Iran Occupational Health

Iran Occupational Health. 2024 (01 Apr);20: 40

Original Article

http://ioh.iums.ac.ir

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

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

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

EXTENDED ABSTRACT

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,

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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.

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

$$WA(E_u) = \frac{\sum_{\substack{v=1 \\ v\neq u}}^{N} W(E_v) \cdot S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v)}{\sum_{\substack{v=1 \\ v\neq u}}^{N} W(E_v)} \quad (3)$$

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

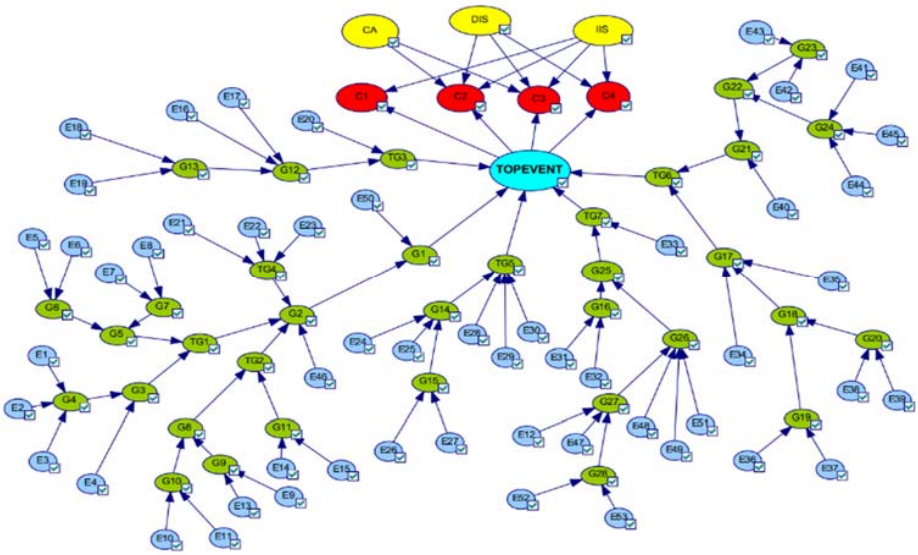


Fig. 1. Bayesian network

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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

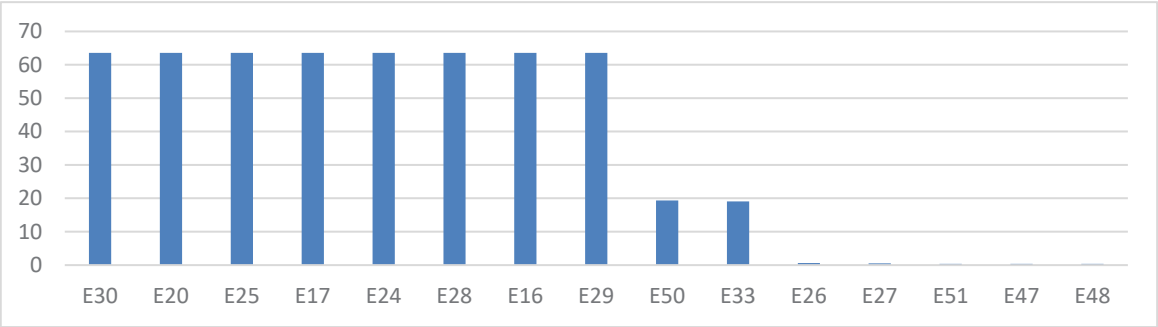


Fig. 2. RoV for 15 top nodes

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.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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**

سلامت کار ایران
دوره ۲۰ - ۴۰/۱۴۰۲

مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

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

محمدرضا حبیبیان محمدآبادی: دانشجو 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

چکیده

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 می شوند. تعیین روشی بهینه و دارای عدم‌قطعیت کمتر جهت تعیین علل پراهمیت و بحرانی در وقوع حوادث می تواند 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 پاپیونی و سپس شبکه بیزین ترسیم شد و روابط بین گره ها وارد نرم افزار گردید. احتمالات گره ها با استفاده از نظر کارشناسان و روش تجمیع شباهت بهبودیافته برآورد شده و در نهایت با درنظرگرفتن رویداد اصلی به‌عنوان گره شاهد، مقادیر نرخ تغییرات (ROV) جهت شناسایی پراهمیت ترین رویدادها محاسبه شد.
یافته ها: در این تحقیق مجموعا ۵۳ رویداد پایه ای شناسایی شد. احتمال رویداد نشت از سیستم ذخیره سازیLPG 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، نقص های 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 می رود. ترکیب این روش با منطق فازی و تجمیع شباهت بهبودیافته می‌تواند باعث کاهش عدم‌قطعیت در مطالعات گردد. همچنین آن ها با داشتن قابلیت به روزرسانی رویدادها می توانند باعث اولویت بندی رویدادهای بحرانی شوند. نتایج حاصل از این اولویت بندی می تواند به‌عنوان یک راهنمای مناسب برای بهینه سازی فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نیز مورداستفاده قرارگیرد.

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

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۳

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

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

مقدمه

مخازن ذخیره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های مجتمع‌های فرایندی همواره حساسیت‌های بالایی را در بحث ایمنی داشته اند (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 باارزش و ایجاد ضرر مالی مشکل ساز خواهد بود(۵). حوادث محتمل مربوط به مخازن مجتمع های 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 می افتند. هرچند که واحدهای فرایندی برای کنترل کردن عملیات و پیشگیری از حوادث عموما به سیستم های جامع کنترل و پایش فرایند مجهز می شوند اما با وجود تمامی این اقدامات باز هم حادثه رخ می دهد (۸). بنابر گزارشات و بررسی های گوناگون، مشخص شده است که حوادث متعددی تاکنون در ارتباط با مخازن ذخیره یLPG[1] -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 ورشکستگی های مختلف در سطح دنیا شده است(۱).

تا به امروز روش های گوناگونی به‌منظور ارزیابی، تحلیل و مدل‌سازی ریسک سیستم ها 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 می توانند باعث کاهش کارآمدی استراتژی‌های کنترل ریسک گردند(۹). در سال‌های اخیر جهت رفع این مشکلات روش‌های گوناگونی اعم از روش های کیفی و کمّی ارائه شده است. کاهش عدم قطعیت و قابلیت به‌روزرسانی احتمال وقوع رویدادهای ریشه ای و پیامدهای نهایی و همچنین دارا بودن قابلیت اعمال تاثیر حفاظ های ایمنی روی یکدیگر از برتری های شبکه های بیزین به شمار می رود(۱۰). از محدودیت‌هایی که برای کمّی سازی شبکه‌های بیزی می‌توان متصور شد کمبود داده‌های خرابی و یا به‌طورکلی عدم دسترسی به این داده‌ها است(۱۱). برای رفع این مشکل می توان از منطق فازی استفاده نمود. کاربرد منطق فازی در روش‌های شناسایی و آنالیز ریسک مانند درخت 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 مرگ‌ومیر 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. ازآن جایی‌که حوادث فرایندی عموما با فرکانس کم اما با سطح خسارت بالا رخ می‌دهد بنابراین لازم است تا وقوع آن پیش‌بینی‌شده 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 می طلبد 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 کنده‌شده و پس از متلاشی شدن درون مخزن فروریخت که درنهایت 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 تشکیل‌شده حدود ۵۰۰ متر بدون آنکه دچار حریق شود در محیط پخش شده بود(۱۴).

در خصوص ارزیابی ایمنی سیستم ها با استفاده از شبکه های بیزین نیز تاکنون مطالعات گوناگونی صورت

1 Liquified petroleum gas

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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

در سال ۲۰۲۱ گو و همکاران(۵) روش تجمیع شباهت آراء بهبودیافته (Improved SAM[1]) را به‌منظور به دست آوردن احتمالات فازی در شبکه‌های بیزین برای اولین بار ارائه کردند. این روش نه‌تنها 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 ۲۴۲حادثه مخزن ذخیره اتمسفریک دسته‌بندی شد و با روش ارائه‌شده مدل‌سازی گردید و درنهایت عللی مانند پرشدگی بیش‌ازحد، پیروی نکردن از SOP[2] 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 کلرزنی 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 مدل‌سازی ریسک‌ها به‌وسیله شبکه بیزی مهم‌ترین علل حوادث مخزن نفت خام را خرابی Breathing valve، آسیب‌دیدگی بدنه مخزن و آب‌بندی نامناسب اطراف دریچه آدم‌رو[3] مخزن شناسایی شد.

در سال ۲۰۲۰ ین و لین(۷) در تحقیقی به ارزیابی ریسک یک مورد مخزن ذخیره‌سازی 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 کمّی سازی کردند. رویداد 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[4]، ارزش حصول ریسک[5] و اهمیت بحرانیت[6] صورت گرفت. نتایج نشان داد که حریق خارجی (مانند شعله باز)، صاعقه، بارهای الکترواستاتیک و جرقه ی 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 تحت‌فشار و بیشتر در حوزه مدل سازی پیامدهای حوادث و یا ارزیابی ریسک با استفاده از داده های تاریخی بوده است. در حالی که در مطالعه حاضر به دلیل نبود داده های خرابی منسجم از منطق فازی برای کمّی 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

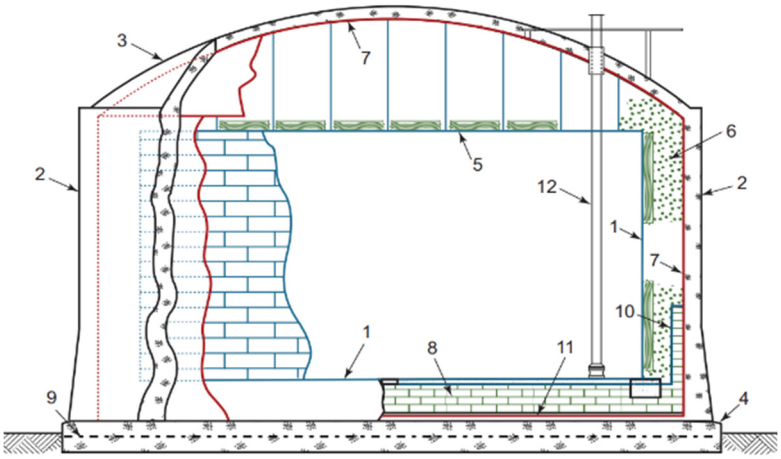
مطالعه سیستم و شناسایی خطرات

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

1 Similarity Aggregation method
2 Standard operating procedure
3 Manhole

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

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]



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)

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 می شود و فشار کاری مخزن ۰،۰۱ barg است. فشار تنظیم شده برای عملکرد شیرهای ایمنی ۱۳۰ mbarg و فشار عملکرد شیرهای خلاء شکن[1] نیز ۲mbarg- است.

شکل۱ ساختار کلی مخازن Full containment روزمینی و اجزای آن را نشان می‌دهد.

ازآنجایی‌که نشت حرارتی درون سیستم می‌تواند باعث تبخیر LPG شود می‌توان آن را در قالب بخارات تولید شده[2] 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 گردشی مایع[3] تعبیه شده است. این جریان عموماً دو وظیفه را بر عهده دارد:

۱. سرد نگه‌داشتن خطوط لوله‌ی انتقال LPG برای بارگیری[4] (به کشتی‌ها) که به‌منظور کاهش نرخ تبخیر هنگام عبور سیال سرد از این خطوط صورت می‌گیرد

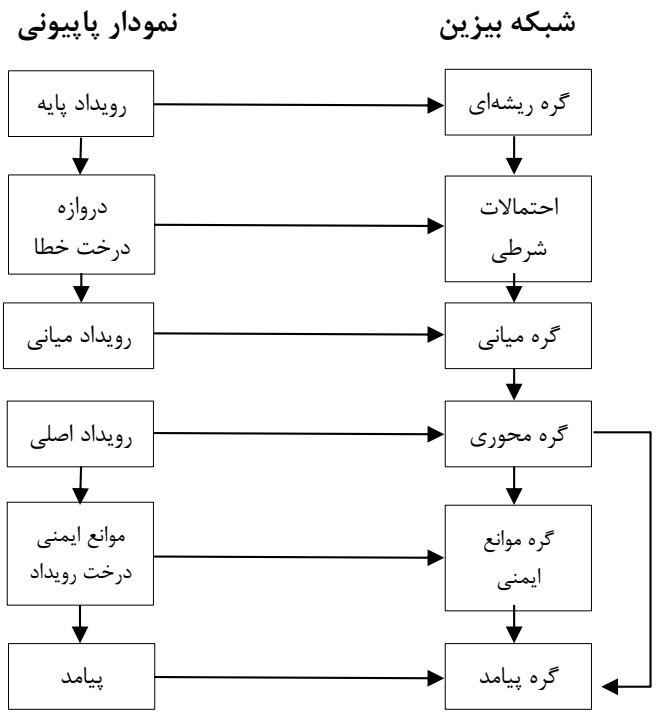
۲. سرد نگه‌داشتن سیال ذخیره‌شده درون مخزن

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 نمی توانند آنالیز شده و در مدل تجزیه‌وتحلیل مخاطرات آورده نمی شوند(۱۸). در تحقیق حاضر از کاربرگ های HAZID[5] 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

1 Vacuum breaker
2 Boil-Off gas (BOG)
3 Circulation
4 Jetty
5 Hazard identification

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]



شکل ۲. تبدیل نمودار پاپیونی به شبکه بیزین

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

نمودار پاپیونی و شبکه بیزین

نمودار پاپیونی[1] رامی توان ترکیبی از نمودار درخت خطا و درخت رویداد دانست. بدین‌صورت که با چرخش درخت خطا به‌صورت ساعت‌گرد و اتصال رویداد اصلی آن به درخت رویداد، نمودار پاپیونی شکل می‌گیرد. آنالیز پاپیونی هم در صنایع فرایندی و هم غیر فرایندی قابلیت استفاده دارد و توسعه و استفاده‌ی صحیح از آن مخصوصاً در صنایع فرآیندی می‌تواند تا حدود زیادی ایمنی فرایند را بهبود ببخشد(۱۹-۲۱).

هدف اصلی از آنالیز کمّی Bowtie محاسبه ی احتمال رویداد اصلی و پیامدهای حاصله است. به دست آوردن احتمال رویدادهای پایه و محاسبه ی رویداد اصلی و پیامدها معمولاً چالش‌برانگیز بوده و برای برآورد آنها نیاز است تا احتمال خرابی و یا میزان قابلیت اطمینان هرکدام از اجزای سیستم موجود باشد. به‌طورکلی برای به دست آوردن داده‌های مربوط به احتمال خرابی نیاز به جمع‌آوری داده های خرابی از تجهیزات به مدت طولانی و تجزیه‌وتحلیل این داده‌ها است(۲۲). درصورتی‌که داده ها ی خرابی برای تجهیزات مورد مطالعه به هردلیل موجود نباشد و یا دارای عدم قطعیت بالایی باشد، استفاده از منطق فازی برای تخمین احتمالات وقوع رویدادها پیشنهاد می شود(۱۱).

پس از ترسیم نمودار پاپیونی، برای تبدیل آن به شبکه بیزین رویدادهای پایه ای به گره‌های والد، رویدادهای میانی تبدیل به گره‌های میانی و پیامدها به عنوان گره‌های فرزند در شبکه بیزین وارد می شوند. روش تبدیل نمودار پاپیونی 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 می کند.

$$P(A|B)=\frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \qquad (۱)$$

در این فرمول عبارت P(A|B) به‌عنوان احتمال پسین[2] شناخته می شود که با دانستن احتمالات پیشین رویدادهای A و B و همچنین P(B|A) که به‌عنوان مشاهدات جدید[3] شناخته می شود، قابل‌محاسبه است. در تحقیق حاضر که به‌عنوان مطالعات ایمنی شناخته

1 Bowtie

2 Posterior

3 New evidence

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

می شود فرمول بیز را می‌توان به‌صورت نشان داده شده در فرمول ۲ بازنویسی نمود(۱۰).

$$P(Effect|Cause)=\frac{P(Cause|Effect)P(Effect)}{P(Cause)} \quad (۲)$$

این فرمول بیان می دارد که احتمال وقوع یک پیامد در صورت وقوع علت آن، می‌تواند 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 ذوزنقه ای هستند. در تحقیق حاضر از اعداد فازی ذوزنقه ای استفاده شده است. علت این انتخاب از این جهت بوده که هنگام ترکیب اطلاعات از چندین متخصص، اعداد فازی ذوزنقه 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 ذوزنقه ای برای تجمیع نظرات کارشناسان مناسب تر باشند (۲۳). البته فرم توابع عضویت (مثلثی، ذوزنقه 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 درنظر گرفتن یک تابع عضویت و استفاده از دو روش مختلف تجمیع، نتایج مختلفی را بدست آوردند(۲۵).

اولین مرحله جهت براورد احتمالات رویدادهای پایه ای، انتخاب کارشناسان مربوطه جهت نظرخواهی است. در انتخاب کارشناسان سعی برآن 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 قطعیت‌هایی باشد که این امر معمولاً بسته به عوامل مختلفی مثل تجربه و تحصیلات است. این عدم قطعیت‌ها را می توان در پرسش‌نامه‌های جمع‌آوری‌شده از آن‌ها دریافت؛ خصوصاً زمانی که دو یا چند خبره در مورد یک سال جواب‌های 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 می‌گیرند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است به هرکدام از زیرمجموعه‌های این پارامترها، عددی اطلاق می‌شود تا با توجه به امتیازی که هر متخصص از هر بخش از طبقه‌بندی دریافت می‌کند امتیاز کل هر متخصص محاسبه شود.

پس‌ازآنکه امتیاز مربوط به همه متخصصان مشخص شد با استفاده از فرمول۳ فاکتور وزنی هر متخصص به دست می آید. فاکتور وزنی هر متخصص، روی اهمیتِ نظراتِ اعلام‌شده توسط ایشان در پرسشنامه تأثیر داده می‌شود(۵).

$$\text{فاکتور وزنی متخصص موردنظر}=\frac{\text{وزن محاسبه شده متخصص مورد نظر}}{\text{مجموع وزن محاسبه شده تمامی متخصصان}} \quad (۳)$$

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 ۷±۲ مورد باشد این بدان معناست که تعداد مناسب عبارات زبانی مورد نیاز برای یک انسان برای قضاوت مناسب بین ۵ تا ۹ است (۵،۲۵). کومار و همکاران (۲۶) پس از بررسی منابع و مطالعات گوناگون، بهینه ترین طیف برای ارزیابی ریسک را دسته بندی ۷تایی دانستند (و از آن برای ارزیابی ریسک جایگاه سوخت LPG استفاده کردند). علاوه بر آن مقیاس ۷ گانه زبانی قادر است تا مرز کاملا مشخصی برای توصیف احتمالات و همچنین بیان تفاوت‌های

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

جدول ۱. معیارهای وزن دهی کارشناسان(۵)

معیار	دسته‌بندی	امتیاز
عنوان شغلی	رئیس شیفت	۱۰
	مسئول شیفت	۸
	مهندس (ایمنی، فرایند، بهره‌برداری، 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
	کمتر از ۵ سال	۲
سطح	دکترا (PhD)	۱۰
تحصیلات	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

موجود به‌طور 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 هرکدام را نشان می‌دهد.

محاسبه درجه تشابه نظرات کارشناسان

بیشتر روش‌های مطرح‌شده به‌منظور اتفاق نظرات خبرگان تنها از وزن اختصاص‌یافته به خبرگان استفاده می‌کند. روش تجمیع شباهت بهبود یافته، یک روش هدفمند و قدرتمند بوده که نه‌تنها اهمیت نسبی خبرگان را در نظر می‌گیرد بلکه میزان توافق نسبی آراء آن‌ها را نیز در محاسبات دخیل می‌کند(۵).

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

$$S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) = 1 - \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} |a_i - b_i| \qquad (۴)$$

که در آن $S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v)$ 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 داشته‌اند.

محاسبه ی درجه ی توافق وزنی و نسبی

در این مرحله محاسبه درجه توافق وزنی (مطلق) توافق کارشناسان (WA) از طریق فرمول۵ صورت می گیرد.

$$WA(E_u) = \frac{\sum_{\substack{v=1 \\ v\neq u}}^{N} W(E_v) \cdot S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v)}{\sum_{\substack{v=1 \\ v\neq u}}^{N} W(E_v)} \qquad (۵)$$

که در این فرمول $W(E_v)$ وزن کارشناس v و $W(E_u)$ وزن کارشناس u است. درواقع این فرمول هسته ی اصلی روش تجمیع شباهت بهبودیافته است. همان‌گونه که پیش تر بیان شد دخیل کردن WA در محاسبات تجمیع آراء نتایج را منطقی‌تر و قابل‌اعتمادتر 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 فرمول۶ است.

1 Relative agreement degree

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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

واژه مربوطه	عدد فازی
خیلی کم(VL)	(۰/۲و۰/۱و۰و۰)
کم (L)	(۰/۳و۰/۲و۰/۲و۰/۱)
نسبتاً کم (ML)	(۰/۵و۰/۴و۰/۳و۰/۲)
متوسط (M)	(۰/۶و۰/۵و۰/۵و۰/۴)
نسبتاً زیاد (MH)	(۰/۸و۰/۷و۰/۶و۰/۵)
زیاد (H)	(۰/۹و۰/۸و۰/۸و۰/۷)
خیلی زیاد (VH)	(۱و۱و۰/۹و۰/۸)

$$RA(E_u)=\frac{WA(E_u)}{\sum_{u=1}^{M}WA(E_u)} \quad (۶)$$

محاسبه ی ضریب توافق عمومی

محاسبه ضریب توافق عمومی (CC[1]) که برای هر متخصص $E_u(u=1,2,\ldots,M)$ به‌صورت آورده شده در فرمول۷ صورت می گیرد.

$$CC(E_u)=\beta\cdot W(E_u)+(1-\beta)\cdot RA(E_u) \quad (۷)$$

در این فرمول β فاکتور حساسیت بوده و مقدار آن $0\le\beta\le1$ است. بر اساس مطالعات چن و همکاران(۲۷) مقدار β یک فاکتور مهم برای برقراری تعادل میان $RA(E_u)$ و درجه اهمیت وزن هر متخصص $W(E_u)$ است. تعیین مقدار β با صلاحدید کسی که مطالعه را انجام داده تعیین می‌شود. با توجه به مقاله ی گو و همکاران که مقدار β را برابر با ۰/۵ در نظر گرفته‌اند 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 می‌کند.

در این مرحله عدد فازی کلی (برای هر رویداد پایه ای) حاصل از تجمیع آراء کارشناسان به‌وسیله‌ی فرمول۸ به دست می آید

$$\tilde{R}_T=CC(E_1)\times\tilde{R}_1+CC(E_2)\times\tilde{R}_2+\cdots+CC(E_M)\times\tilde{R}_M \quad (۸)$$

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 به‌صورت یک عدد فازی است، فازی زدایی (دیفازی[2]) می شود.

در واقع فرایند تولید نتایج کمّی از منطق فازی را فازی زدایی می نامند(۲۸). تاکنون روش‌های مختلفی مانند مرکز سطح (CoA[3]) (۲۹)، روش چن و هوانگ (۳۰) و ارزش‌گذاری وزنی آلفا (۳۱) جهت فازی زدایی پیشنهادشده 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[4] در خروجی آن مشاهده نمی شود(۱۱).

اگر عدد فازی ذوزنقه 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).

$$\mu_{\sim R}(x)\begin{cases}0 & x<r_1\\ \dfrac{x-r_1}{r_2-r_1} & r_1\le x<r_2\\ 1 & r_2\le x<r_3\\ \dfrac{r_4-x}{r_4-r_3} & r_3\le x<r_4\\ 0 & x\ge r_4\end{cases} \quad (۹)$$

به‌منظور غیر فازی سازی عدد فازی از فرمول۱۰ می توان استفاده نمود(۵،۲۸).

$$FPS=\frac{\int_{r_1}^{r_2}\frac{x-r_1}{r_2-r_1}xdx+\int_{r_2}^{r_3}xdx+\int_{r_3}^{r_4}\frac{r_4-x}{r_4-r_3}}{\int_{r_1}^{r_2}\frac{x-r_1}{r_2-r_1}dx+\int_{r_2}^{r_3}dx+\int_{r_3}^{r_4}\frac{r_4-x}{r_4-r_3}dx}= \quad (۱۰)$$

$$\frac{1}{3}\frac{(r_4-r_3)^2-r_4r_3-(r_1+r_2)^2+r_1r_2}{(r_4+r_3-r_1-r_2)}$$

1 Consensus coefficient
2 Defuzzification
3 Center of area
4 Jump

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

مرحله دوم غیر فازی سازی شامل تبدیل عدد امکان فازی(FPS) به احتمال شکست فازی[1](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. درواقع همین مقادیر مربوط به‌احتمال شکست هر رویداد پایه درون گره‌های والد[2] در شبکه بیزین می‌شود و درنهایت نرم‌افزار محاسبات مربوطه را انجام می‌دهد.

$$K=\left[\left(\frac{1-FPS}{FPS}\right)\right]^{\frac{1}{3}}\times 2.301$$
$$FFP=\begin{cases}\frac{1}{10^{k}} \; if \; FPS\neq 0\\ 0 \;\; if \; FPS=0\end{cases} \qquad (۱۱)$$

شناسایی رویدادهای پراهمیت

به منظور شناسایی پراهمیت ترین گره های شبکه ی بیزین، گره رویداد اصلی به‌عنوان گره شاهد[3] در نظر گرفته شده است درنتیجه 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 درنهایت احتمالات مربوط به رویدادهای پایه را محاسبه می‌کند که این مقدار درواقع 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.

$$RoV=\frac{\text{FBNpo}-\text{FBNpr}}{\text{FBNpr}} \qquad (۱۲)$$

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[4]، از دست رفتن محتوی ظرف ذخیره[5] یا همان نشت از سیستم ذخیره سازی انتخاب گردید (۲۱). این 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[6] 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[7]، شیرهای ایمنی و دخالت اپراتور) شناسایی شد. در مرحله بعد روابط علت و معلولی بین عوامل شناسایی شده توسط درخت خطا مدل می‌گردد. درصورتی‌که حفاظ برای یک علت وجود داشته باشد، خطر و رویداد «نقص در عملکرد حفاظ» توسط دروازه‌ی AND به یکدیگر متصل می‌شوند و درصورتی‌که 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 تفضیل آورده شده اند. همان‌گونه که در شکل۲ 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

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)

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

جدول ۳. تشریح رویدادهای میانی در درخت خطا

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

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 وکیوم شدن لایه داخلی مخزن، TG3 فاکتورهای خارجی، TG4مخاطرات ساختاری لایه داخلی و TG5 علل عمومی نشت از خط لوله ورودی را نشان می دهند.

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 دولایه ی مخزن است بنابراین این عامل به عنوان رویداد میانی مستقیما به رویداد اصلی متصل گردیده است.

رویداد میانی TG7 درخت خطای مربوط به رویداد نشت 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 نشت 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 نشت از خط خروجی مخزن تنها با وجود روشن بودن پمپ‌های درون مخزن میسر است. در جدول۳ 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 نقطه‌جوش معمولی و یا پروپان و بوتان سرد شده را[1] نشان می دهد(۳۳). پس از تعیین درخت رویداد، از کارشناسان برای برآورد احتمال احتراق تاخیری، فوری و محصور بودن فضا توسط پرسشنامه نظرخواهی شد.

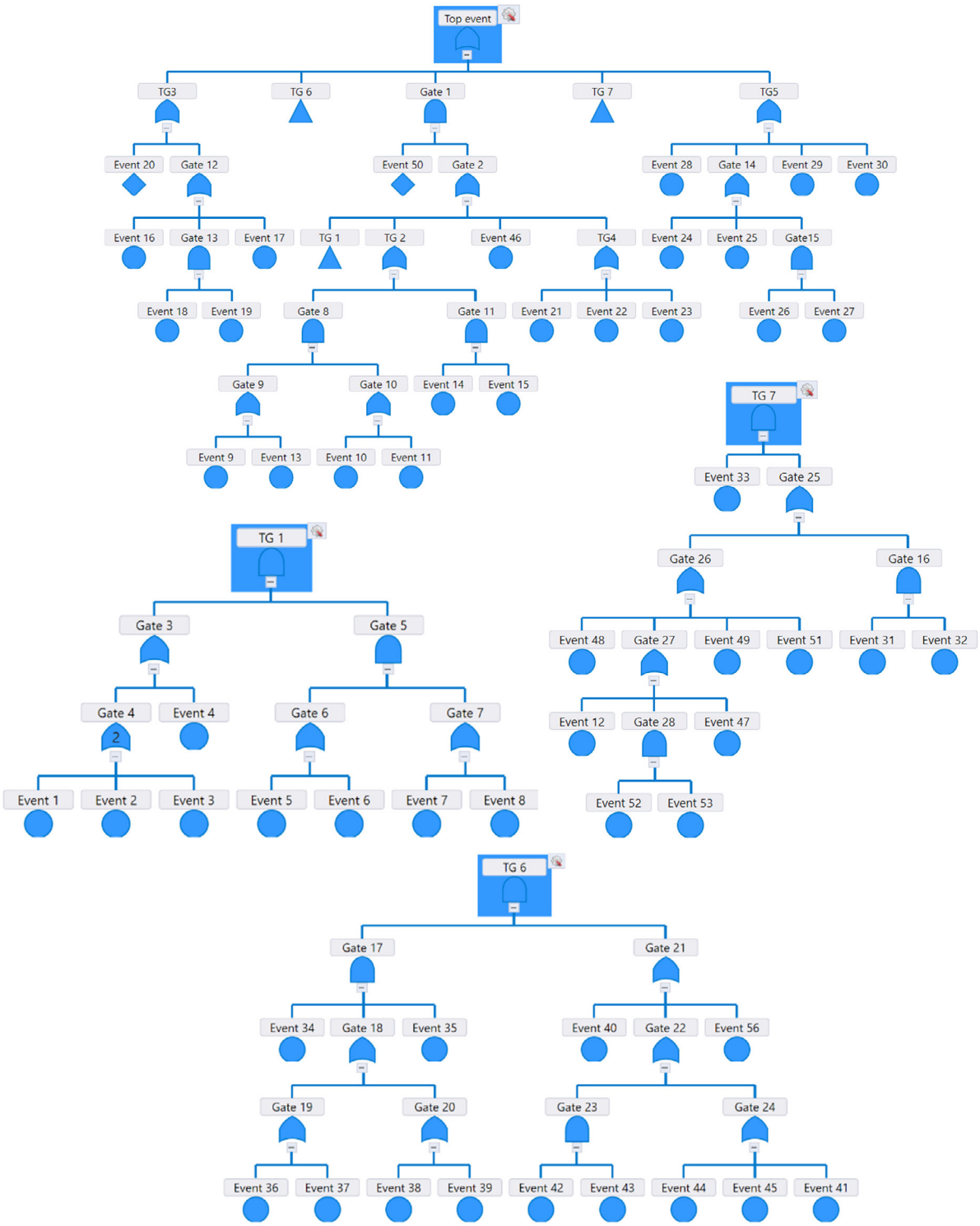
برآورد احتمالات فازی

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 جدول۴ صورت گرفته است.

1 Refrigerated

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]



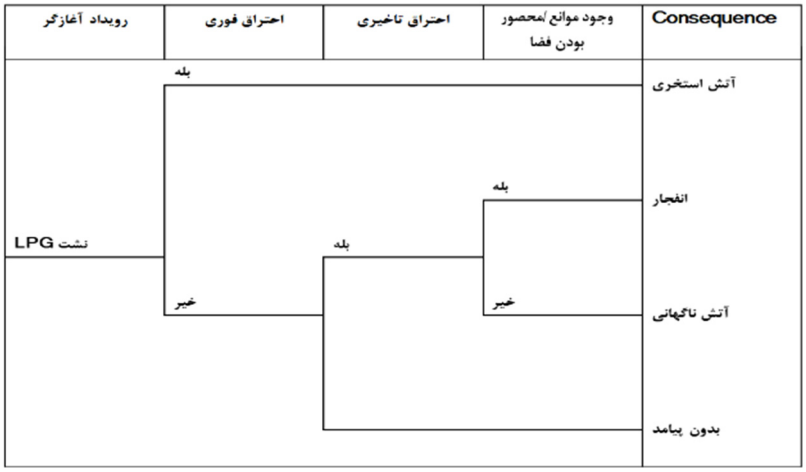
شکل ۳. درخت خطای مخزن مورد مطالعه

شبکه بیزین

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 دروازه های 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

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]



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
متخصص۱	مهندس ایمنی	کارشناسی ارشد	کمتر از ۵ سال	کمتر از ۳۰ سال	۹	۰/۲
متخصص۲	مسئول شیفت	دکترا	بین ۲۰ تا ۲۹ سال	بین ۴۰ تا ۴۹ سال	۱۶	۰/۳۵
متخصص۳	مهندس فرایند	لیسانس	بین ۱۰ تا ۱۹ سال	بین ۴۰ تا ۴۹ سال	۱۲	۰/۲۷
متخصص۴	اپراتور	لیسانس	بین ۶ تا ۹ سال	بین ۳۰ تا ۳۹ سال	۸	۰/۱۸

گره‌های پایه در آن صورت گرفته است. همان‌گونه 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 رویداد ها

پس از واردکردن مقادیر احتمال برای گره های پایه در نرم افزار، احتمالات مربوط به رویداداصلی، رویدادهای میانی و همچنین پیامدهای مربوطه قابل محاسبه خواهد بود. در جدول۵ این مقادیر گزارش شده است.

شناسایی پراهمیت ترین گره های شبکه بیزین

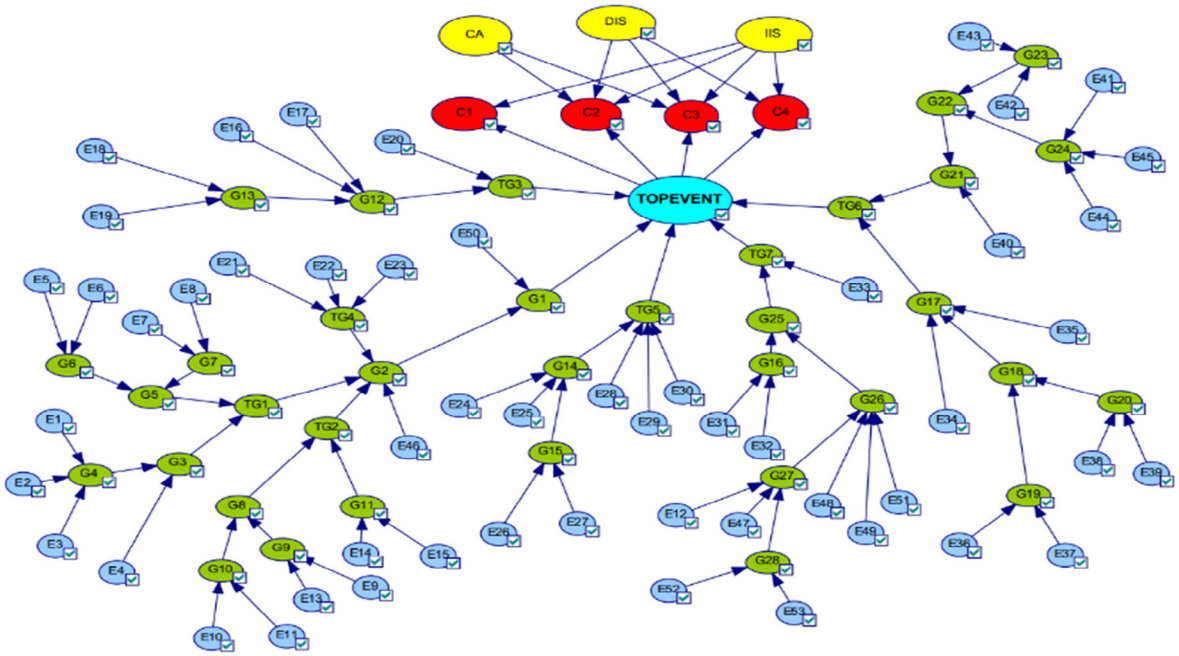
از آنجایی که پارامترRoV برای هر گره به طور جداگانه محاسبه می گردد بنابراین مقدار متناظر برای ۱۵ گره با بالاترین اهمیت در شکل ۶ آورده شده است.

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 بالاترین اولویت هستند. این رویدادها بیشترین تاثیرات 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.

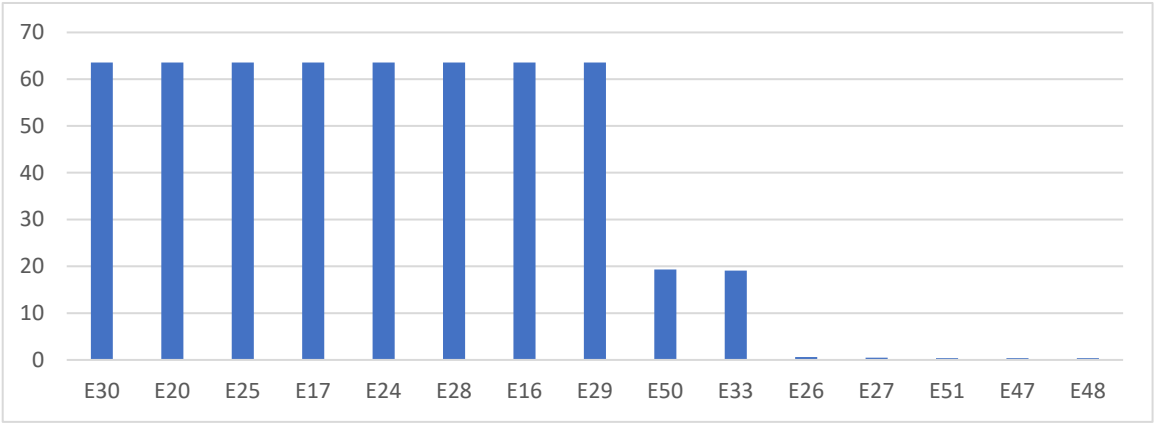
بحث

پس از انجام محاسبات مربوط به تعیین احتمال برای انواع رویدادها، مقدار احتمال برای رویداد اصلی نشت از سیستم ذخیره سازیLPG مقدار 1.5E-02 و برای پیامدهای مربوطه اعم از آتش استخری، انفجار، آتش ناگهانی و رهایش ایمن به ترتیب7.58E-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.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]



شکل ۵. شبکه بیزین مخزن LPG



شکل ۶. مقادیر RoV برای ۱۵ گره اول

ارزیابی ایمنی مخازن Full containment تاکنون به صورت بسیار محدود صورت گرفته است؛ همچنین از آن جایی که مخزن مورد مطالعه در هر تحقیق شرایط فرایندی، محیطی و ساختاری ویژه ی خود را دارد نتایج مربوط به آن نیز مخصوص همان مخزن ارائه می گردد اما پس از بررسی برخی از مطالعات مشابه با تحقیق حاضر و بررسی یافته های آن ها، برخی شباهت بین نتایج کار آن ها 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 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 رمضانی 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

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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[۱]	IIS	۴/۹E-۰۴
منابع احتراق تأخیری[۲]	DIS	۳/۹E-۰۴
وجود موانع/محصور بودن فضا[۳]	CA	۱/۸۱E-۰۱

[۱] Immediate ignition source
[۲] Delayed ignition source
[۳] Congested area

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 می شود عموم علل پراهمیت شناخته شده که می توانند منجر به حادثه در مخزن مورد مطالعه حاضر شوند مربوط به قسمت های خارج از جداره های مخزن یعنی لوله های متصل به مخزن هستند. این در حالیست که مارکوفسکی و سیوتا (۳۶) نیز در سال ۲۰۱۷ با استفاده از دو روش ماتریس ریسک سنتی و منطق فازی مهم ترین 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، محتمل ترین 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 مهم ترین 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[۱] 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 گرفته اند. همچنین لایه بیرونی نیز از قسمت‌های پراهمیت سیستم شناخته شده است. این امر را می توان به دلیل نقش مهم این لایه در حفاظت از لایه داخلی از خطرات خارجی و 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 می توان در وجود افزونگی[۲] های زیاد در سیستم های ایمنی مخزن مانند سیستم کنترل پایه، سیستم ابزاردقیق ایمنی و شیرهای ایمنی دانست.

در نهایت پس از بررسی نهایی و شناسایی گره های 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 عملیات های تعمیر و نگهداری و رعایت نکات ایمنی حین بستن اتصالات. بستن بیش از حد پیچ ها می تواند باعث وارد آمدن بار بیش از حد به گسکت ها شده و یا با افزایش خستگی در تجهیزات قدیمی باعث ترک خوردن در آنها بشود. از طرف دیگر شل بسته شدن اتصالات می تواند علت مستقیم نشت از فلنج ها باشد. انتخاب نوع صحیح گسکت، کیفیت مناسب و نحوه صحیح نصب آن ها نیز باید طی دوره های آموزشی به پرسنل مربوطه آموزش و یا بازآموزی گردد.

• استفاده از برخی از تجهیزات مانند محافظ اسپری فلنج[۳] بر روی اتصالات فلنجی. محافظ اسپری فلنج یک وسیله حفاظتی است که بر روی فلنج ها و شیرها نصب می‌شود تا از آسیب به کارگران، تجهیزات اطراف یا محیط در حوادث ناخواسته ی ناشی از پاشش یا نشت مواد

1 Natural Hazards Triggering Technological Accidents (Natech)
2 Redundancy
3 Spray flange shield

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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 نشتی 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 جریانات هوایی نیز است. همچنین گشت های منظم و بازرسی های دوره ای به منظور شناسایی احتمالی نشتی ها پیشنهاد می گردد.

• فضاهای محصوری که در آنها پتانسیل تجمع گاز وجود دارد و از نظر فرایندی بااهمیت 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 جریانات 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 معمولا استاندارد هایی در طراحی مانند نسبت ارتفاع به قطر و همچنین میزان بیشته شتاب زلزله در نظر گرفته می شود. با این حال برای کاهش احتمال آسیب رسانی زلزله یکی از بهترین راه ها مهار کردن[1] 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 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 نقشه‌برداری یا اصلاح زمین قبل از ساخت‌وساز

• وارد آمدن تشعشات حرارتی بیش از ۳۲ کیلووات بر مترمربع بر بدنه بیرونی

• خرابی طولانی‌مدت 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 نشتی شود. در این حالت انجام تست های غیرمخرب مانند تست اولتراسونیک(UPE[2]) و GPR[3] 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 کاربرگ 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

1 Anchoring

2 Ultrasonic Pulse Echo

3 Ground Penetrating Radar

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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.

ازجمله استفاده‌هایی که در این تحقیق از شبکه‌های بیزین شد تعیین علل و فاکتورهای پراهمیت در وقوع حادثه برای سیستم است. به‌طورمعمول این نوع از آنالیز بدین‌صورت است که تأثیر خرابی یک جزء (یک علت خرابی) را روی خرابی کل می‌سنجد بدین معنی که چنانچه یک جزء از سیستم دچار خرابی بشود با انجام آنالیز، مشخص می شود که این خرابی تا چه اندازه می‌تواند 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 غیرضروری کاهش می یابد.

همچنین با علم به این دانش می‌توان طراحی استراتژی های مدیریتی را بهبود بخشید و از اطمینان واقع‌گرایانه‌تری نسبت به عملکرد سیستم‌های حیاتی بهره برد. علاوه بر آن با استفاده از تکنولوژی‌های مناسب و روش‌های مدیریت اثربخش می‌توان عوامل مهم شناسایی‌شده را پایش و با اطمینان از این که به‌درستی کار می‌کنند، از وقوع حوادث پیشگیری نمود(۴۴).

باتوجه‌به دامنه و شرایط تحقیقاتی مطالعه حاضر، محدودیتی مانند کمبود داده‌های خرابی منسجم جهت برآورد احتمالات رویدادهای پایه ای وجود داشت که با استفاده از منطق فازی و روش تجمیع شباهت بهبودیافته برطرف شد. محدودیت دیگر دسترسی محدود و زمان بر شدن جمع‌آوری اطلاعات باتوجه‌به 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 نقشه‌های هوایی جهت بررسی موقعیت جغرافیایی مخزن، برطرف گردید.

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. بدین‌وسیله از مدیریت محترم واحد HSE و کارشناسان گران‌قدر پالایشگاه مورد مطالعه که در تحقیق حاضر اینجانب را راهنمایی و مشاوره نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

REFERENCE

1. 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.
2. NFPA TC of L by. NFPA 58-Liquified petroleum gas code. 2020;
3. Prasun Kumar Roy, Arti Bhatt, Bimal Kumar, Sarvjeet Kaur CR. Consequence and risk assessment: Case study of an ammonia storage facility Prasun. 2011;
4. 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.
5. 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.
6. 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
7. 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).
8. Khan F, Abbasi S. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. J loss Prev Process Ind. 1998;
9. 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;
10. Unnikrishnan G. Oil and Gas Processing Equipment, Risk Assessment with Bayesian Networks. 2020.
11. Pouyakian M, Jafari MJ, Laal F, Nourai F, Zarei E. A comprehensive approach to analyze the risk of floating

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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
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
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
31. Detyniecki M, Yager RR. Ranking fuzzy numbers using α-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. Vílchez 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

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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 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.ress.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.ress.2018.05.017

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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

رویداد پایه	شرح رویداد پایه	متخصص ۱	متخصص ۲	متخصص ۳	متخصص ۴	FFP (FBN prior)	FBN posterior	ROV
E1	وقوع خرابی در LAHH-41	ML	M	ML	ML	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	۰
E2	وقوع خرابی درLAHH-42	ML	M	ML	ML	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	۰
E3	وقوع خرابی درLAHH-43	ML	M	ML	ML	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	۰
E4	عدم بسته شدن اضطراری جریان گردشی بازگشتی به مخزن (SDV-۱۱۱)	ML	L	ML	ML	۰/۰۰۰۹۴۴	۰/۰۰۰۹۴۴	۰
E5	سهل‌انگاری اپراتور در واکنش به آلارم	MH	H	MH	M	۰/۰۱۴۶۰۱	۰/۰۱۴۶۰۱	۰
E6	عدم آلارم صحیحLAH-502	ML	M	ML	M	۰/۰۰۲۹۴۲	۰/۰۰۲۹۴۲	۰
E7	خرابی HS-040 حین پر شدن مخزن	L	ML	M	ML	۰/۰۰۱۶۰۵	۰/۰۰۱۶۰۵	۰
E8	خرابی و عدم بسته شدن ولو PV-002	M	M	M	ML	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	۰
E9	حواس‌پرتی یا خطای اپراتور در خاموش کردن پمپ‌های بارگیری (P-101A/B/C)	MH	M	ML	MH	۰/۰۰۶۰۱۶	۰/۰۰۶۰۱۶	۰
E10	بسته ماندن ولو PV-001 بدلیل نقص مکانیکی یا خرابی سیستم کنترلی آن	M	M	M	ML	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	۰
E11	بسته شدن جریان برگشتی BOG از کشتی حین بارگیری	M	MH	M	M	۰/۰۰۵۵۳۲	۰/۰۰۵۵۳۲	۰
E12	خستگی خط لوله خروجی	L	ML	L	L	۰/۰۰۰۴۴۵	۰/۰۰۰۶۱۲	۰/۳۷۶۱۷۹۸
E13	خرابیPALL-43	ML	M	ML	ML	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	۰
E14	عدم عملکرد PSV042A	ML	M	M	M	۰/۰۰۴۰۲۷	۰/۰۰۴۰۲۷	۰
E15	عدم عملکردPSV042B	ML	M	M	M	۰/۰۰۴۰۲۷	۰/۰۰۴۰۲۷	۰
E16	زلزله	L	L	ML	L	۰/۰۰۰۴۰۸	۰/۰۲۶۳۴	۶۳/۵۵۹۲۱۳
E17	سونامی	VL	L	VL	L	۶/۶۵E-۰۵	۰/۰۰۴۲۹۳	۶۳/۵۵۹۲۱۴
E18	برخورد صاعقه به شیر ایمنی تخلیه مخزن	M	M	ML	M	۰/۰۰۳۷۸۸	۰/۰۰۴۵۷۷	۰/۲۰۸۳۲۰۳
E19	عدم وجود و یا خرابی سیستم صاعقه گیر	M	ML	ML	MH	۰/۰۰۳۲۹	۰/۰۰۴۰۷۹	۰/۲۳۹۸۱۷۶
E20	اقدامات خرابکارانه	L	L	L	VL	۰/۰۰۰۱۳۹	۰/۰۰۸۹۷۳	۶۳.۵۵۹۲۱۴
E21	خوردگی داخلی مخزن	M	ML	L	ML	۰/۰۰۱۳۷۱	۰/۰۰۱۵۳۸	۰/۱۲۱۸۰۸۹
E22	خستگی	ML	ML	L	ML	۰/۰۰۱۰۰۹	۰/۰۰۱۱۳۲	۰/۱۲۱۹۰۲۹
E23	نقص‌های جوشکاری	MH	ML	M	ML	۰/۰۰۳۴۵۹	۰/۰۰۳۸۸۱	۰/۱۲۲۰۰۰۶
E24	خستگی خط لوله ورودی	L	ML	L	L	۰/۰۰۰۴۴۵	۰/۰۲۸۷۲	۶۳/۵۵۹۲۱۳
E25	شکست ساپورت خطوط لوله ورودی	L	L	L	VL	۰/۰۰۰۱۳۹	۰/۰۰۸۹۷۳	۶۳/۵۵۹۲۱۴
E26	شکست سیستم حفاظت از خوردگی شامل پوشش ها، سیستم حفاظت کاتدی و بازدارنده‌ها	MH	M	M	MH	۰/۰۰۷۷۲۵	۰/۰۱۲۴۷	۰/۶۱۴۲۳۹۵
E27	عدم انجام به موقع بازرسی فنی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	H	M	MH	M	۰/۰۰۹۷۵۳	۰/۰۱۴۴۹	۰/۴۸۵۶۹۶۷
E28	برخورد وسایل نقلیه به خط ورودی	MH	M	ML	ML	۰/۰۰۳۶۳۶	۰/۲۳۴۷۳۷	۶۳/۵۵۹۲۱۳
E29	وقوع نقص ساختاری در ولوهای روی خط ورودی	ML	ML	M	M	۰/۰۰۲۷۹۶	۰/۱۸۰۵۰	۶۳/۵۵۹۲۱۳

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]

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

رویداد پایه	شرح رویداد پایه	متخصص ۱	متخصص ۲	متخصص ۳	متخصص ۴	FFP (FBN prior)	FBN posterior	ROV
E30	اتصالات نامناسب بین خط لوله ورودی، ولوها و غیره	MH	M	M	MH	۰/۰۰۷۷۲۵	۰/۴۹۸۷۲	۶۳/۵۵۹۲۱۴
E31	بسته بودن ولو دستیHC-45 بدلیل خطای اپراتور	M	MH	M	M	۰/۰۰۶۷۸۷	۰/۰۰۶۷۹۷	۰/۰۰۱۴۹۱
E32	باز نشدن ولو FCV-45A بدلیل نقص عملکردی در سیستم کنترلی آن (جریانMin flow پمپ)	M	M	M	ML	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۹۹	۰/۰۰۲۵۴۳۹
E33	عدم واکنش به موقع اپراتور برای توقف پمپاژ هنگام بارگیری	MH	M	ML	MH	۰/۰۰۶۰۱۶	۰/۱۲۰۷۸	۱۹/۰۷۶۴۶۳
E34	عدم عملکردPSV43A در فشار ۱۳۰ mbarg	ML	ML	ML	M	۰/۰۰۱۹۷۷	۰/۰۰۱۹۷۷	۰
E35	باز نشدن به موقعPV-41 و عدم تخلیه BOG به فلر	M	M	M	ML	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	۰
E36	خرابیPIAHH-42	ML	M	ML	ML	۰/۰۰۲۲۱۶	۰/۰۰۲۲۱۶	۰
E37	خرابی و عدم بسته شدنSDV-18	ML	L	ML	ML	۰/۰۰۰۵۴۴	۰/۰۰۰۵۴۴	۰
E38	خرابی سوییچ کنترلیHS-40	L	ML	M	ML	۰/۰۰۱۶۰۵	۰/۰۰۱۶۰۵	۰
E39	عدم بسته شدن ولوPV-02 بدلیل نقص در سیستم کنترلی	M	M	M	ML	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	۰
E40	وقوع Rollover	MH	M	ML	M	۰/۰۰۴۷۱۶	۰/۰۰۴۷۱۶	۰
E41	خرابی پمپ جریان Circulation	M	M	M	ML	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	۰
E42	وقوع حریق خارجی	L	M	L	L	۰/۰۰۰۷۵۳	۰/۰۰۰۷۵۳	۰
E43	نقص در عایق میانی مخزن	M	ML	ML	L	۰/۰۰۱۴۶۵	۰/۰۰۱۴۶۵	۰
E44	نقص در سیستم تبرید	ML	M	M	ML	۰/۰۰۳۱۱۳	۰/۰۰۳۱۱۳	۰
E45	بسته ماندن بیش از حد FCV-13A بدلیل نقص مکانیکی یا خرابی سیستم کنترلی آن	M	M	M	ML	۰/۰۰۳۹۸۹	۰/۰۰۳۹۸۹	۰
E46	خطای انسانی و سقوط پمپ درون مخزن حین عملیات لیفتینگ	MH	MH	M	MH	۰/۰۱۰۵۳۴	۰/۰۱۱۸۲۲	۰/۱۲۲۲۳۲۸
E47	شکست ساپورت خطوط لوله خروجی	L	L	L	VL	۰/۰۰۰۴۶۶	۰/۰۰۰۶۴۱	۰/۳۷۶۳۰۹
E48	برخورد وسایل نقلیه به خط خروجی	MH	ML	ML	M	۰/۰۰۳۲۶۹	۰/۰۰۴۴۹۹	۰/۳۷۶۲۶۱۹
E49	وقوع نقص ساختاری در ولوهای روی خط خروجی	ML	M	M	M	۰.۰۰۴۰۲۷	۰/۰۰۵۵۴۲	۰/۳۷۶۲۱۰۶
E50	نقص در ساختار لایه بیرونی	M	ML	ML	ML	۰/۰۰۱۹۵۵	۰/۰۳۹۷۶	۱۹/۳۳۷۵۹۶
E51	اتصالات نامناسب بین خط لوله خروجی، ولوها و غیره	MH	M	M	MH	۰/۰۰۷۷۲۵	۰/۰۱۰۶۳۲	۰/۳۷۶۳۱۰۷
E52	شکست سیستم حفاظت از خوردگی شامل پوشش ها، سیستم حفاظت کاتدی و بازدارنده‌ها	MH	M	M	MH	۰/۰۰۷۷۵	۰/۰۰۷۷۵۳	۰/۰۰۰۳۸۷۱
E53	عدم انجام به موقع بازرسی فنی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	H	M	MH	M	۰/۰۰۹۷۵۲	۰/۰۰۹۷۸۱	۰/۰۰۲۹۴۲۹

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.61186/ioh.20.2.20]