



## Risk Assessment of Ilam Gas Refinery Storage Tanks using Safety Weighted Hazard Index (SWeHI) and Recommendation of Required Control Measures

**Fakhradin Ghasemi**, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Abadan University of Medical Sciences, Abadan, Iran and Department of Ergonomics, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

**Mohammad Kurdestani**, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Abadan University of Medical Sciences, Abadan, Iran and Department of Ergonomics, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

**Iraj Mohammadfam**, (\*Corresponding author), Professor, Health, Safety, and Environment Management Department and Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. [mohammadfam@umsha.ac.ir](mailto:mohammadfam@umsha.ac.ir)

### Abstract

**Background and aims:** Risk assessment is the most important tool for identifying unacceptable risks and preventing the occurrence of accidents. In this study, the Safety Weighted Hazard Index (SWeHI) was used for assessing risks associated with the storage tanks of the Ilam gas refinery company.

**Methods:** SWeHI, has two different parts to be determined: First, the potential hazard index (B) and second, the hazard control index (A). B can come into two forms: the fire and explosion hazards (B1) and toxic release hazard (B2). Both of these forms should be computed separately and the highest, will be considered as B. For calculating A, all the protection layers in place are assessed and quantified. The SWeHI, is calculated by dividing B by A.

**Results:** B1 values for atmospheric and spherical tanks were 347.31 and 269.16, and B2 values were 97.48 and 169.34, respectively. A value for all tanks was 84.31. Among factors affecting A indicator, the emergency management plan and reliability of equipment were the most challenging ones. For spherical and atmospheric tanks, the SWeHI grand scores were 3.1925 and 4.1993, respectively.

**Conclusion:** Compared to other similar indices, SWeHI is a more quick and straightforward technique of risk assessment and remedial measures prioritization in oil and gas industries.

**Conflicts of interest:** None

**Funding:** None

### Keywords

Storage Tanks

Gas Refining

Safety Index

Received: 2020/02/05

Accepted: 2021/02/14

## INTRODUCTION

Oil and gas industries play an important role in the national economic of Iran. Iran has the second greatest natural gas reserves, and the fourth greatest oil reserves in the world. Therefore, there are many onshore and offshore extraction fields, refineries, and chemical process plants in this country. As these industries utilize hazardous materials in their operations, there always are risks of major process and occupational accidents, such as toxic gas release, fire, and explosion (1).

There have occurred many catastrophic accidents in these industries all around the world, such as Flixborough accident in England, Seveso in Italy, Delaware and BP Texas City in America (2–4). Likewise, several major accidents occurred in Iranian industries during recent years, such as fire and explosion in Bu Ali petrochemical company and chlorine gas release in Karoon petrochemical company. Therefore, the risk assessment and management in oil and gas industries is a major issue and must not be undervalued.

There are many techniques of assessing and managing the risks in oil and gas industries. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Hazard and Operability Study (HAZOP), Fault Tree Analysis (FTA), Event Tree Analysis (ETA), Bow-Tie Analysis (BTA) and the Bayesian network-based techniques, are some of the approaches used for assessing and managing risks in oil and gas industries (5–7). These techniques can be categorized into three groups of qualitative, semi-quantitative, and quantitative techniques. Qualitative techniques are inexpensive and easy to administer. They are not time-consuming and need the least amount of training. However, they do not offer a deep insight regarding the hazards and their effects, and they also do not offer proper control measures. Quantitative techniques, on the other hand, give us detailed information regarding the hazards and the consequences of probable accidents. However, they are more time-consuming and need specific knowledge regarding the process under consideration. The Safety Weighted Hazard Index (SWeHI) (8), is developed to assess the risk of process units in a quantitative manner. The technique is able to assess the risks associated with major process accidents, i.e. fire, explosion, and toxic vapor dispersion.

Ilam Gas Refinery Company is located in west of Iran. The refinery receives its feed from

the Chavar Gas Reservoir. Ethane, liquefied natural gas, natural gas condensate and sulfur are the main products of this refinery. The natural gas refined by this company is consumed by provinces located in the west of Iran, including Ilam, Kurdistan, and Kermanshah, as well as the Ilam Petrochemical Company. The aim of this study was to assess the risks of fire, explosion and vapor cloud dispersion in Ilam Gas Refinery Company using SWeHI.

## METHODS AND MATERIALS

This cross-sectional study was conducted in Ilam Gas Refinery. Ilam Gas Refinery is located in the Ilam province. The refinery receives its feed from the Chavar Gas Reservoir. Ethane, liquefied natural gas, natural gas condensate and sulfur, are the main products of the refinery.

SWeHI was developed by Khan et al. in 2001 (8). The method is the modified version of Hazard Identification and Ranking Analysis (HIRA), and with the superiority of providing safety measures required for reducing risk factors to an acceptable level. The method is composed of two distinct divisions: the hazard potential index (B) and hazard control index (A).

In the division B, the expected damage due to fire & explosion hazards ( $B_1$ ) and the expected damage due to toxic vapor dispersion ( $B_2$ ), are assessed based on the process parameters (such as temperature and pressure) and equipment characteristics.

For estimating  $B_1$ , four steps should be completed;

- Step 1, Determination of the category of the unit: According to SWeHI, all units in a chemical process industry can be categorized into five groups: storage units, units associated with physical operations (such as heat or mass transfer, pumping and compression), reactors, transportation units, and others (such as boilers and furnaces). In this step, the category of the unit under consideration should be determined.

- Step 2, Determination of energy factors: In this step, three coefficients ( $F_1$ ,  $F_2$ , and  $F_3$ ) related to the physical and chemical energies in the unit, should be estimated.  $F_1$  is calculated based on the chemical energy of the unit, while  $F_2$  and  $F_3$  are representative of the physical energy of the unit.

$$F_1 = 0.1M \times H_c / K$$

Where M is the mass of chemical (kg) or rate of mass release (kg/s),  $H_c$  is the heat of combustion,

and  $K$  is a constant, equal to 3.148.

$$F_2 = 1.304 \times 10^{-3} \times PP \times V$$

$$F_3 = 10^{-3} \times \left( \frac{1}{T+273} \right) \times (PP - VP)^2 \times V$$

Where,  $PP$  is the processing pressure,  $V$  is the volume of chemical under consideration, and  $VP$  is the vapor pressure of the chemical.

• Step 3, Evaluation and assignment of penalties: There are eight type of penalties to be assessed in this step: the penalty related to the temperature impact ( $pn_1$ ), the penalty related to the pressure impact ( $pn_2$ ), the penalty related to the adjacent hazardous units ( $pn_3$ ), the penalty related to the quantity of the involved hazardous substances ( $pn_4$ ), the penalty related to the flammability and reactivity of the involved substance ( $pn_5$ ), the penalty related to the density of the units at the site ( $pn_6$ ), the penalty related to external factors such as earthquake, flood, and so on ( $pn_7$ ), and the penalty related to the proneness of the surrounding environment and population, to the accidents of the plant ( $pn_8$ ).

1. Calculation of  $B_1$ . The following equations are used for calculating  $B_1$ :

$$HP = (F_1 \times Pn_1 + F \times Pn_2) \times$$

$$Pn_3 \times Pn_4 \times Pn_5 \times Pn_6 \times Pn_7 \times Pn_8$$

$$B_1 = 4.76 \times HP^{1/3}$$

Where in the above equations,  $HP$  stands for hazard potential.

Factor  $B_2$ , demonstrates the radius of area in which the death probability is 50% in the case of substance release.  $B_2$  is calculated based on a new factor, so called  $G$  factor, and seven penalties.  $G$  factor is a function of release condition and release rate. The seven penalties are as follows: the penalty related to the temperature impact ( $pnr_1$ ), the penalty related to the pressure impact ( $pnr_2$ ), the penalty related to the vapor density of the involved substances ( $pnr_3$ ), the penalty related to the toxicity of the involved substance ( $pnr_4$ ), the penalty related to the population density in the vicinity of the unit ( $pnr_5$ ), penalty related to the external factors ( $pnr_6$ , similar to  $pn_7$ ), and penalty related to the vulnerability of the surrounding environment and populations ( $pnr_7$ , similar to  $pn_8$ ). The following equations are used for calculating  $B_2$ :

$$G = S \times m$$

$$B_2 = a \left( \frac{G \times pnr_1 \times pnr_2 \times pnr_3}{\times pnr_4 \times pnr_5 \times pnr_6 \times pnr_7} \right)^b$$

Where in the above equations,  $S$  is assigned based on the release conditions,  $m$  is the expected release rate, and  $a$  and  $b$  are two constants, which are normally considered to be 25.35 and 0.425, respectively.

Since  $B_1$  and  $B_2$  are calculated, they are compared to each other, and the higher one would be considered as the hazard potential index ( $B$ ).

In the division A, the hazard control index ( $A$ ) is determined based on the control measures which are in place and operation. Basic process control system, detection devices, emergency control measures, system proneness to human error and equipment reliability, are the influencing factors which should be taken into account when calculating the hazard control index ( $A$ ). Factor  $A$  is quantified using eight credits: emergency resource planning ( $cr_1$ ), disaster management plan ( $cr_2$ ), damage control measures ( $cr_3$ ), process control systems ( $cr_4$ ), the installed detective devices ( $cr_5$ ), emergency control measures ( $cr_6$ ), human factors including the human-system interaction and basic human characteristic ( $cr_7$ ), and equipment reliability ( $cr_8$ ).

The following equation is used for calculating  $A$ :

$$A = 0.15 \times (1 + Cr_1) \times (1 + Cr_2) \times$$

$$(1 + Cr_3) \times (1 + Cr_4) \times (1 + Cr_5) \times$$

$$(1 + Cr_6) \times (1 + Cr_7) \times (1 + Cr_8)$$

The final score of SWeHI is the ratio of  $B$  to  $A$ . As demonstrated in Figure 1, SWeHI values are categorized into five levels of none hazardous, less hazardous, moderately hazardous, hazardous, and highly hazardous.

$$SWeHI = \frac{B}{A}$$

## RESULTS

Demonstrated in Table 1 and Table 2 are the information and data gathered for calculating  $B_1$  and  $B_2$ . The storage tank farm of the company contains two atmospheric storage tanks (shown by TK-3810A and TK-3810B) used for storing  $C^{+5}$  and four spherical storage tanks (shown by TK-

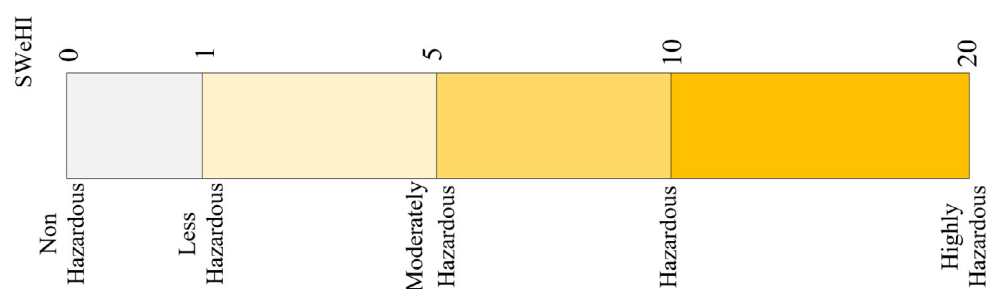


Figure 1. classification of hazards based on SWeHI values

Table 1. Penalties, coefficients, hazard potentials, and fire and explosion hazard of investigated tanks

Unit	Category	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	Pnr <sub>1</sub>	Pnr <sub>2</sub>	Pnr <sub>3</sub>	Pnr <sub>4</sub>	Pnr <sub>5</sub>	Pnr <sub>6</sub>	Pnr <sub>7</sub>	Pnr <sub>8</sub>	HP	B <sub>1</sub>
TK-3810A	1	1575.79	8437.4	2075.16	1.55	1.3	1.35	2.75	2.2	1.34	2	1.1	388433.5	347.31
TK-3810B	1	1575.79	8437.4	2075.14	1.55	1.3	1.35	2.75	2.2	1.34	2	1.1	388433.5	347.31
TK-3710A	1	927.12	1414.43	3116.94	1.55	1.4	1.45	2.75	2.2	1.17	2	1.1	180813.7	269.16
TK-3710B	1	927.12	1414.43	1414.43	1.55	1.4	1.45	2.75	2.2	1.17	2	1.1	180813.7	269.16
TK-3710C	1	927.12	1414.43	1414.43	1.55	1.4	1.45	2.75	2.2	1.17	2	1.1	180813.7	269.16
TK-3710D	1	927.12	1414.43	1414.43	1.55	1.4	1.45	2.75	2.2	1.17	2	1.1	180813.7	269.16

Table 2. The results of assessing "damage resulted from toxic vapor dispersion"

Unit	Category	S	G	Pnr <sub>1</sub>	Pnr <sub>2</sub>	Pnr <sub>3</sub>	Pnr <sub>4</sub>	Pnr <sub>5</sub>	Pnr <sub>6</sub>	Pnr <sub>7</sub>	B <sub>2</sub>
TK-3810A	1	0.07	0.75	1.75	1.2	4.27	1.6	1	2	1.1	97.48
TK-3810B	1	0.07	0.75	1.75	1.2	4.27	1.6	1	2	1.1	97.48
TK-3710A	1	0.25	2.91	1.75	2.2	2.21	1.6	1	2	1.1	169.34
TK-3710B	1	0.25	2.91	1.75	2.2	2.21	1.6	1	2	1.1	169.34
TK-3710C	1	0.25	2.91	1.75	2.2	2.21	1.6	1	2	1.1	169.34
TK-3710D	1	0.25	2.91	1.75	2.2	2.21	1.6	1	2	1.1	169.34

3710A, TK-3710B, TK-3710C and TK-3710D) used for storing C<sup>3</sup>. Factor B<sub>1</sub> was, 347.31 and 269.16 for the atmospheric and spherical tanks, respectively. Accordingly, damages due to fire and explosion (B<sub>1</sub>) was regarded as B. The factor B<sub>1</sub> was higher for atmospheric tanks in comparison with the spherical ones due to several factors. These tanks had a higher capacity than the spherical ones, therefore, the quantity of the hazardous materials, and consequently the energy factor, was higher in the atmospheric tanks. Moreover, they contained heavier hydrocarbons, which could result in a higher heat radiation during fire. The results of this section demonstrated that, the values of pnr<sub>1</sub>, pnr<sub>2</sub>, pnr<sub>3</sub>, pnr<sub>4</sub>, pnr<sub>5</sub>, pnr<sub>6</sub>, pnr<sub>7</sub> and pnr<sub>8</sub> for the atmospheric tanks were 1.55, 1.3, 1.35, 2.75, 2.2, 1.34, 2, and 1.1, respectively. The values of the same penalties for the spherical tanks also were 1.55, 1.4, 1.45, 2.75, 2.2, 1.17, 2, and 1.1, respectively. Therefore, pnr<sub>1</sub>, pnr<sub>4</sub>, pnr<sub>5</sub>, pnr<sub>7</sub>, and pnr<sub>8</sub> were equal for all the storage tanks. Pnr<sub>2</sub> and pnr<sub>3</sub> related to the spherical tanks were higher than those of atmospheric tanks,

which is mainly due to the higher pressure of these tanks. In contrast, pnr<sub>6</sub> was higher for atmospheric tanks, because of the proximity of the atmospheric tanks to each other. Consequently, factor B<sub>2</sub> was 97.477 and 169.344 for the atmospheric and spherical tanks, respectively. Moreover, the results of this section demonstrated that, the values of pnr<sub>1</sub>, pnr<sub>2</sub>, pnr<sub>3</sub>, pnr<sub>4</sub>, pnr<sub>5</sub>, pnr<sub>6</sub> and pnr<sub>7</sub> for the atmospheric tanks were 1.75, 1.2, 4.27, 1.6, 1, 2 and 1.1, respectively. Likewise, the values of these penalties for the spherical tanks were also 1.75, 2.2, 2.21, 1.6, 1, 2 and 1.1, respectively. The G factor was also 0.75 for the atmospheric tanks and 2.91 for the spherical tanks. As the spherical tanks are under pressure, the rate of release would be higher for them in case of leakage. As evident, the expected damage due to the fire & explosion of the tanks was more than the estimated damage, due to their toxic properties, consequently, factor B<sub>1</sub> was regarded as the final B. Factor A was calculated based on the control measures which were used in the refinery's operations. Two types

of control measures were assessed: those used for controlling the damage potential and those used for reducing the frequency of occurrence. The values of  $cr_1$ ,  $cr_2$ ,  $cr_3$ ,  $cr_4$ ,  $cr_5$ ,  $cr_6$ ,  $cr_7$  and  $cr_8$  in the investigated company, were 1.4, 0.9, 1.3, 2.7, 1.9, 1, 1.2, and 0.1, respectively. Among these credits, the lowest values were associated with the  $cr_8$  and  $cr_2$ , suggesting that the company should improve the reliability of the equipment used, and promote its disaster management plan. Based on the assigned credits, the value of A was calculated to be 84.31 for atmospheric and spherical tanks. The ratio of B to A, which demonstrates the final SWeHI score, was 4.12 for the atmospheric tanks and 3.19 for the spherical tanks. Therefore, all tanks posed a moderate level of risk for the refinery and surrounding environment and population.

### CONCLUSION

The results of this study demonstrated that

the storage tanks in the Ilam Gas Refinery pose a moderate level of risk. The major hazards of these tanks are fire and explosion. For reducing the risk level, it is recommended to improve the emergency plans based on the credible scenarios, and to inspect and calibrate the gas detectors used across the site in a regular time interval.

### ACKNOWLEDGEMENT

Authors would like to thank Hamadan university of medical sciences for financial support (grant number: 970121113). Authors also would like to thank the staff of Ilam Gas Refining Company for their collaboration.

### CONFLICT OF INTEREST

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

---

---

### How to cite this article:

Fakhradin Ghasemi, Mohammad Kurdestani, Iraj Mohammadfam. Risk Assessment of Ilam Gas Refinery Storage Tanks using Safety Weighted Hazard Index (SWeHI) and Recommendation of Required Control Measures. Iran Occupational Health. 2021 (01 Oct);18:19.

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



## ارزیابی ریسک مخازن پالایشگاه گاز ایلام با استفاده از شاخص خطر وزن شده ایمنی و ارائه راهکارهای کنترلی موردنیاز

**فخرالدین قاسمی:** استادیار گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشگاه علوم پزشکی آبادان، آبادان، ایران.  
**محمد کردستانی:** دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ایمنی، سلامت و محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.  
**ایرج محمدفام:** (\* نویسنده مسئول) استاد گروه مدیریت ایمنی، سلامت و محیط زیست، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. mohammadfam@umsha.ac.ir

### چکیده

#### کلیدواژه‌ها

مخازن ذخیره سازی  
پالایشگاه گاز  
شاخص ایمنی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶

**زمینه و هدف:** ارزیابی ریسک مهم‌ترین ابزار جهت شناسایی ریسک‌های غیرقابل قبول و پیشگیری از حوادث مربوط به آن می‌باشد. هدف این مطالعه ارزیابی ریسک مخازن پالایش گاز ایلام با استفاده از شاخص خطر وزن شده ایمنی به عنوان یک روش کمی ارزیابی ریسک می‌باشد.

**روش بررسی:** شاخص خطر وزن شده ایمنی دارای دو بخش شاخص خطر بالقوه (B) و شاخص کنترل خطر (A) است. بخش اول شامل خطرات حریق و انفجار (B<sub>1</sub>) و خطر رها شدن مواد سمی (B<sub>2</sub>) است که پس از محاسبه جراثم آن‌ها، عدد بزرگ‌تر به عنوان شاخص خطر بالقوه انتخاب می‌شود. برای تعیین فاکتور A انواع لایه های حفاظتی موجود ارزیابی می‌شوند. با تقسیم عدد بزرگ‌تر بین B<sub>1</sub> و B<sub>2</sub> بر A شاخص خطر وزن شده ایمنی محاسبه می‌گردد. بالا بودن مقدار این شاخص نشان دهنده بالاتر بودن ریسک واحد مورد بحث می‌باشد.

**یافته‌ها:** مقدار B<sub>1</sub> برای مخازن اتمسفری و کرووی به ترتیب ۳۴۷/۳۱ و ۲۶۹/۱۶ و مقدار B<sub>2</sub> برای این مخازن به ترتیب ۹۷/۴۸ و ۱۶۹/۳۴ محاسبه شده است. مقدار A برای مخازن اتمسفری و کرووی برابر با ۸۴/۳۱ تعیین گردید. در بین پارامترهای اثرگذار بر A، طرح مدیریت بحران و قابلیت اطمینان تجهیزات مورد استفاده دارای کمترین مقدار می‌باشند. شاخص خطر وزن شده ایمنی برای مخازن کرووی و استوانه ای به ترتیب برابر ۳/۱۹۲۵ و ۴/۱۹۹۳ محاسبه شده که نشان دهنده خطر متوسط می‌باشد.

**نتیجه گیری:** در مقایسه با سایر تکنیک های مشابه، شاخص خطر وزن شده ایمنی رویکردی سریع جهت ارزیابی ریسک و اولویت بندی اقدامات اصلاحی در صنایع نفت و گاز می‌باشد.

**تعارض منافع:** گزارش نشده است.

**منبع حمایت کننده:** ندارد.

شیوه استناد به این مقاله:

Fakhradin Ghasemi, Mohammad Kurdestani, Iraj Mohammadfam. Risk Assessment of Ilam Gas Refinery Storage Tanks using Safety Weighted Hazard Index (SWeHI) and Recommendation of Required Control Measures. Iran Occupational Health. 2021 (01 Oct);18:19.

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

## مقدمه

را شناسایی می کنند. چنانچه سطح ریسک تجهیزات از معیار موردنظر بالاتر باشد، با استفاده از سایر روش های ارزیابی ریسک (از جمله روش های کمی) نواحی فرآیندی موردنظر از نظر ریسک به طور دقیق تر مورد واکاوی قرار می گیرند. بر اساس دانش ما فقط تعداد مطالعات بسیار محدودی از این روش برای ارزیابی ریسک استفاده کرده اند. با توجه به مزیت هایی که این روش در مقایسه با سایر شاخص های ارزیابی خطر دارد به نظر می رسد شاخص SWeHI به عنوان یک ابزار سودمند در ارزیابی و ارائه راهکارهای پیشگیرانه عمل کند (۸). پژوهشگران و محققین در این مطالعه قصد دارند با استفاده از روش SWeHI خطرات حریق و انفجار و رهایش مواد سمی مربوط به مخازن گاز را در پالایشگاه گاز ایلام بررسی کرده و راهکارهای کنترلی مناسب ارائه دهند.

## مواد و روش ها

مطالعه حاضر یک نوع پژوهش بررسی مقطعی است که به ارزیابی ریسک مخازن پالایشگاه گاز ایلام به عنوان یکی از پرخطرترین بخش های پالایشگاه که در معرض حوادث فرآیندی از جمله خطر حریق و انفجار و رهایش مواد سمی شیمیایی است با استفاده از شاخص SWeHI پرداخته است (۸). این روش جهت ارزیابی ایمنی و شناسایی سریع و جامع خطرات در صنایع فرآیندی توسط خان و همکاران در سال ۲۰۰۱ معرفی شده است. این روش نسخه ی اصلاح شده روش رتبه بندی و شناسایی خطر (HIRA<sup>6</sup>) می باشد و علاوه بر این، اقدامات ایمنی موردنیاز برای کاهش آن ها را نیز مشخص می کند (۵). در این روش گستره کاملی از خطرات، مثل خطاهای انسانی، شرایط اضطراری، نقص در دریچه ها، فاکتورهای خارجی و... بر اساس احتمال و تعداد دفعات بروز در صنایع شیمیایی فرآیندی واکاوی و امتیازدهی شده و اقدامات ایمنی را در نمره نهایی ارزیابی لحاظ می کند. هم چنین در این شاخص اقدامات کنترلی در هر واحد جهت کنترل یا حذف خطرات در صنایع در نظر گرفته می شود. این روش در نهایت یک تصویر لحظه ای از واحد فرآیندی با در نظر گیری خطرات موجود در فرآیند و اقدامات ایمنی برای کنترل یا حذف آن خطرات را فراهم می آورد.

روش SWeHI شامل دو بخش شاخص خطر بالقوه (B) و شاخص کنترل خطر (A) است. بخش اول که با عنوان B از آن یاد می شود شامل خطرات حریق و انفجار (B<sub>1</sub>) و خطر مربوط به رهایش مواد سمی شیمیایی (B<sub>2</sub>) بوده و

صنایع نفت و گاز نقش کلیدی در اقتصاد کشور ایران دارند به طوری که و مهم ترین منبع درآمد ارزی کشور محسوب می شوند. با این وجود، به علت ماهیت خطرناک مواد مورد استفاده در این صنایع، همواره احتمال رخداد حوادث فرآیندی و شغلی در این صنایع بالا می باشد (۱). تاریخ صنایع نفت و گاز شاهد حوادث زیادی بوده است که از آن جمله می توان به حادثی از قبیل فلیکسیپوروا<sup>۱</sup> در انگلستان (۲۸ نفر کشته)، حادثه سوسو<sup>۲</sup> ایتالیا (توده گاز منتشر شده ی ناشی از انفجار با ۶ کیلومتر طول و یک کیلومتر عرض)، حادثه دلور<sup>۳</sup> آمریکا (انفجار تانک ذخیره بنزین)، حادثه پارتریج رالی<sup>۴</sup> آمریکا (انفجار تانک ذخیره نفت) و حادثه آتش سوزی در پتروشیمی بوعلی اشاره کرد (۲-۴). از آنجایی که ارزیابی و مدیریت ریسک مهمترین و مقرون به صرفه ترین ابزار جهت پیشگیری از چنین حوادثی است، اهمیت آن ها نمی بایست در سازمان دست کم گرفته شود.

بر همین اساس، در دو دهه اخیر روش های مختلفی جهت ارزیابی و مدیریت ریسک این صنایع ارائه شده اند که از آن جمله می توان HAZOP، FMEA، درخت خطا، درخت رویداد و رویکردهای مبتنی بر شبکه های بیزین اشاره نمود. این شاخص ها را می توان به طور کلی در سه دسته کیفی، نیمه کمی و کمی تقسیم بندی نمود. استفاده از شاخص های کیفی نیازمند حداقل آموزش بوده و در کمترین زمان قابل اجرا هستند، در نتیجه استفاده از آن ها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد. در مقابل، شاخص های کمی ارزیابی ریسک نیازمند تخصیص منابع آموزشی و زمان بیشتر می باشند. به طور کلی استفاده از شاخص های کمی ارزیابی ریسک به علت فراهم آوردن خروجی های عمیق تر و کامل تر از اقبال بیشتری در میان متخصصین امر برخوردار می باشد (۵-۷).

از جمله روش های جدیدی که اخیراً توسعه یافته و جز روش های کمی ارزیابی تلقی می شود، روش شاخص های ریسک (مثل شاخص SWeHI<sup>5</sup>) است (۸). در این روش مجموعه ای از عوامل مؤثر بر ایمنی به صورت یک شاخص عددی بیان می شود که این شاخص به عنوان ملاک ارزیابی ریسک قرار می گیرد. این شاخص ها با استفاده از مقادیر عددی، تجهیزات فرآیندی با سطح ریسک بالا

1 Flixborough

2 Seveso

3 Delaware

4 Partridge-Raleigh

5 Safety Weighted Hazard Index

6 hazard identification and ranking analysis

در رابطه ۲، فاکتور  $F_1$  میزان انرژی مواد شیمیایی بوده،  $M$  نشان دهنده جرم ماده شیمیایی (بر حسب کیلوگرم یا نرخ رهایش جرم بر حسب کیلوگرم بر ثانیه) است،  $H_c$  گرمای ناشی از احتراق بر حسب کیلوژول بر مول بوده و  $K$  نیز عدد ثابت معادل  $3/148$  می باشد. دو فاکتور دیگر که بیان کننده انرژی فیزیکی می باشند نیز با استفاده از روابط ۳ و ۴ به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$F_2 = 1.304 \times 10^{-3} PP \times V \quad (3)$$

$$F_3 = 10^{-3} \times \left( \frac{1}{T+273} \right) (PP - VP)^2 \times V \quad (4)$$

در این روابط،  $PP$  فشار فرآیند بر حسب کیلو پاسکال،  $VP$  فشار بخار بر حسب کیلو پاسکال،  $V$  حجم ماده شیمیایی بر حسب متر مکعب و  $T$  دما بر حسب درجه سانتی گراد هستند. روابط فوق بر اساس معادلات پیچیده ترمودینامیک مایعات یا گازی های تحت فشار در حالت انبساط آدیباتیک تعریف می شوند (9). در محاسبه شاخص آسیب ناشی از حریق و انفجار عوامل مختلفی مانند: دما، فشار، فاصله از واحدهای خطرناک، میزان ظرفیت واحد و ... در نظر گرفته می شود. نحوه امتیازدهی جرائم مربوط به واحدهای ذخیره سازی مطابق مطالعه صورت گرفته توسط خان و همکاران انجام می پذیرد.

به منظور تعیین پتانسیل خطر، فاکتورهای انرژی و جرائم از طریق رابطه ی ۵ با هم ترکیب شده که در مرحله بعد با جایگذاری مقدار پتانسیل خطر در رابطه ی ۶ می توان پتانسیل آسیب یا شاخص  $B_1$  را محاسبه کرد.

$$HP = (F_1 \times Pn_1 + F_2 \times Pn_2) \times Pn_3 \times Pn_4 \times Pn_5 \times Pn_6 \times Pn_7 \times Pn_8 \quad (5)$$

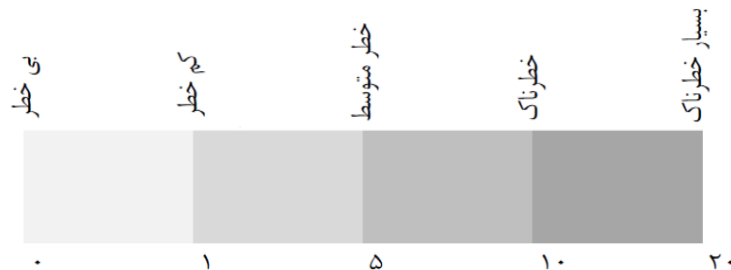
$$B_1 = 4.76 \times HP^{1/3} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن سلسله پارامترهایی از جمله دما و فشار، مشخصات تجهیزات و فرآیند و ... میزان این شاخص محاسبه می گردد. پس از مقایسه دو عامل بالا (سمیت شیمیایی و حریق و انفجار) عدد بزرگ تر به عنوان شاخص خطر بالقوه (B) انتخاب می شود. بخش دوم این روش شامل در نظر گیری فاکتورهای کنترلی موجود در فرآیند از جمله عوامل بالقوه آسیب رسان، سامانه های کنترلی و ... می باشد. پس از محاسبه این زیر فاکتورها میزان شاخص کنترل خطر (A) به دست می آید. همان گونه که در رابطه ۱ نشان داده شده است با تقسیم میزان شاخص خطر بالقوه بر شاخص کنترل خطر، عدد نهایی مربوط به SWeHI به دست می آید که میزان ریسک واحد را مشخص می کند. به این صورت که، هرچه عدد حاصل بزرگ تر باشد واحد خطرناک تر است. لذا اقدامات کنترلی مناسب باید در جهت کم کردن صورت کسر و زیاد کردن مخرج کسر صورت گیرد. جزئیات طبقه بندی SWeHI در شکل ۱ آمده است. اجرای روش SWeHI بر اساس شکل ۲ می باشد. با شناسایی نقاط پرخطر و نقص های کنترلی صورت گرفته می توان به حذف و کاهش خطر و با ارائه راهکارهای کنترلی مناسب به مدیریت ریسک موجود پرداخت.

$$SWeHI = \frac{B}{A} \quad (1)$$

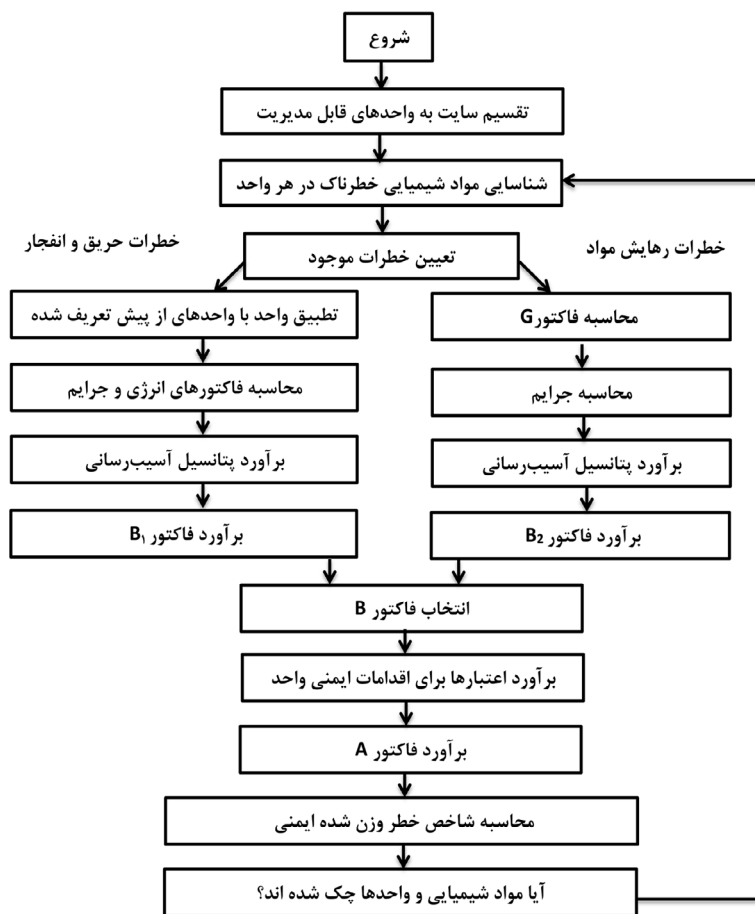
در رابطه ۱، B نمایانگر شاخص خطر بالقوه و A نمایانگر شاخص کنترل خطر می باشد. به منظور برآورد شاخص حریق و انفجار این واحدها با استفاده از شاخص SWeHI، سه فاکتور انرژی  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  تعریف می شوند که انرژی های فیزیکی و شیمیایی را در بر می گیرند. فاکتورهای  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  به ترتیب با استفاده از روابط ۲، ۳ و ۴ محاسبه می شوند.

$$F_1 = 0.1M \times H_c / K \quad (2)$$



شکل ۱. دسته بندی خطر بر اساس مقدار عددی شاخص SWeHI





شکل ۲. مراحل اجرای روش SWeHI

پخش آن در اتمسفر شده و باعث ایجاد یک بار سمی در هوا می‌شود. گازهای سمی که دو حالت رهائش دارند و به دنبال آن پخش و بار سمی در هوا تشکیل می‌شود. جامدات سمی گرما دوست که بخارات سمی داشته و باعث تولید یک بار سمی در هوا می‌شوند. فاکتور G طبق رابطه ۷ کمی می‌شود:

$$G = S \times M \quad (7)$$

در این رابطه، M رهائش پیش بینی شده و بر حسب کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد و میزان S به شرایط رهائش بستگی دارد که مقادیر آن برای حالات مختلف ماده رها شده (جامد، مایع، گاز و گاز مایع شده) بر اساس رتبه بندی NFPA تعیین می‌گردد. نحوه محاسبه این فاکتور توسط خان و همکاران توضیح داده شده است.

همان‌طور که بیان شد عامل  $B_2$  توسط یک فاکتور به نام فاکتور G و چند جریمه برآورد می‌شود. فاکتور G همان فاکتور بار سمی است که به منظور بیان میزان صدمه

در روابط فوق، HP نشان دهنده پتانسیل خطر می‌باشد. عامل  $B_2$  شعاع منطقه ای را که رهائش مواد سمی، آن را با احتمال ۵۰ درصد مرگومیر تحت تأثیر قرار می‌دهد، محاسبه می‌کند. این شاخص همانند شاخص آسیب ناشی از مواد سمی (TDI<sup>1</sup>) در روش HIRA است و از مدل‌های تجربی و حوادث ناشی از حمل‌ونقل بر اساس مقدار ماده شیمیایی مورد استفاده در واحد، سمیت مواد، شرایط کار و عملیات، حالت فیزیکی و ویژگی‌های محل کار به دست می‌آید (۱۰).

محاسبه عامل  $B_2$  با استفاده از یک فاکتور اصلی به نام فاکتور G و چند جریمه انجام می‌گردد. فاکتور G در موارد زیر محاسبه می‌شود:

در طول رهائش تصادفی مایع بسیار گرم از هر واحد (مایعی که در دمای بالاتر از نقطه جوش خود ذخیره یا استفاده می‌شود) قسمتی از آن به سرعت بخار می‌شود و باقی مانده آن به حوضچه‌هایی تبدیل شده که متعاقباً تبخیر می‌گردد. رهائش گازها به‌طور مستقیم منجر به

1 Toxic Damage Index

## جدول ۱. رتبه‌بندی خطرات مربوط به حریق و انفجار و سمیت مواد شیمیایی بر اساس شعاع آسیب

ویژگی خطر	شاخص آسیب ناشی از سمیت (TDI)	شاخص آسیب ناشی از حریق و انفجار (FEDI)
بی‌نهایت خطرناک	$TDI > 700$	$FEDI > 500$
بسیار خطرناک	$700 > TDI > 500$	$500 > FEDI > 400$
خطرناک	$500 > TDI > 200$	$400 > FEDI > 200$
خطر متوسط	$200 > TDI > 50$	$200 > FEDI > 100$
کم‌خطر	$50 > TDI > 5$	$100 > FEDI > 20$
بی‌خطر	$TDI < 5$	$FEDI < 20$

اقدامات ایمنی یک واحد یا فرآیند را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: ۱. اقدامات مربوط به کنترل پتانسیل‌های آسیب‌رسان در واحد‌های خاص. ۲. اقدامات مربوط به تعداد رخداد حوادث آسیب‌رسان.

فاکتور A از طریق عناصر مختلف اقدامات ایمنی یک صنعت و نیز دستورالعمل‌های ایمنی واحد یا فرآیند مطابق با رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$A = 0.15 \times (1 + Cr_1) \times (1 + Cr_2) \times \quad (9)$$

$$(1 + Cr_3) \times (1 + Cr_4) \times (1 + Cr_5) \times$$

$$(1 + Cr_6) \times (1 + Cr_7) \times (1 + Cr_8)$$

برای محاسبه A بایستی تعیین اعتبارات برای کنترل عوامل بالقوه آسیب‌رسان صورت پذیرد. این کار همان‌گونه که توسط خان و همکاران توضیح داده شده است در دو قسمت انجام می‌پذیرد. در قسمت اول تعیین اعتبارات برای کنترل عوامل بالقوه آسیب‌رسان در سه سطح انجام می‌شود که شامل: برنامه‌ی واکنش در شرایط اضطراری، برنامه‌ی مدیریت بحران و دیگر اقدامات کنترل آسیب می‌باشد. در بخش دوم اقدامات مربوط به تعداد رخداد حوادث آسیب‌رسان مورد بررسی قرار می‌گیرد که خود شامل ۵ سطح مختلف است: سامانه کنترل فرآیند، وسایل آشکارساز، اقدامات کنترل اضطراری، خطاهای انسانی و قابلیت اطمینان تجهیزات. جداول مربوط به اندازه‌گیری این عوامل توسط Khan توضیح داده شده است (۸).

## نتایج

واحد مخازن در پالایشگاه عهده‌دار ذخیره‌سازی تولیدات پالایشگاه است. واحد یادشده شامل دو مخزن استوانه‌ای جهت نگهداری  $C^{+5}$  در فشار اتمسفریک هر کدام با ظرفیت ۳۲۳۵۲ متر مکعب و چهار مخزن کروی

سمی که به دنبال رهايش رخ می‌دهد مورد استفاده قرار می‌گیرد. چند جریمه برای تعیین شاخص  $B_2$  تعریف شده است که می‌توان به دمای عملیاتی، فشار عملیاتی، چگالی بخار، سمیت مواد شیمیایی، ویژگی‌های محیط کار تعیین شده اشاره کرد. روش محاسبه این جرائم توسط خان و همکاران ارائه شده است. لازم به ذکر است که جرائم دما و فشار به کمک راهنماهای  $TCPA^1$  و OSHA محاسبه می‌شوند و در نهایت فاکتور و جرائم با استفاده از رابطه ۸ محاسبه و ضریب  $B_2$  به دست می‌آید.

$$B_2 = a \left( \frac{G \times pnr_1 \times pnr_2 \times pnr_3 \times}{pnr_4 \times pnr_5 \times pnr_6 \times pnr_7} \right)^b \quad (8)$$

در رابطه فوق a و b اعدادی ثابت هستند و به صورت تجربی با مطالعه رهايش و پخش گسترده‌ای از مواد شیمیایی (مانند مایعات بسیار گرم گازهای مایع شده، گازها و...) برآورد می‌شوند. مقادیر a و b در این مطالعه به ترتیب ۲۵/۳۵ و ۰/۴۲۵ در نظر گرفته شده‌اند.

پس از محاسبه شاخص‌های  $B_1$  و  $B_2$  با استفاده از جدول راهنمای HIRA می‌توان هر واحد فرآیندی را از نظر خطر حریق و انفجار و رهايش مواد سمی تحت عنوان شعاع آسیب مورد بررسی قرار داد (۱۱).

همان‌گونه که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، پس از به دست آوردن  $B_2$  از بین  $B_1$  و  $B_2$  عددی که بزرگ‌تر است را به عنوان شاخص خطر بالقوه انتخاب می‌کنیم که این عدد در صورت کسر رابطه ۱ محاسبه SWeHI قرار می‌گیرد.

هر صنعتی با استفاده از اقدامات ایمنی مختلف با پتانسیل ریسک برخورد می‌کنند. موازنه بین لایه‌های ایمنی و خطرات، سطح پتانسیل یک صنعت خاص را در زمان مشخص تعیین می‌کند. هرچه سنگینی خطر در این موازنه بیشتر باشد احتمال حادثه افزایش می‌یابد. اقدامات کنترل خطر باید از مرحله طراحی آغاز شود.

فاصله بوده و از طریق نمودار مربوط به این جریمه تعیین شده که در نهایت با توجه به فاصله ۲۰ متری مخازن کروی از همدیگر میزان این جریمه برابر ۱/۴۵ به دست آمده است. در مخازن استوانه‌ای این فاصله برابر ۳۷ متر بوده که میزان جریمه ۱/۳۵ را نشان می‌دهد. ظرفیت مخزن (Pn<sub>4</sub>) تابعی از مقدار ماده بر حسب تن است که روش مربوطه میزان این جریمه برای هر دو نوع مخزن کروی و استوانه‌ای عدد ۲/۷۵ به دست آمده که بالاترین میزان جریمه برای تعیین خطر بالقوه ناشی از حریق و انفجار را به خود اختصاص می‌دهند. برای جریمه ناشی از ویژگی اشتعال پذیری و واکنش‌پذیری (Pn<sub>5</sub>) مجدداً از لوزی رتبه‌بندی خطر NFPA استفاده شده است که برای هر دو نوع مخزن کروی و استوانه‌ای برابر با ۲/۲ می‌باشد. جریمه مربوط به سطح واحد (Pn<sub>6</sub>) تابع سطح اشغال شده توسط واحد در شعاع ۳۰ متری آن به دست می‌آید که برابر به ۱/۱۷ بوده و این جریمه برای مخازن استوانه‌ای ۱/۳۴۲ محاسبه گردیده است. دو جریمه ناشی از حوادث طبیعی مثل زلزله و طوفان (Pn<sub>7</sub>) و آشوب‌ها نژادی و برخوردی‌های گروهی (Pn<sub>8</sub>) برای همه مخازن یکسان بوده و به ترتیب برابر ۲ و ۱/۱ محاسبه شده‌اند. نتیجه پتانسیل خطر برای مخازن کروی ۱۸۰۸۱۳/۷ را نشان می‌دهد که در نتیجه آن، عدد ۲۶۹/۱۶۴ مربوط به پتانسیل آسیب

جهت نگهداری C<sup>3+</sup> هر کدام با ظرفیت ۱۰۴۷ متر مکعب می‌باشد.

طبق آنالیزهای انجام شده به روش شاخص SWeHI برای چهار مخزن کروی میزان فاکتور انرژی شیمیایی F<sub>1</sub> برابر با ۹۲۷/۱۲ و دو فاکتور فیزیکی F<sub>2</sub> و F<sub>3</sub> به ترتیب ۱۴۱۴/۴۳ و ۳۱۱۶/۹۴ به دست آمده‌اند (جدول ۲). بررسی‌های ما نشان داد که بالا بودن فاکتورهای موردنظر در مخازن ذکر شده به علت زیاد بودن میزان جریان، گرمای ناشی از احتراق و حجم بالای مخازن است. از طرفی فاکتورهای F<sub>1</sub>، F<sub>2</sub> و F<sub>3</sub> برای دو مخزن استوانه‌ای به ترتیب ۱۵۷۵/۷۹، ۸۴۳۷/۴ و ۲۰۷۵/۱۶ محاسبه گردیده‌اند. میزان جریمه مربوط به دما (Pn<sub>1</sub>) چهار مخزن کروی با توجه به دمای عملیاتی فرآیند و نقطه اشتعال و خود اشتعالی گاز بوتان برابر با عدد ۱/۵۵ می‌باشد. همچنین میزان این جریمه با توجه به خصوصیات اکتان موجود در مخازن استوانه‌ای نیز برابر ۱/۵۵ تعیین گردیده است. جریمه ناشی از فشار (Pn<sub>2</sub>) با توجه به رتبه بندی اشتعال پذیری NFPA گاز بوتان و فشار فرآیند و با توجه به نمودار تعیین جریمه فشار مشخص گشته که عدد ۱/۴۵ به دست آمده است، این در حالی است که این جریمه برای مخازن استوانه‌ای عدد ۱/۳ بوده که میزان بسیار بالایی را نشان نمی‌دهد. جریمه مربوط به نزدیک ترین واحد خطرناک (Pn<sub>3</sub>) تابع میزان

جدول ۲. نتایج جرائم و شاخص آسیب ناشی از حریق و انفجار در واحد ذخیره سازی پالایشگاه گاز ایلام

نام واحد	طبقه بندی	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	Pn <sub>1</sub>	Pn <sub>2</sub>	Pn <sub>3</sub>	Pn <sub>4</sub>	Pn <sub>5</sub>	Pn <sub>6</sub>	Pn <sub>7</sub>	Pn <sub>8</sub>	H.P	B <sub>1</sub>
TK-3810A	1	1575/79	8437/4	2075/16	1/55	1/3	1/35	2/75	2/2	1/34	2	1/1	388443/5	34/31 7
TK-3810B	1	1575/79	8437/4	2075/14	1/55	1/3	1/35	2/75	2/2	1/34	2	1/1	388443/5	34/31 7
TK-3710A	1	927/12	1414/43	3116/94	1/55	1/4	1/45	2/75	2/2	1/17	2	1/1	180813/7	26/16 9
TK-3710B	1	927/12	1414/43	1414/43	1/55	1/4	1/45	2/75	2/2	1/17	2	1/1	180813/7	26/16 9
TK-3710C	1	927/12	1414/43	1414/43	1/55	1/4	1/45	2/75	2/2	1/17	2	1/1	180813/7	26/16 9
TK-3710D	1	927/12	1414/43	1414/43	1/55	1/4	1/45	2/75	2/2	1/17	2	1/1	180813/7	26/16 9

جدول ۳. نتایج جرائم و شاخص آسیب ناشی از رهايش مواد سمی و شیمیایی در واحد ذخیره سازی پالایشگاه گاز ایلام

نام واحد	طبقه بندی	S	G	Pnr <sub>1</sub>	Pnr <sub>2</sub>	Pnr <sub>3</sub>	Pnr <sub>4</sub>	Pnr <sub>5</sub>	Pnr <sub>6</sub>	Pnr <sub>7</sub>	B <sub>2</sub>
TK-3810A	1	0/07	0/75	1/75	1/2	4/27	1/6	1	2	1/1	97/48
TK-3810B	1	0/07	0/75	1/75	1/2	4/27	1/6	1	2	1/1	97/48
TK-3710A	1	0/25	2/91	1/75	2/2	2/21	1/6	1	2	1/1	169/34
TK-3710B	1	0/25	2/91	1/75	2/2	2/21	1/6	1	2	1/1	169/34
TK-3710C	1	0/25	2/91	1/75	2/2	2/21	1/6	1	2	1/1	169/34
TK-3710D	1	0/25	2/91	1/75	2/2	2/21	1/6	1	2	1/1	169/34

مقادیر  $Cr_1, Cr_2, Cr_3, Cr_4, Cr_5, Cr_6, Cr_7, Cr_8$  به ترتیب برابر با  $1/4, 0/9, 1/3, 2/5, 1/9, 1, 1/2$  و  $0/2$  بوده است. در نتیجه کلی میزان شاخص کنترل خطر با استفاده از رابطه مربوطه برابر با  $84/31$  محاسبه گردیده است.

همان‌گونه که در جدول ۵ نشان داده شده، میزان شاخص خطر ناشی از حریق و انفجار در مخازن کروی برابر  $269/16$  و در مخازن استوانه‌ای  $347/30$  تعیین گردیده است. همچنین، میزان شاخص رهایش مواد شیمیایی در مخازن کروی  $169/34$  و در مخازن استوانه‌ای  $97/45$  می‌باشد. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از نتایج حاصل از شاخص خطر ناشی از حریق و انفجار و شاخص خطر ناشی از رهایش مواد سمی در کلیه مخازن کروی و استوانه‌ای میزان شاخص خطر ناشی از حریق و انفجار بیشتر از شاخص خطر ناشی از رهایش مواد سمی بوده از طرفی میزان شاخص کنترل خطر در همه مخازن برابر با عدد  $84/31$  است در نتیجه عدد نهایی ریسک به روش SWeHI برای مخازن کروی برابر  $3/19$  و برای مخازن استوانه‌ای  $4/20$  به دست آمده که مقایسه این اعداد با رتبه‌بندی این شاخص خطر وزن شده ایمنی، همه ی مخازن در محدوده خطر متوسط قرار می‌گیرند.

### بحث

توسعه منابع نفت و گاز، مخاطرات جدی فرآیندی را به دنبال داشته و این صنایع را در زمره صنایع خطرناک قرار داده است. در همین راستا، چانگ و همکاران (12) با بررسی ۲۴۲ مورد از حوادث مربوط به تانک‌های ذخیره صنایع فرآیندی نشان دادند که خطر آتش‌سوزی و انفجار، مسئول بیش از ۸۵ درصد رخدادهای صنایع فرآیندی است که در موارد زیادی منجر به خسارات جبران‌ناپذیری

ناشی از حریق و انفجار محاسبه می‌شود. از طرفی عدد پتانسیل آسیب برای مخازن استوانه‌ای برابر  $388443/5$  است که در نهایت مبین عدد بالای  $347/31$  مربوط به پتانسیل آسیب ناشی از حریق و انفجار می‌باشد. این نتایج در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

میزان فاکتور G با توجه به میزان رتبه‌بندی فاکتور سلامت NFPA ماده شیمیایی و میزان نرخ رهایش محاسبه شده، که این فاکتور برای مخازن کروی  $2/91$  و برای مخازن استوانه‌ای  $0/754$  به دست آمده است (جدول ۳). جریمه ناشی از دما ( $Pnr_1$ ) با توجه دمای عملیاتی و نقطه خود اشتعالی محتوای مخازن برای مخازن کروی و استوانه‌ای برابر با  $1/75$  می‌باشد. جریمه ناشی از فشار ( $Pnr_2$ ) برای مخازن کروی  $2/2$  و برای مخازن استوانه‌ای  $1/2$  محاسبه شده است. جریمه چگالی بخار ( $Pnr_3$ ) از طریق محاسبه میزان چگالی بخار اجزای موجود در مخزن در مقایسه با چگالی بخار هوا به دست می‌آید که برای مخازن کروی و استوانه‌ای به ترتیب برابر  $2/212$  و  $4/271$  محاسبه شده است. جریمه سمیت ماده شیمیایی ( $Pnr_4$ ) نیز با استفاده از میزان رتبه‌بندی فاکتور سلامت NFPA ماده شیمیایی محاسبه شده که برای هر دو نوع مخزن برابر  $1/6$  است. جرائم مربوط به تراکم جمعیت ( $Pnr_5$ )، فاکتورهای حوادث طبیعی ( $Pnr_6$ ) و آشوب‌های اجتماعی ( $Pnr_8$ ) نیز برای هر دو نوع مخازن برابر بوده و به ترتیب برابر  $1, 2$  و  $1/1$  محاسبه شده‌اند. در نتیجه میزان شاخص رهایش مواد سمی برای مخازن کروی  $169/344$  و برای مخازن استوانه‌ای  $97/448$  می‌باشد. این نتایج در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

زیر شاخص‌های کنترل خطر شامل ۸ اعتبار بوده که برای همه مخازن یکسان و مطابق جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴. نتایج امتیازات مربوط به شاخص کنترل خطر واحد ذخیره سازی پالایشگاه گاز ایلام

نام واحد	A	1/4	0/9	1/3	2/5	1/9	1	1/2	0/2	A
مخازن	84/31									

جدول ۵. نتایج شاخص خطر وزن شده ایمنی برای واحد ذخیره سازی پالایشگاه گاز ایلام

نام واحد	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B	A	SWeHI
TK-3810A	347/31	97/45	347/31	84/31	4/12
TK-3810B	347/31	97/45	347/31	84/31	4/12
TK-3710A	269/17	169/34	269/17	84/31	3/19
TK-3710B	269/17	169/34	269/17	84/31	3/19
TK-3710C	269/17	169/34	269/17	84/31	3/19
TK-3710D	269/17	169/34	269/17	84/31	3/19

حالت فیزیکی گاز پروپان و در نتیجه بالا رفتن فاکتور G اشاره کرد که روی هم رفته باعث بالا رفتن ریسک ناشی از رهائش مواد سمی می شود (۱۴).

اگرچه مطالعه دیگری وجود ندارد که رهائش مواد سمی را با استفاده از روش SWeHI بررسی کرده باشد، اما مطالعاتی که در آن‌ها از دیگر شاخص‌های ارزیابی ریسک استفاده شده است نشان از بالا بودن خطر رهائش مواد سمی در پالایشگاه‌های گاز می دهند که همسو با نتایج مطالعه ما می باشد. در همین راستا، در مطالعه جهانگیری و همکاران در سال ۲۰۱۰ با هدف تعیین حریم خطر رهائش مواد شیمیایی سمی در یکی از صنایع پتروشیمی کشور و به منظور به کارگیری نتایج آن در برنامه ریزی واکنش در شرایط اضطراری، جهت تعیین حریم خطر رهائش مواد شیمیایی سمی از شاخص خطر مواجهه شیمیایی (CEI) که توسط شرکت شیمیایی Dow ارائه شده است استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که از بین مخازن مواد شیمیایی مورد بررسی شامل کلر، فنول، تولوئن، اپی کلروهیدرین، کلروبنزن و کلرید هیدروژن، بیشترین شاخص خطر و حریم خطر مربوط به ماده کلر با شاخص مواجهه شیمیایی ۳۴۰ و فاصله خطر ۳۳۹۹ و ۱۳۳۹ متر به ترتیب برای غلظت‌های مربوط به راهنمای برنامه ریزی برای شرایط اضطراری ۲ و ۳ بود (۱۵). همچنین چراغی و همکاران (۱۶) از شاخص مواجهه شیمیایی جهت تعیین فاصله خطر رهائش مواد سمی در پالایشگاه‌های گاز استفاده کردند. در این مطالعه، فاصله خطر برای بدترین سناریو ده هزار متر تعیین گردید که نشان دهنده پتانسیل بالای آسیب رسانی و اهمیت این سناریو در پالایشگاه‌های گاز می باشد. هر چند که چراغی و همکاران (۱۷) در مطالعه دیگری به این نتیجه رسیدند که فاصله خطر بدست آمده از چنین شاخص‌هایی بیشتر از فواصل تخمین زده شده توسط نرم افزارهای مدل سازی پیامد می باشد. این یافته نشان می دهد که نتایج بدست آمده از شاخص‌ها ممکن است اغراق آمیز باشد که البته از نظر ایمنی مطلوب ولی از نظر امکان پذیری نامطلوب است. بر همین اساس و با توجه به اهمیت رهائش گاز سمی از تأسیسات این چینی، یانگ و همکاران رویکرد جدیدی جهت شناسایی و دسته بندی مناطق در رهائش گازهای سمی ارائه کردند (۱۸).

طبق بررسی‌های صورت گرفته در پالایشگاه گاز و مطابق جدول ۴ امتیاز مربوط به شاخص کنترل خطر در همه واحدهای مخازن مشابه بوده و امتیاز نهایی آن ۸۴/۳۱ می باشد. همچنین با توجه به جداول ۲ و ۳ در ۶ واحد مربوط به قسمت مخازن در ۱۰۰ درصد واحدها

شده است. لذا در مطالعه حاضر پس از آشنایی با پالایشگاه گاز ایلام و طبقه بندی واحد‌های فرآیندی آن، از شاخص SWeHI برای شناسایی، ارزیابی و مدیریت ریسک‌های حریق و انفجار و رهائش مواد شیمیایی سمی مربوط به مخازن گاز استفاده شده است.

طبق نتایج این مطالعه در واحد مخازن، تمامی واحدها از نظر حریق و انفجار در ناحیه خطرناک قرار داشتند (جدول ۱). بر اساس نتایج آنالیز حریق و انفجار (جدول ۲)، بالاترین مقدار  $B_1$  (شاخص حریق و انفجار) مربوط به دو مخزن TK-A3810 و TK-B3810 (واحد مخازن  $C_7$  و  $C_8$ ) با میزان ۳۴۷/۴۱ بود که در ناحیه خطرناک قرار می گیرند. به نظر می رسد وجود هیدروکربن‌های سنگین که به صورت مستقیم باعث بالا رفتن گرمای ناشی از احتراق این مخازن می شوند به عنوان یکی از عوامل مؤثر در نرخ بالای مقدار  $B_1$  در این واحدها باشد. از طرف دیگر با توجه به مشاهدات ما، حجم این مخازن بالا بوده که این نیز می تواند باعث بالا رفتن فاکتور انرژی و فاکتورهای فیزیکی شده که نهایتاً باعث بالا رفتن ریسک حریق و انفجار می باشد. همان گونه که در جدول ذکر شده است، مقادیر  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  به عنوان شاخص‌های انرژی فیزیکی و شیمیایی مقادیر بالایی بوده و نتایج قبلی را تأیید می کند. همسو با نتایج ما، در مطالعه‌ای که توسط ایما و همکاران (13) در سال ۲۰۱۸ با موضوع ارزیابی ریسک و برآورد خطر در واحد آمونیوم پالایشگاه انجام شد، ضریب  $B_1$  در تانک ذخیره آمونیوم ۲۲۵/۱۸ به دست آمد که در محدوده خطرناک قرار می گیرد. در این مطالعه نیز به مانند مطالعه حاضر، دلیل بالا بودن این نرخ عواملی از جمله میزان دبی ورودی بالا و همچنین غلظت بالای گاز آمونیوم معرفی شد.

همان گونه که در بخش روش‌ها توضیح داده شد، برای اندازه گیری SWeHI، علاوه بر محاسبه میزان  $B_1$ ، مقادیر  $B_2$  (شاخص رهائش مواد سمی) نیز برآورده شده و عدد بزرگ‌تر در معادله نهایی قرار می گیرد. بر اساس نتایج آنالیز رهائش مواد سمی (جدول ۳)، بالاترین مقدار  $B_2$  مربوط به چهار مخزن TK-A3710، TK-B3710، TK-C3710 و TK-D3710 با میزان ۱۶۹/۳۴ می باشد که در ناحیه خطر متوسط قرار می گیرند. با توجه به نتایج به دست آمده، در واحد مخازن، ۳۳/۳۴ درصد واحدها در ناحیه کم خطر و ۶۶/۶۶ در ناحیه خطر متوسط قرار دارند. اگرچه مقادیر  $B_1$  بالاتر از مقادیر به دست آمده برای  $B_2$  است اما میزان  $B_2$  نیز به خودی خود بالاست (۸). از جمله عوامل تأثیرگذار در بالا بودن نرخ  $B_2$  در این واحدها می توان به

- توسعه و بهبود برنامه مدیریت بحران به طوری که علاوه بر پالایشگاه افراد بیرون و صنایع مجاور را نیز در برگیرد.
- نصب و کالیبره به موقع آشکارسازهای مواد شیمیایی قابل اشتعال، مواد شیمیایی قابل انفجار، مواد شیمیایی سمی در هر ۱۰۰ متر مربع از این واحدها و کاربرد آشکارساز شعله گیر در این واحدها.
- استفاده از کارکنان مسئول و پاسخ گو در این واحدها.

### نتیجه گیری

با توجه به نتایج شاخص SWeHI مشخص شده که میزان ریسک کل مخازن در محدوده خطر متوسط می باشند. بهبود طرح مدیریت بحران و ارتقای قابلیت تجهیزات مهم ترین راهکارهای پیشنهادی جهت بهبود وضعیت ایمنی در بخش مخازن پالایشگاه گاز ایلام می باشد.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی همدان به جهت حمایت از این طرح در قالب پایان نامه دانشجویی (شماره طرح: ۹۷۰۱۲۱۱۱۳) و کارکنان پالایشگاه گاز ایلام به جهت همکاری همه جانبه در فرآیند جمع آوری داده و اطلاعات مورد نیاز کمال تشکر را دارند.

## REFERENCES

1. Mohammadfam I, Abdoli M, Ghasemi F. Risk Assessment and Management of Gas Transmission Lines, in Alamout natural gas pipeline. Jundishapur J Heal Sci. 2013;5(3):175-82.
2. Centemeri L. What kind of knowledge is needed about toxicant-related health issues? Some lessons drawn from the Seveso dioxin case. Science and Politics in a Toxic World. Berghahn Books; 2014. 134-151 p.
3. Zio E, Aven T. Industrial disasters: Extreme events, extremely rare. Some reflections on the treatment of uncertainties in the assessment of the associated risks. Process Saf Environ Prot. 2013;91(1):31-45.
4. Weber M. Some Safety Aspects on the Design of Sparger Systems for the. Process Saf Prog. 2006;25(4):326-30.
5. Khan FI, Abbasi SA. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. J Loss Prev Process Ind. 1998;11(4):261-77.
6. George PG, Renjith VR. Evolution of Safety and Security Risk Assessment methodologies towards the use of Bayesian Networks in Process Industries. Process Saf Environ Prot. 2021;149:758-75.
7. Ghasemi F, Ghasemi A, Kalatpour O. Prediction of

مقدار شاخص خطر ناشی از حریق و انفجار بیشتر از شاخص خطر ناشی از رهایش مواد سمی است. از دلایل اصلی بالاتر بودن خطر حریق و انفجار می توان به نرخ دبی بالا و حجم بالای این مخازن اشاره کرد که باعث بالا رفتن بیش از انتظار فاکتورهای انرژی و فاکتورهای فیزیکی مربوط خطر ناشی از حریق و انفجار می شود (۱۹). از طرفی میزان ظرفیت بالای این مخازن باعث بالا رفتن بیش از حد جریمه ناشی از ظرفیت واحد شده که بدین ترتیب بالاترین میزان جریمه (۲/۷۵) را به خود اختصاص داده است (۸).

بر اساس محاسبات شاخص SWeHI و مطابق جدول ۵، پس از انتخاب شاخص خطر بالقوه و در نظر گیری شاخص کنترل خطر مشخص شد که در ۶ واحد مربوط به بخش مخازن پالایشگاه ۱۰۰ درصد واحدها در ناحیه خطر متوسط قرار گرفته اند. بر اساس نتایج آنالیز شاخص خطر وزن شده ایمنی، بیش ترین مقدار این شاخص مربوط به دو مخزن کروی TK-A۳۸۱۰ و TK-B۳۸۱۰ با میزان ۴/۱۲ می باشد. از دلایل اصلی بالا بودن شاخص SWeHI برای این واحدها، حجم بالای این مخازن (۳۲۳۵۲ مترمکعب) است که باعث بالا رفتن فاکتورهای فیزیکی شده است. همچنین این ابعاد بالا باعث افزایش بیش از حد جریمه ناشی از سطح واحد در سایت ( $Pn_g$ ) می شود.

همان گونه که نشان داده شد، فاکتورهای انرژی فیزیکی و شیمیایی در واحد مخازن پالایشگاه ایلام بالا می باشد، لذا از طریق کاهش حجم واحدها می توان نرخ رهایش فاکتورهای انرژی و فیزیکی را کاهش داده و متعاقباً میزان شاخص خطر بالقوه (B) را تا نصف عدد اولیه پایین آورد. جهت جبران میزان تولید روزانه مورد انتظار پالایشگاه می توان یک خط جدید از این واحدها جهت جبران نرخ ورودی دبی رهایش استفاده کرد. از آنجایی جبران نرخ ورودی رهایش مستلزم هزینه های فنی و مالی بالای است می توان با ارتقای نقایص کنترلی که در زیر اشاره شده است جهت مدیریت ریسک این واحد عملکرد مؤثرتری داشت. عملیاتی شدن پیشنهادات زیر می تواند میزان شاخص کنترل خطر را تا عدد ۳۲۱/۸۹ بالا بیاورد که در آن صورت عدد نهایی شاخص SWeHI به زیر یک خواهد رسید که در ناحیه کم خطر قرار می گیرد. به صورت کلی با توجه به نتایج به دست آمده، اقدامات کنترلی زیر برای کاهش مؤثر ریسک واحدهای مربوطه موجود ارائه می گردند.

- ارتقای برنامه های شرایط اضطراری از طریق افزایش مانورهای پیش از حادثه از سه مانور به پنج مانور می باشد.

14. Birk AM. Hazards from propane BLEVEs: An update and proposal for emergency responders. *J Loss Prev Process Ind.* 1996;9(2):173–81.
15. Jahangiri M, Parsarad A. Determination of hazard distance of chemical release in a petrochemical industry by chemical exposure index (CEI). *Iran Occup Heal.* 2010;7(3):55–62.
16. Cheraghi M, Bagherian-Sahlavani A, Mohammadfam I. Toxic chemical release hazard distance determination using chemical exposure index (CEI) in a gas refinery. *Iran J Chem Chem Eng.* 2019;38(4):273–91.
17. Cheraghi M, Bagherian-Sahlavani A, Noori H, Mohammad-Fam I. Evaluation of hazard distances related to toxic releases in a gas refinery: comparison of chemical exposure index and consequence modeling approaches. *Int J Occup Saf Ergon.* 2019;0(0):1–13.
18. Yang D, Chen G, Shi J, Zhu Y, Dai Z. A novel approach for hazardous area identification of toxic gas leakage accidents on offshore facilities. *Ocean Eng.* 2020;217(September 2019):107926.
19. Bjerketvedt D, Bakke JR, van Wingerden K. Gas explosion handbook. *J Hazard Mater.* 1997;52(1):1–151.
- human error probability during the hydrocarbon road tanker loading operation using a hybrid technique of fuzzy sets , Bayesian network and CREAM. *Int J Occup Saf Ergon.* 2021;0(0):1–11.
8. Khan FI, Husain T, Abbasi SA. Safety weighted hazard index (SWeHI). A new, user-friendly tool for swift yet comprehensive hazard identification and safety evaluation in chemical process industries. *Process Saf Environ Prot.* 2001;79(2):65–80.
9. Scheffler NE. Improved fire and explosion index hazard classification. *Process Saf Prog.* 1994;13(4):214–8.
10. Tyler BJ, Thomas AR, Doran P, Greig TR. Toxicity hazard index. *Inst Chem Eng Symp Ser.* 1994;(134):351–66.
11. Khan FI, Abbasi SA. Multivariate Hazard Identification and Ranking System. *Process Saf Prog.* 1998;17(3):157–70.
12. Chang JJ, Lin CC. A study of storage tank accidents. *J Loss Prev Process Ind.* 2006;19(1):51–9.
13. Roy A, Ema SS. Comprehensive Hazard Identification and Safety Evaluation for Shahjalal Fertilizer Industry Limited Comprehensive Hazard Identification and Safety Evaluation for Shahjalal Fertilizer Industry Limited. *Int Conf Mech Ind Energy Eng.* 2018;(December):0–6.





