۶	۸	۹/۵	۵	۷	۸/۷۵	۲	۴	۵/۵
FM <sub>۲</sub>	۸	۹/۵	۱۰	۲	۳	۶	۰/۵	۳	۲
FM <sub>۳</sub>	۸	۹/۵	۱۰	۶	۸	۷/۵	۳	۵	۷
FM <sub>۴</sub>	۴/۵	۶/۵	۸/۵	۲	۲/۵	۶	۱/۷۵	۳/۲۵	۵
FM <sub>۵</sub>	۶	۸	۹/۵	۲	۴	۶	۲	۴	۶
FM <sub>۶</sub>	۷/۵	۹	۹/۷۵	۶	۸	۹/۵	۱/۵	۳/۵	۵/۵
وزن دهی تیم FMEA	۰/۲۴۹۹۲۵			۰/۲۴۹۹۷۵			۰/۲۴۹۷۷۵		
وزن ریسک فاکتور	۰/۴۲			۰/۳۳			۰/۲۵		
وزن قطعی	۰/۱۰۵			۰/۰۸۲			۰/۰۸۲		

جدول ۹. شاخص‌های فازی مطلوبیت، عدم مطلوبیت و شاخص VIKOR

	میزان مطلوبیت (S)			میزان عدم مطلوبیت (R)			شاخص VIKOR (Q)		
	پایین	متوسط	بالا	پایین	متوسط	بالا	پایین	متوسط	بالا
FM <sub>۱</sub>	۰/۱۶۶۸۰	۰/۲۰۰۰۶	۰/۱۲۹۴۰	۰/۱۰۵	۰/۰۸۲	۰/۰۳۱	۰/۳۶۷۴۳	۰/۲۱۷۴	۰/۴۸۴۴۹
FM <sub>۲</sub>	۰/۰۵۲۲۰	۰/۰۸۸۱۴	۰/۰۳۶۱۰	۰/۰۳۵	۰	۰/۰۴۶۵	۰/۷۹۶۹۴	۰/۸۷۵۵	۰/۶۲۵۰۰
FM <sub>۳</sub>	۰/۲۱۸۰۰	۰/۳۵۴۰۰	۰/۲۱۱۸۰	۰/۲۱۰۰	۰/۰۸۲	۰/۰۵۴۲	۰	۰	۰/۰۶۲۹۰
FM <sub>۴</sub>	۰	۰	۰/۰۴۶۸۶	۰	۰/۰۴۸۶۸	۰	۱	۰/۷۱۴۳	۰/۹۶۹۳۸
FM <sub>۵</sub>	۰/۱۰۵۳۰	۰/۱۵۵۳۴	۰/۰۷۱۱۷	۰/۱۰۵	۰/۰۲۰۵	۰/۰۳۱۰	۰/۵۰۸۴۹	۰/۶۵۵۶	۰/۶۵۰۲
FM <sub>۶</sub>	۰/۱۴۴۰۰	۰/۱۴۴۰۰	۰/۱۴۴۰۰	۰	۰/۰۸۲	۰/۰۶۲	۰/۶۶۹۷۲	۰/۲۹۴۶	۰/۱۹۲۹۷

جدول ۱۰. رتبه‌بندی حالات شکست بر اساس مقدار شاخص VIKOR

رتبه‌بندی	شاخص VIKOR (Q)	میزان عدم مطلوبیت (R)	میزان مطلوبیت (S)
۲	۰/۲۸۶۹۳۹۸۸۶	۰/۰۷۷۳	۰/۱۸۲۷۴
۶	۰/۸۲۰۶۶۲۶۳۲	۰/۰۱۳۵۸	۰/۰۷۳۴۸
۱	۰/۱۰۴۸۳۸۷۱	۰/۰۹۸۷	۰/۳۰۷۶
۵	۰/۸۰۴۴۰۸۷۹۹	۰/۰۳۱۲۴	۰/۰۰۷۸۱
۴	۰/۶۳۰۱۷۶۳۸۷	۰/۰۳۶	۰/۱۳۲۹۷
۲	۰/۳۴۰۱۹۹۷۲۷	۰/۰۶۵	۰/۱۴۴۹



شکل ۳. رتبه‌بندی نتایج تحلیل حساسیت با تغییر وزن ریسک فاکتورها

می‌شود. آنالیز حساسیت در این بخش شامل دو زیربخش اصلی است؛ اول، تحلیلی در مورد پارامتر کنترل  $\alpha$  انجام می‌شود تا تأثیر تغییر مقادیر  $\alpha$  در رتبه‌بندی نهایی حالات شکست بررسی شود. دوم، آنالیز ریسک فاکتورها با هدف بررسی تأثیر نوسانات وزن اهمیت بر عملکرد حالات شکست انجام می‌شود (۱۶).

الف) آنالیز حساسیت پارامتر کنترل  $\alpha$  و ریسک فاکتورها: ابتدا، برای بررسی تأثیر پارامتر کنترل وزن‌های ترکیبی در رتبه‌بندی حالات شکست، مقادیر مختلفی از  $\alpha$  انتخاب می‌شوند. پارامتر  $\alpha$  در دو حالت وزنی توسط PEW و SEW در نظر گرفته می‌شود. وقتی مؤلفه  $\alpha=0$  باشد، فقط SEW برای تعیین وزن اعضاء تیم با توجه به ریسک فاکتورها استفاده می‌شود. وقتی  $\alpha=1$  باشد، فقط PEW جهت تعیین وزن اعضاء تیم با توجه به ریسک فاکتورها استفاده می‌شود. به‌طور کلی،  $\alpha=0.5$  در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که  $\alpha$  مقادیر ۰ تا ۱ را اختیار می‌کند، رتبه‌بندی حالات شکست، ثابت می‌ماند. روند

به‌صورت  $Q_3 < Q_1 < Q_6 < Q_5 < Q_4 < Q_2$  است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد جدی‌ترین حالت شکست،  $FM_3$  بوده که لازم است بالاترین اولویت ریسک را به آن اختصاص داد. آنالیز حساسیت: آنالیز حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر، روشی برای تغییر دادن ورودی‌های یک مدل آماری به‌صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی نمود (۶۴، ۶۳). در این بخش، آنالیز حساسیت برای آزمون پایداری رویکرد پیشنهادی با تغییر وزن هر معیار با معیار دیگر انجام شد. وزن معیارها بیشترین تأثیر را در رتبه‌بندی گزینه‌ها دارد. تصمیم‌گیرنده باید پایایی نتایج را برای تصمیم‌گیری بدانند. به دلیل عدم قطعیت در مراحل مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره، لازم است قبل از انتخاب گزینه نهایی، تحلیل حساسیت روی یک مسئله انجام شود؛ بنابراین، آنالیز حساسیت پس از تعیین گزینه‌های رتبه‌بندی پیشنهاد

جدول ۱۱. رتبه‌بندی حالات شکست با روش‌های مختلف

	FMEA		SWARA-VIKOR		رویکرد پیشنهادی	
	RPN	رتبه‌بندی	Q	رتبه‌بندی	Q	رتبه‌بندی
FM <sub>۱</sub>	۲۰	۲	۰/۲۳۵	۲	۰/۲۸۶۹۳۹۸۸۶	۲
FM <sub>۲</sub>	۱۲	۴	۰/۶۳	۶	۰/۸۲۰۶۶۲۶۳۲	۶
FM <sub>۳</sub>	۲۸	۱	۰/۱۰۹	۱	۰/۱۰۴۸۳۸۷۱	۱
FM <sub>۴</sub>	۴	۵	۰/۴۴۵	۴	۰/۸۰۴۴۰۸۷۹۹	۵
FM <sub>۵</sub>	۱۵	۳	۰/۵۸	۵	۰/۶۳۰۱۷۶۳۸۷	۴
FM <sub>۶</sub>	۱۲	۴	۰/۳۳۵	۳	۰/۳۴۰۱۹۹۷۲۷	۳

کمترین اولویت ریسک در اکثر تست‌ها است. اولویت‌های دیگر حالات شکست به‌طور مشخص در دوازده تست تغییر می‌کند. این واقعیت نشان می‌دهد FM3، بالاترین سطح ریسک را نشان می‌دهد، حتی اگر ریسک فاکتورها با وزن‌های متفاوتی نسبت داده شوند. به عبارت دیگر، حالت شکست FM3 باید بسیار مورد توجه قرار گرفته و اولویت بالایی برای اصلاح باشد. علاوه بر این، با توجه به اینکه اولویت‌های حالات شکست عمده با تغییر وزن ریسک فاکتورها متفاوت است، وزن نسبی ریسک فاکتورها با توجه به موقعیت‌های عملی ضروری و معقول است.

۸) آنالیز تطبیقی رویکرد پیشنهادی: برای تأیید مزایای رویکرد پیشنهادی، یک تحلیل مقایسه‌ای بین رویکرد پیشنهادی و دو روش دیگر، یعنی FMEA و SWARA-VIKOR انجام گرفت. در جدول ۱۱، نتایج حاصل با روش‌های مختلف نشان داده شده است که بر اساس آن، با وجود برخی اختلافات در رتبه‌بندی حالات شکست، همچنان FM3، حالت شکست با بالاترین سطح ریسک است. این یافته، نتیجه به‌دست‌آمده توسط رویکرد پیشنهادی را تا حدی تأیید می‌کند.

### بحث

مطالعات بسیاری شاهد بر محدودیت‌های روش FMEA سنتی در ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک هستند (۶۴-۶۷). سه مشکل اصلی در ارزیابی ریسک به روش FMEA، به ترتیب، الف) در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای هر یک از ریسک فاکتورها (شدت، احتمال و قابلیت کشف)، ب) بیان امتیاز هر یک از حالات شکست در مقابل ریسک فاکتورها به‌صورت عددی (بین ۱ تا ۱۰) و ج) اولویت‌بندی ریسک‌ها بر اساس عدد اولویت ریسک هستند که در برخی از مواقع ممکن است این اعداد با هم یکسان بوده و یا در صورت داشتن فاصله کم از یکدیگر، اولویت‌بندی ریسک‌ها با مشکل مواجه شود. بدین منظور، در این مطالعه، جهت برطرف نمودن محدودیت‌های روش

رتبه‌بندی نهایی حالات شکست در این رویکرد، حساسیت خوبی را نشان می‌دهد. پارامتر کنترل  $\alpha$  باید برای ترکیب PEW و SEW در تعیین وزن اعضاء تیم استفاده شود.

مطابق جدول ۷، وزن اعضاء تیم TM1 و TM2 با توجه به ریسک فاکتور احتمال، به ترتیب ۰,۲۲۶۰ و ۰,۲۲۶۵ برای روش PEW است. بدیهی است PEW عضو تیم TM2، بزرگ‌تر از عضو تیم TM1 است. برای روش SEW، SEW عضو تیم TM2 بزرگ‌تر از عضو تیم TM1 است زیرا اولی، ۰,۲۳۵۱ و دومی، ۰,۲۳۰۵ است. نتایج مشابه در سایر عناصر ظاهر می‌شود. بر این اساس، در نظر گرفتن هم‌زمان PEW و SEW در تعیین وزن اعضاء تیم، محتاطانه و منطقی است.

ب) آنالیز ریسک فاکتورها جهت بررسی تأثیر نوسانات وزن اهمیت بر عملکرد حالات شکست: برای بررسی تأثیر نوسانات وزن‌های اهمیت ریسک فاکتورها بر رتبه‌بندی حالات شکست، محاسبات وزن ریسک فاکتورها در صورتی که مقادیر ۳۰-۲۰٪ وزن پایه کمتر یا بیشتر باشد، مجدداً انجام می‌شود. هنگامی که وزن ریسک فاکتورها به میزان ۳۰-۲۰٪ کاهش یا افزایش یابد، وزن سایر ریسک فاکتورها نیز تغییر می‌کند زیرا مجموع وزن ریسک فاکتورها برابر ۱ است. فرض کنید مقدار قطعی وزن اصلی ریسک فاکتورها به شکل معادله  $w_j^* = \alpha \times w_j$  تبدیل می‌شود که در آن،  $\alpha$  مقادیر ۷۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۳۰٪ و وزن‌های سایر ریسک فاکتورها به  $w_r^* = \beta \times w_r$  ( $r \neq j, r = 1, 2, 3$ ) تغییر یابد. در این حالت، وزن‌های اصلاح‌شده ریسک فاکتورها به شرایط  $\alpha \times w_j^* + \sum_{r=1, r \neq j}^3 \beta w_r^* = 1$ , where  $\beta = (1 - \alpha w_j^*) / (1 - w_j^*)$  تغییر می‌یابد؛ جایی که مقدار  $\alpha$  برابر با ۰,۵ انتخاب شده است. برای سه ریسک فاکتور، دوازده تست آنالیز حساسیت انجام شده که در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۳، حالت شکست FM3 بالاترین اولویت ریسک را با تغییر مقادیر وزن ریسک فاکتورها حفظ می‌کند. در همین حال، حالت شکست FM2 دارای

برای کارشناسان است. این نتایج با نتایج مطالعه Hamta و همکاران (۲۸) که در شرکت گاز لرستان انجام داده بودند، هم خوانی داشت. بر اساس نتایج، نقص رگلاتور، فیلتر و سیستم بودارکننده در رتبه‌های اول، دوم و سوم قرار داشتند. علل نشت گاز و عملکرد ناخواسته رگلاتور به دلیل خرابی در رگلاتور و قطعات و تجهیزات آن و کیفیت نامطلوب است. از علل نقص فیلتر می‌توان به خوردگی فیلتر، ورود گاز کثیف، انسداد فیلتر، عیب دریچه خروجی، کثیفی فیلتر و پارگی المنت فیلتر اشاره کرد. از علل نقص سیستم بودارکننده می‌توان به عملکرد نادرست پمپ تزریق، تنظیم نبودن میزان تزریق، عدم وجود مقدار کافی مایع در مخزن بودارکننده، گرفتگی جزئی صافی ورودی به پمپ تزریق بودارکننده (گرفتگی مسیر بودارکننده)، نامناسب بودن قطر اورفیس و نقص اتصالات اشاره داشت. نتایج مطالعه نشان داد شکست رگلاتور، بالاترین اولویت

ریسک را دارا است؛ لذا رگلاتورها به‌عنوان بحرانی‌ترین جزء این سیستم شناسایی شدند که برای کاهش ریسک آن، برنامه تعمیر و نگهداری مناسب پیشنهاد می‌گردد. در ضمن، تست لاک آپ برای رگلاتور در زمان‌های بیشتری از سال و به‌صورت دوره‌ای سبب می‌شود بعدها نیازی به باز و بسته کردن زیاد رگلاتور نباشد. در نتیجه، خرابی‌های جانبی در دستگاه‌های دیگر را کمتر و ایمنی بیشتری تضمین شود. نتایج مطالعه زارعی و همکاران (۷۰) نشان داد که خرابی رگلاتور به‌عنوان بدترین سناریوی خطر در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز بوده که با نتایج این مطالعه هم خوانی داشت.

نتایج آنالیز حساسیت رویکرد پیشنهادی نشان داد روند رتبه‌بندی نهایی حالات شکست در این رویکرد، حساسیت خوبی را نشان می‌دهد و در نظر گرفتن هم‌زمان PEW و SEW در تعیین وزن اعضاء تیم، محتاطانه و منطقی است. همچنین، با اینکه اولویت‌های حالات شکست با تغییر وزن ریسک فاکتورها متفاوت است اما وزن نسبی ریسک فاکتورها با توجه به موقعیت‌های عملی، ضروری و معقول است.

رویکرد پیشنهادی، مزایای زیر را ارائه می‌دهد؛ ابتدا، PEW و SEW را برای تعیین وزن اعضاء تیم با توجه به هر یک از ریسک فاکتورها ترکیب می‌کند که به‌طور منطقی و محتاطانه، پیشینه دانش اعضاء تیم را در نظر می‌گیرد. دوم، این رویکرد به اندازه کافی به اهمیت متفاوت ریسک فاکتورها توجه دارد. وزن ریسک فاکتورها با استفاده از روش SWARA فازی تعیین می‌شود که می‌تواند به راحتی انجام گرفته و نتیجه آنالیز ریسک را با

FMEA در ارزیابی و اولویت‌بندی حالت‌های شکست، از روش‌های فازی SWARA، RE و VIKOR استفاده گردید. جهت حذف مشکل یکسان بودن وزن‌های مربوط به ریسک فاکتورها در روش سنتی، از روش SWARA فازی استفاده شد. همچنین، به منظور برطرف نمودن مشکل عدم قطعیت موجود در داده‌ها (نظرات متخصصان) از روش RE فازی بهره گرفته شد. علاوه بر این، از روش VIKOR فازی برای اولویت‌بندی حالت‌های شکست استفاده شد. جهت نشان دادن برتری روش ارائه‌شده نسبت به روش‌های موجود، حالت‌های شکست شش تجهیز اصلی ایستگاه تقلیل فشار گاز دروازه شهری شامل رگلاتور، فیلتر، هیتر، بودارکننده، تجهیزات ایمنی و کنتور مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج نشان داد رویکرد پیشنهادی نسبت به روش FMEA سنتی، برتری دارد. اول اینکه بین رتبه‌بندی ارائه‌شده توسط روش FMEA سنتی و رویکرد پیشنهادی، تغییرات بسیاری وجود دارد (جدول ۱۱). دلیل این رتبه‌بندی‌های ناسازگار، عمدتاً به اهمیت نسبی معیارهای شدت، احتمال رخداد و کشف در محاسبه عدد اولویت ریسک و وزن معیارها مربوط می‌شود که در آن، تغییرات رتبه‌بندی ارائه‌شده برای حالات شکست در رتبه‌بندی FMEA لحاظ نشده است. همچنین، در عدد اولویت ریسک، مجموعه‌های مختلف شدت، احتمال رخداد و کشف ممکن است مقدار عدد اولویت ریسک یکسانی داشته باشند اما در رتبه‌بندی بر اساس رویکرد پیشنهادی متفاوت باشند. در ضمن، نتایج رویکرد پیشنهادی در مقایسه با SWARA-VIKOR نشان داد رتبه‌بندی حالات شکست به جز در FM4 و FM5، یکسان است (جدول ۱۱). دلایل تفاوت‌ها ممکن است ویژگی‌های SWARA-VIKOR و رویکرد پیشنهادی باشد. این دو روش بر اساس رویکردهای مختلف جمع‌هستند. علاوه بر این، رویکرد پیشنهادی از PEW و SEW برای تعیین وزن اعضاء تیم با توجه به عوامل خطر استفاده می‌کند که متفاوت با ایده استفاده از یک معیار تشابه است. همچنین، رویکرد پیشنهادی از SWARA فازی برای استخراج وزن‌های ریسک فاکتورها استفاده می‌کند به‌طوری که مقایسه کاملی را بین گزینه‌ها انجام می‌دهد و مستلزم وابستگی مستقیم و متناسب اهمیت و اولویت گزینه‌های مورد بررسی در یک سیستم است (۵۲).

بر اساس نتایج وزن دهی کارشناسان، شاخص شدت ریسک از اولویت بالاتری نسبت به شاخص‌های احتمال و کشف برخوردار است که نشان‌دهنده اهمیت این معیار

ملی گاز ایران (استان خراسان شمالی) و معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی تهران تقدیر و تشکر می‌نمایند.

## REFERENCES

- Pittiglio, P., Bragatto, P., & Delle Site, C. Updated failure rates and risk management in process industries. *Energy Procedia*, 45, 2014. 1364-1371.
- Zhu P, Liyanage JP, Kumar R, Panesar SS. Decision quality related to emergency shutdown system in the oil and gas industry: influences from data and information. *International Journal of Decision Sciences, Risk and Management*. 2021; 10(1-2):131-59.
- Karami M, Samimi A, Jafri M. Necessity to Study of Risk Management in Oil and Gas Industries (Case Study: Oil Projects). *Progress in Chemical and Biochemical Research*. 2020 Jun 30:239-43.
- Rafiee B, Shishehbori D, Hosseini Nasab H. Tackling uncertainty in safety risk analysis in process systems: The case of gas pressure reduction stations. *Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2020 Feb 1; 13(16):1-5.
- Nourian, R., Mousavi, S. M., & Raissi, S. A fuzzy expert system for mitigation of risks and effective control of gas pressure reduction stations with a real application. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019. 59, 77-90.
- Nourian, R., & Mousavi, S. M. Design and implementation of an expert system for periodic and emergency control under uncertainty: A case study of city gate stations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019. 66, 306-315.
- Liu, H. C. Improved FMEA methods for proactive healthcare risk analysis. Springer Singapore. 2019.
- He, R., Li, X., Chen, G., Wang, Y., Jiang, S., & Zhi, C. A quantitative risk analysis model considering uncertain information. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018. 118, 361-370.
- Liu, H. C. FMEA using uncertainty theories and MCDDM methods. In *FMEA using uncertainty theories and MCDDM methods*, Springer, Singapore, 2016. 13-27
- Qin J, Xi Y, Pedrycz W. Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. *Applied Soft Computing*. 2020 Apr 1; 89:106134.
- Yucesan M, Gul M, Celik E. A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best-worst method. *Complex & Intelligent Systems*. 2021 Jun; 7(3):1547-64.
- Liu, Y., Kong, Z., & Zhang, Q. Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018. 164, 325-330.
- Vazdani, S., Sabzghabaei, G., Dashti, S., Cheraghi, M., Alizadeh, R., & Hemmati, A. FMEA techniques used in environmental risk assessment, *Environment & Ecosystem Science (EES)*. 2017.1(2) 16-18
- Ghasemi, S., Mahmoudvand, R., & Yavari, K. Application of the FMEA in insurance of high-risk industries: a case study of Iran's gas refineries. *Stochastic environmental research and risk assessment*,

وضعیت عملی هماهنگ کند. روش VIKOR فازی برای تعیین اولویت‌های ریسک حالات شکست استفاده می‌شود که می‌تواند حداکثر مطلوبیت گروهی و حداقل عدم مطلوبیت فردی را در نظر بگیرد. از این نظر، رتبه‌بندی اولویت ریسک به‌دست‌آمده توسط رویکرد پیشنهادی، معتبر است. در نتیجه، اطلاعات ارزشمند و مؤثری را در کمک به تصمیم‌گیری مدیریت ریسک ارائه می‌دهد. با توجه به ماهیت چنین مطالعاتی و وجود عدم قطعیت در نتایج این‌گونه مطالعات، در این تحقیق امکان مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج سایر مطالعات، بیش از موارد ذکر شده وجود نداشت. یکی از نقاط قوت این تحقیق، جدید بودن اجرای این روش به‌صورت ترکیبی در یکی از مراکز مهم و حساس خطوط انتقال گاز بود. اگرچه این مطالعه برخی از محدودیت‌های روش FMEA را جبران نمود اما همچنان محدودیت‌هایی وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند. در مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد بر جنبه‌های زیر تمرکز شود:

اول- استفاده از اعداد Z فازی و زبانی برای گرفتن اطلاعات ارزیابی کیفی ریسک در محیط تصمیم‌گیری بسیار پیچیده؛  
دوم- اعمال سایر روش‌های MCDM، مانند MULTIMOORA، GRA و WASPAS برای روش FMEA؛ سوم- درنهایت، به کارگیری آسان مدل پیشنهادی برای FMEA با هدف مقابله با سایر مشکلات تحلیل ریسک.

## نتیجه‌گیری

رویکرد پیشنهادی با توجه به کاربرد روش‌های فازی RE، SWARA و VIKOR، به ترتیب مشکل یکسان بودن وزن‌های مربوط به ریسک فاکتورها، عدم قطعیت موجود در داده‌ها (نظرات متخصصان) و اولویت‌بندی حالت‌های شکست را حذف نموده و نسبت به روش FMEA سنتی از توانایی بالاتری در اولویت‌بندی ریسک‌ها برخوردار است.

## تعارض منافع

گزارش نشده است.

## تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر، برگرفته از پایان‌نامه دکتری بهداشت حرفه‌ای با کد اخلاق (IR.TUMS.SPH.REC.1400.151) تأیید شده توسط دانشگاه علوم پزشکی تهران است. نویسندگان این مقاله از همکاری و حمایت مالی شرکت

- analysis. *IEEE Transactions on Reliability*. 2015 May 8; 64(3):869-77.
- 30- Yang Z, Wang J. Use of fuzzy risk assessment in FMEA of offshore engineering systems. *Ocean Engineering*. 2015 Feb 1; 95:195-204.
- 31- Bozdag E, Asan U, Soyer A, Serdarasan S. Risk prioritization in failure mode and effects analysis using interval type-2 fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*. 2015 May 15; 42(8):4000-15.
- 32- Bao J, Johansson J, Zhang J. An occupational disease assessment of the mining industry's occupational health and safety management system based on FMEA and an improved AHP model. *Sustainability*. 2017 Jan 11; 9(1):94.
- 33- Boral S, Chatterjee P, Pamucar D, Yazdani M. An Integrated Fuzzy MCDM-Based FMEA Approach for Risk Prioritization of Casting Defects in Electro-Pneumatic Brake Units of EMU, MEMU, and DMU Coaches. In *Reliability and Risk Modeling of Engineering Systems 2021* (pp. 107-132). Springer, Cham.
- 34- Sagnak M, Kazancoglu Y, Ozen YD, Garza-Reyes JA. Decision-making for risk evaluation: integration of prospect theory with failure modes and effects analysis (FMEA). *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2020 Apr 20.
- 35- Liu HC, You JX, Lin QL, Li H. Risk assessment in system FMEA combining fuzzy weighted average with fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2015 Jul 3; 28(7):701-14.
- 36- Lo HW, Shiue W, Liou JJ, Tzeng GH. A hybrid MCDM-based FMEA model for identification of critical failure modes in manufacturing. *Soft Computing*. 2020 Oct; 24(20):15733-45.
- 37- Boral S, Chakraborty S. Failure analysis of CNC machines due to human errors: An integrated IT2F-MCDM-based FMEA approach. *Engineering Failure Analysis*. 2021 Dec 1; 130:105768.
- 38- Zhou Q, Thai VV. Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction. *Safety science*. 2016 Mar 1; 83:74-9.
- 39- Bagheri M, Yousefi S, Rezaee MJ. Risk measurement and prioritization of auto parts manufacturing processes based on process failure analysis, interval data envelopment analysis and grey relational analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2018 Dec; 29(8):1803-25.
- 40- Singgih ML. Integrated FMEA-MCDM For Prioritizing Operational Disruption in Production Process. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Apr 1* (Vol. 847, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.
- 41- Vahdani B, Salimi M, Charkhchian M. A new FMEA method by integrating fuzzy belief structure and TOPSIS to improve risk evaluation process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015 Mar; 77(1):357-68.
- 42- Peko M, Komatina N, Banduka N, Crnjac M. The assessment and ranking of failures in the information technology industry based on FMEA and MCDM. *Ekonomski horizonti*. 2018; 20(3):257-68.
- 43- Wang ZC, Ran Y, Chen Y, Yang X, Zhang G. Group risk assessment in failure mode and effects analysis using a hybrid probabilistic hesitant fuzzy linguistic MCDM method. *Expert Systems with Applications*. 2022, Feb 1; 188:116013.
- 2016.30(2), 737-745
- 15- Boral, S., Howard, I., Chaturvedi, S. K., McKee, K., & Naikan, V. N. A. An integrated approach for fuzzy failure modes and effects analysis using fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*, 2020. 108, 104195.
- 16- Tian, Z. P., Wang, J. Q., & Zhang, H. Y. An integrated approach for failure mode and effects analysis based on fuzzy best-worst, relative entropy, and VIKOR methods. *Applied Soft Computing*, 2018. 72, 636-646.
- 17- Ghouschi, S. J., Yousefi, S., & Khazaei, M. An extended FMEA approach based on the ZMOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied Soft Computing*, 2019. 81, and 105505.
- 18- Kutlu, A.C. Ekmekçioğlu, M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS based fuzzy AHP, *Expert Systems with Applications*, 2012. 39 (1), 61-67.
- 19- Carpitella, S. Certa, A., J. C.M. Izquierdo. Fata, La. A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case, *Reliability Engineering & System Safety*, 2018. 169 394-402.
- 20- Safari, H., Faraji, Z., Majidian, S. Identifying and evaluating enterprise architecture risks using FMEA and fuzzy VIKOR, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016. 27 (2), 475-486.
- 21- Liu, H., You, J., You, X. A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method, *Applied Soft Computing*, 2015. 28, 579-588.
- 22- Kai, M.T. Chai, K.C. Lim, C.P. Jong, C.H. A perceptual computing-based method to prioritize failure modes in failure mode and effect analysis and its application to edible bird nest farming, *Applied Soft Computing*, 2016. 49, 734-747.
- 23- Wang LE, Liu HC, Quan MY. Evaluating the risk of failure modes with a hybrid MCDM model under interval-valued intuitionistic fuzzy environments. *Computers & Industrial Engineering*. 2016 Dec 1; 102:175-85.
- 24- Zhao H, You JX, Liu HC. Failure mode and effect analysis using MULTIMOORA method with continuous weighted entropy under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *Soft Computing*. 2017 Sep; 21(18):5355-67.
- 25- Liu HC, You JX, Duan CY. An integrated approach for failure mode and effect analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *International Journal of Production Economics*. 2019 Jan 1; 207:163-72.
- 26- Huang J, Li ZS, Liu HC. New approach for failure mode and effect analysis using linguistic distribution assessments and TODIM method. *Reliability Engineering & System Safety*. 2017 Nov 1; 167:302-9.
- 27- Liu HC, Liu L, Liu N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert systems with applications*. 2013 Feb 1; 40(2):828-38.
- 28- Hamta N, Ehsanifar M, Babai A, Biglar A. Improving the Identification and prioritization of the most important risks of safety equipment in FMEA with a hybrid multiple criteria decision-making technique. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*. 2021 Jul 13.
- 29- Jee TL, Tay KM, Lim CP. A new two-stage fuzzy inference system-based approach to prioritize failures in failure mode and effect

- 56- Mou Z, Scheutz C, Kjeldsen P. Evaluation and application of site-specific data to revise the first-order decay model for estimating landfill gas generation and emissions at Danish landfills. *J Air Waste Manag Assoc.* 2015 Jun 3; 65(6):686-98.
- 57- Zhou Y, Xia J, Zhong Y, Pang J. An improved FMEA method based on the linguistic weighted geometric operator and fuzzy priority. *Quality Engineering.* 2016 Oct 1; 28(4):491-8.
- 58- Chang, T.H. Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan. *Inf. Sci.* 2014, 271, 196–212
- 59- Opricovic S & Tzeng G H. Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS *European Journal of Operational Research.* 2004. 156(2): 445- 455
- 60- Opricovic S & Tzeng G H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods *European Journal of Operational Research.* 2007, 178(2): 514-529
- 61- Tzeng G H, Lin C W & Opricovic S. Multi-Criteria Analysis of Alternative-Fuel Buses for Public Transportation Energy Policy. 2005, 33(11): 1373-1383
- 62- Musani S, Jemain AA. Ranking schools' academic performance using a fuzzy VIKOR. In *Journal of Physics: Conference Series* 2015 May 1 (Vol. 622, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- 63- Zarghami M & Szidarovszky F, Revising the OWA operator for multi criteria decision making problems under uncertainty *European Journal of Operational Research.* 2009. 198(1): 259-265
- 64- Saltelli, A. "Sensitivity Analysis for Importance Assessment". *Risk Analysis.* 2002, 22 (3): 1–12.
- 65- Saltelli, A.; Ratto, M.; Andres, T.; Campolongo, F.; Cariboni, J.; Gatelli, D.; Saisana, M.; Tarantola, S. *Global Sensitivity Analysis: The Primer.* John Wiley & Sons. 2008.
- 66- Omidvar M, Nirumand F. Risk assessment using FMEA method and on the basis of MCDM, fuzzy logic and grey theory: a case study of overhead cranes. *Journal of Health and Safety at Work.* 2017 Apr 10; 7(1):63-76.
- 67- Chanamool N, Naenna T. Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department. *Applied Soft Computing.* 2016;43:441-53
- 68- Zhang X, Jin F, Liu P. A grey relational projection method for multi-attribute decision making based on intuitionistic trapezoidal fuzzy number. *Applied Mathematical Modelling.* 2013;37(5):3467-77
- 69- Wang Y-M, Chin K-S, Poon GKK, Yang J-B. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert systems with applications.* 2009; 36(2):1195-207.
- 70- Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of hazardous materials.* 2017 Jan 5; 321:830-40.
- 44- Armin H, Gousheh SN, Gholamnia R, Khaloo SS. Investigating the safety and health risks ranking in the hospital using the integrated approach of failure modes and effects analysis (FMEA) and Fuzzy-based Multiple Criteria Decision Making (MCDM) method. *ACADEMIC JOURNA.* 2022/37 (1): 41-47. EISSN 2255-0569.
- 45- Emovon I, Norman RA, Alan JM, Pazouki K. An integrated multicriteria decision making methodology using compromise solution methods for prioritising risk of marine machinery systems. *Ocean Engineering.* 2015 Sep 1; 105:92-103.
- 46- Shahri MM, Jahromi AE, Houshmand M. Failure Mode and Effect Analysis using an integrated approach of clustering and MCDM under pythagorean fuzzy environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2021 Sep 1; 72:104591.
- 47- Maheswaran K, Loganathan T. A novel approach for prioritization of failure modes in FMEA using MCDM. *International Journal of Engineering Research and Applications.* 2013; 3(4):733-9.
- 48- Khalilzadeh M, Ghasemi P, Afrasiabi A, Shakeri H. Hybrid fuzzy MCDM and FMEA integrating with linear programming approach for the health and safety executive risks: a case study. *Journal of Modelling in Management.* 2021 Mar 1.
- 49- Fattahi R, Tavakkoli-Moghaddam R, Khalilzadeh M, Shahsavari-Pour N, Soltani R. A novel FMEA model based on fuzzy multiple-criteria decision-making methods for risk assessment. *Journal of Enterprise Information Management.* 2020 Jun 6.
- 50- Akbari R, Dabbagh R, Ghoushchi SJ. HSE risk prioritization of molybdenum operation process using extended FMEA approach based on Fuzzy BWM and Z-WASPAS. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems.* 2020 Jan 1; 38(4):5157-73.
- 51- Certa A, Enea M, Galante GM, La Fata CM. ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number. *Computers & Industrial Engineering.* 2017 Jun 1; 108:100-10.
- 52- Mavi, R. K., Goh, M., & Zarbakhshnia, N. Sustainable third-party reverse logistic provider selection with fuzzy SWARA and fuzzy MOORA in plastic industry. *Int J Adv Manuf Technol,* 2017. 91(5), 2401-2418
- 53- Zavadskas EK, Antucheviciene J. Multiple criteria evaluation of rural building's regeneration alternatives. *Building and Environment.* 2007 Jan 1; 42(1):436-51.
- 54- Chen H, Zhou L. A relative entropy approach to group decision making with interval reciprocal relations based on COWA operator. *Group Decision and Negotiation.* 2012 Jul; 21(4):585-99.
- 55- Hu J, Yang Y, Zhang X, Chen X. Similarity and entropy measures for hesitant fuzzy sets. *International Transactions in Operational Research.* 2018 May; 25(3):857-86.