



## Safety Assessment of Double-Walled LPG Tanks Using Fuzzy Bayesian Network And Improved Similarity Aggregation Method

**Mohamadreza habibian mohamadabadi**, HSE engineering master student, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

**Reza Saeedi**, Associate professor, Department of Health, Safety and Environment (HSE), School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran and Workplace Health Promotion Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

✉ **Reza gholamnia**, (\*Corresponding author), Associate professor, Department of Health, Safety and Environment (HSE), School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran and Workplace Health Promotion Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. [gholamnia@sbmu.ac.ir](mailto:gholamnia@sbmu.ac.ir)

### Abstract

**Background and aims:** Storage tanks play a crucial role in safety within industrial complexes. Accidents involving these tanks can lead to harm to individuals and financial losses. The development of a more precise method to identify key causes of accidents can significantly enhance prevention strategies.

**Methods:** Initially, a preliminary hazard identification was conducted on the storage tank, and a tank leakage event was selected as the top event. Subsequently, a bowtie and then a Bayesian network were constructed, and relationships between nodes were input into the software. The probabilities of nodes were estimated using expert opinions and an improved similarity aggregation method. Finally, with the top event considered as the evidence node, RoV values were computed to prioritize the most important events.

**Results:** This study identified 53 basic events. The probability of a leakage event from the LPG storage system was  $1.5E-02$ , with the most likely hazardous outcome being a pool fire. Using RoV calculation, some basic events such as inadequate connection leaks, natural disasters, and structural defects in valves and concrete walls were identified as the most critical nodes. Finally, preventive and mitigative recommendations were suggested for these events.

**Conclusion:** The Bayesian network is recognized as an effective tool for modeling cause-effect relationships. Integrating this approach with fuzzy logic and an improved similarity aggregation method can reduce uncertainty in studies. Additionally, the ability of these methods to update probabilities enables the prioritization of important events. The results of such prioritization can serve as a valuable guide for optimizing preventive maintenance activities.

**Conflicts of interest:** None

**Funding:** None

### Keywords

Bayesian network

Improved SAM

LPG

Full containment

Criticality analysis

Fuzzy logic

Received: 2023/08/16

Accepted : 2023/12/24

## INTRODUCTION

Storage tanks, as one of the most critical components in process plants, have consistently been associated with high sensitivities in safety considerations. According to various reports and studies, it has been evident that numerous incidents related to LPG storage tanks, primarily containing butane, propane, or a combination of both, have resulted in fatalities, legal issues, reputational damage, and various bankruptcies on a global scale.

Bayesian network risk modeling has become popular for its ability to reduce uncertainty, update event probabilities, and incorporate safety barriers impact. However, limitations like inadequate failure data exist. Fuzzy logic provides a solution, which researchers have welcomed in risk assessment methods like fault tree analysis. This study utilizes fuzzy logic to address these limitations effectively.

In 2021, Guo et al. introduced the Improved Similarity Aggregation Method (Improved SAM) to obtain fuzzy probabilities in Bayesian networks. This approach considers experts' relative importance and their consensus degree. They applied the method to categorize causal factors of 242 atmospheric storage tank accidents, identifying key causes such as overfilling, SOP non-compliance, static electricity, and rim seal leakage.

In 2021, Borqhei Pour et al. focused on assessing potential hazards from hydrogen gas leakage in power plant chlorination units. The study employed Bowtie analysis and Bayesian network techniques to identify causes and their relationships leading to catastrophic accident. The Bayesian network highlighted reduced ventilation flow of tank as the primary initiating event, with flash ignition and subsequent fires as the likely consequences.

In 2020, Yin and Lin evaluated the risk of a 10,000 cubic meter natural gas storage facility in western China. They used SAM and fuzzy theory to analyze a fault tree quantitatively. The main event studied was "storage facility explosion," with underlying events like external fires, lightning, electrostatic charges, and impact sparks identified as significant contributors to the main event's likelihood. The study showed that SAM remains effective even with limited expert input or divergent opinions among experts.

After reviewing various articles related to the safety assessment of LPG (liquefied petroleum gas) storage tanks, it can be observed that safety assessment studies for LPG tanks are generally related to pressurized spherical tanks and are mostly focused on consequence modeling or risk assessment using historical data. However, in the current study, due to the lack of failure data, a fuzzy logic approach has been used for quantifying the Bayesian network and determining the most significant causes of incidents

in full containment atmospheric LPG tanks, which have not been previously investigated. Additionally, in this research, the authors have applied the improved similarity aggregation method to enhance efficiency and accuracy in estimating fuzzy probabilities.

## METHODOLOGY

The first step in understanding an incident is identifying its potential hazards. This involves recognizing all possible sources of hazards, the parts that could be affected, likely events, and why they might happen. This process is crucial because those hazards not identified at this stage can't be properly studied later on. In this study, HAZID worksheets were used to find these hazards. Some of these hazards directly cause the main event (in this case, the "Loss of containment from the storage system"), while others contribute indirectly through other events. The information gathered from this hazard identification is used in later stages to create diagrams that help analyze the risks involved.

The first goal of quantitative Bowtie analysis is to calculate the likelihood of the top event and its consequences. Determining the probabilities of basic events and calculating the top event and consequences can often be challenging, requiring information about failure probabilities or the reliability of each component in the system.

After drawing the Bowtie diagram, the conversion process involves transforming basic events into parent nodes, intermediate events into intermediate nodes, and consequences into child nodes within the Bayesian network. Bayesian networks utilize Bayes' formula (Formula 1) to calculate conditional probabilities.

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

In this formula, the term  $P(A|B)$  is known as the Posterior probability, which can be calculated by knowing the prior probabilities of events A and B, as well as  $P(B|A)$ , referred to as the "new observations."

### *Determination of basic events probabilities using Improved SAM*

The initial step for estimating fuzzy probabilities does involve selecting relevant experts for consultation. The opinions of these experts, which are influenced by factors such as experience and education, can introduce uncertainties. These uncertainties are collected through questionnaires, especially when multiple experts provide differing or conflicting responses. These variations can impact the quality of the answers and the outcomes of the research. Therefore, parameters such as age, education,

professional position, and service time are considered in surveys to ensure a comprehensive evaluation. In this research, there are 4 collaborating experts.

After obtaining the experts' opinions on basic events, formulas 2 to 8 can indeed be employed to transform them into fuzzy probabilities.

$$S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |a_i - b_i| \quad (2)$$

$$WA(E_u) = \frac{\sum_{v \neq u}^N W(E_v) \cdot S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v)}{\sum_{v \neq u}^N W(E_v)} \quad (3)$$

$$RA(E_u) = \frac{WA(E_u)}{\sum_{u=1}^M WA(E_u)} \quad (4)$$

$$CC(E_u) = \beta \cdot W(E_u) + (1 - \beta) \cdot RA(E_u) \quad (5)$$

$$\tilde{R}_T = CC(E_1) \times \tilde{R}_1 + CC(E_2) \times \tilde{R}_2 + \dots + CC(E_M) \times \tilde{R}_M \quad (6)$$

$$FPS = \frac{1}{3} \frac{(r_4 - r_3)^2 - r_4 r_3 - (r_1 + r_2)^2 + r_1 r_2}{(r_4 + r_3 - r_1 - r_2)} \quad (7)$$

$$FFP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & \text{if } FPS \neq 0 \\ 0 & \text{if } FPS = 0 \end{cases}$$

$$K = \left[ \left( \frac{1 - FFP}{FFP} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (8)$$

In order to prioritize basic nodes in the Bayesian network, the top event node is established as the evidence, under the assumption of a 100% leakage probability. The posterior probabilities are determined by recursively calculating probabilities for intermediate events and, subsequently, basic events based on this assumption. The authors then compute the RoV values using formula 9, with a higher RoV indicating greater importance of the node.

$$RoV = \frac{FBNpo - FBNpr}{FBNpr} \quad (9)$$

**RESULTS**

Figure 1 depicts the Bayesian network resulting from modeling the causes of consequences arising from LPG leakage from the studied tank. This figure has been constructed based on the gate logic of the fault tree related to tank leakage and the event tree. The authors used the GeNIe software to draw this network and perform complex probability calculations after inputting the probabilities of the basic event (parent) nodes. As can be seen in Figure 1, the blue nodes represent basic events, the green nodes represent intermediate events, and the red nodes represent the corresponding consequences.

After inputting the probability values for the base nodes into the software, it becomes possible to compute the probabilities associated with the top event, intermediate events, and corresponding consequences. These values are reported in Table 1

*Criticality analysis*

Identification of the most critical root nodes contributing to the occurrence of the top event is of utmost importance. This enables decision-makers to initiate suitable measures for preventing

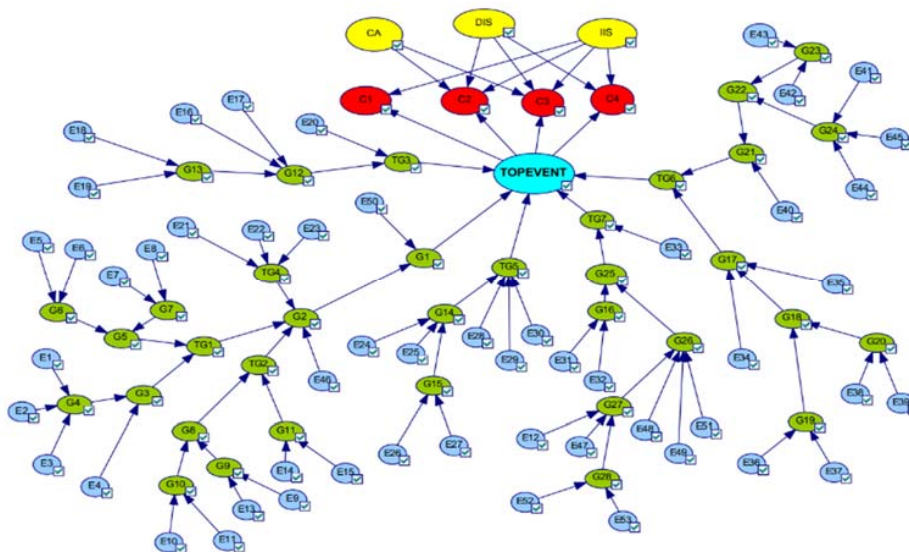
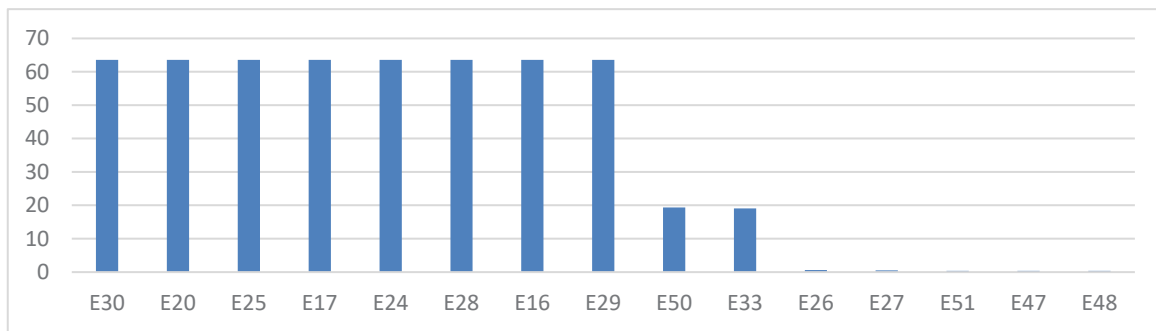


Fig. 1. Bayesian network

**Table 1.** Symbols, Descriptions, and Possibilities for important events

Event name	Tag	FBNprior
Loss of containment	TOP EVENT	1.5E-02
Pool fire	C1	7.58E-06
Explosion	C2	1.09E-06
Flash fire	C3	4.95E-06
No consequence	C4	1.5E-02
Immediate ignition source	IIS	4.9E-04
Delayed ignition source	DIS	3.9E-04
Congested area	CA	1.81E-01



**Fig. 2.** RoV for 15 top nodes

accidents and mitigating consequences. As the RoV parameter is computed individually for each node, the corresponding values for the 15 most significant nodes are depicted in Figure 2

As depicted in Figure 2, events such as inadequate pipeline and valve connection leaks (E30), sabotage (E20), natural disasters (E16 and E17), structural defects in valves (E29), fatigue of pipelines and failure of line supports (E24 and E25), and potential vehicle collisions with pipelines (E28) hold the highest significance, thus making them the most critical events. These events exert the most substantial influence on the probability of the top event occurrence. In the subsequent priorities, structural defects in the outer layer of the tank (E50) and operator error in response to pump shutdown during loading (E33) are given precedence

### CONCLUSION

In this research, the safety of double-walled LPG

tanks was assessed using Bayesian networks. The approach involved hazard identification through HAZID, followed by Bayesian network modeling using event and fault trees. Fuzzy logic and Improved SAM were subsequently utilized to estimate probabilities, and Bayesian networks were employed to prioritize critical events. Notably, events such as improper inadequate pipeline and valve connection leaks, sabotage, natural disasters, and structural defects were emphasized. This methodology provides valuable insights for the design of effective management strategies and preventive measures. Bayesian networks offer a robust framework for identifying critical causes and enhancing system reliability, guiding practical interventions to prevent incidents with confidence..

### CONFLICT OF INTEREST

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

### How to cite this article:

Mohamadreza habibian mohamadabadi, Reza Saeedi, Reza gholamnia. Safety Assessment of Double-Walled LPG Tanks Using Fuzzy Bayesian Network And Improved Similarity Aggregation Method. *Iran Occupational Health*. 2024 (01 Apr);20:40.

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



## ارزیابی ایمنی مخازن دوجداره گازمایع با استفاده از شبکه بیزین فازی و براساس روش تجمیع شباهت بهبود یافته

**محمد رضا حبیبیان محمدآبادی:** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی HSE، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهیدبهشتی تهران، ایران.  
**رضا سعیدی:** دانشیار، گروه سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهیدبهشتی تهران، ایران - مرکز تحقیقات ارتقاء سلامت محیط کار، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تهران، ایران.  
**رضا غلام نیا:** \* نویسنده مسئول) دانشیار، گروه سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهیدبهشتی تهران، ایران - مرکز تحقیقات ارتقاء سلامت محیط کار، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تهران، ایران. [gholamnia@sbmu.ac.ir](mailto:gholamnia@sbmu.ac.ir)

### چکیده

#### کلیدواژه‌ها

شبکه بیزین  
تجمیع شباهت بهبودیافته  
آنالیز بحرانیت  
گاز مایع  
منطق فازی  
مخازن دوجداره

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۳

**زمینه و هدف:** مخازن ذخیره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های مجتمع‌های فرایندی حساسیت بالایی را در بحث ایمنی دارند؛ چراکه در صورت وقوع حادثه هم باعث آسیب به پرسنل و هم ایجاد ضرر مالی می‌شوند. تعیین روشی بهینه و دارای عدم قطعیت کمتر جهت تعیین علل پراهمیت و بحرانی در وقوع حوادث می‌تواند در پیشگیری از حوادث بسیار موثر باشد.  
**روش بررسی:** در ابتدا شناسایی اولیه مخاطرات از مخزن صورت گرفت و رویداد نشت از سیستم ذخیره سازی به‌عنوان رویداد اصلی انتخاب شد. در مرحله بعد درخت‌واره پایونی و سپس شبکه بیزین ترسیم شد و روابط بین گره‌ها وارد نرم افزار گردید. احتمالات گره‌ها با استفاده از نظر کارشناسان و روش تجمیع شباهت بهبودیافته برآورد شده و در نهایت با در نظر گرفتن رویداد اصلی به‌عنوان گره شاهد، مقادیر نرخ تغییرات (ROV) جهت شناسایی پراهمیت ترین رویدادها محاسبه شد.  
**یافته‌ها:** در این تحقیق مجموعاً ۵۳ رویداد پایه ای شناسایی شد. احتمال رویداد نشت از سیستم ذخیره سازی LPG مقدار ۱/۵E-۰۲ به دست آمد و محتمل ترین پیامد خطرناک آتش استخری شناسایی شد. پس از محاسبه ی RoV، رویدادهایی مانند نشت از اتصالات نامناسب، بلایای طبیعی، نقص‌های ساختاری در ولوها و لایه ی بتنی به‌عنوان علل پراهمیت انتخاب شده و پیشنهادات اصلاحی لازم پیشنهاد گردید.

**نتیجه گیری:** شبکه بیزین یکی از ابزارهای مناسب جهت مدل سازی علت-پیامد به شمار می‌رود. ترکیب این روش با منطق فازی و تجمیع شباهت بهبودیافته می‌تواند باعث کاهش عدم قطعیت در مطالعات گردد. همچنین آن‌ها با داشتن قابلیت به روزرسانی رویدادها می‌توانند باعث اولویت بندی رویدادهای بحرانی شوند. نتایج حاصل از این اولویت بندی می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای مناسب برای بهینه سازی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نیز مورد استفاده قرار گیرد.

**تعارض منافع:** گزارش نشده است.  
**منبع حمایت کننده:** ندارد.

شیوه استناد به این مقاله:

Mohamadreza habibian mohamadabadi, Reza Saeedi, Reza gholamnia. Safety Assessment of Double-Walled LPG Tanks Using Fuzzy Bayesian Network And Improved Similarity Aggregation Method. Iran Occupational Health. 2024 (01 Apr);20:40.

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

## مقدمه

خطا تاکنون بسیار مورد استقبال محققین قرار گرفته است که در تحقیق حاضر نیز از آن استفاده شده است (۳،۴). با وجود ارتقاء سطح ایمنی مخازن اما حوادث قابل توجه مخازن ذخیره LPG در سراسر دنیا طی سال‌های متمادی منجر به مرگ و میر و جراحات و در برخی موارد موجب خرابی تأسیسات ذخیره مربوطه شده است (۱۲). در بیشتر موارد شکست لایه‌های حفاظتی باعث بروز این حوادث شده است. از آن جایی که حوادث فرایندی عموماً با فرکانس کم اما با سطح خسارت بالا رخ می‌دهد بنابراین لازم است تا وقوع آن پیش‌بینی شده و قبل از رخداد پیشگیری شود (۱۲). هدف از مطالعه حاضر ارزیابی ایمنی مخازن ذخیره LPG دوجداره (از نوع Full containment) با استفاده از شبکه بیزین فازی و همچنین اولویت بندی پراهمیت ترین علل ایجاد حوادث در این گونه مخازن است.

هرچند ایمنی مخازن ذخیره ی دوجداره ی گازهای مایع، یکپارچگی بالایی را می‌طلبد اما نمونه‌هایی از حوادث مربوط به این نوع از مخازن در طول تاریخ مشاهده می‌شود. برای نمونه می‌توان به حادثه نشت گاز مایع طبیعی از مخزن ذخیره‌ای در کلیولند اوهایو در سال ۱۹۴۴ اشاره نمود. علت وقوع این حادثه ساخت لایه داخلی با درصد نیکل ناکافی بود که در اثر تماس با ماده سرد دچار شکست شده و سیال سرد به لایه میانی نشت پیدا کرده بود. سرعت نشت و تبخیر در این حادثه آن‌چنان زیاد بود که سقف بتنی مخزن به‌طور کامل از جا کنده شده و پس از متلاشی شدن درون مخزن فروریخت که در نهایت موجب انفجار و کشته شدن ۱۲۸ نفر گردید (۱۳). در سال ۱۹۷۹ نیز در کوپوینت مریلند نشت گسترده و سپس انفجار مخزن گاز مایع طبیعی موجب مرگ و آسیب به تعدادی از پرسنل و وارد آمدن خسارتی در حدود ۳ میلیون دلار گردید (۱۳). همچنین در سال ۱۹۷۷ در UMM said قطر یک مخزن حاوی ۲۳۶۰۰۰ بشکه از LPG مایع به‌طور فجیعی تخریب گردید. در این حادثه به یک مخزن بوتان مایع که در نزدیکی آن مخزن قرار داشت و همچنین به بیشتر مناطق فرایندی اطراف آسیب جدی وارد شد. در این حادثه شش نفر کشته شدند و نزدیک به ۱۷۹ میلیون دلار خسارت وارد گردید. این در حالی بود که یک سال قبل‌تر اتصالات جوشی مربوط به مخزن دچار مشکل شده بود و ۱۴۰۰۰ بشکه پروپان در محیط آزاد شده بود و ابر بخار تشکیل شده حدود ۵۰۰ متر بدون آنکه دچار حریق شود در محیط پخش شده بود (۱۴).

در خصوص ارزیابی ایمنی سیستم‌ها با استفاده از شبکه‌های بیزین نیز تاکنون مطالعات گوناگونی صورت

مخازن ذخیره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های مجتمع‌های فرایندی همواره حساسیت‌های بالایی را در بحث ایمنی داشته‌اند (۱) و از این نظر که مواد مورد استفاده در فرآیندها و یا خروجی‌های با ارزش فرآیند جهت صادرات یا فروش در آن‌ها ذخیره می‌شود، وقوع حادثه هم از جنبه‌ی آسیب‌رسانی به پرسنل و هم از دست رفتن محصول با ارزش و ایجاد ضرر مالی مشکل ساز خواهد بود (۵). حوادث محتمل مربوط به مخازن مجتمع‌های فرایندی یا به دلیل وقوع نقص در تجهیزات و مواد (همانند نقص ساختاری در بدنه مخزن) و یا اشتباهات عملیاتی (مانند افزایش بیش از حد فشار) و یا تهدیدات خارجی (مانند برخورد وسیله نقلیه یا برخورد پرتابه به مخزن) اتفاق می‌افتند. هرچند که واحدهای فرایندی برای کنترل کردن عملیات و پیشگیری از حوادث عموماً به سیستم‌های جامع کنترل و پایش فرایند مجهز می‌شوند اما با وجود تمامی این اقدامات باز هم حادثه رخ می‌دهد (۸). بنابر گزارشات و بررسی‌های گوناگون، مشخص شده است که حوادث متعددی تاکنون در ارتباط با مخازن ذخیره‌ی LPG<sup>۱</sup> - که عمدتاً از بوتان، پروپان یا ترکیبی از این دو تشکیل شده است (۲) - رخ داده که باعث مرگ افراد، ایجاد مشکلات حقوقی، از دست رفتن اعتبار و ورشکستگی‌های مختلف در سطح دنیا شده است (۱).

تا به امروز روش‌های گوناگونی به‌منظور ارزیابی، تحلیل و مدل‌سازی ریسک سیستم‌ها در سراسر جهان ارائه شده است که هرکدام دامنه کاربرد و نقاط ضعف و قدرت خود را دارند. ضعفی که عموم این روش‌ها دارند را می‌توان پویا نبودن ساختار و وجود عدم قطعیت در نتایج آن‌ها دانست که این موارد می‌توانند باعث کاهش کارآمدی استراتژی‌های کنترل ریسک گردند (۹). در سال‌های اخیر جهت رفع این مشکلات روش‌های گوناگونی اعم از روش‌های کیفی و کمی ارائه شده است. کاهش عدم قطعیت و قابلیت به‌روزرسانی احتمال وقوع رویدادهای ریشه‌ای و پیامدهای نهایی و همچنین دارا بودن قابلیت اعمال تاثیر حفاظ‌های ایمنی روی یکدیگر از برتری‌های شبکه‌های بیزین به شمار می‌رود (۱۰). از محدودیت‌هایی که برای کمی‌سازی شبکه‌های بیزی می‌توان متصور شد کمبود داده‌های خرابی و یا به‌طور کلی عدم دسترسی به این داده‌ها است (۱۱). برای رفع این مشکل می‌توان از منطق فازی استفاده نمود. کاربرد منطق فازی در روش‌های شناسایی و آنالیز ریسک مانند درخت

1 Liquefied petroleum gas

اصلی در این آنالیز، «انفجار مخزن» در نظر گرفته شد و آنالیز اهمیت رویدادهای پایه ای که منجر به انفجار مخزن می شدند نیز با استفاده از شاخص‌های ارزش کاهش ریسک<sup>۴</sup>، ارزش حصول ریسک<sup>۵</sup> و اهمیت بحرانیت<sup>۶</sup> صورت گرفت. نتایج نشان داد که حریق خارجی (مانند شعله باز)، صاعقه، بارهای الکترواستاتیکی و جرقه‌ی حاصل از ضربه به‌عنوان مهم‌ترین رویدادهای پایه تلقی می شوند چراکه این عوامل بیشترین تأثیر را روی احتمال وقوع رویداد اصلی داشتند. همچنین محققین در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که در حالتی که برای نظرسنجی، تعداد کارشناسان اندکی در دسترس باشد یا نظرات کارشناسان با یکدیگر تفاوت زیادی داشته باشد، استفاده از روش SAM می تواند همچنان نتایج مناسبی را به همراه داشته باشد.

پس از بررسی مقالات مختلف در رابطه با ارزیابی ایمنی مخازن LPG می توان مشاهده کرد که مطالعات ارزیابی ایمنی مخازن LPG عموماً مربوط به مخازن کروی تحت فشار و بیشتر در حوزه مدل سازی پیامدهای حوادث و یا ارزیابی ریسک با استفاده از داده‌های تاریخی بوده است. در حالی که در مطالعه حاضر به دلیل نبود داده‌های خرابی منسجم از منطق فازی برای کمی سازی شبکه بیزین و تعیین مهم ترین علل وقوع حوادث در مخزن اتمسفری حاوی LPG (مخزن Full containment) استفاده شده است که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین در تحقیق حاضر از روش تجمیع شباهت بهبودیافته که توسط گو و همکاران در سال ۲۰۲۱ برای افزایش کارآمدی و دقت در برآورد احتمالات فازی معرفی شد؛ برای مخازن LPG اتمسفری استفاده شده است.

### روش بررسی

#### مطالعه سیستم و شناسایی خطرات

مخازن سرد دوجداره غالباً به شکل استوانه‌ای با کف صاف بوده که به دو صورت روزمینی و زیرزمینی موجود هستند. مخزن مورد مطالعه حاضر از نوع روزمینی و Full containment است. لایه داخلی مخزن به شکل یک استوانه‌ی عمودی فلزی با آلیاژی خاص (۹٪ نیکل) با سقف روباز بوده که توسط یک لایه بیرونی از جنس بتن محافظت می شود (۱۶). فضای بین دیواره‌ها به طور کامل به وسیله‌ی پرلیت ایزوله می‌گردد تا نرخ تبخیر LPG به حداقل برسد. همچنین سقفی عایق (معمولاً عایق شده با

گرفته است که برخی از آنها برای برآورد احتمالات رویدادهای پایه از پایگاه‌های داده و برخی دیگر از منطق فازی استفاده کرده اند.

در سال ۲۰۲۱ گو و همکاران (۵) روش تجمیع شباهت آراء بهبودیافته (Improved SAM)<sup>۱</sup> را به‌منظور به دست آوردن احتمالات فازی در شبکه‌های بیزین برای اولین بار ارائه کردند. این روش نه تنها اهمیت نسبی کارشناسان را در نظر می‌گیرد بلکه میزان توافق نسبی آراء آنها را نیز در محاسبات دخیل می‌کند. در این تحقیق علل رویداد حوادث برای ۲۴۲ حادثه مخزن ذخیره اتمسفریک دسته‌بندی شد و با روش ارائه‌شده مدل سازی گردید و در نهایت عللی مانند پرشدگی بیش از حد، پیروی نکردن از SOP<sup>۲</sup> ها، الکتریسیته ساکن و نشت از Rim seal مخازن به‌عنوان مهم‌ترین علل حوادث مخازن اتمسفریک شناسایی شد.

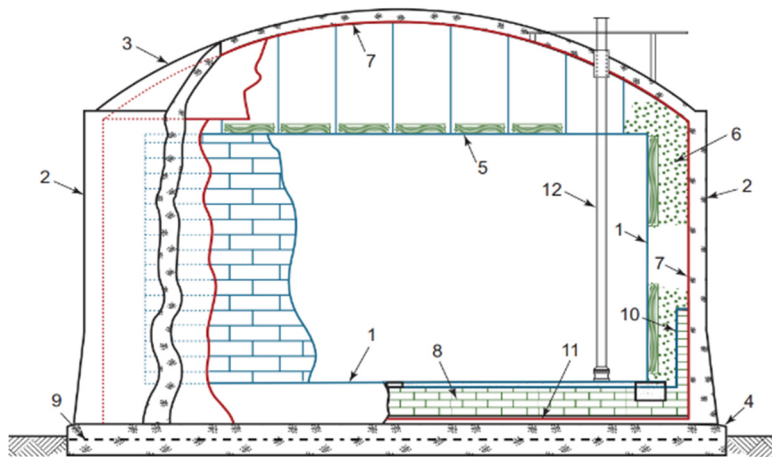
در تحقیقی توسط برقعی پور و همکاران (۶) در سال ۲۰۲۱ بر نشت گاز هیدروژن از واحد کلرژنی در نیروگاه‌ها به‌عنوان سناریوی مطالعه برای ارزیابی خطر احتمالی حوادث تمرکز شده است. در این مطالعه از تکنیک پاپیونی و آنالیز شبکه بیزی برای تعیین نوع و رابطه بین علل دخیل در حوادث فاجعه‌بار استفاده شده است. بر اساس شبکه بیزی، کاهش دبی در سیستم تهویه مخزن ذخیره به‌عنوان محتمل‌ترین رویداد پایه و آتش فورانی و همچنین حریق ناگهانی به‌عنوان محتمل‌ترین پیامدهای وقوع رویداد اصلی شناسایی شدند.

در سال ۲۰۲۱ جیانگسینگ و همکاران (۱۵) ارزیابی ریسک مخزن ذخیره نفت خام را با استفاده از شبکه بیزین انجام دادند. در این مقاله محققین از رویکرد NoisyOr شبکه بیزی استفاده نمودند و به دلیل نبود داده‌های کافی و مورد اعتماد تاریخی در مورد وقوع رویدادهای پایه‌ای از منطق فازی برای به دست آوردن آنها استفاده نمودند. محققین پس از مدل سازی ریسک‌ها به‌وسیله شبکه بیزی مهم‌ترین علل حوادث مخزن نفت خام را خرابی Breathing valve، آسیب دیدگی بدنه مخزن و آب بندی نامناسب اطراف دریچه آدم‌رو<sup>۳</sup> مخزن شناسایی شد.

در سال ۲۰۲۰ ین و لین (۷) در تحقیقی به ارزیابی ریسک یک مورد مخزن ذخیره سازی گاز طبیعی با ظرفیت ۱۰۰۰۰ مترمکعب پرداختند. آنها در این تحقیق با استفاده از روش تجمیع شباهت (SAM) و تئوری فازی، درخت خطای ترسیم شده را کمی سازی کردند. رویداد

4 Risk reduction worth (RRW)  
5 Risk achievement worth (RAW)  
6 Criticality importance

1 Similarity Aggregation method  
2 Standard operating procedure  
3 Manhole



- |                                |                                     |                                  |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| ۱- دیواره‌ی داخلی مخزن (فلزی)  | ۵- سقف عایق آویزان (روی لایه داخلی) | ۹- سیستم حرارتی فونداسیون مخزن   |
| ۲- دیواره‌ی بیرونی مخزن (بتنی) | ۶- لایه‌ی عایق مخزن                 | ۱۰- حفاظ حرارتی مخزن             |
| ۳- سقف مخزن (بتنی)             | ۷- لایه‌ی محافظ نشت بخارات          | ۱۱- لایه‌ی حفاظت از رطوبت        |
| ۴- فونداسیون مخزن              | ۸- عایق کف مخزن                     | ۱۲- پمپ مخزن و اجزای مربوط به آن |

شکل ۱. اجزای مخزن Full containment (دیواره اولیه فلزی، ثانویه بتنی با سقف بتنی) (۱۶)

بارگیری<sup>۴</sup> (به کشتی‌ها) که به‌منظور کاهش نرخ تبخیر هنگام عبور سیال سرد از این خطوط صورت می‌گیرد  
 ۲. سرد نگه‌داشتن سیال ذخیره‌شده درون مخزن بخشی از جریان گردش‌ی که برای سرد نگه‌داشتن خطوط لوله بارگیری استفاده می‌شود، با هدایت به سیستم تبرید (Subcooler) مجدداً سرد شده و به مخزن برگردانده می‌شود.

پس از شناخت اجزای مختلف سیستم و شرایط گوناگون فرایندی آن، بایستی شناسایی خطرات انجام شود. شناسایی خطرات اولین قدم در تعیین عناصر دخیل در یک حادثه است. در این مرحله بایستی تمامی منابع خطر، قسمت‌های تحت‌تأثیر، رویدادهای محتمل و علل آن‌ها شناسایی شوند. شناسایی خطرات از آنجایی بااهمیت است که آن خطراتی که در این مرحله شناسایی نشوند، در مراحل بعد نمی‌توانند آنالیز شده و در مدل تجزیه‌وتحلیل مخاطرات آورده نمی‌شوند (۱۸). در تحقیق حاضر از کاربرگ‌های HAZID<sup>۵</sup> برای شناسایی مخاطرات استفاده شده است. این مخاطرات یا مستقیماً باعث وقوع رویداد اصلی (که همان «رها شدن ماده خطرناک از سیستم ذخیره» است) می‌شوند و یا اینکه به‌طور غیرمستقیم و

پشم‌شیشه) که به لایه بیرونی متصل شده به‌صورت آویزان روی لایه درونی قرار می‌گیرد تا میزان تبخیر را کاهش دهد (۱۷).

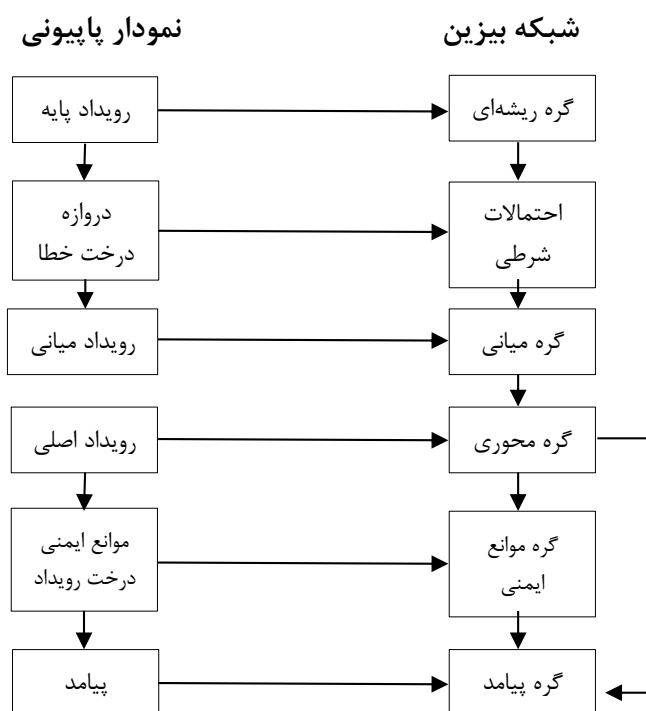
بوتان مایع درون مخزن در دمای ۶- درجه سانتیگراد نگهداری می‌شود و فشار کاری مخزن ۰٫۰۱ barg است. فشار تنظیم شده برای عملکرد شیرهای ایمنی ۱۳۰ mbarg و فشار عملکرد شیرهای خلاء شکن<sup>۱</sup> نیز ۲ mbarg است.

شکل ۱ ساختار کلی مخازن Full containment روزمینی و اجزای آن را نشان می‌دهد.

از آنجایی که نشت حرارتی درون سیستم می‌تواند باعث تبخیر LPG شود می‌توان آن را در قالب بخارات تولید شده<sup>۲</sup> مشاهده نمود. این مخازن باید به‌طور مداوم در دمای سرد قرار بگیرند چراکه مقادیر کمی از نشت حرارتی به مخزن همیشه وجود دارد برای همین درون مخزن ذخیره، پمپی برای تأمین جریان گردش مایع<sup>۳</sup> تعبیه شده است. این جریان عموماً دو وظیفه را بر عهده دارد:  
 ۱. سرد نگه‌داشتن خطوط لوله‌ی انتقال LPG برای

1 Vacuum breaker  
 2 Boil-Off gas (BOG)  
 3 Circulation

4 Jetty  
 5 Hazard identification



شکل ۲. تبدیل نمودار پایبونی به شبکه بیزین

و تجزیه و تحلیل این داده‌ها است (۲۲). در صورتی که داده‌های خرابی برای تجهیزات مورد مطالعه به هر دلیل موجود نباشد و یا دارای عدم قطعیت بالایی باشد، استفاده از منطق فازی برای تخمین احتمالات وقوع رویدادها پیشنهاد می‌شود (۱۱).

پس از ترسیم نمودار پایبونی، برای تبدیل آن به شبکه بیزین رویدادهای پایه‌ای به گره‌های والد، رویدادهای میانی تبدیل به گره‌های میانی و پیامدها به عنوان گره‌های فرزند در شبکه بیزین وارد می‌شوند. روش تبدیل نمودار پایبونی به اجزای متناظر آن در شبکه بیزین در شکل ۲ آورده شده است.

شبکه بیزین از فرمول بیز (فرمول ۱) برای محاسبه احتمالات شرطی استفاده می‌کند.

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

در این فرمول عبارت  $P(A|B)$  به عنوان احتمال پسین<sup>۲</sup> شناخته می‌شود که با دانستن احتمالات پیشین رویدادهای A و B و همچنین  $P(B|A)$  که به عنوان مشاهدات جدید<sup>۳</sup> شناخته می‌شود، قابل محاسبه است. در تحقیق حاضر که به عنوان مطالعات ایمنی شناخته

به واسطه‌ی رویدادهای میانی موجب این امر می‌شوند. اطلاعات به دست آمده از شناسایی مخاطرات، ورودی مراحل بعدی جهت تشکیل درخت خطا، درخت رویداد و نمودار پایبونی است.

#### نمودار پایبونی و شبکه بیزین

نمودار پایبونی<sup>۱</sup> رامی توان ترکیبی از نمودار درخت خطا و درخت رویداد دانست. بدین صورت که با چرخش درخت خطا به صورت ساعت گرد و اتصال رویداد اصلی آن به درخت رویداد، نمودار پایبونی شکل می‌گیرد. آنالیز پایبونی هم در صنایع فرایندی و هم غیر فرایندی قابلیت استفاده دارد و توسعه و استفاده‌ی صحیح از آن مخصوصاً در صنایع فرایندی می‌تواند تا حدود زیادی ایمنی فرایند را بهبود ببخشد (۱۹-۲۱).

هدف اصلی از آنالیز کمی Bowtie محاسبه‌ی احتمال رویداد اصلی و پیامدهای حاصله است. به دست آوردن احتمال رویدادهای پایه و محاسبه‌ی رویداد اصلی و پیامدها معمولاً چالش برانگیز بوده و برای برآورد آنها نیاز است تا احتمال خرابی و یا میزان قابلیت اطمینان هر کدام از اجزای سیستم موجود باشد. به‌طور کلی برای به دست آوردن داده‌های مربوط به احتمال خرابی نیاز به جمع‌آوری داده‌های خرابی از تجهیزات به مدت طولانی

2 Posterior

3 New evidence

1 Bowtie

می شود فرمول بیز را می توان به صورت نشان داده شده در فرمول ۲ بازنویسی نمود (۱۰).

$$P(\text{Effect}|\text{Cause}) = \frac{P(\text{Cause}|\text{Effect})P(\text{Effect})}{P(\text{Cause})} \quad (2)$$

این فرمول بیان می دارد که احتمال وقوع یک پیامد در صورت وقوع علت آن، می تواند از ضرب احتمال وقوع علت در صورت رخداد پیامد (که این عبارت همان مشاهدات ما هستند. این مشاهدات می توانند همان شبه حوادث رخ داده در سازمان و یا مشاهدات حاصل از پیامدهای یک حادثه باشند که در طول چرخه عمر یک فرایند کسب می شوند) در احتمال غیرشرطی پیامد تقسیم بر احتمال غیرشرطی علت به دست آید (۱۰).

### تعیین احتمال وقوع رویدادها با روش تجمیع شباهت بهبود یافته (Improved SAM)

در تحقیق حاضر برای تعیین احتمال وقوع رویدادهای پایه ای از منطق فازی و روش تجمیع شباهت بهبود یافته که در سال ۲۰۲۱ توسط گو و همکارانش (۵) معرفی گردید، استفاده می شود. این روش یکی از جدیدترین روش های تعیین احتمالات به وسیله منطق فازی است که می تواند با ترکیب اهمیت نسبی خبرگان و میزان توافق نسبی آراء، قضاوت کارشناسان را بهتر انعکاس دهد (۵). متداول ترین نوع مورد استفاده از اعداد فازی در مقالات گوناگون اعداد فازی مثلثی و دوزنقه ای هستند. در تحقیق حاضر از اعداد فازی دوزنقه ای استفاده شده است. علت این انتخاب از این جهت بوده که هنگام ترکیب اطلاعات از چندین متخصص، اعداد فازی دوزنقه ای این امکان را می دهند که بازه ی وسیع تری از نظرات در مطالعه دخیل شده و عدم قطعیت ها بهتر بیان شوند. این ویژگی باعث می شود تا اعداد دوزنقه ای برای تجمیع نظرات کارشناسان مناسب تر باشند (۲۳). البته فرم توابع عضویت (مثلثی، دوزنقه ای، گاوسی و غیره) تنها فاکتور تاثیرگذار در نتایج نهایی نیست بلکه روش مورد استفاده برای تجمیع نظرات هم نقش مهمی را ایفا می کند. نمونه آن را می توان در مطالعه یزدی و زارعی (۲۴) دریافت که با در نظر گرفتن یک تابع عضویت و استفاده از دو روش مختلف تجمیع، نتایج مختلفی را بدست آوردند (۲۵).

اولین مرحله جهت برآورد احتمالات رویدادهای پایه ای، انتخاب کارشناسان مربوطه جهت نظرخواهی است. در انتخاب کارشناسان سعی بر آن بوده تا کارشناسان مسلط بر فرایند و آشنا با خطرات مربوط به آن (که سابقه

شرکت در جلسات مختلف ارزیابی ریسک نیز داشته اند) حضور داشته باشند. در این مطالعه از ۴ کارشناس با تخصص و سوابق گوناگون نظرخواهی شده است. انتخاب کارشناسان با تخصص های گوناگون از این جهت دارای برتری است که با وجود تخصص های گوناگون، طیف گسترده تری از نظرات در مطالعه دخیل می شود (۲۵).

نظرخواهی از کارشناسان می تواند دارای عدم قطعیت هایی باشد که این امر معمولاً بسته به عوامل مختلفی مثل تجربه و تحصیلات است. این عدم قطعیت ها را می توان در پرسشنامه های جمع آوری شده از آنها دریافت؛ خصوصاً زمانی که دو یا چند خبره در مورد یک سال جواب های مختلف و یا بعضاً متناقض دارند (۵). طبیعی است که تفاوت در این پارامترها ممکن است باعث تفاوت در کیفیت پاسخ های ارائه داده شده و در آخر منجر به تغییر در نتایج تحقیق شود به همین جهت پارامترهای مذکور را در نظرسنجی در نظر می گیرند. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است به هر کدام از زیرمجموعه های این پارامترها، عددی اطلاق می شود تا با توجه به امتیازی که هر متخصص از هر بخش از طبقه بندی دریافت می کند امتیاز کل هر متخصص محاسبه شود.

پس از آنکه امتیاز مربوط به همه متخصصان مشخص شد با استفاده از فرمول ۳ فاکتور وزنی هر متخصص به دست می آید. فاکتور وزنی هر متخصص، روی اهمیت نظرات اعلام شده توسط ایشان در پرسشنامه تأثیر داده می شود (۵).

$$(3) \quad \text{وزن محاسبه شده متخصص مورد نظر} = \frac{\text{فاکتور وزنی متخصص مورد نظر}}{\text{مجموع وزن محاسبه شده تمامی متخصصان}}$$

اصطلاحات زبانی نقش مهمی را در بررسی وقایع پیچیده یا مبهم (که نتوان با عبارات کمی متعارف توصیف کرد) ایفا می کنند. از جمله مقادیر اصطلاحات زبانی می توان به «خیلی کم- کم- متوسط- زیاد- خیلی زیاد» اشاره نمود. با توجه به ظرفیت حافظه انسان، تعداد اصطلاحات زبانی بهتر است  $2 \pm 7$  مورد باشد این بدان معناست که تعداد مناسب عبارات زبانی مورد نیاز برای یک انسان برای قضاوت مناسب بین ۵ تا ۹ است (۲۵، ۵). کومار و همکاران (۲۶) پس از بررسی منابع و مطالعات گوناگون، بهترین طیف برای ارزیابی ریسک را دسته بندی ۷ تایی دانستند (و از آن برای ارزیابی ریسک جایگاه سوخت LPG استفاده کردند). علاوه بر آن مقیاس ۷ گانه زبانی قادر است تا مرز کاملاً مشخصی برای توصیف احتمالات و همچنین بیان تفاوت های

جدول ۱. معیارهای وزن دهی کارشناسان (۵)

معیار	دسته بندی	امتیاز
عنوان شغلی	رئیس شیفت	۱۰
	مسئول شیفت	۸
	مهندس (ایمنی، فرایند، بهره برداری، بازرسی فنی)	۶
	تکنسین	۴
	اپراتور	۲
سابقه شغلی	۳۰ سال و بالاتر	۱۰
	بین ۲۰ تا ۲۹ سال	۸
	بین ۱۰ تا ۱۹ سال	۶
	بین ۶ تا ۹ سال	۴
سطح تحصیلات	دکتر (PhD)	۱۰
	کارشناسی ارشد	۸
	کارشناسی	۶
	دیپلم	۴
	زیر دیپلم	۲
سن	۵۰ سال و بالاتر	۸
	بین ۴۰ تا ۴۹ سال	۶
	بین ۳۰ تا ۳۹ سال	۴
	کمتر از ۳۰ سال	۲

که در آن  $S(\bar{R}_u, \bar{R}_v)$  در بازه ی بین ۰ و ۱ است و هرچقدر این مقدار عدد بالاتری را به خود اختصاص دهد یعنی نظر دو کارشناس به یکدیگر شباهت بیشتری داشته اند.

#### محاسبه ی درجه ی توافق وزنی و نسبی

در این مرحله محاسبه درجه توافق وزنی (مطلق) توافق کارشناسان (WA) از طریق فرمول ۵ صورت می گیرد.

$$WA(E_u) = \frac{\sum_{v=1}^N W(E_v) \cdot S(\bar{R}_u, \bar{R}_v)}{\sum_{v \neq u}^N W(E_v)} \quad (5)$$

که در این فرمول  $W(E_v)$  وزن کارشناس  $v$  و  $W(E_u)$  وزن کارشناس  $u$  است. در واقع این فرمول هسته ی اصلی روش تجمیع شباهت بهبود یافته است. همان گونه که پیش تر بیان شد دخیل کردن WA در محاسبات تجمیع آراء نتایج را منطقی تر و قابل اعتمادتر می کند. پس از محاسبه توافق وزنی، برای هر متخصص در هر گزاره ی مورد پرسش پارامتر توافق نسبی ( $RA^1$ ) محاسبه خواهد شد که رابطه آن به شکل فرمول ۶ است.

موجود به طور مناسب ارائه نماید (۵). به همین جهت در تحقیق حاضر نیز از طیف ۷ تایی برای بیان عبارات کلامی استفاده شده است. جدول ۲ عبارات کلامی مورد استفاده و همچنین اعداد فازی متناظر هر کدام را نشان می دهد.

#### محاسبه درجه تشابه نظرات کارشناسان

بیشتر روش های مطرح شده به منظور اتفاق نظرات خبرگان تنها از وزن اختصاص یافته به خبرگان استفاده می کند. روش تجمیع شباهت بهبود یافته، یک روش هدفمند و قدرتمند بوده که نه تنها اهمیت نسبی خبرگان را در نظر می گیرد بلکه میزان توافق نسبی آراء آنها را نیز در محاسبات دخیل می کند (۵).

در اولین مرحله از متدولوژی تجمیع شباهت بهبود یافته، درجه ی توافق یا درجه تشابه بین نظرات کارشناسان محاسبه می شود برای محاسبه این مقدار باید نظرات کارشناسان دوبه دو با یکدیگر مقایسه شوند. اگر نظر کارشناس  $u$  به صورت  $\bar{R}_u = (a_1, a_2, a_3, a_4)$  و نظر کارشناس  $v$  به صورت  $\bar{R}_v = (b_1, b_2, b_3, b_4)$  نشان داده شود آنگاه درجه ی توافق بین نظرات این دو کارشناس به صورت آورده شده در فرمول ۴ تعریف می شود.

$$S(\bar{R}_u, \bar{R}_v) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 |a_i - b_i| \quad (4)$$

1 Relative agreement degree

جدول ۲. عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر (۵)

واژه مربوطه	عدد فازی
خیلی کم (VL)	(۰/۰ و ۰/۱ و ۰/۲)
کم (L)	(۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ و ۰/۴)
نسبتاً کم (ML)	(۰/۲ و ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۵)
متوسط (M)	(۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۵ و ۰/۶)
نسبتاً زیاد (MH)	(۰/۴ و ۰/۵ و ۰/۶ و ۰/۷ و ۰/۸)
زیاد (H)	(۰/۵ و ۰/۶ و ۰/۷ و ۰/۸ و ۰/۹)
خیلی زیاد (VH)	(۰/۶ و ۰/۷ و ۰/۸ و ۰/۹ و ۱/۱)

در واقع فرایند تولید نتایج کمی از منطق فازی را فازی زدایی می نامند (۲۸). تاکنون روش های مختلفی مانند مرکز سطح (CoA<sup>3</sup>) (۲۹)، روش چن و هوانگ (۳۰) و ارزش گذاری وزنی آلفا (۳۱) جهت فازی زدایی پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر از روش مرکز سطح برای دیفازی کردن استفاده شده است. استفاده از روش مرکز سطح دارای دو مزیت است اول آنکه سرعت و بازدهی محاسباتی این تکنیک بسیار مناسب است. به علاوه یکی از جنبه های مهم فازی زدایی پیوسته بودن خروجی آن است و روش مرکز سطح نیز پیوسته است چرا که با ایجاد تغییرات کوچک در ورودی، تغییرات ناگهانی یا پرش<sup>۴</sup> در خروجی آن مشاهده نمی شود (۱۱).

اگر عدد فازی دوزنقه ای به شکل  $\tilde{R}=(r_1, r_2, r_3, r_4)$  نشان داده شود آنگاه تابع عضویت آن به فرم معادله ۹ خواهد بود (۵).

$$\mu_{-R}(x) = \begin{cases} 0 & x < r_1 \\ \frac{x-r_1}{r_2-r_1} & r_1 \leq x < r_2 \\ 1 & r_2 \leq x < r_3 \\ \frac{r_4-x}{r_4-r_3} & r_3 \leq x < r_4 \\ 0 & x \geq r_4 \end{cases} \quad (9)$$

به منظور غیر فازی سازی عدد فازی از فرمول ۱۰ می توان استفاده نمود (۵، ۲۸).

$$FPS = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \frac{x-r_1}{r_2-r_1} x dx + \int_{r_2}^{r_3} x dx + \int_{r_3}^{r_4} \frac{r_4-x}{r_4-r_3} x dx}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{x-r_1}{r_2-r_1} dx + \int_{r_2}^{r_3} dx + \int_{r_3}^{r_4} \frac{r_4-x}{r_4-r_3} dx} \quad (10)$$

$$\frac{1}{3} \frac{(r_4-r_3)^2 - r_4 r_3 - (r_1+r_2)^2 + r_1 r_2}{(r_4+r_3-r_1-r_2)}$$

$$RA(E_u) = \frac{WA(E_u)}{\sum_{u=1}^M WA(E_u)} \quad (6)$$

محاسبه ی ضریب توافق عمومی

محاسبه ضریب توافق عمومی (CC<sup>1</sup>) که برای هر متخصص  $E_u (u=1,2,\dots,M)$  به صورت آورده شده در فرمول ۷ صورت می گیرد.

$$CC(E_u) = \beta \cdot W(E_u) + (1-\beta) \cdot RA(E_u) \quad (7)$$

در این فرمول  $\beta$  فاکتور حساسیت بوده و مقدار آن  $0 \leq \beta \leq 1$  است. بر اساس مطالعات چن و همکاران (۲۷) مقدار  $\beta$  یک فاکتور مهم برای برقراری تعادل میان  $RA(E_u)$  و درجه اهمیت وزن هر متخصص  $W(E_u)$  است. تعیین مقدار  $\beta$  با صلاح دید کسی که مطالعه را انجام داده تعیین می شود. با توجه به مقاله ی گو و همکاران که مقدار  $\beta$  را برابر با ۰/۵ در نظر گرفته اند بنابراین در مقاله حاضر نیز همین مقدار در نظر گرفته می شود. مقدار ۰/۵ توازن مناسبی بین  $RA(E_u)$  و  $W(E_u)$  برقرار می کند.

در این مرحله عدد فازی کلی (برای هر رویداد پایه ای) حاصل از تجمیع آراء کارشناسان به وسیله ی فرمول ۸ به دست می آید

$$\tilde{R}_T = CC(E_1) \times \tilde{R}_1 + CC(E_2) \times \tilde{R}_2 + \dots + CC(E_M) \times \tilde{R}_M \quad (8)$$

برگرداندن از حالت فازی به مقادیر احتمالاتی

در این مرحله  $\tilde{R}_T$  های به دست آمده از مرحله قبل که معادل نظر جمیع کارشناسان است و هنوز به صورت یک عدد فازی است، فازی زدایی (دیفازی<sup>۲</sup>) می شود.

3 Center of area

4 Jump

1 Consensus coefficient

2 Defuzzification

در حالی است که رویداد مذکور یکی از متداول ترین رویدادهای اصلی در حوادث فرایندی و مطالعات مربوطه نیز به شمار می رود (۳۲).

در این مرحله پس از تشکیل تیم شناسایی خطرات متشکل از کارشناسان با تخصص‌های مختلف، ۴ دسته از مخاطرات تهدید کننده ی مخزن ذخیره و لوله های متصل به آن شامل:

- مخاطرات فرایندی (مانند تغییرات ناخواسته فشار، تغییرات ناخواسته سطح مایع و برخی پدیده های عملیاتی مانند Rollover)

- مخاطرات طبیعی<sup>۶</sup> و عوامل آسیب رسان خارجی (مانند بلایای طبیعی، اقدامات خرابکارانه، برخورد وسیله نقلیه به لوله)

- مخاطرات ساختاری (مانند نقص ساختاری لوله‌ها، نشت از اتصالات، عیوب جوشکاری، خستگی و شوک حرارتی)

- مخاطرات فعالیت‌های بازرسی و نگهداری و تعمیرات (مانند نقص در سیستم حفاظت کاتدی، بازدارنده ها و نقص در بازرسی های دوره ای یا تست‌های غیرمخرب)

به همراه حفاظ های ایمنی (مانند سیستم های کنترل پایه<sup>۷</sup>، شیرهای ایمنی و دخالت اپراتور) شناسایی شد. در مرحله بعد روابط علت و معلولی بین عوامل شناسایی شده توسط درخت خطا مدل می‌گردد. در صورتی که حفاظ برای یک علت وجود داشته باشد، خطر و رویداد «نقص در عملکرد حفاظ» توسط دروازه‌ی AND به یکدیگر متصل می‌شوند و در صورتی که حفاظ موجود نباشد خودِ خطر مستقیماً به‌عنوان رویداد پایه‌ای ذکر می‌شود.

### درخت خطای مخزن

در این بخش درخت‌های خطای مربوط به رویداد نشت از مخزن ذخیره و خطوط لوله ی مربوط به آن به تفصیل آورده شده اند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود «نشت LPG از سیستم ذخیره‌سازی» به عنوان رویداد اصلی در این مطالعه انتخاب گردیده و گروه‌های مختلف از رویدادهای میانی به صورت دروازه ی انتقال متصل به آن مشخص شده است. با توجه به این نمودار، علل مربوط به نشت از لایه داخلی به همراه رویداد پایه ی نقص در ساختار لایه خارجی آورده شده است. تعیین این ساختار از این جهت بوده که وظیفه‌ی ساختار لایه خارجی جلوگیری از گسترش نشت به محیط (در صورت نشت از لایه داخلی) است بنابراین مواد نشت یافته از لایه

مرحله دوم غیر فازی سازی شامل تبدیل عدد امکان فازی (FPS) به احتمال شکست فازی<sup>۱</sup> (FFP) است. رابطه تبدیل FPS به FFP در فرمول ۱۱ آمده است (۵،۲۸). این مرحله آخرین بخش محاسبات مربوط به قبل از ورود داده‌ها به شبکه بیزین در نرم‌افزار Genie 3.0 است. در واقع همین مقادیر مربوط به احتمال شکست هر رویداد پایه درون گره‌های والد<sup>۲</sup> در شبکه بیزین می‌شود و در نهایت نرم‌افزار محاسبات مربوطه را انجام می‌دهد.

$$K = \left[ \left( \frac{1 - FPS}{FPS} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (11)$$

$$FFP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & \text{if } FPS \neq 0 \\ 0 & \text{if } FPS = 0 \end{cases}$$

### شناسایی رویدادهای پراهمیت

به منظور شناسایی پراهمیت ترین گره های شبکه ی بیزین، گره رویداد اصلی به‌عنوان گره شاهد<sup>۳</sup> در نظر گرفته شده است در نتیجه نرم‌افزار، احتمال رخداد نشت از سیستم ذخیره سازی را ۱۰۰ درصد در نظر می‌گیرد و سپس با توجه به این فرض، به‌صورت بازگشتی احتمالات مربوط به رویدادهای میانی و در نهایت احتمالات مربوط به رویدادهای پایه را محاسبه می‌کند که این مقدار در واقع همان احتمال پسین برای رویدادهای پایه ی موردنظر است. پس از محاسبه ی احتمال پسین برای هر گره پایه، مقدار RoV با توجه به فرمول ۱۲ قابل محاسبه خواهد بود (۵). که در آن FBNpo احتمال پسین و FBNpr احتمال پیشین هر گره است. مقدار بالاتر RoV نشانگر اهمیت بالاتر گره خواهد بود.

$$RoV = \frac{FBNpo - FBNpr}{FBNpr} \quad (12)$$

### یافته ها

#### شناسایی مخاطرات

در اولین مرحله از فرایند ارزیابی ایمنی مخزن ابتدا به شناسایی علل احتمالی مربوط به رویداد اصلی پرداخته شد. رویداد اصلی بنابر پیشنهاد مرکز ایمنی فرایند های شیمیایی<sup>۴</sup>، از دست رفتن محتوی ظرف ذخیره<sup>۵</sup> یا همان نشت از سیستم ذخیره سازی انتخاب گردید (۲۱). این

1 Fuzzy failure probability

2 Parent Nodes

3 Evidence

4 Center for Chemical Process Safety (CCPS)

5 Loss of containment (LOC)

6 Natural Hazards Triggering Technological Accidents (Natech)

7 Basic process control system (BPCS)

جدول ۳. تشریح رویدادهای میانی در درخت خطا

رویداد	توصیف	توصیف	رویداد
Gate 1	نشست از مخزن به محیط اطراف	خوردگی	Gate 15
Gate 2	نشست از لایه ی داخلی	گرفتگی خط خروجی مخزن حین بارگیری کشتی	Gate 16
Gate 3	عدم کنترل سطح High-High	عدم عملکرد صحیح حفاظ های فشار بالا	Gate 17
Gate 4	عدم شناسایی سطح HH	تزریق بیش از اندازه Fuel gas یا BOG	Gate 18
Gate 5	عدم کنترل سطح High	عدم کنترل فشار HH	Gate 19
Gate 6	عدم واکنش به موقع هنگام بالا رفتن سطح	عدم کنترل فشار High	Gate 20
Gate 7	سطح سیال حین بارگیری مخزن بالا برود	افزایش فشار	Gate 21
Gate 8	کاهش فشار مخزن حین بارگیری کشتی	افزایش دما و نرخ تبخیر LPG	Gate 22
Gate 9	عدم توقف عملیات بارگیری به کشتی	عوامل خارجی	Gate 23
Gate 10	عدم باز شدن جریان تامین فشار مخزن	عدم تامین جریان Circulation	Gate 24
Gate 11	عدم عملکرد Vacuum breaker های مخزن	نشست از خط انتقال به بازوی بارگیری اسکله	Gate 25
Gate 12	حوادث و بلایای طبیعی	شکست خط لوله خروجی	Gate 26
Gate 13	صاعقه	شکست مکانیکی خط لوله خروجی	Gate 27
Gate 14	شکست مکانیکی خط لوله ورودی	خوردگی	Gate 28

مخزن میسر است. در جدول ۳ سایر رویدادهای میانی آورده شده است.

#### تعیین پیامدهای محتمل با درخت رویداد

شکل ۴ درخت رویداد برای مواد شیمیایی فوق‌العاده خطرناک (با کد R12 طبق دستورالعمل‌های برچسب‌گذاری EC labeling) و ذخیره‌شده در فشار اتمسفریک به عنوان مثال اتیلن مایع، LNG ذخیره‌شده در دمای نزدیک به نقطه جوش معمولی و یا پروپان و بوتان سرد شده<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد (۳۳). پس از تعیین درخت رویداد، از کارشناسان برای برآورد احتمال احتراق تاخیری، فوری و محصور بودن فضا توسط پرسشنامه نظر خواهی شد.

#### برآورد احتمالات فازی

در جدول پیوست (الف) نظرات کارشناسان در مورد فرکانس وقوع تمامی علل پایه مربوط به رهایش LPG از مخزن ذخیره و وقوع اشتعال یا انفجار بعد از آن آورده شده است. این نظرات با استفاده از فرمول‌های ۴ تا ۱۱ به مقدار احتمالاتی برای رویدادهای پایه تبدیل شده است که در ستون FFP از این جدول قابل مشاهده است. از احتمال شکست فازی به عنوان احتمال ورودی به گره‌های پایه در شبکه بیزین استفاده می‌شود که این مقادیر در واقع احتمال پیشین گره‌های شبکه بیزین هستند. همچنین وزن دهی به کارشناسان با توجه به جدول ۴ صورت گرفته است.

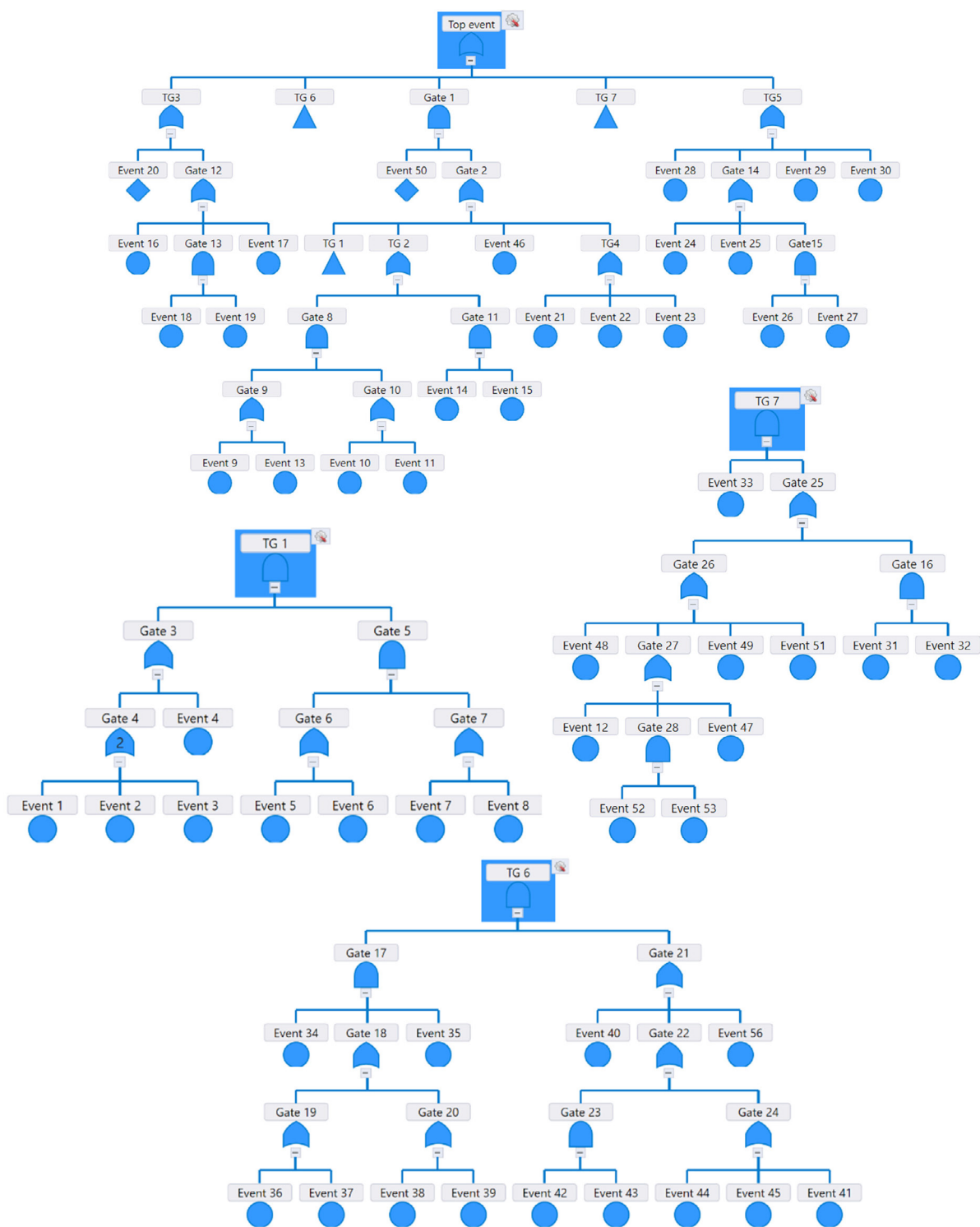
داخلی تنها در صورتی در محیط انتشار می‌یابند که نقص ساختاری در لایه بیرونی نیز اتفاق افتاده باشد.

رویداد میانی TG1 درخت خطای مربوط به رویداد میانی پر شدن بیش از اندازه مخزن (Overfilling) را نشان می‌دهد. رویداد پرشدگی بیش از اندازه مخزن موجب می‌شود تا سطح سیال درون مخزن بالا رفته و با بلند کردن سقف بالایی (سقف عایق آویزان به لایه میانی) سرریز نماید. همچنین TG2 و کیوم شدن لایه داخلی مخزن، TG3 فاکتورهای خارجی، TG4 مخاطرات ساختاری لایه داخلی و TG5 علل عمومی نشست از خط لوله ورودی را نشان می‌دهند.

رویداد میانی TG6 دسته‌بندی علل مربوط به رویداد بالا رفتن بیش از حد فشار مخزن (Overpressure) را نشان می‌دهد. از آنجایی که فشار جریان ورودی به مخزن بالاتر از فشار طراحی برای هر دو لایه ی مخزن است بنابراین این عامل به عنوان رویداد میانی مستقیماً به رویداد اصلی متصل گردیده است.

رویداد میانی TG7 درخت خطای مربوط به رویداد نشست از خط خروجی مخزن را نشان می‌دهد. به منظور رعایت طراحی ذاتا ایمن‌تر، مسیرهای ورودی و خروجی مخزن از بالای آن بوده و هیچ‌گونه خط لوله‌ای در پایین مخزن وجود ندارد. برای انتقال سیال از مخزن به سکوی بارگیری و کشتی، وجود پمپ در کف مخزن ضروری است. بنابراین نشست از خط انتقال به بازوی بارگیری اسکله به همراه عدم واکنش به موقع اپراتور برای توقف پمپاژ آورده شده است. این امر به این دلیل است که نشست از خط خروجی مخزن تنها با وجود روشن بودن پمپ‌های درون

1 Refrigerated

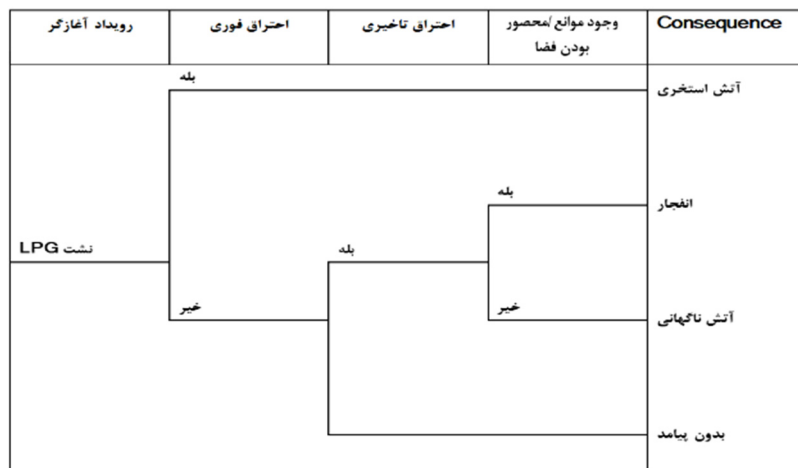


شکل ۳. درخت خطای مخزن مورد مطالعه

### شبکه بیزین

درخت خطای مربوط به نشت از مخزن و همچنین درخت رویداد ترسیم شده به وجود آمده است. این شبکه توسط نرم افزار GenIE ترسیم شده و انجام محاسبات پیچیده‌ی مربوط به برآورد احتمالات، پس از وارد کردن احتمالات

در شکل ۵ شبکه‌ی بیزین حاصل از مدل‌سازی علل پیامدهای حاصل از نشت LPG از مخزن مورد مطالعه آورده شده است. این شکل با توجه به منطق دروازه‌های



شکل ۴. درخت رویداد مربوط به پیامدهای حاصل از نشت (۳۳)

جدول ۴. مشخصات متخصصان و فاکتور وزنی آنها

متخصص	عنوان شغلی	مدرک تحصیلی	سابقه کار	سن	مجموع امتیاز	فاکتور وزنی
متخصص ۱	مهندس ایمنی	کارشناسی ارشد	کمتر از ۵ سال	کمتر از ۳۰ سال	۹	۰/۲
متخصص ۲	مسئول شیفت	دکتر	بین ۲۰ تا ۲۹ سال	بین ۴۰ تا ۴۹ سال	۱۶	۰/۳۵
متخصص ۳	مهندس فرایند	لیسانس	بین ۱۰ تا ۱۹ سال	بین ۴۰ تا ۴۹ سال	۱۲	۰/۲۷
متخصص ۴	اپراتور	لیسانس	بین ۶ تا ۹ سال	بین ۳۰ تا ۳۹ سال	۸	۰/۱۸

بالاترین اولویت هستند. این رویدادها بیشترین تأثیرات را در احتمال وقوع رویداد اصلی دارند بنابراین در وهله اول بایستی تا اقدامات مهندسی/مدیریتی برای کنترل آنها پیشنهاد گردد و به جهت کاهش احتمال وقوع آنها تلاش گردد. در اولویت‌های بعدی نقص ساختاری در لایه ی بیرونی مخزن (E50) و عدم واکنش به موقع اپراتور برای خاموش کردن پمپ هنگام بارگیری (E33) بالاترین اولویت را دارند. در پیوست (الف) مقادیر RoV برای بقیه ی گره ها نیز به تفصیل آورده شده است.

### بحث

پس از انجام محاسبات مربوط به تعیین احتمال برای انواع رویدادها، مقدار احتمال برای رویداد اصلی نشت از سیستم ذخیره سازی LPG مقدار  $1.5E-02$  و برای پیامدهای مربوطه اعم از آتش استخری، انفجار، آتش ناگهانی و رهاش ایمن به ترتیب  $7.58E-06$  و  $1.09E-06$  و  $4.95E-06$  و  $1.5E-02$  بدست آمد. از این احتمالات می توان جهت محاسبه سطح ریسک کلی مخزن در نرم افزارهایی مانند SAFETI استفاده نموده و با مشخص نمودن کانتورهای ریسک روی نقشه، اقدامات کنترلی مناسب تری را ارائه نمود.

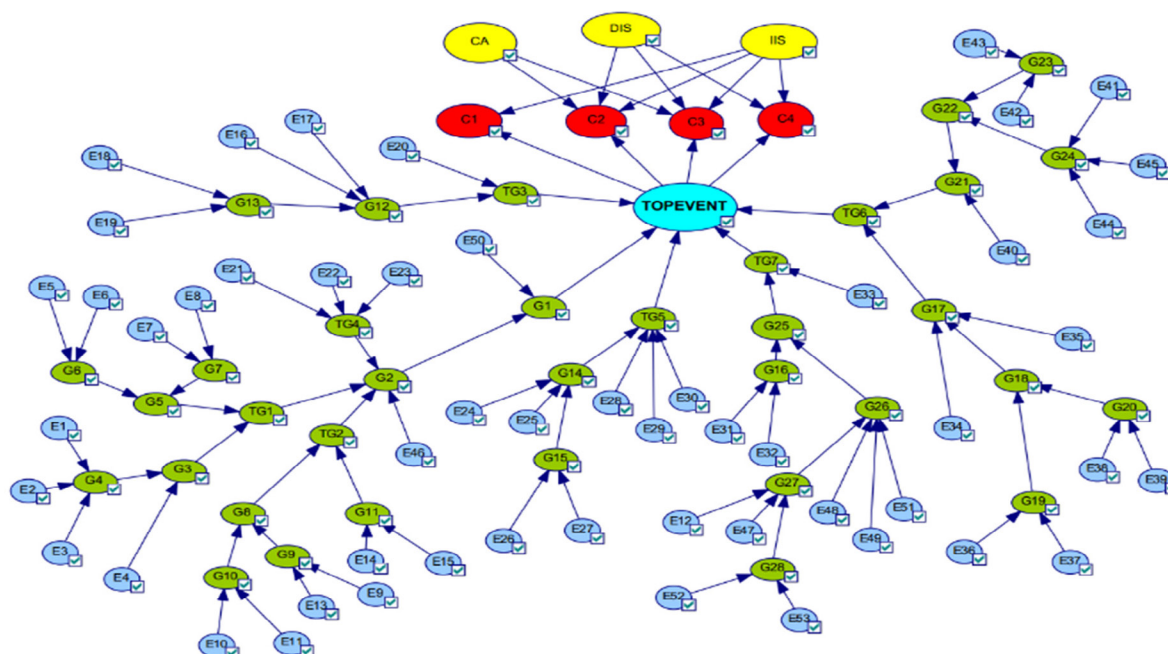
گره‌های پایه در آن صورت گرفته است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود گره‌های آبی نمایانگر رویدادهای پایه، گره‌های سبزرنگ نمایانگر رویدادهای میانی و گره‌های قرمز نمایانگر پیامدهای مربوطه است.

### برآورد احتمال مهمترین رویدادها

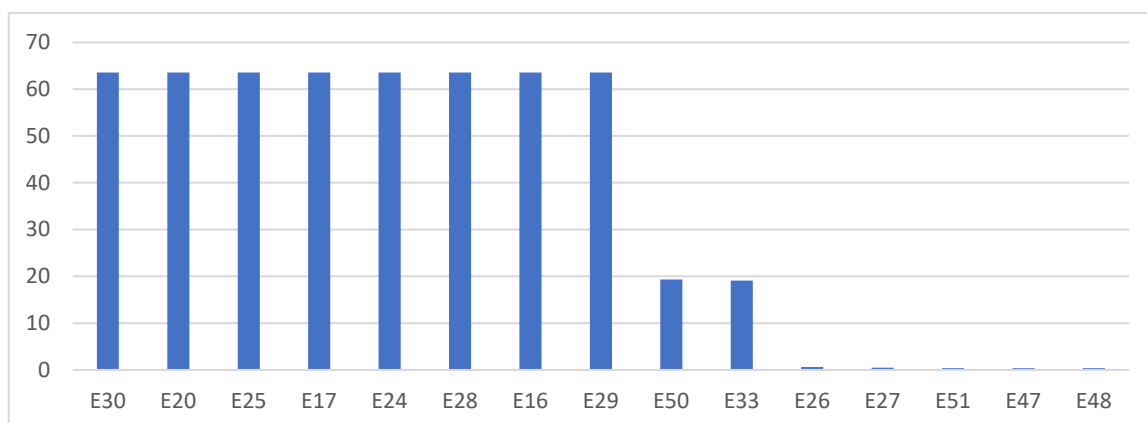
پس از وارد کردن مقادیر احتمال برای گره های پایه در نرم افزار، احتمالات مربوط به رویداد اصلی، رویدادهای میانی و همچنین پیامدهای مربوطه قابل محاسبه خواهد بود. در جدول ۵ این مقادیر گزارش شده است.

### شناسایی پراهمیت ترین گره های شبکه بیزین

از آنجایی که پارامتر RoV برای هر گره به طور جداگانه محاسبه می گردد بنابراین مقدار متناظر برای ۱۵ گره با بالاترین اهمیت در شکل ۶ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می شود رویدادهایی مانند نشت از اتصالات نامناسب خط لوله و ولوها (E30)، اقدامات خرابکارانه (E20)، بلایای طبیعی (E16 و E17)، نقص ساختاری در ولوها (E29)، خستگی و شکست ساپورت های خط (E24 و E25) و همچنین برخورد احتمالی وسایل نقلیه به خطوط لوله (E28) دارای



شکل ۵. شبکه بیزین مخزن LPG



شکل ۶. مقادیر RoV برای ۱۵ گره اول

دیگر مخازن ذخیره (مانند مخازن یک جداره روزمینی) یکپارچگی بالاتری دارند (۳۴) بنابراین ممکن است برخی علل مانند برخورد صاعقه به مخزن که در انواع دیگر مخازن (بخصوص در مخازن اتمسفری سقف شناور (۱۱)) بسیار شایع است، در این مطالعه وارد نشده اند و یا علل پراهمیت شناخته نشده اند. برای نمونه در مطالعه‌ی رضانی و همکاران (۳۵) در سال ۲۰۱۹ با موضوع ارزیابی ریسک مخازن LPG کروی با استفاده از روش پاپیونی رویداد نشت از اتصالات مخزن به‌عنوان پراهمیت‌ترین نقص شناخته شد که با مطالعه حاضر مشابهت داشت. اما برخی رویدادهای دیگر مانند سرریز شدن از مخزن و

ارزیابی ایمنی مخازن Full containment تاکنون به صورت بسیار محدود صورت گرفته است؛ همچنین از آنجایی که مخزن مورد مطالعه در هر تحقیق شرایط فرایندی، محیطی و ساختاری ویژه‌ی خود را دارد نتایج مربوط به آن نیز مخصوص همان مخزن ارائه می‌گردد اما پس از بررسی برخی از مطالعات مشابه با تحقیق حاضر و بررسی یافته‌های آن‌ها، برخی شباهت بین نتایج کار آن‌ها و کار تحقیقاتی حاضر شناسایی شد که در ادامه تشریح شده است.

از آنجایی که مخازن ذخیره دوجداره Full containment بنا به طراحی خاص خود نسبت به انواع

جدول ۵. احتمال وقوع مهمترین رویدادها

نام رویداد	شناسه رویداد	احتمال وقوع (اولیه)
نشت از سیستم ذخیره سازی	TOP EVENT	۱/۵E-۰۲
آتش استخری	C1	۷/۵۸E-۰۶
انفجار	C2	۱/۰۹E-۰۶
آتش ناگهانی	C3	۴/۹۵E-۰۶
بدون پیامد	C4	۱/۵E-۰۲
منابع احتراق فوری <sup>۱</sup>	IIS	۴/۹E-۰۴
منابع احتراق تأخیری <sup>۲</sup>	DIS	۳/۹E-۰۴
وجود موانع/محصور بودن فضا <sup>۳</sup>	CA	۱/۸۱E-۰۱

<sup>۱</sup> Immediate ignition source<sup>۲</sup> Delayed ignition source<sup>۳</sup> Congested area

همچنین نقش محافظ برای جلوگیری از پخش نشتی‌های مربوط به لایه داخلی دانست.

بررسی بیشتر نتایج حاکی از آن است که مخاطرات مربوط به انحرافات فرایندی دارای اولویت‌های کمتری هستند. دلیل این امر را می‌توان در وجود افزونگی<sup>۲</sup>‌های زیاد در سیستم‌های ایمنی مخزن مانند سیستم کنترل پایه، سیستم ابزار دقیق ایمنی و شیرهای ایمنی دانست. در نهایت پس از بررسی نهایی و شناسایی گره‌های پراهمیت و بحرانی، پیشنهادات زیر جهت کنترل علل مخاطره آمیز و کاهش احتمال وقوع حادثه در مخزن مورد مطالعه ی حاضر ارائه گردیده است.

- حصول اطمینان پرسنل نگهداری و تعمیرات از عدم وجود نشتی از اتصالات فلنجی (به عنوان مثال نقص در گسکت) پس از عملیات‌های تعمیر و نگهداری و رعایت نکات ایمنی حین بستن اتصالات. بستن بیش از حد پیچ‌ها می‌تواند باعث وارد آمدن بار بیش از حد به گسکت‌ها شده و یا با افزایش خستگی در تجهیزات قدیمی باعث ترک خوردن در آنها بشود. از طرف دیگر شل بسته شدن اتصالات می‌تواند علت مستقیم نشت از فلنج‌ها باشد. انتخاب نوع صحیح گسکت، کیفیت مناسب و نحوه صحیح نصب آن‌ها نیز باید طی دوره‌های آموزشی به پرسنل مربوطه آموزش و یا بازآموزی گردد.

- استفاده از برخی از تجهیزات مانند محافظ اسپری فلنج<sup>۳</sup> بر روی اتصالات فلنجی. محافظ اسپری فلنج یک وسیله حفاظتی است که بر روی فلنج‌ها و شیرها نصب می‌شود تا از آسیب به کارگران، تجهیزات اطراف یا محیط در حوادث ناخواسته ی ناشی از پاشش یا نشت مواد

نشتی از PRV که از علل پراهمیت حادثه در مخازن کروی معرفی شدند، به دلیل تفاوت ساختاری مخازن در تحقیق حاضر پراهمیت شناخته نشدند.

همان گونه که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود عموم علل پراهمیت شناخته شده که می‌توانند منجر به حادثه در مخزن مورد مطالعه حاضر شوند مربوط به قسمت‌های خارج از جداره‌های مخزن یعنی لوله‌های متصل به مخزن هستند. این در حالیست که مارکوفسکی و سیوتا (۳۶) نیز در سال ۲۰۱۷ با استفاده از روش ماتریس ریسک سنتی و منطق فازی مهم‌ترین سناریوی مخاطره آمیز مربوط به مخازن دوجداره (Full containment) را نیز پارگی یا نشت از خطوط ورودی و خروجی این نوع از مخازن بدست آوردند. کومار و همکاران (۲۶) نیز پس از ارزیابی ریسک مخازن مربوط به جایگاه سوخت LPG با استفاده از شبکه بی‌زین فازی، محتمل‌ترین مقدار نشت LPG را مقدار  $2.3E-02$  بدست آوردند که به احتمال بدست آمده برای رویداد اصلی در مطالعه حاضر بسیار نزدیک است. همچنین از مهم‌ترین علل نشت در تحقیق مذکور برخورد وسایل نقلیه بود که با اولویت بندی تحقیق حاضر (رویداد E28) تشابه دارد.

برخی علل دیگر مانند بلایای طبیعی<sup>۱</sup> به دلیل شدت اثر بالا و اقدامات خرابکارانه مانند حملات تروریستی به دلیل موقعیت قرارگیری مخزن و نزدیکی به دریا در اولویت‌های بعدی در تحقیق حاضر قرار گرفته‌اند. همچنین لایه بیرونی نیز از قسمت‌های پراهمیت سیستم شناخته شده است. این امر را می‌توان به دلیل نقش مهم این لایه در حفاظت از لایه داخلی از خطرات خارجی و

<sup>2</sup> Redundancy  
<sup>3</sup> Spray flange shield

1 Natural Hazards Triggering Technological Accidents (Natech)

لایه بتنی موثر واقع گردد. عوامل دیگری نیز می توانند باعث نقص در ساختار لایه ی بیرونی بشوند مانند (۳۷):

- نشست زمین به دلیل ناکافی بودن نقشه برداری یا اصلاح زمین قبل از ساخت و ساز
- وارد آمدن تشعشات حرارتی بیش از ۳۲ کیلووات بر مترمربع بر بدنه بیرونی
- خرابی طولانی مدت سیستم گرمایش کف مخزن (بروز Frost heave)

• وجود نقص ساختاری درون بتن حین فرایند ساخت به همین منظور حصول اطمینان از سلامت لایه بیرونی به صورت دوره ای امری مهم به نظر می رسد. وجود ترک های روی لایه بتنی ممکن است به طور معمول وجود داشته باشد در حالیکه بسیاری از آنها مسئله مهمی را برای مخزن ایجاد نمی کند اما ممکن است توسط برخی از آنها عوامل آسیب رسان به بتن نفوذ کرده و موجب آسیب و نشستی شود. در این حالت انجام تست های غیرمخرب مانند تست اولتراسونیک<sup>(۲)</sup> (UPE) و GPR<sup>۳</sup> به صورت دوره ای پیشنهاد می شود (۳۸).

همچنین به منظور کاهش خطای اپراتور در صورت نیاز به توقف فرایند بارگیری تدوین دستورالعمل های مربوطه برای انجام کار به طور صحیح و همچنین طرح واکنش در شرایط اضطراری ضروری است.

کاهش احتمال رخداد خطای عملکردی اپراتور برای شناسایی آنومالی های احتمالی از طریق آموزش آن ها با شبیه ساز های رایانه ای و همچنین اصلاح و هوشمند سازی نرم افزار کنترل فرآیند می تواند در کاهش ریسک خطای انسانی تاثیر قابل ملاحظه ای داشته باشد (۳۹).

### نتیجه گیری

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی ایمنی مخازن دوجداره LPG با استفاده از شبکه بیزین صورت گرفت. از آنجایی که تاکنون مطالعات شناسایی مخاطرات برای این مخزن صورت نگرفته بود بنابراین ابتدا از کاربرد های HAZID استفاده شده و خطرات، علل، پیامد و همچنین حفاظ های ایمنی مربوطه شناسایی گردید. سپس با استفاده از نمودار پاپیونی که ترکیبی از درخت رویداد و درخت خطا است مدل سازی اولیه برای تشکیل شبکه بیزین صورت گرفت. در مرحله بعد با استفاده از منطق فازی و روش تجمیع شباهت بهبود یافته احتمالات رویدادهای پایه ای که همان گره های والد در شبکه بیزین بودند بدست آمد و

شیمیایی خطرناک مانند مواد اسیدی و قلیایی، نفت و گاز و حتی بخار داغ جلوگیری می کند.

• نصب موانع تصادف برای محافظت از تجهیزات آسیب پذیر مانند خطوط لوله در برابر برخورد وسایل نقلیه. مکان یابی و طراحی موانع لازم باید از طریق ارزیابی ریسک انجام شود. سیستم مانع برخورد باید طوری طراحی شود که انرژی ضربه طراحی را با تغییر شکل و بدون فروپاشی جذب کند. تردد وسایل نقلیه باید در داخل منطقه تاسیسات کنترل شود تا ضربه به حداقل برسد (۳۷).

• نصب سیستمی کارآمد که بتواند نشستی را در همان زمان اولیه شناسایی کرده و ابعاد پیامد حریق را کاهش دهد- نحوه پخش LPG در محیط نیازمند شبیه سازی و آنالیز است تا مسیر انتشار آن مشخص گردد. این اقدام باعث کمک به مشخص شدن مکان های مناسب برای نصب دتکتورها می گردد. نصب دتکتور ها نیازمند در نظر گرفتن الگوهای جریان های هوایی نیز است. همچنین گشت های منظم و بازرسی های دوره ای به منظور شناسایی احتمالی نشستی ها پیشنهاد می گردد.

• فضاهای محصور که در آنها پتانسیل تجمع گاز وجود دارد و از نظر فرایندی با اهمیت بوده و یا در آنها تجهیزات گران قیمت وجود دارد نیز نیازمند نصب دتکتور هستند. اما نصب دتکتور در محیط هایی که به طور مداوم تحت تاثیر شرایطی محیطی مانند جریان های سطحی، گرد و خاک و تجمع یخ و برف هستند، بهتر است صورت نگیرد (۳۷).

• برای کاهش احتمال آسیب رسیدن به مخزن بر اثر وقوع زلزله معمولاً استاندارد هایی در طراحی مانند نسبت ارتفاع به قطر و همچنین میزان بیشه شتاب زلزله در نظر گرفته می شود. با این حال برای کاهش احتمال آسیب رسانی زلزله یکی از بهترین راه ها مهار کردن<sup>۱</sup> لایه داخلی مخزن است (۱۶). از بخش های مهم دیگر که نسبت به زلزله آسیب پذیر هستند اتصالات لوله ها، پلکان ها و نردبان های متصل به مخزن است بنابراین محکم کردن اتصالات و بازرسی دوره ای آنها از بخش های مهم دیگر جهت کاهش احتمال آسیب دیدن سیستم ذخیره سازی بر اثر وقوع زلزله است.

در وهله ی بعد نقص در ساختار لایه ی بتنی بیرونی پراهمیت است. از آنجایی که مخزن مورد مطالعه به جهت ارتباط با کشتی های تجاری (جهت صادرات LPG) فاصله کمی با دریا دارد بنابراین وجود مقادیر بالایی از رطوبت، دمای بالا و شرایط نامناسب محیطی می تواند روی سلامت

2 Ultrasonic Pulse Echo

3 Ground Penetrating Radar

1 Anchoring

## قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از نتایج پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی HSE در دانشکده بهداشت و ایمنی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی است. بدین وسیله از مدیریت محترم واحد HSE و کارشناسان گران قدر پالایشگاه مورد مطالعه که در تحقیق حاضر اینجانب را راهنمایی و مشاوره نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## REFERENCE

- Mirzaei aliabadi M, Mohammad Fam I, Kalatpour O, Babayi mesdaraghi Y. Risk assessment of liquefied petroleum gas (LPG) storage tanks in the process industries using the Bowtie technique (In Persian). J Occup Hyg Eng . 2016 Sep 1;3(2):1-11.
  - NFPA TC of L by. NFPA 58-Liquified petroleum gas code. 2020;
  - Prasun Kumar Roy, Arti Bhatt, Bimal Kumar, Sarvjeet Kaur CR. Consequence and risk assessment: Case study of an ammonia storage facility Prasun. 2011;
  - Kumar M, Kaushik M. System failure probability evaluation using fault tree analysis and expert opinions in intuitionistic fuzzy environment. J Loss Prev Process Ind. 2020 Sep 1;67:104236.
  - Guo X, Ji J, Khan F, Ding L, Yang Y. Fuzzy Bayesian network based on an improved similarity aggregation method for risk assessment of storage tank accident. Process Saf Environ Prot . 2021 May;149:817-30.
  - Jafari MJ, Zarei E, Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. Int J Hydrogen Energy . 2012;37(24):19241-9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.082>
  - Yin H, Liu C, Wu W, Song K, Liu D, Dan Y. Safety assessment of natural gas storage tank using similarity aggregation method based fuzzy fault tree analysis (SAM-FFTA) approach. J Loss Prev Process Ind. 2020;66(February).
  - Khan F, Abbasi S. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. J loss Prev Process Ind. 1998;
  - Zarei E, Mohammadfam I, Azadeh A, Khakzad N, Mirzaei Aliabadi M. Dynamic risk assessment of chemical process systems using bayesian network [In persian]. Iran Occup Heal. 2018;
  - Unnikrishnan G. Oil and Gas Processing Equipment, Risk Assessment with Bayesian Networks. 2020.
  - Pouyakian M, Jafari MJ, Laal F, Nourai F, Zarei E. A comprehensive approach to analyze the risk of floating
- سپس با تعیین روابط شرطی در جداول شرطی (CPTs) مقادیر احتمال برای پیامدها محاسبه گردید. در نهایت با استفاده از قابلیت محاسبه بازگشتی شبکه های بیزین و محاسبه ی احتمال پسین، رویدادهای پراهمیت شناسایی شدند. در این بین نشت از اتصالات نامناسب خط لوله و ولوها، اقدامات خرابکارانه، بلایای طبیعی، نقص ساختاری در ولوها، خستگی و شکست ساپورت های خط و همچنین برخورد احتمالی وسایل نقلیه به خطوط لوله بالاترین اولویت را داشتند و در وهله بعد نقص ساختاری در لایه ی بیرونی مخزن و عدم واکنش به موقع اپراتور برای خاموش کردن پمپ به هنگام بارگیری قرار داشتند. در نهایت پیشنهادات اصلاحی و مهندسی برای کاهش یا کنترل مخاطرات ارائه گردید.
- از جمله استفاده هایی که در این تحقیق از شبکه های بیزین شد تعیین علل و فاکتورهای پراهمیت در وقوع حادثه برای سیستم است. به طور معمول این نوع از آنالیز بدین صورت است که تأثیر خرابی یک جزء (یک علت خرابی) را روی خرابی کل می سنجد بدین معنی که چنانچه یک جزء از سیستم دچار خرابی بشود با انجام آنالیز، مشخص می شود که این خرابی تا چه اندازه می تواند روی قابلیت اطمینان کل سیستم مؤثر باشد (۴۰-۴۳). شناسایی پراهمیت ترین علل بروز حادثه باعث بهینه سازی اقدامات کنترلی و فعالیت های نگهداری و تعمیرات شده و در نهایت هزینه های غیر ضروری کاهش می یابد. همچنین با علم به این دانش می توان طراحی استراتژی های مدیریتی را بهبود بخشید و از اطمینان واقع گرایانه تری نسبت به عملکرد سیستم های حیاتی بهره برد. علاوه بر آن با استفاده از تکنولوژی های مناسب و روش های مدیریت اثربخش می توان عوامل مهم شناسایی شده را پایش و با اطمینان از این که به درستی کار می کنند، از وقوع حوادث پیشگیری نمود (۴۴).
- باتوجه به دامنه و شرایط تحقیقاتی مطالعه حاضر، محدودیتی مانند کمبود داده های خرابی منسجم جهت برآورد احتمالات رویدادهای پایه ای وجود داشت که با استفاده از منطق فازی و روش تجمیع شباهت بهبود یافته برطرف شد. محدودیت دیگر دسترسی محدود و زمان بر شدن جمع آوری اطلاعات باتوجه به موقعیت جغرافیایی سایت و سخت گیری های مربوطه بود که این مورد نیز توسط ارتباط با متخصصان مربوطه و دریافت مدارک فرایندی لازم و همچنین استفاده از نقشه های هوایی جهت بررسی موقعیت جغرافیایی مخزن، برطرف گردید.

25. Zarei E, Yazdi M, Abbassi R, Khan F. A hybrid model for human factor analysis in process accidents: FBN-HFACS. *J Loss Prev Process Ind* . 2019 Jan;57:142–55. Available from: <https://doi.org/10.1080/17476348.2020.1754800>
26. Jishin Jayan T, Muthukumar K, Rajiev R. Dynamic Risk Assessment of an Ammonia Storage Tank Based on Bow-Tie and Bayesian Approaches. In: *Advances in Materials Research Select Proceedings of ICAMR 2019* . Springer; 2021. p. 427–36. Available from: [http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-8319-3\\_43](http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-8319-3_43)
27. Hsi-Mei Hsu, Chen-Tung Chen. Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. *Fuzzy Sets Syst* . 1996 May;79(3):279–85. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0165011495001859>
28. Ahmadi O, Mortazavi SB, Mahabadi HA, Hosseinpouri M. Development of a dynamic quantitative risk assessment methodology using fuzzy DEMATEL-BN and leading indicators. *Process Saf Environ Prot*. 2020;142:15–44.
29. Sugeno M. *Fuzzy Modeling and Control Selected Works of Sugeno*. Hung T. Nguyen NRP, editor. 1999.
30. Chen S-J, Hwang C-L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods. In 1992. p. 289–486. Available from: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-46768-4\\_5](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-46768-4_5)
31. Detyniecki M, Yager RR. Ranking fuzzy numbers using  $\alpha$ -weighted valuations. *Int J Uncertainty, Fuzziness Knowledge-Based Syst* . 2000 Oct 21;08(05):573–91.
32. Reniers G, Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. In: Reniers G, Cozzani V, editors. *Domino Effects in the Process Industries*. Amsterdam: Elsevier; 2013. p. 30–42.
33. Vilchez JA, Espejo V, Casal J. Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. *J Loss Prev Process Ind* . 2011 May;24(3):281–7.
34. Rath S, Krol M. Comparative Risk Assessment for Different LNG-Storage Tank Concepts. *Chem Eng Trans*. 2013;31.
35. Ramezani Khoshnameh MK, Mirza ebrahim tehrani M, Babayi mesdaraghi Y. Risk Assessment of Releasing Flammable Material from Liquefied Petroleum Gas Tanks by Bowtie Method and Vulnerability Zoning by PHAST Software (In Persian). *Occup Hyg Heal Promot* . 2019 May 21;
36. Markowski AS, Siuta D. Selection of representative accident scenarios for major industrial accidents. *Process Saf Environ Prot*. 2017;111:652–62.
37. BS EN 1473 :Installation and equipment for liquefied natural gas — Design of onshore installations. BSI standards publication; 2021.
38. Kuchipudi ST, Ghosh D, Gupta H. Automated roof storage tanks. *Process Saf Environ Prot* . 2021 Feb;146:811–36. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582020319194>
12. Sarvestani K, Ahmadi O, Mortazavi SB, Mahabadi HA. Development of a predictive accident model for dynamic risk assessment of propane storage tanks. *Process Saf Environ Prot*. 2021;148:1217–32.
13. Energy Information Administration, FERC, California Energy Commission, Center for Liquefied Natural Gas, and Green Futures. *Liquefied Natural Gas (LNG)* . 2009.
14. Chang JI, Lin CC. A study of storage tank accidents. *J Loss Prev Process Ind*. 2006;19(1):51–9.
15. Jianxing Y, Shibo W, Yang Y, Haicheng C, Haizhao F, Jiahao L, et al. Process system failure evaluation method based on a Noisy-OR gate intuitionistic fuzzy Bayesian network in an uncertain environment. *Process Saf Environ Prot*. 2021;150:281–97.
16. API 625: Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage. 2010.
17. Mehdizadeh D. Construction and engineering of double-walled tanks for liquified gases. In: *The first international of oil, gas, petrochemical and power plant*. 2012.
18. Leitch M. ISO 31000:The New International Standard on Risk Management. *Risk Anal* . 2010 Apr 8;30(6):887–92. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1539-6924.2010.01397.x>
19. De Dianous V, Fiévez C. ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. Vol. 130, *Journal of Hazardous Materials*. 2006. p. 220–33.
20. Pitblado R, Weijand P. Barrier diagram (Bow Tie) quality issues for operating managers. Vol. 33, *Process Safety Progress*. 2014. p. 355–61.
21. CCPS. Bow ties in risk management: A concept book for process safety . *Bow Ties in Risk Management: A Concept Book for Process Safety*. 2018 [cited 2021 Aug 19]. 1–180 p.
22. Crowl D, Louvar J. *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*. International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. 2019. 12–26 p.
23. Yazdi M. *Linguistic Methods Under Fuzzy Information in System Safety and Reliability Analysis*. Yazdi M, editor. Cham: Springer International Publishing; 2022. (Studies in Fuzziness and Soft Computing; vol. 414).
24. Yazdi M, Zarei E. Uncertainty Handling in the Safety Risk Analysis: An Integrated Approach Based on Fuzzy Fault Tree Analysis. *J Fail Anal Prev* . 2018 Apr 14;18(2):392–404. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11668-018-0421-9>

- from: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104229>
42. Sun H, Wang H, Yang M, Reniers G. Resilience-based approach to safety barrier performance assessment in process facilities. *J Loss Prev Process Ind* . 2021;73(July):104599. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104599>
  43. Zhang Y, Weng WG. Bayesian network model for buried gas pipeline failure analysis caused by corrosion and external interference. *Reliab Eng Syst Saf* . 2020;203:107089. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107089>
  44. Amin MT, Khan F, Imtiaz S. Dynamic availability assessment of safety critical systems using a dynamic Bayesian network. *Reliab Eng Syst Saf* . 2018;178:108–17. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.05.017>
  - Assessment of Reinforced Concrete Elements using Ground Penetrating Radar. *Autom Constr* . 2022 Aug;140:104378.
  39. Ghasemi M, Nasl Saraji G, Zakerian A, Azhdari.MR. Control of human errors and comparison of risk levels after correction action with the SHERPA method in a control room of petrochemical industry[In persian]. *Iran Occup Heal*. 2011;
  40. Tong X, Fang W, Yuan S, Ma J, Bai Y. Application of Bayesian approach to the assessment of mine gas explosion. *J Loss Prev Process Ind* . 2018;54:238–45. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.04.003>
  41. Jafari MJ, Pouyakian M, khanteymoori A, Hanifi SM. Reliability evaluation of fire alarm systems using dynamic Bayesian networks and fuzzy fault tree analysis. *J Loss Prev Process Ind* . 2020;67:104229. Available

**پیوست الف.** نظرات کارشناسان، احتمال پسین، احتمال پیشین و مقادیر RoV برای رویدادهای پایه

ROV	FBN posterior	FFP (FBN prior)	متخصص ۴	متخصص ۳	متخصص ۲	متخصص ۱	شرح رویداد پایه	رویداد پایه
.	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	ML	ML	M	ML	LAHH-41 وقوع خرابی در	E1
.	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	ML	ML	M	ML	LAHH-42 وقوع خرابی در	E2
.	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	ML	ML	M	ML	LAHH-43 وقوع خرابی در	E3
.	۰/۰۰۰۹۴۴	۰/۰۰۰۹۴۴	ML	ML	L	ML	عدم بسته شدن اضطراری جریان گردشی بازگشتی به مخزن (SDV- (۱۱۱	E4
.	۰/۰۱۴۶۰۱	۰/۰۱۴۶۰۱	M	MH	H	MH	سهل‌انگاری اپراتور در واکنش به آلام	E5
.	۰/۰۰۲۹۴۲	۰/۰۰۲۹۴۲	M	ML	M	ML	عدم آلام صحیح LAH-502	E6
.	۰/۰۰۱۶۰۵	۰/۰۰۱۶۰۵	ML	M	ML	L	خرابی HS-040 حین پر شدن مخزن	E7
.	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	ML	M	M	M	خرابی و عدم بسته شدن ولو PV-002 حواس‌پرتی یا خطای اپراتور در خاموش کردن پمپ‌های بارگیری (P-101A/B/C)	E8
.	۰/۰۰۶۰۱۶	۰/۰۰۶۰۱۶	MH	ML	M	MH	بسته ماندن ولو PV-001 بدلیل نقص مکانیکی یا خرابی سیستم کنترلی آن	E9
.	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	ML	M	M	M	بسته شدن جریان برگشتی BOG از کشتی حین بارگیری	E10
.	۰/۰۰۵۵۳۲	۰/۰۰۵۵۳۲	M	M	MH	M	خستگی خط لوله خروجی	E11
۰/۳۷۶۱۷۹۸	۰/۰۰۰۶۱۲	۰/۰۰۰۴۴۵	L	L	ML	L	خرابی PALL-43	E12
.	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	ML	ML	M	ML	عدم عملکرد PSV042A	E13
.	۰/۰۰۴۰۲۷	۰/۰۰۴۰۲۷	M	M	M	ML	عدم عملکرد PSV042B	E14
.	۰/۰۰۴۰۲۷	۰/۰۰۴۰۲۷	M	M	M	ML	زلزله	E15
۶۳/۵۵۹۲۱۳	۰/۰۲۶۳۴	۰/۰۰۰۴۰۸	L	ML	L	L	سونامی	E16
۶۳/۵۵۹۲۱۴	۰/۰۰۴۲۹۳	۶/۶۵E-۰۵	L	VL	L	VL	برخورد صاعقه به شیر ایمنی تخلیه مخزن	E17
۰/۲۰۸۳۲۰۳	۰/۰۰۴۵۷۷	۰/۰۰۳۷۸۸	M	ML	M	M	عدم وجود و یا خرابی سیستم صاعقه‌گیر	E18
۰/۲۳۹۸۱۷۶	۰/۰۰۴۰۷۹	۰/۰۰۳۲۹	MH	ML	ML	M	اقدامات خرابکارانه	E19
۶۳/۵۵۹۲۱۴	۰/۰۰۸۹۷۳	۰/۰۰۰۱۳۹	VL	L	L	L	خوردگی داخلی مخزن	E20
۰/۱۲۱۸۰۸۹	۰/۰۰۱۵۳۸	۰/۰۰۱۳۷۱	ML	L	ML	M	خستگی	E21
۰/۱۲۱۹۰۲۹	۰/۰۰۱۱۳۲	۰/۰۰۱۰۰۹	ML	L	ML	ML	نقص‌های جوشکاری	E22
۰/۱۲۲۰۰۰۶	۰/۰۰۲۸۸۱	۰/۰۰۲۴۵۹	ML	M	ML	MH	خستگی خط لوله ورودی	E23
۶۳/۵۵۹۲۱۳	۰/۰۲۸۷۲	۰/۰۰۰۴۴۵	L	L	ML	L	شکست سابلورت خطوط لوله ورودی	E24
۶۳/۵۵۹۲۱۴	۰/۰۰۸۹۷۳	۰/۰۰۰۱۳۹	VL	L	L	L	شکست سیستم حفاظت از خوردگی شامل پوشش‌ها، سیستم حفاظت کاتدی و بازدارنده‌ها	E25
۰/۶۱۴۲۳۹۵	۰/۰۱۲۴۷	۰/۰۰۷۷۲۵	MH	M	M	MH	عدم انجام به موقع بازرسی فنی و فعالیتهای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	E26
۰/۴۸۵۶۹۶۷	۰/۰۱۴۴۹	۰/۰۰۹۷۵۳	M	MH	M	H	برخورد وسایل نقلیه به خط ورودی	E27
۶۳/۵۵۹۲۱۳	۰/۲۳۴۷۳۷	۰/۰۰۳۶۳۶	ML	ML	M	MH	وقوع نقص ساختاری در ولوهای روی خط ورودی	E28
۶۳/۵۵۹۲۱۳	۰/۱۸۰۵۰	۰/۰۰۲۷۹۶	M	M	ML	ML		E29

ادامه پیوست الف. نظرات کارشناسان، احتمال پسین، احتمال پیشین و مقادیر RoV برای رویدادهای پایه

ROV	FBN posterior	FFP (FBN prior)	متخصص ۴	متخصص ۳	متخصص ۲	متخصص ۱	شرح رویداد پایه	رویداد پایه
۶۳/۵۵۹۲۱۴	۰/۴۹۸۷۲	۰/۰۰۷۷۲۵	MH	M	M	MH	اتصالات نامناسب بین خط لوله ورودی، ولوها و غیره	E30
۰/۰۰۱۴۹۱	۰/۰۰۶۷۹۷	۰/۰۰۶۷۸۷	M	M	MH	M	بسته بودن ولو دستی HC-45 بدلیل خطای اپراتور	E31
۰/۰۰۲۵۴۳۹	۰/۰۰۳۹۹۹	۰/۰۰۳۹۸۹	ML	M	M	M	باز نشدن ولو FCV-45A بدلیل نقص عملکردی در سیستم کنترلی آن (جریان Min flow پمپ)	E32
۱۹/۰۷۶۴۶۳	۰/۱۲۰۷۸	۰/۰۰۶۰۱۶	MH	ML	M	MH	عدم واکنش به موقع اپراتور برای توقف پمپاژ هنگام بارگیری	E33
.	۰/۰۰۱۹۷۷	۰/۰۰۱۹۷۷	M	ML	ML	ML	عدم عملکرد PSV43A در فشار ۱۳۰ mbarg	E34
.	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	ML	M	M	M	باز نشدن به موقع PV-41 و عدم تخلیه BOG به فلر	E35
.	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	ML	ML	M	ML	خرابی PIAHH-42	E36
.	۰/۰۰۰۵۴۴	۰/۰۰۰۵۴۴	ML	ML	L	ML	خرابی و عدم بسته شدن SDV-18	E37
.	۰/۰۰۱۶۰۵	۰/۰۰۱۶۰۵	ML	M	ML	L	خرابی سویچ کنترلی HS-40	E38
.	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	ML	M	M	M	عدم بسته شدن ولو PV-02 بدلیل نقص در سیستم کنترلی	E39
.	۰/۰۰۴۷۱۶	۰/۰۰۴۷۱۶	M	ML	M	MH	وقوع Rollover	E40
.	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	ML	M	M	M	خرابی پمپ جریان Circulation	E41
.	۰/۰۰۰۷۵۳	۰/۰۰۰۷۵۳	L	L	M	L	وقوع حریق خارجی	E42
.	۰/۰۰۱۴۶۵	۰/۰۰۱۴۶۵	L	ML	ML	M	نقص در عایق میانی مخزن	E43
.	۰/۰۰۳۱۱۳	۰/۰۰۳۱۱۳	ML	M	M	ML	نقص در سیستم تبرید	E44
.	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	ML	M	M	M	بسته ماندن بیش از حد FCV-13A بدلیل نقص مکانیکی یا خرابی سیستم کنترلی آن	E45
۰/۱۲۲۲۳۲۸	۰/۰۱۱۸۲۲	۰/۰۱۰۵۳۴	MH	M	MH	MH	خطای انسانی و سقوط پمپ درون مخزن حین عملیات لیفتینگ	E46
۰/۳۷۶۳۰۹	۰/۰۰۰۶۴۱	۰/۰۰۰۴۶۶	VL	L	L	L	شکست ساپورت خطوط لوله خروجی	E47
۰/۳۷۶۲۶۱۹	۰/۰۰۴۴۹۹	۰/۰۰۳۲۶۹	M	ML	ML	MH	بر خورد وسایل نقلیه به خط خروجی	E48
۰/۳۷۶۲۱۰۶	۰/۰۰۵۵۴۲	۰/۰۰۴۰۲۷	M	M	M	ML	وقوع نقص ساختاری در ولوهای روی خط خروجی	E49
۱۹/۳۳۷۵۹۶	۰/۰۳۹۷۶	۰/۰۰۱۹۵۵	ML	ML	ML	M	نقص در ساختار لایه بیرونی	E50
۰/۳۷۶۳۱۰۷	۰/۰۱۰۶۳۲	۰/۰۰۷۷۲۵	MH	M	M	MH	اتصالات نامناسب بین خط لوله خروجی، ولوها و غیره	E51
۰/۰۰۰۳۸۷۱	۰/۰۰۷۷۵۳	۰/۰۰۷۷۵	MH	M	M	MH	شکست سیستم حفاظت از خوردگی شامل پوشش ها، سیستم حفاظت کاتدی و بازدارنده ها	E52
۰/۰۰۲۹۴۲۹	۰/۰۰۹۷۸۱	۰/۰۰۹۷۵۲	M	MH	M	H	عدم انجام به موقع بازرسی فنی و فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	E53