

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Identifying, Assessing and Prioritizing Pressure Reduction Station Risks Using FMEA Based on SWARA-VIKOR Multi-criteria Decision-making Methods

Rajabali Hokmabadi<sup>1,2</sup>, Esmail Zarei<sup>3</sup>, Ali Karimi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, North Khorasan University of Medical Sciences, Bojnurd, Iran.

<sup>3</sup> Centre for Risk, Integrity and Safety Engineering (C-RISE), Process Engineering Department, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, Canada.

Received: 2022-1-17

Accepted: 2022-7-23

### ABSTRACT

**Introduction:** Failure modes and effects analysis (FMEA) method is used in industries to identify, assess and prioritize risks. Multi-criteria decision-making methods (MCDM) select the best option from different criteria. Therefore, this study aims to identify, assess and prioritize risks using FMEA based on SWARA-VIKOR multi-criteria decision-making methods in a gas pressure reduction station.

**Material and Methods:** In this descriptive and analytical study, stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) and decision-making optimization and compromise solution (VIKOR) methods were used to rank the risks of failure modes identified in FMEA. SWARA method was employed to determine the severity, probability and discovery weights, and VIKOR technique was applied to rank the failure modes of the system equipment. Finally, an operational example of the pressure reduction station was presented to show the application and feasibility of the proposed model. A comparative study was conducted to confirm the practicality and effectiveness of the proposed model.

**Results:** In total, 35 main failure modes were identified in the pressure reduction station. Failure of regulator sleeve and safety valve and regulator diaphragm rupture were assigned the first, second and third ranks of risk priority, respectively. The sensitivity analysis results showed the proposed approach had desirable stability and only the failure mode of increasing the heater flame temperature was very sensitive to changes in the weight of the criteria. Results of ranking the failure modes of the station indicated there were many changes in the ranking of failure modes based on the proposed approach.

**Conclusion:** The proposed approach could provide more reasonable and accurate results for ranking risks because the criteria were weighed step by step based on the experts' opinion.

**Keywords:** Risk assessment, FMEA method, SWARA method, VIKOR method

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Hokmabadi R, Zarei E, Karimi A. Identifying, Assessing and Prioritizing Pressure Reduction Station Risks Using FMEA Based on SWARA-VIKOR Multi-criteria Decision-making Methods. *J Health Saf Work*. 2022; 12(3): 632-651.

## 1. INTRODUCTION

City Gate Stations (CGS) are important facilities in the gas transportation system at the point of consumption of industries, industrial towns, and cities. Any deviation in the operation

of such a system can cause costly or catastrophic consequences. Therefore, in order to prevent undesired events, it is important to carry out risk analysis.

Several approaches have been represented as risk analysis methods including event tree analysis (ETA), fault tree analysis (FTA), bow-tie analysis

\* Corresponding Author Email: [a\\_karimi@sina.tums.ac.ir](mailto:a_karimi@sina.tums.ac.ir)

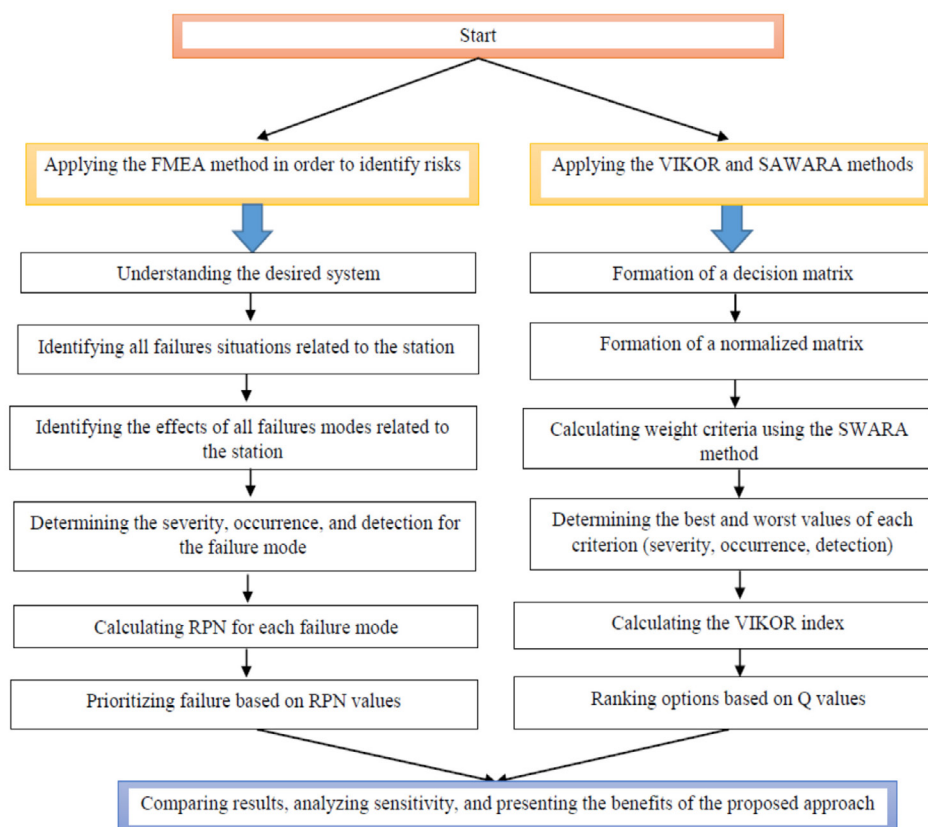


Fig. 1. The general framework of the proposed study algorithm

(BTA), hazard and operability analysis (HAZOP), and failure mode and effect analysis (FMEA), among others. FMEA is recognized as one of the most practical analytical methods that can be applied for defining, identifying, and eliminating multiple failures of a system before they occur. Despite the widespread use of this method, FMEA has limitations such as the inability to manage unspecified failure data including subjective assessment of experts, lack of weight values of risk parameters and, inability to consider conditionality between failure events.

Therefore, approaches should be sought that can compensate for the shortcomings of the FMEA method and improve the ability to evaluate and rank failure situations based on three related risk factors. Accordingly, the present study takes this research gap into account and uses multiple criteria decision making (MCDM) techniques to resolve the above-mentioned limitations. In this study, the stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) was used to determine the weights of intensity, probability, and detection, and the *vlsekriterijumska optimizacija i kaompromisno*

*resenje* (VIKOR) technique was employed to provide prioritization levels for the system equipment failure mode. Therefore, this research aimed to evaluate the risk using the FMEA method based on the MCDM methods SWARA-VIKOR in a gas pressure reduction station.

## 2. MATERIAL AND METHODS

This descriptive-analytical study was conducted in 2022 to develop the FMEA method in one of the pressure reduction stations located in North Khorasan Province. First, the specifications of the CGS and its main equipment are presented, followed by the steps of the approach proposed in this study.

The main components of these stations include the following:

- Filtration system
- Heating system
- Pressure reduction system (regulators, safety valve, and shut-off valve)
- Deodorizing system

This study was performed based on the following steps (Fig 1).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

First, the main failures of the CGS were identified using the FMEA method. For, the regulator, filter, heater, odorizing system, safety valve, shut-off valve, gauge, pipeline, meter and valves 7,5,6,3,3,3,1,3,3,2, and 2 failures were detected, respectively. The probability of deterioration and detection of risk priority numbers (RPN) were calculated, and, based on the calculated number, the failures were prioritized (Table 1).

Based on the results of expert weighting, the risk severity index (0.45) had higher priority

than the occurrence (0.35) and diagnosis (0.2) indicators, which demonstrated the importance of this criterion for experts.

In this study, the probability criteria of occurrence and severity had a positive aspect and the detection criterion had a negative aspect based on the range of the scores of the VIKOR method. After completing the phases of the VIKOR decision technique, the most important step is to determine the desirability and non-desirability of each option, and perform the final calculation of the VIKOR index (Table 2).

Table 1. Final risk priorities based on FMEA

| Type of equipment        | Type of defect                            | Severity | Occurrence | Detection | RPN   | Priority |
|--------------------------|-------------------------------------------|----------|------------|-----------|-------|----------|
| <b>Regulator</b>         | Failure 1: stop                           | 6.9      | 5.2        | 4         | 143.5 | 12       |
|                          | Failure 2: Vibration                      | 4.8      | 3.9        | 5         | 93.69 | 23       |
|                          | Failure 3: Closing defect                 | 6.2      | 4.1        | 3.8       | 96.6  | 22       |
|                          | Failure 4: Rupture of the diaphragm       | 8.8      | 5.15       | 3.8       | 172.2 | 3        |
|                          | Failure 5: Corrosion                      | 4.1      | 4.2        | 5         | 86.1  | 25       |
|                          | Failure 6: Sleeve failure                 | 8.8      | 6.9        | 3.1       | 188.2 | 1        |
|                          | Failure 7: Uring failure                  | 6.2      | 3.85       | 3.1       | 74    | 29       |
| <b>Filter</b>            | Failure 1: stop                           | 5.8      | 4.9        | 6         | 170.5 | 4        |
|                          | Failure 2: Mesh filling                   | 6.2      | 4          | 3         | 74.4  | 28       |
|                          | Failure 3: Dirty filter                   | 4.5      | 5          | 3         | 67.5  | 30       |
|                          | Failure 4: Corrosion                      | 5        | 3.8        | 5.2       | 98.8  | 20       |
|                          | Failure 5: Cartridge failure              | 4.55     | 4          | 3         | 54.6  | 34       |
| <b>Heater</b>            | Failure 1: stop                           | 6.8      | 5          | 4.8       | 163.2 | 6        |
|                          | Failure 2: Increased flame temperature    | 6.2      | 5.5        | 4         | 136.4 | 13       |
|                          | Failure 3: Defective startup              | 4.5      | 5.6        | 3         | 75.6  | 27       |
|                          | Failure 4: Corrosion                      | 5        | 3.85       | 5         | 96.3  | 23       |
|                          | Failure 5: Tube failure                   | 9        | 4.2        | 4         | 151.2 | 8        |
|                          | Failure 6: Electrical connection          | 5.9      | 4.5        | 5         | 132.8 | 14       |
| <b>Deodorizer system</b> | Failure 1: Improper injection             | 5        | 6.8        | 3         | 102   | 18       |
|                          | Failure 2: Injection device not adjusting | 5.9      | 4          | 4         | 94.4  | 24       |
|                          | Failure 3: Filter failure                 | 9        | 4.1        | 4         | 147.6 | 10       |
| <b>Safety valve</b>      | Failure 1: stop                           | 9        | 4.2        | 3         | 113.4 | 16       |
|                          | Failure 2: Washer failure                 | 9        | 4          | 4.25      | 153   | 7        |
|                          | Failure 3: Corrosion                      | 5        | 3.85       | 5.1       | 96.9  | 21       |
| <b>Shut-off valve</b>    | Failure 1: stop                           | 6.9      | 5          | 5         | 172.5 | 3        |
|                          | Failure 2: Washer failure                 | 7        | 4.1        | 4.3       | 123.4 | 15       |
|                          | Failure 3: Corrosion                      | 5        | 3.85       | 5.2       | 100.1 | 19       |
| <b>Gauge</b>             | Failure 1: Measurement error              | 5        | 4          | 3         | 60    | 33       |
| <b>Pipeline</b>          | Failure 1: Corrosion                      | 5        | 3.86       | 5.3       | 102.3 | 17       |
|                          | Failure 2: Connections failure            | 9        | 3.9        | 4.2       | 147   | 11       |
|                          | Failure 3: Tube clogging                  | 5.9      | 4.2        | 3.2       | 79.3  | 26       |
| <b>Counter</b>           | Failure 1: stop                           | 4        | 3.85       | 4         | 61.6  | 32       |
|                          | Failure 2: Wrong display                  | 4        | 3.7        | 3         | 44.4  | 35       |
| <b>Valve</b>             | Failure 1: Failure                        | 7        | 5.9        | 4         | 165.2 | 5        |
|                          | Failure 2: Washer failure                 | 8.8      | 4.2        | 4         | 147.8 | 9        |

Table 2. Values of final VIKOR index and ranking of station values

| Type of equipment | Failure   | Potential risk to data safety |      |      | VIKOR normal decision matrix |       |       | Utility | Regret | Final VIKOR | Priority |
|-------------------|-----------|-------------------------------|------|------|------------------------------|-------|-------|---------|--------|-------------|----------|
|                   |           | S                             | O    | D    | S                            | O     | D     |         |        |             |          |
| Regulator         | Failure 1 | 6.8                           | 5.15 | 3.95 | 0.154                        | 0.116 | 0.089 | 0.339   | 0.17   | 0.22        | 7        |
|                   | Failure 2 | 4.2                           | 3.85 | 5.5  | 0.095                        | 0.087 | 0.124 | 0.73    | 0.386  | 0.851       | 35       |
|                   | Failure 3 | 6.2                           | 4.2  | 3.5  | 0.14                         | 0.095 | 0.079 | 0.501   | 0.278  | 0.647       | 20       |
|                   | Failure 4 | 8.5                           | 5.15 | 3.8  | 0.192                        | 0.116 | 0.086 | 0.187   | 0.17   | 0.112       | 3        |
|                   | Failure 5 | 3.9                           | 3.85 | 5.2  | 0.088                        | 0.087 | 0.118 | 0.665   | 0.323  | 0.725       | 30       |
|                   | Failure 6 | 8.5                           | 6.6  | 3.05 | 0.192                        | 0.149 | 0.069 | 0.014   | 0.014  | 0.109       | 1        |
|                   | Failure 7 | 6.2                           | 3.85 | 3    | 0.14                         | 0.087 | 0.068 | 0.54    | 0.319  | 0.426       | 11       |
| Filter            | Failure 1 | 5.9                           | 4.85 | 6    | 0.133                        | 0.11  | 0.136 | 0.463   | 0.235  | 0.692       | 28       |
|                   | Failure 2 | 6.2                           | 3.85 | 3.05 | 0.14                         | 0.087 | 0.069 | 0.54    | 0.319  | 0.55        | 16       |
|                   | Failure 3 | 4.6                           | 4.9  | 3.05 | 0.103                        | 0.111 | 0.069 | 0.564   | 0.354  | 0.579       | 17       |
|                   | Failure 4 | 3.9                           | 3.85 | 5.2  | 0.115                        | 0.087 | 0.118 | 0.67    | 0.323  | 0.747       | 32       |
|                   | Failure 5 | 3.6                           | 3.85 | 3.1  | 0.103                        | 0.087 | 0.07  | 0.688   | 0.354  | 0.681       | 25       |
| Heater            | Failure 1 | 6.4                           | 5.15 | 4.6  | 0.145                        | 0.116 | 0.104 | 0.378   | 0.187  | 0.607       | 18       |
|                   | Failure 2 | 5.9                           | 5.6  | 4.1  | 0.133                        | 0.127 | 0.093 | 0.367   | 0.235  | 0.632       | 19       |
|                   | Failure 3 | 4.6                           | 5.3  | 3.05 | 0.103                        | 0.12  | 0.069 | 0.517   | 0.354  | 0.321       | 9        |
|                   | Failure 4 | 3.9                           | 3.86 | 5.2  | 0.111                        | 0.087 | 0.118 | 0.665   | 0.323  | 0.731       | 31       |
|                   | Failure 5 | 8.5                           | 4.2  | 4.3  | 0.192                        | 0.095 | 0.097 | 0.297   | 0.278  | 0.524       | 13       |
|                   | Failure 6 | 5.9                           | 4.2  | 5.2  | 0.133                        | 0.095 | 0.118 | 0.536   | 0.278  | 0.690       | 27       |
| Deodorizer system | Failure 1 | 4.9                           | 6.6  | 3.05 | 0.111                        | 0.149 | 0.069 | 0.336   | 0.113  | 0.113       | 4        |
|                   | Failure 2 | 5.9                           | 3.85 | 3.95 | 0.133                        | 0.087 | 0.089 | 0.572   | 0.319  | 0.679       | 23       |
|                   | Failure 3 | 8.5                           | 4.2  | 4.3  | 0.192                        | 0.095 | 0.907 | 0.297   | 0.278  | 0.499       | 12       |
| Safety valve      | Failure 1 | 8.5                           | 4.2  | 3.1  | 0.192                        | 0.095 | 0.07  | 0.292   | 0.278  | 0.11        | 2        |
|                   | Failure 2 | 8.5                           | 4.2  | 4.3  | 0.192                        | 0.095 | 0.097 | 0.297   | 0.278  | 0.536       | 14       |
|                   | Failure 3 | 4.9                           | 3.85 | 5.2  | 0.111                        | 0.087 | 0.118 | 0.665   | 0.323  | 0.793       | 33       |
| Shut-off valve    | Failure 1 | 6.8                           | 4.5  | 5.35 | 0.102                        | 0.102 | 0.121 | 0.417   | 0.242  | 0.683       | 26       |
|                   | Failure 2 | 6.5                           | 4.2  | 4.3  | 0.147                        | 0.095 | 0.097 | 0.477   | 0.278  | 0.680       | 24       |
|                   | Failure 3 | 4.9                           | 3.85 | 5.2  | 0.111                        | 0.087 | 0.118 | 0.665   | 0.323  | 0.797       | 34       |
| Gauge             | Failure 1 | 4.9                           | 3.85 | 3    | 0.111                        | 0.087 | 0.068 | 0.655   | 0.323  | 0.657       | 21       |
| Pipeline          | Failure 1 | 4.9                           | 3.85 | 5.2  | 0.111                        | 0.087 | 0.118 | 0.665   | 0.323  | 0.699       | 29       |
|                   | Failure 2 | 8.5                           | 4.2  | 4.2  | 0.192                        | 0.095 | 0.095 | 0.297   | 0.278  | 0.255       | 8        |
|                   | Failure 3 | 5.9                           | 4.2  | 3    | 0.133                        | 0.095 | 0.068 | 0.526   | 0.278  | 0.341       | 10       |
| Counter           | Failure 1 | 3.9                           | 3.85 | 3.45 | 0.088                        | 0.087 | 0.078 | 0.749   | 0.414  | 0.678       | 22       |
|                   | Failure 2 | 6.9                           | 3.85 | 3.05 | 0.156                        | 0.087 | 0.069 | 0.476   | 0.319  | 0.219       | 6        |
| Valve             | Failure 1 | 6.6                           | 5.9  | 4.1  | 0.15                         | 0.133 | 0.093 | 0.268   | 0.168  | 0.218       | 5        |
|                   | Failure 2 | 8.5                           | 4.2  | 4.3  | 0.192                        | 0.095 | 0.097 | 0.297   | 0.278  | 0.548       | 15       |

The sensitivity analysis of this study was performed by substituting the weight of each criterion with another criterion. The sensitivity analysis indicated that, in most cases, options ranking remained the same or slightly changed.

Table 3 also provides the ranking results of the station's main defects using the proposed combined approach and the FMEA method. According to the results, many changes were observed in the ranking of defects based on the proposed approach with the FMEA method and only in three failures including the regulator

sleeve failure, rupture of regulator diaphragm and, valve structural defect, however, the same results were obtained for both methods.

The findings demonstrated that the proposed approach can provide more reasonable and accurate results for risk rating. First, it was indicated that there were many differences between the rankings provided by the two traditional approaches and the proposed approach. The reason for these inconsistent rankings could be mainly related to the relative importance of the criteria of severity, probability of occurrence and detection in

Table 3. The ranking results using the proposed approach and FMEA method

| Type of equipment        | Failure   | Traditional FMEA | Proposed approach |
|--------------------------|-----------|------------------|-------------------|
| <b>Regulator</b>         | Failure 1 | 12               | 7                 |
|                          | Failure 2 | 23               | 35                |
|                          | Failure 3 | 22               | 20                |
|                          | Failure 4 | 3                | 3                 |
|                          | Failure 5 | 25               | 30                |
|                          | Failure 6 | 1                | 1                 |
|                          | Failure 7 | 29               | 11                |
| <b>Filter</b>            | Failure 1 | 4                | 28                |
|                          | Failure 2 | 28               | 16                |
|                          | Failure 3 | 30               | 17                |
|                          | Failure 4 | 20               | 32                |
|                          | Failure 5 | 34               | 25                |
| <b>Heater</b>            | Failure 1 | 6                | 18                |
|                          | Failure 2 | 13               | 19                |
|                          | Failure 3 | 27               | 9                 |
|                          | Failure 4 | 23               | 31                |
|                          | Failure 5 | 8                | 13                |
|                          | Failure 6 | 14               | 27                |
| <b>Deodorizer system</b> | Failure 1 | 18               | 4                 |
|                          | Failure 2 | 24               | 23                |
|                          | Failure 3 | 10               | 12                |
| <b>Safety valve</b>      | Failure 1 | 16               | 2                 |
|                          | Failure 2 | 7                | 14                |
|                          | Failure 3 | 21               | 33                |
| <b>Shut-off valve</b>    | Failure 1 | 3                | 26                |
|                          | Failure 2 | 15               | 24                |
|                          | Failure 3 | 19               | 34                |
| <b>Gauge</b>             | Failure 1 | 33               | 21                |
| <b>Pipeline</b>          | Failure 1 | 17               | 29                |
|                          | Failure 2 | 11               | 8                 |
|                          | Failure 3 | 26               | 10                |
| <b>Counter</b>           | Failure 1 | 32               | 22                |
|                          | Failure 2 | 35               | 6                 |
| <b>Valve</b>             | Failure 1 | 5                | 5                 |
|                          | Failure 2 | 9                | 15                |

calculating RPN and the weight of the criteria, and changes in the proposed ranking for failure cases were not included in the FMEA ranking. Second, in an RPN, different sets of intensity, probability of occurrence and detection might have the same RPN value, but differ in ranking based on the proposed approach. Therefore, given this deep gap, the new hybrid approach can properly solve this problem by providing an accurate ranking for each risk and differentiating the results.

## 5. ACKNOWLEDGMENT

The present study is part of a Ph.D. 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 Occupational Health Engineering of Tehran University of Medical Sciences for their cooperation and financial support of the present study.

## شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک تجهیزات ایستگاه تقلیل فشار با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره SWARA-VIKOR

رجبعلی حکم‌آبادی<sup>۱</sup>، اسماعیل زارعی<sup>۲</sup>، علی کریمی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، بجنورد، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی فرآیند، دانشکده مهندسی و علوم کاربردی، دانشگاه مموریال نیوفاندلند کانادا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

### چکیده

**مقدمه:** روش آنالیز حالت شکست و اثرات آن (FMEA) یک روش شناسایی، ارزیابی و الویت‌بندی ریسک است که در صنایع استفاده می‌شود. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، روش‌هایی هستند که از بین چندین معیار مختلف، بهترین گزینه را انتخاب می‌کنند؛ بنابراین، هدف از این مقاله، شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره SWARA-VIKOR در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز می‌باشد.

**روش کار:** در این مطالعه توصیفی-تحلیلی، از روش‌های تحلیل نسبت ارزیابی وزن دهی تدریجی (SWARA) و جواب سازشی و بهینه تصمیم‌گیری (VIKOR) برای رتبه‌بندی خطرات حالات شکست شناسایی شده در FMEA استفاده گردید. از روش SWARA جهت تعیین وزن‌های شدت، احتمال و کشف و از تکنیک VIKOR برای رتبه‌بندی حالات شکست تجهیزات سیستم استفاده گردید. در نهایت، یک نمونه عملیاتی از ایستگاه تقلیل فشار برای نشان دادن کاربرد و امکان‌سنجی مدل پیشنهادی و یک مطالعه مقایسه‌ای نیز برای تأیید قابلیت عملی بودن و اثربخشی مدل پیشنهادی انجام گرفت.

**یافته‌ها:** ۳۵ حالت شکست اصلی در ایستگاه تقلیل فشار شناسایی گردید. خرابی اسلیو رگلاتور، خرابی شیر اطمینان و پارگی دیافراگم رگلاتور رتبه‌های اول، دوم و سوم اولویت ریسک را به خود اختصاص دادند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که رویکرد پیشنهادی از پایداری مناسبی برخوردار می‌باشد و فقط حالت شکست افزایش دمای شعله هیت‌ر نسبت به تغییر وزن معیارها بسیار حساس می‌باشد. نتایج رتبه‌بندی حالات شکست ایستگاه نشان داد که تغییرات بسیاری در رتبه‌بندی حالات شکست بر اساس رویکرد پیشنهادی وجود داشت.

**نتیجه‌گیری:** به دلیل این که وزن‌دهی معیارها بر اساس نظر کارشناسان به صورت گام‌به‌گام صورت گرفته است، رویکرد پیشنهادی می‌تواند نتایج معقول‌تر و دقیق‌تری را برای رتبه‌بندی ریسک ارائه دهد.

**کلمات کلیدی:** ارزیابی ریسک، روش آنالیز حالت شکست و اثرات آن، روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن دهی تدریجی، روش جواب سازشی و بهینه تصمیم‌گیری

## مقدمه

ایستگاه‌های تقلیل فشار دروازه شهری<sup>۱</sup> (CGS)، از تاسیسات بسیار مهم در سیستم حمل‌ونقل گازی جهت صنایع، کارخانجات، شهرک‌های صنعتی و مصارف شهری می‌باشند (۱). هرگونه شکست و اختلال در عملکرد چنین ایستگاه‌هایی می‌تواند عواقب فاجعه باری به همراه داشته باشند (۲)، بنابراین، به‌منظور پیشگیری از حوادث ناخواسته، انجام آنالیز ریسک تجهیزات و عملیات این قبیل ایستگاه‌ها بسیار مهم می‌باشد (۳). آنالیز ریسک، ابزاری علمی و سیستماتیک جهت پیش‌بینی و حذف ریسک در سیستم‌های صنعتی و فرآیندی است (۴-۷).

رویکردهای مختلفی برای شناسایی و آنالیز ریسک ارائه شده است که می‌توان به آنالیز درخت علت<sup>۲</sup> (ETA)، آنالیز درخت خطا<sup>۳</sup> (FTA)، روش پایبونی (Bow-tie)، روش هازوپ (HAZOP)، آنالیز حالت شکست و اثرات آن‌ها<sup>۴</sup> (FMEA) و ... اشاره کرد. روش FMEA به‌عنوان یکی از قابل‌استفاده‌ترین روش‌های تحلیلی شناخته شده است که می‌تواند در صورت تعریف، شناسایی و رفع شکست‌های متعدد سیستم قبل از هر رخدادی مورد استفاده قرار گیرد (۸). این ابزار اساساً برای تجزیه و تحلیل کیفی استفاده می‌شود که سیستم‌ها یا زیرسیستم‌ها را برای شناسایی خطاهای احتمالی اجزای سیستم بررسی می‌کند و سعی می‌کند اثرات خطاهای احتمالی را بر سایر اجزای سیستم ارزیابی کند (۹-۱۱). علاوه بر این، این روش به اولویت‌بندی شناسایی شکست‌ها و پیشگیری از وقوع حوادث احتمالی آن‌ها کمک می‌کند (۱۲).

اولویت‌بندی شکست‌ها بر اساس مقدار پارامترهای ریسک، شامل وقوع<sup>۵</sup> (O)، شدت<sup>۶</sup> (S)، کشف<sup>۷</sup> (D) و شاخصی است که عدد اولویت ریسک<sup>۸</sup> (RPN) نامیده می‌شود. پارامتر O نشان‌دهنده احتمال وقوع، پارامتر S

نشان‌دهنده شدت و پارامتر D نشان‌دهنده احتمال کشف شکست قبل از هر وقوع است (۳). از حاصل ضرب مقادیر پارامترهای ریسک، مقدار RPN یک حالت شکست خاص محاسبه می‌شود. علاوه بر تمام مزایای FMEA، این روش به دلایل مختلف مورد انتقاد قرار گرفته است. یکی از عیوب آن، عدم ارزیابی دقیق پارامترهای ریسک (شدت، وقوع و کشف) است که دلیل آن عمدتاً به خاطر تخصص، دانش و تجربه کارشناسان با توجه به سوابق متفاوت آن‌هاست (۱۳-۱۶)؛ بنابراین، باید به دنبال رویکردهایی بود که بتواند کمبود روش FMEA را جبران کند و قابلیت ارزیابی و رتبه‌بندی حالات شکست را بر اساس سه ریسک فاکتور مرتبط تقویت کند. بر این اساس، مطالعه حاضر این شکاف پژوهشی را در نظر گرفته و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به دنبال رفع این محدودیت‌ها می‌باشد.

به‌منظور غلبه بر محدودیت‌ها و بهبود اثربخشی روش FMEA، تعداد فزاینده‌ای از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره توسعه یافته‌اند که در این مطالعه، از روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن دهی تدریجی<sup>۹</sup> (SWARA) جهت تعیین وزن‌های شدت، احتمال و کشف و روش جواب سازشی و بهینه تصمیم‌گیری<sup>۱۰</sup> (VIKOR) برای ارائه سطوح اولویت‌بندی حالات شکست تجهیزات استفاده شده است. تکنیک SWARA یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که برای استخراج عدم قطعیت‌های موجود در روند ارزیابی عبارات زبانی معیارها و گزینه‌ها استفاده می‌شود. همچنین حجم کم محاسبه، سهولت استفاده، قابل فهم بودن، استفاده از ضریب اهمیت مقایسه‌ای به‌منظور مقایسه هر شاخص با شاخص قبلی خود، یافتن وزن اولویت معیارها بر اساس برنامه‌های سازمان، استفاده از نظر خبرگان و قابلیت ترکیب نظرات چندین خبره و داشتن رویه‌ای گام‌به‌گام جهت ارائه راه‌حل نهایی از مهم‌ترین مزایای این روش می‌باشد (۱۷-۲۲). روش VIKOR نیز برای بهینه‌سازی چند معیاره برای

1 City Gas Station

2 Even Tree Analysis

3 Fault Tree Analysis

4 Failure Mode and Effect Analysis

5 Occurrence

6 Intensity

7 Detection

8 Risk Priority Number

9 Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis

10 VlseKriterijumska Optimizacija I Kaompromisno Resenje





شکل ۱. نمودار بلوکی ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS

یکسان هستند. اجزای اصلی این ایستگاه‌ها شامل موارد زیر است:

- سیستم فیلتراسیون
  - سیستم گرمکن
  - سیستم تقلیل فشار (رگلاتورها، شیر قطع کن، شیر اطمینان)
  - سیستم بودار کننده
- در ادامه، نمودار بلوکی ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS نشان داده شده است (شکل ۱).

#### روش FMEA

یک تیم عملیاتی متشکل از متخصصان مرتبط با تحقیق شامل کارشناسان واحد ایمنی و بهداشت، عملیات، ابزار دقیق و تعمیر و نگهداری تشکیل و شناسایی حالات شکست تجهیزات ایستگاه بر اساس روش FMEA صورت گرفت. در جلسه اول، دیگرام‌های فرایند پروسه، لوله‌کشی و ابزار دقیق بررسی گردید و تجهیزات اصلی ایستگاه، خطوط ورودی و خروجی و همچنین دستگاه‌های متصل به آن‌ها شناسایی گردید و در مرحله بعد، شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی شکست‌ها با روش FMEA انجام گرفت. روش FMEA فرآیند بررسی هر چه بیشتر اجزاء، مجموعه‌ها و زیرسیستم‌ها برای شناسایی حالات شکست احتمالی در یک سیستم و علل و اثرات آن است. برای هر جزء، حالات شکست و اثرات ناشی از آن بر بقیه سیستم در یک کاربرگ FMEA ثبت گردید. این روش، یکی از اولین تکنیک‌های بسیار ساختارمند و سیستماتیک برای آنالیز شکست می‌باشد (۸، ۱۱، ۱۹). در این روش، بعد از شناسایی شکست‌ها، درجه‌بندی معیارهای شدت، احتمال

سیستم‌های پیچیده و رتبه‌بندی اولویت سازشی از گزینه‌ها با توجه به معیارهای انتخاب‌شده، توسعه داده شد. راه‌حل‌های سازش آمیز برای یک مشکل با معیارهای متضاد می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا یک پاسخ قابل قبول را شناسایی کنند؛ همچنین این روش می‌تواند مشکلات روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره را با معیارهای متناقض یا غیرقابل مقایسه‌ای حل کند (۲۳)؛ بنابراین، هدف از این مطالعه، بهبود ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره SWARA-VIKOR در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS می‌باشد.

#### روش کار

این مطالعه توصیفی-تحلیلی در سال ۱۴۰۰ در یکی از ایستگاه‌های تقلیل فشار CGS استان خراسان شمالی انجام گرفت. در ابتدا، مشخصات ایستگاه و تجهیزات اصلی آن ارائه و در ادامه مفاهیم پایه روش‌های FMEA، SWARA و VIKOR و در انتها مراحل رویکرد پیشنهادی این مطالعه آورده شده است.

#### - مشخصات ایستگاه

این ایستگاه‌ها دارای سیستم تقلیل فشار گاز می‌باشد که با کاهش فشار گاز از ۱۰۰۰ به ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع، بیشتر در ورودی شهرها مورداستفاده قرار می‌گیرند. یک ایستگاه تقلیل فشار گاز بسته به نوع تقلیل فشار گاز (فشار ورودی به خروجی) و ظرفیت آن، دارای جزئیات فیزیکی و هندسی خاصی در اجزای خود است؛ اما درعین حال و به‌طور کلی همه این ایستگاه‌ها از نظر ظاهر و نوع اجزاء



جدول ۱. درجه‌بندی معیارهای شدت، احتمال رخداد و کشف برای شناسایی خطرات در FMEA (۱۹، ۱۱، ۸)

| معیار               | رتبه | میزان             | شرح                                                           |
|---------------------|------|-------------------|---------------------------------------------------------------|
| شدت                 | ۱    | هیچ               | بدون اثر                                                      |
|                     | ۲    | خیلی جزئی         | اثر خیلی جزئی دارد                                            |
|                     | ۳    | جزئی              | اثر جزئی دارد                                                 |
|                     | ۴    | خیلی کم           | وخامت خیلی کم ولی بیشتر افراد آن را احساس می‌کنند مثل نشت گاز |
|                     | ۵    | کم                | وخامت کم مثل ضرب‌دیدگی                                        |
|                     | ۶    | متوسط             | وخامت متوسط مثل شکستگی و مسمومیت غذایی                        |
|                     | ۷    | زیاد              | وخامت زیاد مثل آتش گرفتن تجهیزات، سوختگی بدن                  |
|                     | ۸    | خیلی زیاد         | وخامت جبران‌ناپذیر مثل از دست دادن یک عضو بدن                 |
|                     | ۹    | خطرناک با هشدار   | وخامت تأسفبار اما همراه با هشدار                              |
|                     | ۱۰   | خطرناک بدون هشدار | وخامت تأسفبار مثل خطر مرگ، تخریب کامل                         |
| احتمال رخداد        | ۱    | بعید (نامحتمل)    | کمتر از ۱ در ۱۵۰۰۰۰۰                                          |
|                     | ۲    | خطرات نسبتاً نادر | ۱ در ۱۵۰۰۰۰                                                   |
|                     | ۳    | خطرات کم          | ۱ در ۱۵۰۰۰                                                    |
|                     | ۴    | نسبتاً کم         | ۱ در ۲۰۰۰                                                     |
|                     | ۵    | متوسط             | ۱ در ۴۰۰                                                      |
|                     | ۶    | نسبتاً زیاد       | ۱ در ۸۰                                                       |
|                     | ۷    | زیاد              | ۱ در ۲۰                                                       |
|                     | ۸    | شکست‌های مکرر     | ۱ در ۸                                                        |
|                     | ۹    | خیلی زیاد         | ۱ در ۳                                                        |
|                     | ۱۰   | بسیار زیاد        | ۱ در ۲ یا بیش از آن                                           |
| قابلیت کشف (ردیابی) | ۱    | تقریباً حتمی      | تقریباً به‌طور حتم با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود           |
|                     | ۲    | خیلی زیاد         | به احتمال خیلی زیاد با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود          |
|                     | ۳    | زیاد              | به احتمال زیاد با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود               |
|                     | ۴    | نسبتاً زیاد       | به احتمال نسبتاً زیاد با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود        |
|                     | ۵    | متوسط             | در نیمی از موارد محتمل است که با کنترل موجود ردیابی شود       |
|                     | ۶    | کم                | احتمال کمی دارد که با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود           |
|                     | ۷    | خیلی کم           | احتمال خیلی کمی دارد که با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود      |
|                     | ۸    | ناچیز             | احتمال ناچیزی دارد که با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود        |
|                     | ۹    | خیلی ناچیز        | احتمال خیلی ناچیزی دارد که با کنترل‌های موجود ردیابی می‌شود   |
|                     | ۱۰   | مطلقاً هیچ        | هیچ کنترلی وجود ندارد و یا در صورت وجود قادر به ردیابی نیست   |

بر اساس این روش، در گام اول، معیارها با توجه به اجماع کارشناسان (متخصصان بهداشت حرفه‌ای، کارشناسان ابزار دقیق، کارشناسان تعمیر و نگهداری و کارشناسان عملیاتی) اولویت‌بندی شدند. در مرحله دوم اهمیت نسبی معیارها در مقایسه با معیارهای دیگر مشخص گردید. به‌طور کلی، روش SWARA دارای هفت مرحله است که به شرح زیر می‌باشند (۲۴، ۲۲، ۱۹).

مرحله (۱) تعیین و گروه‌بندی معیارهای ارزیابی: معیارهای ارزیابی در این مرحله با توجه به عواملی مانند نوع و اهداف پروژه تعیین شده و سپس معیارها به ترتیب اهمیت ارزیابی می‌شوند. به طوری که هر چه معیار مهم‌تر باشد رتبه بالاتری به آن تعلق می‌گیرد.

مرحله (۲) مرتب کردن معیارها بر اساس اهمیت مورد

رخداد و کشف بر اساس جدول ۱ تعیین و درنهایت عدد اولویت ریسک یا RPN از حاصل ضرب شدت، احتمال و قابلیت کشف محاسبه گردید.

### روش SWARA

یکی از جدیدترین روش‌ها در ارزیابی اوزان است که در آن، کارشناسان نقش بسزایی در محاسبه اوزان دارند. بر اساس این روش، رتبه‌های اول و آخر به ترتیب به بیشترین و کم‌اهمیت‌ترین معیارها اختصاص می‌یابد. درنهایت، میانگین ارزش رتبه‌بندی‌های داده‌شده به هر معیار توسط کارشناسان مختلف، رتبه‌بندی و اهمیت آن معیار را مشخص می‌کند. از این‌رو در مطالعه حاضر از این روش برای محاسبه وزن معیارها استفاده گردید.

بیشتری داشته باشد از اهمیت بالاتری برخوردار است.

### روش VIKOR

به منظور رتبه‌بندی و انتخاب گزینه مناسب از روش VIKOR استفاده گردید؛ به طوری که این روش جواب سازشی برای یک مساله را به کمک معیارهای متناقض و سازش ناپذیر مشخص می‌کند که تصمیم گیرنده را به تصمیم نهایی می‌رساند (۲۵-۲۹، ۱۱). به طور کلی تکنیک VIKOR دارای شش مرحله است (۱۱) که به شرح زیر می‌باشد:

مرحله (۱) تشکیل ماتریس تصمیم: در اولین قدم بر اساس اطلاعات در دسترس، ماتریس تصمیم را به صورت زیر تشکیل داده که در آن  $m$  نماینده تعداد گزینه مدنظر و  $n$  نماینده تعداد معیار مدنظر جهت ارزیابی گزینه‌ها می‌باشند.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ A_{m1} & \dots & A_{mn} \end{bmatrix} \quad ۴$$

برای این منظور ابتدا باید طیفی انتخاب گردد که در این مطالعه از مقیاس لیکرت ۹ درجه‌ای (۱۱) استفاده گردید. جدول ۲، ماتریس تصمیم یا ماتریس رتبه‌بندی ریسک را بر حسب معیارهای انتخاب شده (شدت، وقوع رخداد و قابلیت کشف) فهرست می‌کند.

مرحله (۲) تشکیل یک ماتریس نرمال شده: در مرحله دوم تصمیم‌گیری، با استفاده از روش خطی، نرمال سازی صورت می‌گیرد. ماتریس نرمال شده با  $(N)$  و هر ورودی با  $n_{ij}$  نشان داده می‌شود که از طریق تقسیم ورودی مربوطه در ماتریس اولیه بر مجموع ورودی‌های ستون مربوطه محاسبه می‌گردد:

انتظار: ابتدا شاخص‌هایی که تصمیم گیرندگان نهایی در نظر می‌گیرند بر اساس درجه اهمیت انتخاب و مرتب می‌شوند. بر این اساس بحرانی‌ترین شاخص‌ها در رده‌های بالاتر و کم اهمیت‌ترین شاخص‌ها در رتبه‌های پایین قرار می‌گیرند.

مرحله (۳) اهمیت مقایسه‌ای: در این مرحله تصمیم گیرنده اهمیت نسبی شاخص  $j$  ام را در ارتباط با شاخص قبلی  $j-1$  برای هر شاخص تعیین می‌کند.

مرحله (۴) تعیین ضریب اهمیت مقایسه‌ای: در این مرحله اهمیت مقایسه شده هر شاخص با شاخص قبلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای مقایسه شاخص دوم به بعد می‌بایست اهمیت مقایسه‌ای شاخص اول را با مقدار یک جمع نمود (فرمول ۱).

$$k_j = \begin{cases} 1 & j=1 \\ s_j + 1 & j>1 \end{cases} \quad ۱$$

مرحله (۵) محاسبه وزن: در این مرحله وزن‌های غیرنرمال محاسبه می‌شود (فرمول ۲).

$$q_j = \begin{cases} 1 & j=1 \\ \frac{x_j - 1}{k_j} & j>1 \end{cases} \quad ۲$$

مرحله (۶) نرمال کردن: در این مرحله به محاسبه نرمال شده  $j$  امین شاخص پرداخته می‌شود (فرمول ۳)

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad ۳$$

مرحله (۷) تعیین وزن قطعی: در این مرحله وزن قطعی هر شاخص محاسبه می‌گردد. هر شاخصی که مقدار

جدول ۲. طیف VIKOR

| وضعیت | بینهایت زیاد | خیلی زیاد | زیاد | زیاد تا متوسط | متوسط | کم تا متوسط | کم | خیلی کم | ناچیز |
|-------|--------------|-----------|------|---------------|-------|-------------|----|---------|-------|
| درجه  | ۹            | ۸         | ۷    | ۶             | ۵     | ۴           | ۳  | ۲       | ۱     |

$$S^* = \text{Min}S_i, S^- = \text{Max}S_i \quad ۱۳$$

$$R^* = \text{Min}R_i, R^- = \text{Max}R_i \quad ۱۴$$

مرحله ۶) رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس شاخص VIKOR: بعد از این که مقدار شاخص Q بر اساس فرمول ۱۲ تعیین گردید، رتبه‌بندی گزینه‌ها به این صورت می‌باشد که هر گزینه‌ای که دارای مقدار شاخص Q کمتری باشد از اولویت بیشتری برای انتخاب برخوردار است و به عنوان نمره نهایی رویکرد پیشنهادی می‌باشد.

چارچوب رویکرد پیشنهادی

اجرای این مطالعه بر اساس مراحل زیر انجام گرفت (شکل ۲)

### یافته‌ها

ابتدا حالات شکست ایستگاه CGS با استفاده از روش FMEA شناسایی گردید. به طوری که برای رگولاتور، فیلتر، هیتر، سیستم بودار کننده، شیر اطمینان، شیر قطع کن، گیج، خط لوله، کنتور و شیرآلات به ترتیب ۵، ۶، ۳، ۳، ۳، ۱، ۳، ۲ و ۲ شکست و در مجموع ۳۵ حالت شکست اصلی شناسایی گردید و بعد بر اساس جدول شماره ۱ برای هر حالت شکست، مقدار شدت، احتمال رخداد و کشف، تعیین و از حاصل ضرب شدت، احتمال و قابلیت کشف، مقدار RPN محاسبه گردید و بر اساس عدد محاسبه شده، اولویت‌بندی حالات شکست صورت گرفت (جدول ۳).

پس از شناسایی معیارهای تصمیم‌گیری، وزن‌دهی آن (شدت، احتمال رخداد و کشف) بر اساس نظر کارشناسان به صورت گام‌به‌گام انجام شد. در مرحله اول معیارها طبقه‌بندی شده و پس از طبقه‌بندی شاخص‌ها بر اساس تجمیع نظرات کارشناسان رتبه‌بندی شدند. در مرحله بعد اهمیت نسبی هر یک از معیارهای قبلی آن محاسبه گردید. در مرحله سوم ضریب اهمیت نسبی تعیین و وزن هر شاخص نسبت به وزن شاخص قبلی سنجیده شد. در

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}}, \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad ۵$$

مرحله ۳) تعیین بهترین و بدترین مقادیر هر معیار: در این مرحله بهترین و بدترین مقادیر هر معیار از بین تمامی گزینه‌ها انتخاب می‌شود. اگر معیار مثبت باشد بهترین و بدترین بر اساس فرمول‌های ۶ و ۷ و در صورتی که معیار منفی باشد بهترین و بدترین بر اساس فرمول‌های ۸ و ۹ انتخاب می‌گردند.

$$f_j^* = \text{Max}f_i \quad ۶$$

$$f_j^- = \text{Min}f_i \quad ۷$$

$$f_j^* = \text{Min}f_i \quad ۸$$

$$f_j^- = \text{Max}f_i \quad ۹$$

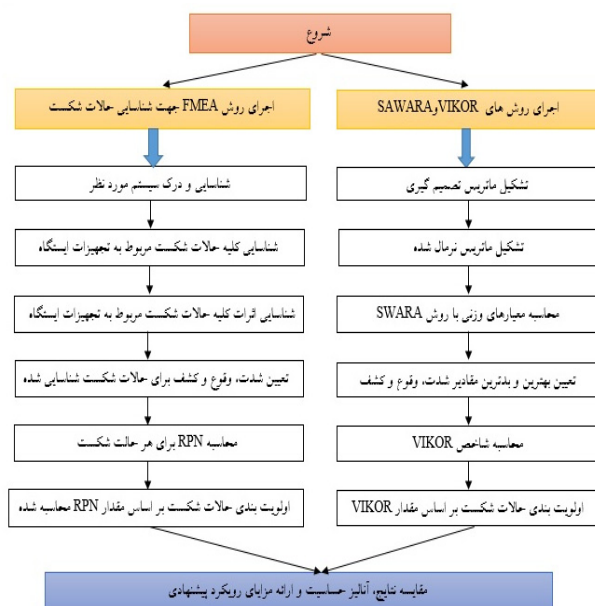
مرحله ۴) تعیین مطلوبیت (سودمندی) و عدم مطلوبیت (تأسف) گزینه‌ها: این مقادیر با استفاده از فرمول‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود. به طوری که مقادیر بهترین و بدترین هر معیار با توجه به نوع معیار (مثبت یا منفی بودن) و بر اساس روابط ۶ تا ۹ تعیین می‌گردد.

$$S_j = \sum_{j=1}^n W_j \times \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j} \quad ۱۰$$

$$R_j = \text{Max} \left[ W_j \times \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j} \right] \quad ۱۱$$

مرحله ۵) محاسبه شاخص VIKOR: مقدار شاخص VIKOR (Q) برای هر گزینه بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i = v \left[ \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] + (1-v) \left[ \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right] \quad ۱۲$$



شکل ۲. الگوریتم رویکرد پیشنهادی

جدول ۳. اولویت‌بندی نهایی حالات شکست تجهیزات ایستگاه تقلیل فشار CGS بر اساس روش FMEA

| نوع تجهیز         | حالت شکست                                 | شدت  | رخداد | کشف  | RPN   | اولویت‌بندی |
|-------------------|-------------------------------------------|------|-------|------|-------|-------------|
| رگلاتور           | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۶/۹  | ۵/۲   | ۴    | ۱۴۳/۵ | ۱۲          |
|                   | حالت شکست ۲: ارتعاش                       | ۴/۸  | ۳/۹   | ۵    | ۹۳/۶  | ۲۳          |
|                   | حالت شکست ۳: شکست در بسته شدن             | ۶/۲  | ۴/۱   | ۳/۸  | ۹۶/۶  | ۲۲          |
|                   | حالت شکست ۴: پارگی دیافراگم               | ۸/۸  | ۵/۱۵  | ۳/۸  | ۱۷۲/۲ | ۳           |
|                   | حالت شکست ۵: خوردگی قطعات رگلاتور         | ۴/۱  | ۴/۲   | ۵    | ۸۶/۱  | ۲۵          |
|                   | حالت شکست ۶: خرابی اسلیو                  | ۸/۸  | ۶/۹   | ۳/۱  | ۱۸۸/۲ | ۱           |
|                   | حالت شکست ۷: خرابی اورینگ                 | ۶/۲  | ۳/۸۵  | ۳/۱  | ۷۴    | ۲۹          |
| فیلتر             | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۵/۸  | ۴/۹   | ۶    | ۱۷۰/۵ | ۴           |
|                   | حالت شکست ۲: پر شدن مش                    | ۶/۲  | ۴     | ۳    | ۷۴/۴  | ۲۸          |
|                   | حالت شکست ۳: کثیف شدن فیلتر               | ۴/۵  | ۵     | ۳    | ۶۷/۵  | ۳۰          |
|                   | حالت شکست ۴: خوردگی قطعات فیلتر           | ۵    | ۳/۸   | ۵/۲  | ۹۸/۸  | ۲۰          |
|                   | حالت شکست ۵: پارگی کارتریج                | ۴/۵۵ | ۴     | ۳    | ۵۴/۶  | ۲۴          |
| هیتر              | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۶/۸  | ۵     | ۴/۸  | ۱۶۳/۲ | ۶           |
|                   | حالت شکست ۲: دمای زیاد شعله               | ۶/۲  | ۵/۵   | ۴    | ۱۳۶/۴ | ۱۳          |
|                   | حالت شکست ۳: شکست در راماندازی            | ۴/۵  | ۵/۶   | ۳    | ۷۵/۶  | ۲۷          |
|                   | حالت شکست ۴: خوردگی قطعات هیتر            | ۵    | ۳/۸۵  | ۵    | ۹۶/۳  | ۲۳          |
|                   | حالت شکست ۵: خرابی تیوب هیتر              | ۹    | ۴/۲   | ۴    | ۱۵۱/۲ | ۸           |
| سیستم بودار کننده | حالت شکست ۶: اتصال الکتریکی               | ۵/۹  | ۴/۵   | ۵    | ۱۳۲/۸ | ۱۴          |
|                   | حالت شکست ۱: عملکرد نامناسب پمپ تزریق     | ۵    | ۶/۸   | ۳    | ۱۰۲   | ۱۸          |
|                   | حالت شکست ۲: تنظیم نشدن دستگاه تزریق      | ۵/۹  | ۴     | ۴    | ۹۴/۴  | ۲۴          |
|                   | حالت شکست ۳: خرابی فیلتر                  | ۹    | ۴/۱   | ۴    | ۱۴۷/۶ | ۱۰          |
| شیر اطمینان       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۹    | ۴/۲   | ۳    | ۱۱۳/۴ | ۱۶          |
|                   | حالت شکست ۲: خرابی واشر                   | ۹    | ۴/۲۵  | ۴/۲۵ | ۱۵۳   | ۷           |
|                   | حالت شکست ۳: خوردگی قطعات                 | ۵    | ۳/۸۵  | ۵/۱  | ۹۶/۹  | ۲۱          |
| شیر قطع کن        | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۶/۹  | ۵     | ۵    | ۱۷۲/۵ | ۳           |
|                   | حالت شکست ۲: خرابی واشر                   | ۷    | ۴/۱   | ۴/۳  | ۱۲۳/۴ | ۱۵          |
|                   | حالت شکست ۳: خوردگی قطعات                 | ۵    | ۳/۸۵  | ۵/۲  | ۱۰۰/۱ | ۱۹          |
| گیج               | حالت شکست ۱: نمایش غلط (خطای اندازه‌گیری) | ۵    | ۴     | ۳    | ۶۰    | ۲۳          |
| خط لوله           | حالت شکست ۱: خوردگی لوله                  | ۵    | ۳/۸۶  | ۵/۳  | ۱۰۲/۳ | ۱۷          |
|                   | حالت شکست ۲: شکست اتصالات                 | ۹    | ۳/۹   | ۴/۲  | ۱۴۷   | ۱۱          |
|                   | حالت شکست ۳: گرفتگی لوله                  | ۵/۹  | ۴/۲   | ۳/۲  | ۷۹/۳  | ۲۶          |
| کنتور             | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۴    | ۳/۸۵  | ۴    | ۶۱/۶  | ۳۲          |
|                   | حالت شکست ۲: نمایش غلط (خطای اندازه‌گیری) | ۴    | ۳/۷   | ۳    | ۴۴/۴  | ۲۵          |
| شیر (ولو)         | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۷    | ۵/۹   | ۴    | ۱۶۵/۲ | ۵           |
|                   | حالت شکست ۲: خرابی قطعات شیر              | ۸/۸  | ۴/۲   | ۴    | ۱۴۷/۸ | ۹           |

جدول ۴. وزن معیارها بر اساس تکنیک SWARA

| وزن نهایی | معیار |
|-----------|-------|
| ۰/۴۵      | شدت   |
| ۰/۳۵      | رخداد |
| ۰/۲۰      | کشف   |

با معیار دیگری انجام شد. وزن معیارها بیشترین تأثیر را در رتبه‌بندی گزینه‌ها دارند. تصمیم‌گیرنده باید پایایی نتایج را برای تصمیم‌گیری بداند. به دلیل عدم قطعیت در مراحل مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره، لازم است قبل از انتخاب گزینه نهایی، تحلیل حساسیت روی یک مسئله انجام شود؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل حساسیت پس از به دست آوردن گزینه‌های رتبه‌بندی توصیه می‌شود. تجزیه و تحلیل حساسیت این مطالعه، با تغییر وزن هر معیار با معیار دیگری (۸) انجام گرفت. سه سناریوی مختلف برای تغییر وزن معیارها در نظر گرفته شد که به شرح زیر است:

- سناریوی ۱: تغییر وزن شدت با احتمال رخداد
  - سناریوی ۲: تغییر وزن شدت با کشف
  - سناریوی ۳: تغییر وزن احتمال رخداد با کشف
- در هر سناریو، امتیاز گزینه‌ها به روش VIKOR محاسبه و گزینه‌ها رتبه‌بندی شدند که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶ نشان می‌دهد که در بیشتر موارد، رتبه‌بندی گزینه‌ها تغییر نکرده یا تغییرات جزئی داشته‌اند. نتایج نشان داد که حالت شکست ۲ هیتر (افزایش دمای شعله) نسبت به تغییر وزن معیارها بسیار حساس بوده که با تغییر در وزن معیارها، رتبه آن تغییر کرده است. حالت شکست ۶ رگلاتور (خرابی اسلیو)، حالت شکست ۶ هیتر (اتصال الکتریکی) و حالت شکست ۱ شیر قطع کن (از کار افتادن) هیچ‌گونه تغییری نسبت به تغییرات وزن نداشتند. حالات شکست ۲ و ۵ رگلاتور (ارتعاش و خوردگی قطعات)، حالت شکست ۴ فیلتر (خوردگی قطعات)، حالات شکست ۱ و ۴ هیتر (از کار افتادن و خوردگی قطعات)، حالت شکست ۱ سیستم بودار کننده

مرحله بعد، نسبت تصحیح هر شاخص رتبه‌بندی شده به کل، محاسبه و در نهایت وزن نهایی هر معیار مشخص گردید. بر اساس نتایج وزن دهی کارشناسان، مشخص گردید که شاخص شدت ریسک از اولویت بالاتری نسبت به شاخص‌های وقوع و تشخیص برخوردار است که نشان‌دهنده اهمیت این معیار برای کارشناسان است (جدول ۴).

در این مطالعه از روش VIKOR به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده گردید. بر این اساس، با توجه به توضیحات فوق، ابتدا یک ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل گردید. ماتریس شامل سطرها و ستون‌هایی است که ستون‌ها به معیارها و ردیف‌ها به گزینه‌های مطالعه اختصاص داده شد. داده‌ها بر اساس فرمول ۵ نرمال‌سازی گردید (جدول ۵). در این مطالعه، معیارهای احتمال رخداد و شدت دارای جنبه مثبت و معیار کشف جنبه منفی بر اساس دامنه نمرات روش VIKOR (جدول ۲) در نظر گرفته شدند. پس از تکمیل فازهای دوم، سوم و چهارم روش تصمیم‌گیری VIKOR، مهم‌ترین مرحله شامل تعیین مطلوبیت و عدم مطلوبیت هر گزینه و محاسبه نهایی شاخص VIKOR می‌باشد که به عنوان نمره نهایی جهت اولویت‌بندی حالات شکست در نظر گرفته شد (جدول ۵).

تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود؛ به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرات را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد (۳۰-۳۱). در این بخش، تحلیل حساسیت برای آزمون پایداری رویکرد پیشنهادی با تغییر وزن هر معیار

جدول ۵. مقادیر معیارهای واقعی، نرمال شده، مطلوبیت، عدم مطلوبیت، شاخص نهایی VIKOR و رتبه‌بندی حالات شکست

| نوع تجهیز         | حالت شکست | پارامترهای ریسک |       |      | پارامترهای ریسک نرمال شده بر اساس VIKOR |       |       | مطلوبیت (سودمندی) | عدم مطلوبیت (تأسف) | شاخص نهایی VIKOR | رتبه |
|-------------------|-----------|-----------------|-------|------|-----------------------------------------|-------|-------|-------------------|--------------------|------------------|------|
|                   |           | شدت             | رخداد | کشف  | شدت                                     | رخداد | کشف   |                   |                    |                  |      |
| رگلاتور           | شکست ۱    | ۶/۸             | ۵/۱۵  | ۳/۹۵ | ۰/۱۵۴                                   | ۰/۱۱۶ | ۰/۰۸۹ | ۰/۳۳۹             | ۰/۱۷               | ۰/۲۲             | ۷    |
|                   | شکست ۲    | ۴/۲             | ۳/۸۵  | ۵/۵  | ۰/۰۹۵                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۱۲۴ | ۰/۷۳              | ۰/۲۸۶              | ۰/۸۵۱            | ۳۵   |
|                   | شکست ۳    | ۶/۲             | ۴/۲   | ۳/۵  | ۰/۱۴                                    | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۷۹ | ۰/۵۰۱             | ۰/۲۷۸              | ۰/۶۴۷            | ۲۰   |
|                   | شکست ۴    | ۸/۵             | ۵/۱۵  | ۳/۸  | ۰/۰۹۲                                   | ۰/۱۱۶ | ۰/۰۸۶ | ۰/۱۸۷             | ۰/۱۷               | ۰/۱۱۲            | ۳    |
|                   | شکست ۵    | ۳/۹             | ۳/۸۵  | ۵/۲  | ۰/۰۸۸                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۱۱۸ | ۰/۶۶۵             | ۰/۳۲۳              | ۰/۷۲۵            | ۳۰   |
|                   | شکست ۶    | ۸/۵             | ۶/۶   | ۳/۰۵ | ۰/۱۹۲                                   | ۰/۱۴۹ | ۰/۰۶۹ | ۰/۰۱۴             | ۰/۰۱۴              | ۰/۱۰۹            | ۱    |
|                   | شکست ۷    | ۶/۲             | ۳/۸۵  | ۳    | ۰/۱۴                                    | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۶۸ | ۰/۵۴۰             | ۰/۳۱۹              | ۰/۴۲۶            | ۱۱   |
| فیلتر             | شکست ۱    | ۵/۹             | ۴/۸۵  | ۶    | ۰/۱۲۳                                   | ۰/۱۱  | ۰/۱۳۶ | ۰/۴۶۳             | ۰/۲۳۵              | ۰/۶۹۲            | ۲۸   |
|                   | شکست ۲    | ۶/۲             | ۳/۸۵  | ۳/۰۵ | ۰/۱۴                                    | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۶۹ | ۰/۵۴              | ۰/۳۱۹              | ۰/۵۵             | ۱۶   |
|                   | شکست ۳    | ۴/۵۵            | ۴/۹   | ۳/۰۵ | ۰/۱۰۳                                   | ۰/۱۱۱ | ۰/۰۶۹ | ۰/۵۶۴             | ۰/۲۵۴              | ۰/۵۷۹            | ۱۷   |
|                   | شکست ۴    | ۳/۹۵            | ۳/۸۵  | ۵/۲  | ۰/۱۱۵                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۱۱۸ | ۰/۶۷              | ۰/۲۲۳              | ۰/۷۴۷            | ۳۲   |
|                   | شکست ۵    | ۳/۵۵            | ۳/۸۵  | ۳/۱  | ۰/۱۰۳                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۷  | ۰/۶۸۸             | ۰/۲۵۴              | ۰/۶۸۱            | ۲۵   |
| هیتر              | شکست ۱    | ۶/۴             | ۵/۱۵  | ۴/۶  | ۰/۱۴۵                                   | ۰/۱۱۶ | ۰/۱۰۴ | ۰/۳۷۸             | ۰/۱۸۷              | ۰/۶۰۷            | ۱۸   |
|                   | شکست ۲    | ۵/۹             | ۵/۶   | ۴/۱  | ۰/۱۳۳                                   | ۰/۱۲۷ | ۰/۰۹۳ | ۰/۳۶۷             | ۰/۲۳۵              | ۰/۶۳۲            | ۱۹   |
|                   | شکست ۳    | ۴/۵۵            | ۵/۳   | ۳/۰۵ | ۰/۱۰۳                                   | ۰/۱۲  | ۰/۰۶۹ | ۰/۵۱۷             | ۰/۳۵۴              | ۰/۳۲۱            | ۹    |
|                   | شکست ۴    | ۳/۹             | ۳/۸۶  | ۵/۲  | ۰/۱۱۱                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۱۱۸ | ۰/۶۶۵             | ۰/۳۲۳              | ۰/۷۳۱            | ۳۱   |
|                   | شکست ۵    | ۸/۵             | ۴/۲   | ۴/۳  | ۰/۱۹۲                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۹۷ | ۰/۲۹۷             | ۰/۲۷۸              | ۰/۵۲۴            | ۱۳   |
|                   | شکست ۶    | ۵/۹             | ۴/۲   | ۵/۲  | ۰/۱۳۳                                   | ۰/۱۱۸ | ۰/۰۹۵ | ۰/۵۳۶             | ۰/۲۷۸              | ۰/۶۹۰            | ۲۷   |
|                   | شکست ۱    | ۴/۹             | ۶/۶   | ۳/۰۵ | ۰/۱۱۱                                   | ۰/۱۴۹ | ۰/۰۶۹ | ۰/۳۳۶             | ۰/۱۱۲              | ۰/۱۱۲            | ۴    |
| سیستم بودار کننده | شکست ۲    | ۵/۹             | ۳/۸۵  | ۳/۹۵ | ۰/۱۳۳                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۸۹ | ۰/۵۷۲             | ۰/۳۱۹              | ۰/۶۷۹            | ۲۳   |
|                   | شکست ۳    | ۸/۵             | ۴/۲   | ۴/۳  | ۰/۱۹۲                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۷  | ۰/۲۹۷             | ۰/۲۷۸              | ۰/۴۹۹            | ۱۲   |
| شیر اطمینان       | شکست ۱    | ۸/۵             | ۴/۲   | ۳/۱  | ۰/۱۹۲                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۷  | ۰/۲۹۲             | ۰/۲۷۸              | ۰/۱۱             | ۲    |
|                   | شکست ۲    | ۸/۵             | ۴/۲   | ۴/۳  | ۰/۱۹۲                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۹۷ | ۰/۲۹۷             | ۰/۲۷۸              | ۰/۵۳۶            | ۱۴   |
|                   | شکست ۳    | ۴/۹             | ۳/۸۵  | ۵/۲  | ۰/۱۱۱                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۱۱۸ | ۰/۶۶۵             | ۰/۲۲۳              | ۰/۷۹۳            | ۳۳   |
| شیر قطع کن        | شکست ۱    | ۶/۸             | ۴/۵   | ۵/۳۵ | ۰/۱۰۲                                   | ۰/۱۲۱ | ۰/۴۱۷ | ۰/۴۱۷             | ۰/۲۴۲              | ۰/۶۸۳            | ۲۶   |
|                   | شکست ۲    | ۶/۵             | ۴/۲   | ۴/۳  | ۰/۱۴۷                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۹۷ | ۰/۴۷۷             | ۰/۲۷۸              | ۰/۶۸۰            | ۲۴   |
|                   | شکست ۳    | ۴/۹             | ۳/۸۵  | ۵/۲  | ۰/۱۱۱                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۱۱۸ | ۰/۶۶۵             | ۰/۳۲۳              | ۰/۷۹۷            | ۳۴   |
| گیج               | شکست ۱    | ۴/۹             | ۳/۸۵  | ۳    | ۰/۱۱۱                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۶۸ | ۰/۶۵۵             | ۰/۳۲۳              | ۰/۶۵۷            | ۲۱   |
| خط لوله           | شکست ۱    | ۴/۹             | ۳/۸۵  | ۵/۲  | ۰/۱۱۱                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۱۱۸ | ۰/۶۶۵             | ۰/۳۲۳              | ۰/۶۹۹            | ۲۹   |
|                   | شکست ۲    | ۸/۵             | ۴/۲   | ۴/۲  | ۰/۱۹۲                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۶۸ | ۰/۲۹۷             | ۰/۲۷۸              | ۰/۲۵۵            | ۸    |
|                   | شکست ۳    | ۵/۹             | ۴/۲   | ۳    | ۰/۱۳۳                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۶۸ | ۰/۵۲۶             | ۰/۲۷۸              | ۰/۲۴۱            | ۱۰   |
| کنتور             | شکست ۱    | ۳/۹             | ۳/۸۵  | ۳/۴۵ | ۰/۰۸۸                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۷۸ | ۰/۷۴۹             | ۰/۴۱۴              | ۰/۶۷۸            | ۲۲   |
|                   | شکست ۲    | ۶/۹             | ۳/۸۵  | ۳/۰۵ | ۰/۱۵۶                                   | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۶۹ | ۰/۴۷۶             | ۰/۳۱۹              | ۰/۲۱۹            | ۶    |
| شیر (ولو)         | شکست ۱    | ۶/۶۵            | ۶/۹   | ۵/۹  | ۰/۱۵                                    | ۰/۱۳۳ | ۰/۰۹۳ | ۰/۲۶۸             | ۰/۱۶۷              | ۰/۲۱۸            | ۵    |
|                   | شکست ۲    | ۸/۵             | ۴/۲   | ۴/۳  | ۰/۱۹۲                                   | ۰/۰۹۵ | ۰/۰۹۷ | ۰/۲۹۷             | ۰/۲۷۸              | ۰/۵۴۸            | ۱۵   |

شکست‌ها بر اساس رویکرد پیشنهادی با روش FMEA مشاهده می‌گردد و فقط در سه حالت شکست، خرابی اسلیو رگلاتور، پارگی دیافراگم رگلاتور و از کار افتادن شیر (ولو) نتایج یکسانی از هر دو روش مشاهده گردید.

### بحث

هدف این مقاله، بهبود ارزیابی و اولویت‌بندی حالات شکست با استفاده از روش FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در یک ایستگاه تقلیل فشار

(عملکرد نامناسب پمپ تزریق)، حالت شکست ۳ شیر اطمینان (خوردگی قطعات) و حالات شکست ۲ و ۳ شیر قطع کن (خرابی واشر و خوردگی قطعات) نیز کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات وزن معیارها داشتند. در سایر موارد نیز حساسیت زیادی با تغییر وزن معیارها مشاهده نگردید (جدول ۶). جدول ۷ نیز نتایج رتبه‌بندی حالات شکست اصلی ایستگاه را با استفاده از رویکرد ترکیبی پیشنهادی و روش FMEA نشان می‌دهد که نتایج گویای آن است که تغییرات بسیاری در رتبه‌بندی

جدول ۶. رتبه‌بندی گزینیه‌ها برای سناریوهای مختلف

| رتبه‌بندی حالات شکست برای سناریوهای مختلف |          |          |                                           | نوع تجهیز        |
|-------------------------------------------|----------|----------|-------------------------------------------|------------------|
| سناریو ۳                                  | سناریو ۲ | سناریو ۱ | حالات شکست                                |                  |
| ۲۲                                        | ۲۱       | ۲۹       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | رگلاتور          |
| ۱                                         | ۲        | ۱        | حالت شکست ۲: ارتعاش                       |                  |
| ۲۴                                        | ۲۳       | ۱۷       | حالت شکست ۳: شکست در بسته شدن             |                  |
| ۳۱                                        | ۲۴       | ۳۳       | حالت شکست ۴: پارگی دیافراگم               |                  |
| ۸                                         | ۸        | ۷        | حالت شکست ۵: خوردگی قطعات رگلاتور         |                  |
| ۳۵                                        | ۳۵       | ۳۵       | حالت شکست ۶: خرابی اسلیو                  |                  |
| ۳۰                                        | ۲۸       | ۲۴       | حالت شکست ۷: خرابی اورینگ                 |                  |
| ۲                                         | ۱        | ۸        | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | فیلتر            |
| ۲۸                                        | ۲۷       | ۲۳       | حالت شکست ۲: پر شدن مش                    |                  |
| ۲۶                                        | ۳۱       | ۲۷       | حالت شکست ۳: کثیف شدن فیلتر               |                  |
| ۷                                         | ۷        | ۶        | حالت شکست ۴: خوردگی قطعات فیلتر           |                  |
| ۲۱                                        | ۲۵       | ۱۴       | حالت شکست ۵: پارگی کارتریج                |                  |
| ۱۱                                        | ۱۱       | ۱۵       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | هیتر             |
| ۱۵                                        | ۱۹       | ۲۵       | حالت شکست ۲: افزایش دمای شعله             |                  |
| ۲۷                                        | ۳۲       | ۳۰       | حالت شکست ۳: شکست در راه اندازی           |                  |
| ۶                                         | ۵        | ۵        | حالت شکست ۴: خوردگی قطعات هیتر            |                  |
| ۱۹                                        | ۱۶       | ۲۰       | حالت شکست ۵: خرابی تیوپ                   |                  |
| ۹                                         | ۹        | ۹        | حالت شکست ۶: اتصال الکتریکی               |                  |
| ۳۳                                        | ۳۴       | ۳۴       | حالت شکست ۱: عملکرد نامناسب پمپ تزریق     | سیستم بودارکننده |
| ۱۴                                        | ۱۷       | ۱۲       | حالت شکست ۲: تنظیم نشدن دستگاه تزریق      |                  |
| ۱۸                                        | ۱۵       | ۱۹       | حالت شکست ۳: خرابی فیلتر                  |                  |
| ۳۴                                        | ۳۳       | ۳۲       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | شیر اطمینان      |
| ۱۷                                        | ۱۴       | ۲۱       | حالت شکست ۲: خرابی واشر                   |                  |
| ۵                                         | ۴        | ۴        | حالت شکست ۳: خوردگی قطعات                 |                  |
| ۱۰                                        | ۱۰       | ۱۰       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | شیر قطع کن       |
| ۱۲                                        | ۱۲       | ۱۳       | حالت شکست ۲: خرابی واشر                   |                  |
| ۴                                         | ۳        | ۳        | حالت شکست ۳: خوردگی قطعات                 |                  |
| ۲۵                                        | ۲۶       | ۱۴       | حالت شکست ۱: نمایش غلط (خطای اندازه‌گیری) | گیج              |
| ۳                                         | ۶        | ۲        | حالت شکست ۱: خوردگی لوله                  | خط لوله          |
| ۲۳                                        | ۱۸       | ۲۲       | حالت شکست ۲: شکست اتصالات                 |                  |
| ۲۹                                        | ۳۰       | ۲۶       | حالت شکست ۳: گرفتگی لوله                  |                  |
| ۱۳                                        | ۲۰       | ۱۱       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | کنتور            |
| ۳۲                                        | ۲۹       | ۲۸       | حالت شکست ۲: نمایش غلط (خطای اندازه‌گیری) |                  |
| ۲۰                                        | ۲۲       | ۳۱       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | شیر (ولو)        |
| ۱۶                                        | ۱۳       | ۱۸       | حالت شکست ۲: خرابی قطعات شیر (ولو)        |                  |

۳۵ حالت شکست شناسایی گردید.

مدل پیشنهادی نسبت به روش FMEA برتری داشت. اول، نشان داد که بین رتبه‌بندی ارائه‌شده توسط روش FMEA و رویکرد پیشنهادی، تغییرات بسیاری وجود داشت (جدول ۷). دلیل این رتبه‌بندی‌های ناسازگار، عمدتاً به اهمیت نسبی معیارهای شدت، احتمال رخداد و کشف در محاسبه RPN و وزن معیارها مربوط می‌شود که در آن تغییرات در رتبه‌بندی ارائه‌شده برای حالات شکست در رتبه‌بندی FMEA لحاظ نشده است. همچنین، در عدد اولویت ریسک، مجموعه‌های

گاز CGS می‌باشد. به‌طوری‌که از دو روش تصمیم‌گیری چند معیاره (روش‌های SWARA و VIKOR) برای رتبه‌بندی حالات شکست شناسایی‌شده توسط FMEA استفاده گردید. روش SWARA برای تعیین وزن‌های معیار شدت، احتمال رخداد و کشف و از تکنیک VIKOR برای ارائه سطوح اولویت‌بندی برای حالات شکست در تجهیزات ایستگاه استفاده گردید و در مجموع ۱۰ تجهیز ایستگاه شامل رگولاتور، فیلتر، هیتر، سیستم بودارکننده، شیر اطمینان، شیر قطع کن، گیج، خط لوله، کنتور و شیر (ولو) مورد ارزیابی قرار گرفت و در مجموع



جدول ۷. مقایسه رتبه‌بندی حالات شکست بر اساس روش FMEA و رویکرد پیشنهادی

| نوع تجهیز         | حالت شکست                                 | روش FMEA | رویکرد پیشنهادی |
|-------------------|-------------------------------------------|----------|-----------------|
| رگلاتور           | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۱۲       | ۷               |
|                   | حالت شکست ۲: ارتعاش                       | ۲۳       | ۳۵              |
|                   | حالت شکست ۳: شکست در بسته شدن             | ۲۲       | ۲۰              |
|                   | حالت شکست ۴: پارگی دیافراگم               | ۳        | ۳               |
|                   | حالت شکست ۵: خوردگی قطعات                 | ۲۵       | ۳۰              |
|                   | حالت شکست ۶: خرابی اسلیو                  | ۱        | ۱               |
|                   | حالت شکست ۷: خرابی اورینگ                 | ۲۹       | ۱۱              |
| فیلتر             | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۴        | ۲۸              |
|                   | حالت شکست ۲: پر شدن مش                    | ۲۸       | ۱۶              |
|                   | حالت شکست ۳: کثیف شدن فیلتر               | ۳۰       | ۱۷              |
|                   | حالت شکست ۴: خوردگی قطعات                 | ۲۰       | ۳۲              |
|                   | حالت شکست ۵: پارگی کارتریج                | ۳۴       | ۲۵              |
| هیتر              | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۶        | ۱۸              |
|                   | حالت شکست ۲: افزایش دمای شعله             | ۱۳       | ۱۹              |
|                   | حالت شکست ۳: شکست در راه‌اندازی           | ۲۷       | ۹               |
|                   | حالت شکست ۴: خوردگی قطعات                 | ۲۳       | ۳۱              |
|                   | حالت شکست ۵: خرابی تیوپ                   | ۸        | ۱۳              |
|                   | حالت شکست ۶: اتصال الکتریکی               | ۱۴       | ۲۷              |
|                   | حالت شکست ۱: عملکرد نامناسب پمپ تزریق     | ۱۸       | ۴               |
| سیستم بودار کننده | حالت شکست ۲: تنظیم نشدن دستگاه تزریق      | ۲۴       | ۲۳              |
|                   | حالت شکست ۳: خرابی فیلتر                  | ۱۰       | ۱۲              |
| شیر اطمینان       | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۱۶       | ۲               |
|                   | حالت شکست ۲: خرابی واشر                   | ۷        | ۱۴              |
|                   | حالت شکست ۳: خوردگی قطعات                 | ۲۱       | ۳۳              |
|                   | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۳        | ۲۶              |
| شیر قطع کن        | حالت شکست ۲: خرابی واشر                   | ۱۵       | ۲۴              |
|                   | حالت شکست ۳: خوردگی قطعات                 | ۱۹       | ۳۴              |
| گیج               | حالت شکست ۱: نمایش غلط (خطای اندازه‌گیری) | ۳۳       | ۲۱              |
| خط لوله           | حالت شکست ۱: خوردگی لوله                  | ۱۷       | ۲۹              |
|                   | حالت شکست ۲: نقص اتصالات                  | ۱۱       | ۸               |
|                   | حالت شکست ۳: گرفتگی لوله                  | ۲۶       | ۱۰              |
| کنتور             | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۳۲       | ۲۲              |
|                   | حالت شکست ۲: نمایش غلط (خطای اندازه‌گیری) | ۳۵       | ۶               |
| شیر (ولو)         | حالت شکست ۱: از کار افتادن                | ۵        | ۵               |
|                   | حالت شکست ۲: خرابی قطعات شیر (ولو)        | ۹        | ۱۵              |

ارزیابی دقیق پارامترهای ریسک، در نظر گرفتن اهمیت و وزن پارامترهای شدت، احتمال و کشف، استفاده از ضریب اهمیت مقایسه‌ای به‌منظور مقایسه هر شاخص با شاخص قبلی خود، یافتن وزن اولویت معیارها بر اساس استراتژی‌ها یا برنامه‌های سازمان، استفاده از نظر خبرگان و قابلیت ترکیب نظرات چندین خبره می‌باشد. نتایج ارائه‌شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که باوجود برخی تفاوت‌ها در حالات شکست رتبه‌بندی، بالاترین حالات شکست همچنان حالت شکست اسلیو رگلاتور است که نتایج به‌دست‌آمده از رویکرد پیشنهادی را تأیید می‌کند.

مختلف شدت، احتمال رخداد و کشف ممکن است مقدار RPN یکسانی داشته باشند اما در رتبه‌بندی بر اساس رویکرد پیشنهادی متفاوت باشند؛ بنابراین، با توجه به این شکاف عمیق، رویکرد جدید می‌تواند این مشکل را با ارائه رتبه‌بندی دقیق برای هر حالات شکست و متمایز کردن نتایج به‌خوبی حل کند.

با مقایسه نتایج روش‌های فوق (جدول ۷) می‌توان از ترکیب روش‌های SWARA و VIKOR بر اساس روش FMEA برای بهبود ارزیابی و اولویت‌بندی حالت شکست تجهیزات استفاده کرد که دلیل این امر به خاطر

رویکرد پیشنهادی اجازه می‌دهد تا علل ریشه‌ای برخی از شکست‌های تجهیزات را شناسایی کرده تا به اهداف اصلی پروژه دست یافت و ارزیابی ریسک را به‌طور مناسب‌تر و دقیق‌تر انجام داد.

بر اساس نتایج وزن دهی کارشناسان، ریسک فاکتور شدت ریسک از اولویت بالاتری نسبت به ریسک فاکتورهای احتمال و قابلیت کشف برخوردار است که نشان‌دهنده اهمیت این معیار برای کارشناسان است. یکی از دلایل بالا بودن مقدار اهمیت ریسک فاکتور شدت نسبت به سایر ریسک فاکتورها، بالا بودن وخامت صدمات و خسارات ناشی از بروز حوادث در این ایستگاه می‌باشد. از سوی دیگر، ریسک فاکتور احتمال به دلیل شیوع زیاد حوادث ناشی از تجهیزات ایستگاه در رتبه دوم قرار داشت. همچنین دلیل پایین بودن اهمیت ریسک فاکتور قابلیت کشف نسبت به دو ریسک فاکتور دیگر بر اساس نظر متخصصین، مجهز بودن این تجهیزات به وسایل شناسایی خطر و همچنین بازدیدهای منظم از تجهیزات ایستگاه می‌باشد. به همین دلیل، فاکتور قابلیت کشف کمترین وزن را به خود اختصاص داده است که با نتایج مطالعه هم‌تا و همکارانش (۱۱) که در شرکت گاز لرستان انجام گرفته بود همخوانی داشت. بر اساس نتایج، حالت شکست اسلیو رگلاتور، از کار افتادن شیر اطمینان و پارگی دیافراگم رگولاتور رتبه‌های اول، دوم و سوم را کسب کردند. علل نشت گاز و عملکرد ناخواسته رگولاتور به دلیل خرابی در رگولاتور و قطعات و تجهیزات آن و کیفیت نامطلوب می‌باشد. همچنین از علل از کار افتادن شیر اطمینان می‌توان به آسیب دیافراگم یا دیسک، خرابی فنر، خرابی پیچ تنظیم ورودی اشاره کرد؛ که دلیل آن را می‌توان به نقش حیاتی رگلاتور در تنظیم فشار و در نهایت تضمین ایمنی ایستگاه در نظر گرفت. نتایج مطالعه زارعی و همکارانش (۳۲) نشان داد که خرابی رگلاتور به‌عنوان بدترین سناریوی خطر در ایستگاه‌های تقلیل فشار CGS است که با نتایج این مطالعه همخوانی داشت به‌طوری‌که خرابی رگلاتورها باعث افزایش فشار گاز در خطوط لوله ایستگاه شده که می‌تواند در صورت عدم عملکرد شیر اطمینان و شیر قطع کن باعث بروز حوادث ازجمله انفجار

گردد. بر اساس نتایج، حالت شکست ارتعاش رگلاتور در رتبه آخر قرار گرفت. نقص ارتعاش به دلیل افزایش دبی گاز، فرسودگی قطعات، عدم مهار مناسب خطوط و عدم فونداسیون مناسب ایجاد می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط خسروی راد و همکارانش (۳۳) در ایستگاه TBS انجام گرفت، اتصال به زمین کمترین امتیاز را بر اساس روش FMEA کسب کرده بود که با توجه به نوع تجهیزات بکار رفته در این ایستگاه در مقایسه با ایستگاه CGS منطقی به نظر می‌رسد.

زارعی و همکارانش (۳۲) یک رویکرد تحلیل ریسک کمی پویا و جامع برای سناریو حادثه و مدل‌سازی ریسک پمپ‌های گاز طبیعی پیشنهاد کرده‌اند. Huai-Wei و همکارانش (۳۴) یک مدل ارزیابی ریسک یکپارچه پیشنهاد دادند که در آن چندین تکنیک برای ایجاد یک مدل FMEA برای رتبه‌بندی حالات شکست ترکیب می‌شوند. شفیع و همکارانش (۳۵) یک مدل FTA و FMEA یکپارچه را برای آنالیز ریسک سیستم‌های ایمنی پیشنهاد دادند. رفیعی<sup>۱۱</sup> و همکارانش (۳۶) یک رویکرد نوآورانه شامل نظریه شواهد Dempster Shafer و FMEA را جهت ارائه کارآمدتری در خصوص شناسایی حالت شکست و اولویت‌بندی پیشنهاد کرده‌اند. اوایانگ<sup>۱۲</sup> و همکارانش (۳۷) یک روش مقایسه احتمال فاصله‌ای برای رتبه‌بندی اولویت ریسک حالت شکست برای پیشگیری از دست دادن اطلاعات در فرآیند محاسبه RPN پیشنهاد کردند. چانگ و همکارانش (۳۸) یک مدل ترکیبی FMEA و تصمیم‌گیری چند معیاره برای ایجاد یک چارچوب ارزیابی، ترکیب بدترین روش تقریبی (R-BWM) و R-TOPSIS پیشنهاد کردند. هر کدام از این روش‌های ترکیبی ارائه‌شده در صنایع مختلف انجام گرفته بود ولی در همه روش‌ها، هم‌افزایی تکنیک‌ها باعث اصلاح معیارهای مؤثر بر ارزیابی ریسک شده‌اند و کارایی آنالیز را ارتقاء داده‌اند. علاوه بر این، برتری روش پیشنهادی این مطالعه در مقایسه با روش‌های مذکور، استفاده از ضریب اهمیت مقایسه‌ای به‌منظور

11 Rafiee  
12 Ouyang

استفاده از رویکرد پیشنهادی، سعی گردید با شناسایی ریسک‌های مهم در تصمیم‌گیری و تعیین آن‌ها، روشی را برای ارائه تحلیل‌های مناسب به مدیران معرفی کند. رویکرد پیشنهادی می‌تواند بر کاستی‌های روش FMEA غلبه کند، اثربخشی روش FMEA را بهبود ببخشد و اطلاعات مفیدی را برای کمک به مدیریت خطرات تجهیزات سیستم ارائه دهد. درنهایت، یک چارچوب مناسب برای بهبود ارزیابی ریسک الزامات ایمنی از طریق FMEA اجرا گردید و راهنمایی لازم را برای انجام آنالیز ریسک در صنایع مشابه توصیه می‌کند.

### تشریح و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از پایان‌نامه دکتری بهداشت حرفه‌ای با کد اخلاق (IR.TUMS.SPH. REC.1400.151) تأییدشده توسط دانشگاه علوم پزشکی تهران می‌باشد. نویسندگان این مقاله از همکاری و حمایت مالی شرکت ملی گاز ایران (استان خراسان شمالی) و گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشگاه علوم پزشکی تهران تقدیر و تشکر می‌نمایند.

### REFERENCES

1. Nourian R, Mousavi SM, Raissi S. A fuzzy expert system for mitigation of risks and effective control of gas pressure reduction stations with a real application. *J Loss Prev Process Ind.* 2019;59:77-90.
2. Nourian R, Mousavi SM. Design and implementation of an expert system for periodic and emergency control under uncertainty: A case study of city gate stations. *J Nat Gas Sci Eng.* 2019;66:306-15.
3. Liu HC. Improved FMEA methods for proactive healthcare risk analysis. Singapore: Springer; 2019.
4. He R, Li X, Chen G, Wang Y, Jiang S, Zhi C. A quantitative risk analysis model considering uncertain information. *Process Saf and Environ Prot.* 2018 1;118:361-70.
5. 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 1; 13(Special

مقایسه کردن هر شاخص با شاخص قبلی خود و قابلیت ترکیب نظرات است.

با توجه به ماهیت چنین مطالعاتی و وجود عدم قطعیت در نتایج این‌گونه مطالعات، در این تحقیق امکان مقایسه نتایج با نتایج سایر مطالعات بیش از موارد ذکرشده 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 کرد، اما همچنان محدودیت‌هایی وجود داشت که باید در نظر گرفته شوند. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی برای وزن دهی معیارها و رتبه‌بندی ریسک‌ها استفاده گردد.

### نتیجه‌گیری

در رویکرد پیشنهادی، از روش SWARA برای تعیین اهمیت نسبی معیارهای شدت، احتمال وقوع و کشف در محاسبه وزن معیارها و روش VIKOR برای اولویت‌بندی ریسک‌های شناسایی‌شده استفاده گردید. با

- issue: 16th International Industrial Engineering Conference):1-5.
6. Esmaili, R. Ali Babaei, A. Monazami Tehrani, GH. Relationship between Safety Investment and Safety Performance Indices Considering the Project Hazard Level in Construction Industry. *Journal of Health and Safety at Work.* 2021; 11(2): 327-352.
  7. Omidvari M, Rafighi Z, Omidvari S. A Conceptual Model for Identifying and Ranking Environmental Risks in Industrial Parks (A Case Study of Hashtgerd Industrial Estate). *Journal of Health and Safety at Work.* 2021; 10(4):349-75
  8. Li Z, Chen L. A novel evidential FMEA method by integrating fuzzy belief structure and grey relational projection method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* Eng Appl Artif Intell, 2019; 77: 136-147.
  9. Qin J, Xi Y, Pedrycz W. Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2

- fuzzy evidential reasoning method. *Appl Soft Comput.* 2020; 89:106134.
10. Yucesan M, Gul M, Celik E. A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best-worst method. *Complex Intell Systems.* 2021; 7(3):1547-64.
11. 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;8(Special Issue):1-6.
12. Yang J, Huang HZ, He LP, Zhu SP, Wen D. Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster-Shafer evidence theory under uncertainty. *Eng Fail Anal.* 2011; 18(8): 2084-2092.
13. Salimi M, Salesi M, Akbari H, Bagheri H. Risk Assessment from a Passive Defense Perspective-a Case Study at Shams Abad Industrial Estate, Iran. *International Journal of Occupational Hygiene.* 2019; 11(4):283-98.
14. Li Z, Chen L. A novel evidential FMEA method by integrating fuzzy belief structure and grey relational projection method. *Eng Appl Artif Intell.* 2019; 77: 136-147.
15. Qin J, Xi Y, Pedrycz W. Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. *Appl Soft Comput.* 2020; 89:106134.
16. Yucesan M, Gul M, Celik E. A holistic FMEA approach by fuzzy-based Bayesian network and best-worst method. *Complex Intell Systems.* 2021; 7(3):1547-64.
17. Majeed RA, Breesam HK. Application of SWARA technique to find criteria weights for selecting landfill site in Baghdad governorate. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021 Mar 1 (Vol. 1090, No. 1, p. 012045).* IOP Publishing.
18. Kangavari M, Salimi S, Nourian R, Omid L, Askarian A. An application of failure mode and effect analysis (FMEA) to assess risks in petrochemical industry in Iran. *Iranian journal of health, safety and environment.* 2015; 2(2):257-63.
19. Thanh NP, Matsui Y, Fujiwara T. Household solid waste generation and characteristic in a Mekong Delta city, Vietnam. *Journal of Environmental Management.* 2010; 91(11):2307-21.
20. Zolfani SH, Saporasauskas J. New application of SWARA method in prioritizing sustainability assessment indicators of energy system. *Engineering Economics.* 2013; 24(5):408-14.
21. Keršuliene V, Zavadskas EK, Turskis Z. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management.* 2010;11(2):243-58.
22. Mavi RK, 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):2401-18.
23. Mardani A, Zavadskas EK, Govindan K, Amat Senin A, Jusoh A. VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability.* 2016; 8(1):37.
24. 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; 65(6):686-98.
25. Sayadi MK, Heydari M, Shahanaghi K. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers. *Appl Math Model.* 2009; 33(5):2257-62.
26. Jahan A, Mustapha F, Ismail MY, Sapuan SM, Bahraminasab M. A comprehensive VIKOR method for material selection. *Mater Des.* 2011; 32(3):1215-21.
27. Opricovic S, Tzeng GH. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur J Oper Res.* 2004; 156(2):445-55.
28. Babaei A, Lavasani SM, Nassiri P, Noroollahi Y. Safety Risk Management of Automaker Industries Using Combination of Fuzzy FMEA and VIKOR (Case Study: Pre-Paint Hall of Iran-Khodro Company). *International Journal of Occupational Hygiene.* 2020; 12(4):351-64.
29. Mardani A, Zavadskas EK, Govindan K, Amat Senin A, Jusoh A. VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability.* 2016; 8(1):37.
30. Saltelli A. Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Anal.* 2002;22(3):579-90.
31. 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.

32. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *J Hazard Mater.* 2017; 321:830-40.
33. Khosravi Rad F, Zarei E, Mohammadfam E, Shoja E, Majidi Dariani M. Explosion risk analysis of urban gas pressure reducing stations (TBS) using defect detection method and its effects analysis (FMEA and error tree analysis technique (FTA). *Iranian Occupational Health.* 2016; 12 (6): 16-27.
34. Huai-Wei Lo, Shiue W, Liou JJ, Tzeng GH. A hybrid MCDM-based FMEA model for identification of critical failure modes in manufacturing. *Soft comput.* 2020; 24(20):15733-45.
35. Shafiee M, Enjema E, Kolios A. An integrated FTA-FMEA model for risk analysis of engineering systems: a case study of subsea blowout preventers. *Appl Sci.* 2019; 9(6):1192.
36. 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; 13(16):1-5.
37. Ouyang L, Zheng W, Zhu Y, Zhou X. An interval probability-based FMEA model for risk assessment: A real-world case. *Qual Reliab Eng Int.* 2020; 36(1):125-43.
38. Chang TW, Lo HW, Chen KY, Liou JJ. A novel FMEA model based on rough BWM and rough TOPSIS-AL for risk assessment. *Mathematics.* 2019; 7(10):874.