

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Risk Estimation of Chlorine Leakage from Storage Tanks via Integrated Fault Tree, Bayesian Network, and Dempster-Shafer Theory

Saber Moradi Hanifi¹, Somayeh Kheirandish Sarabi², Faeze Dehghan Banadaki², Hossein Ebrahimi¹, Kazem Samimi³, Mohammadhosein Keyvani Brojeni^{2*}

¹Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

²Student Research Committee, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³School of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 2025/11/24

Accepted: 2026/06/09

ABSTRACT

Introduction: The petrochemical industry faces substantial human and economic risks due to high-temperature, high-pressure operations and hazardous chemicals, such as chlorine. Given chlorine's acute toxicity, oxidizing properties, and severe corrosivity, its accidental release poses a risk of widespread and irreversible damage to human health and safety systems. This study proposes a risk framework by integrating BN and FTA with SAFETI 8.4 software and the Dempster–Shafer theory.

Material and Methods: This study was conducted in 2025 at a petrochemical plant. After identifying the hazards associated with chlorine storage tanks, a chlorine gas leakage scenario was selected and analyzed using FTA. The probabilities of basic events were estimated using the Dempster–Shafer theory to address uncertainty. The results were modeled using a Bayesian network in GeNIe 5.0. Risk estimation was performed with SAFETI 8.4 software incorporating meteorological data. Individual and societal risk curves were plotted using probit equations to determine the areas affected by individual risk and estimate the potential fatalities.

Results: Three chlorine gas release scenarios — leaks of 100 mm and 200 mm, and a catastrophic tank rupture — were analyzed using FTA for the top event. The FTA constructed for the top event “chlorine leakage” comprised 18 intermediate events and 50 basic events. Using the Dempster–Shafer theory, the estimated probabilities were $Bel=1.7405606\times10^{-6}$ and $Pl=8.294732\times10^{-6}$. Social risk curve analysis showed that the PI curve had higher frequencies than the Bel curve, and that PI exceeded the unacceptable risk level. At the same time, Bel remained mostly within the tolerable level (ALARP).

Conclusion: The results indicated that, under optimistic conditions, the social risk of chlorine leakage remained within ALARP, whereas under pessimistic conditions, it reached the unacceptable level. The integrated BN and D-S T reduced uncertainty, enabled accurate risk estimation and comprehensive evaluation, supported evidence-based decisions, and reduced accident probability while enhancing industrial safety and resilience.

Keywords: Chlorine, Dempster–Shafer theory, Uncertainty, Risk assessment, Bayes' theory, Storage tanks, Bayesian network

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Moradi Hanifi S., Kheirandish Sarabi S., Dehghan Banadaki F., Ebrahimi H., Samimi K., Keyvani Brojeni M.H. Risk Estimation of Chlorine Leakage from Storage Tanks via Integrated Fault Tree, Bayesian Network, and Dempster-Shafer Theory. *J Health Saf Work*. 2026; 16(2): 316-344.

* Corresponding Author Email: keyvanibrojeni.m@iums.ac.ir

Copyright © 2026 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

The process industries, including oil, gas, and petrochemicals, are among the most complex and high-risk industrial systems due to their inherent characteristics. These industries involve continuous operations under extreme temperatures and pressures, relying on sophisticated control and instrumentation systems, which makes them susceptible to major industrial accidents. While these sectors are essential for economic development and modern society, their hazardous nature implies that even low-frequency accidents can lead to extensive and often unacceptable human, economic, and environmental consequences. Consequently, process safety and risk management are not just technical but social necessities. Among the chemicals used in these industries, chlorine holds a critical position for safety. It is extensively used in manufacturing vinyl chloride monomer (VCM), polyvinyl chloride (PVC), and in large-scale disinfection operations. The physicochemical properties of chlorine—including high acute toxicity, strong oxidizing nature, extreme corrosiveness, and significant vapor pressure—mean that even minor leaks can rapidly escalate into severe chemical disasters with irreversible impacts. The proximity of many petrochemical units to urban areas further accentuates the urgency for precise prediction, monitoring, and management of chlorine release risks.

Recent years have seen a series of accidental chlorine releases globally, highlighting the vulnerability of safety systems. In 2022, a lifting equipment failure at the Port of Aqaba, Jordan, led to a liquid chlorine container rupture, resulting in 13 fatalities and over 250 injuries. Similarly, a 2020 incident in Pakistan resulted in the exposure of 137 individuals, leading to severe respiratory complications. Historical cases, such as the 2010 tank rupture in the United States and the catastrophic 2005 release in China—which resulted in 27 deaths and the evacuation of 10,000 people—underscore the lethal potential of this gas. In Iran, a significant incident occurred in 2017 in Dezful, where a leak from a 500-kg cylinder poisoned over 475 people, requiring 40 hospitalizations. These statistics emphasize that chlorine-related hazards remain a persistent threat to public health and industrial safety.

Risk assessment is a systematic process of prioritizing hazards based on their frequency and severity. In process industries, it serves as a

cornerstone of safety management, directly linked to operational sustainability and the prevention of major accidents throughout a plant's lifecycle. Traditional methodologies include HAZOP, FMEA, FTA, and ETA. For instance, Fault Tree Analysis (FTA) adopts a top-down approach to identify the causal relationships between basic failures and a specific top event, allowing for a quantitative estimation of failure probabilities. Despite their utility, these traditional methods often face challenges in accurately modeling the complex spatial and temporal aspects of chemical dispersions, necessitating the integration of advanced simulation tools to enhance the precision of consequence analysis.

Given the severe implications of chlorine releases, there is a critical need for integrated, intelligent risk management. This study aims to estimate the risk of chlorine storage tank leaks using a hybrid approach combining FTA, BN, and D-S Theory. FTA identifies structural causes, while D-S T mitigates data scarcity by fusing expert judgments. These inputs are then processed within a BN framework to quantify leak probabilities while accounting for conditional dependencies. Finally, consequence analysis is conducted using SAFETI 8.4. By combining population data, environmental parameters, and meteorological conditions, the model enabled quantitative estimation of individual and societal risks, as well as more realistic risk contours and fatality estimates based on probit equations. This integrated model provides a robust decision-support tool for enhancing industrial safety, emergency planning, and maintenance strategies in high-risk chemical environments.

2. MATERIAL AND METHODS

This research was conducted in 2025 at a petrochemical plant.

2.1 HazOP approach

A team of five experts conducted a Hazard and Operability (HazOP) study to identify hazards of the chlorine storage unit. Process hazards and operational deviations were systematically analyzed using HazOP and P&IDs. Generally, three scenarios were considered: fire, explosion, and toxic gas release. Chlorine is a nonflammable, highly toxic, and corrosive gas. Under normal conditions, it is gaseous, while under pressure, it is stored as a compressed liquid. Being heavier than air, chlorine accumulates in confined spaces.

Although not explosive or directly flammable, the most critical scenario was identified as chlorine gas leakage from tanks.

2.2 FTA method

In this study, the FTA method was utilized to investigate and analyze the causes of chlorine leakage from storage tanks. The analysis began with the definition of the top event, identified as chlorine leakage. After establishing the top event, the intermediate causes contributing to its occurrence were determined and hierarchically structured. These intermediate events were connected to the basic events through logical “AND” and “OR” gates. Boolean algebra principles were then applied to quantitatively assess the probabilities of both intermediate and top events based on Equations (1), (2), and (3).

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (1)$$

$$P_{And} = \prod_{j=1}^n p_j \quad (2)$$

$$P(TE) = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - P(MCS_j)) \quad (3)$$

2.3 D-S Theory

To estimate the probability of basic events and to combine expert opinions for the reduction and management of structural uncertainties, D-S T was utilized. This theory is founded on three fundamental concepts: the Basic Belief Assignment, the Belief Measure, and the Plausibility Measure.

The frame of discernment and its power set were defined according to Equations (4) and (5).

$$\theta = \{H_1, H_2, H_3, \dots, H_n\} \quad (4)$$

$$2^\theta = \{\emptyset, \{E_1\}, \dots, \{E_N\}, \{E_1, E_2\}, \dots, \{E_1, E_2, \dots, E_N\}, \dots, \theta\} \quad (5)$$

Subsequently, the mass, belief, and plausibility functions were calculated using Equations (6) through (10). The total mass of all subsets equals one, while the mass of the empty set equals zero. This evidence fusion process managed inconsistencies and enhanced data reliability.

$$m(\emptyset) = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{A \subseteq 2^\theta} m(A) = 1 \quad (7)$$

$$Bel(A) \leq p(A) \leq Pl(A) \quad (8)$$

$$Bel(A) = \sum_{B|B \subseteq A \neq \emptyset} m(B) \quad (9)$$

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B|B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (10)$$

2.4 BN

The probabilities of basic events represented by the Bel and Pl values were utilized within the Bayesian Network to determine the probability of the top event. Each node in the BN represents a basic event, and the arcs indicate probabilistic dependencies among variables. The estimation of the top event probability was performed using GeNIe software (version 5.0).

2.5 Consequence modeling

Finally, individual and social risks associated with the selected chlorine leak scenario were calculated using SAFETI software (version 8.4). Risk curves were plotted based on toxic impact intensity using the probit equation (Equation 11) to estimate potential human fatalities and assess the reduction of individual risk levels at various distances from the release source.

$$\Pr = k_1 + k_2 \ln(C^n \times t) \quad (11)$$

Meteorological data, including wind speed, atmospheric stability class, ambient temperature, relative humidity, and solar radiation flux, were obtained from a regional meteorological station and incorporated into the software for the summer season under day and night conditions.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, a comprehensive and integrated framework based on BN and D-S T was developed to estimate the risk arising from chlorine gas leakage from storage tanks. Through the HazOP technique, chlorine gas leakage was identified as the most critical hazardous scenario, including leak diameters of 100 mm and 200 mm, as well as catastrophic rupture. Subsequently, using FTA, the top event was defined as “chlorine gas leakage from the tank,” comprising 50 basic events and 18 intermediate events originating from mechanical, process, and human causes. The overall fault-tree structure represented in the BN for Bel and Pl values is illustrated in Figure 1.

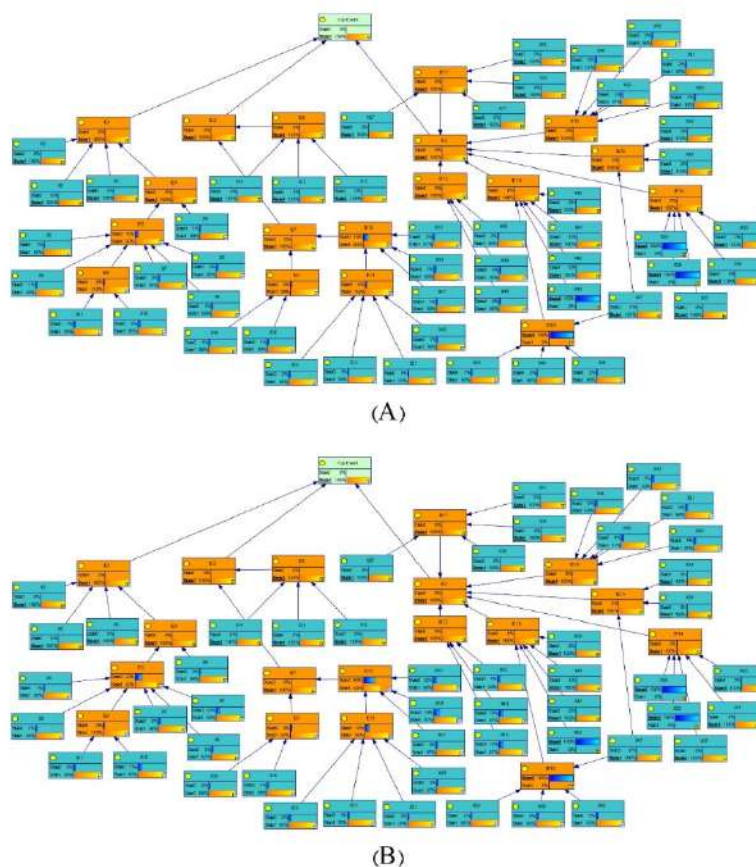


Fig. 1: FTA structure within BN corresponding to Bel (A) and Pl (B) values.

Table 1: Estimated Bel and Pl probabilities for the Top Event

Top Event	Bel Probability	Pl Probability
Chlorine leakage from Storage Tank	1.7405606×10^{-6}	8.2924732×10^{-6}

Subsequently, D-S T was applied to manage epistemic uncertainty in expert judgments by calculating Bel and Pl functions for each basic event. The probability of the top event is obtained in Table 1.

The Bel and Pl levels were integrated into BN structure in GeNIe v5.0 to dynamically model cause-and-effect level. Quantitative risk assessment using SAFETI 8.4 and probit equations illustrated that while the Bel-based contours lie within the ALARP (tolerable) level, the Pl-based contours extend into the unacceptable level. The individual risk contours confirmed a decrease in hazard radius with increasing distance, consistent with industrial chlorine release in Figure 2.

The BN approach effectively reduced uncertainty and improved the accuracy of risk estimation relative to conventional probability-based fault tree analysis. Consistent results were reported by Hamza et al. (2015), who demonstrated that integrating fuzzy FTA into Bayesian structures improves probabilistic reasoning in complex process systems. Likewise, the D-S T approach proved efficient in combining expert judgments and minimizing inconsistencies in safety data, as confirmed by Guo et al. (2023).

Figure 3 illustrates the social risk contours, where panel (A) represents the social risk contour based on Bel values, and panel (B) shows the social risk contour based on Pl values. These contours

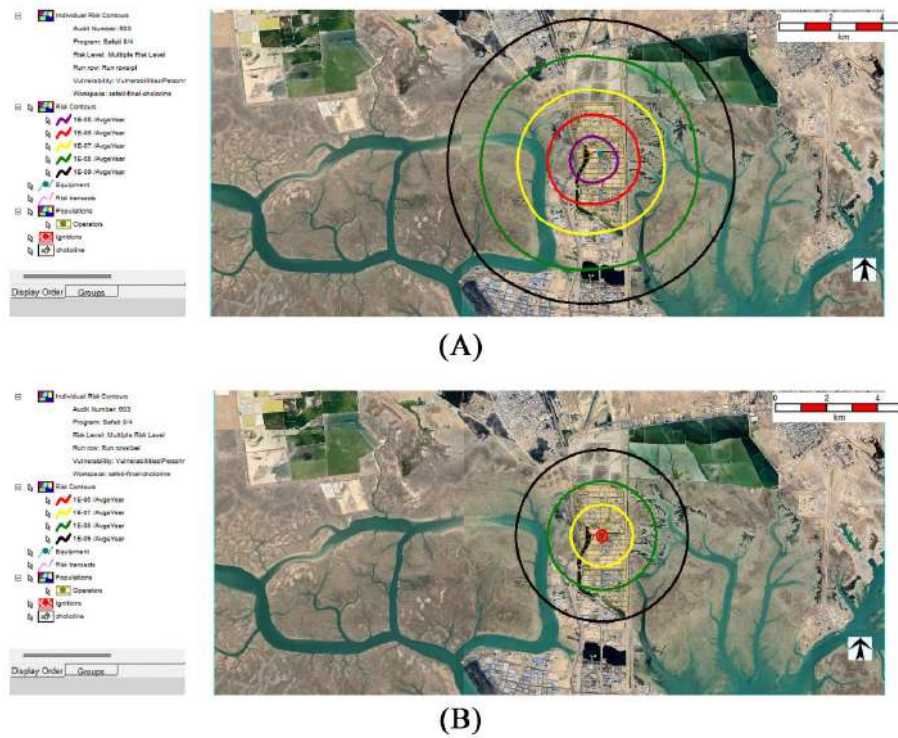


Fig. 2: Profiles of individual risk level variations at different distances based on Bel (A) and Pl (B) values.

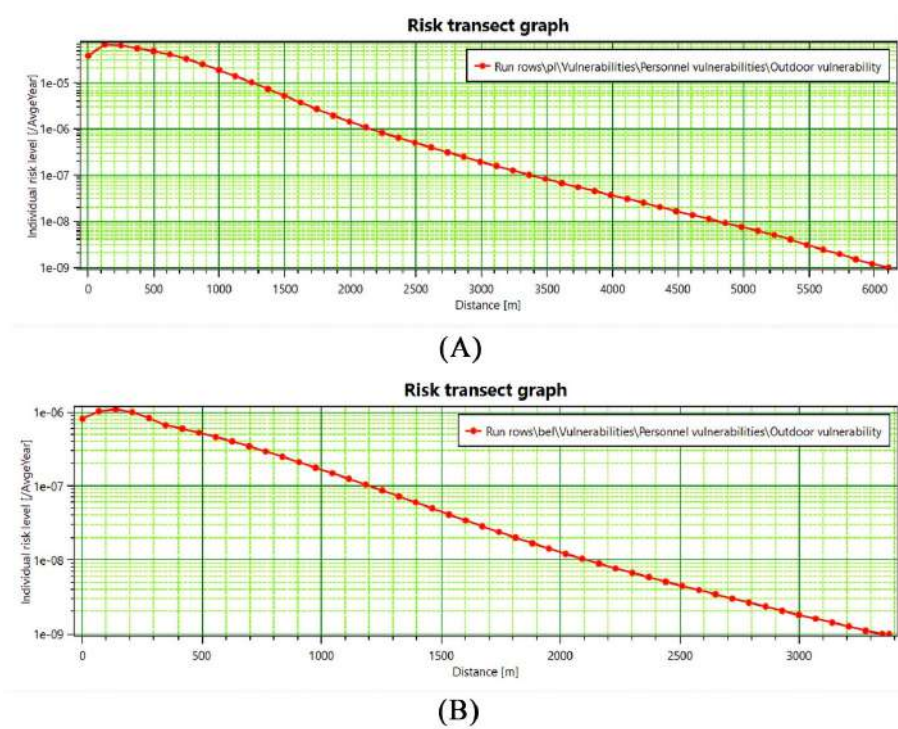


Fig. 3: (A) social risk contour based on Bel, (B) social risk contour based on Pl.

demonstrate the relationship between frequency rate and fatality number in accordance with the UK ALARP criteria.

This model provides a robust framework for chlorine leakage risk analysis. However, incorporating IoT-based sensors for continuous operational and meteorological data could significantly enhance spatial and temporal accuracy. Despite this, the integrated DST–BN methodology offers an innovative, evidence-driven framework that advances probabilistic reasoning and supports safer industrial decision-making under uncertainty.

4. CONCLUSIONS

The results indicated that, under optimistic conditions, the social risk level associated with chlorine leakage from storage tanks remained within the tolerable range. However, under pessimistic conditions, this level tended toward the unacceptable range. The integrated framework built upon BN and D–S T combines probabilistic analysis and uncertainty reasoning, enabling a more precise and realistic estimation of risk. With its ability to reflect variations in process conditions and data accuracy, this hybrid approach serves

as a scientifically efficient tool for risk analysis, continuous monitoring, and management in hazardous-material storage systems—particularly in chlorine tanks, where rapid detection and mitigation of leakage scenarios are essential to ensure overall process safety and industrial resilience.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors sincerely express their gratitude to the Vice-Chancellor for Research and Technology at Iran University of Medical Sciences

6. ETHICAL CODE

This research was conducted with the ethical approval code (IR.IUMS.REC.1404.549) obtained from the Vice-Chancellor for Research and Technology at Iran University of Medical Sciences.

7. FUNDING

The authors disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: This research was supported by the Vice-Chancellor for Research and Technology of Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

تخمین ریسک نشت مخازن ذخیره سازی کلر با رویکرد تلفیقی درخت خطا، شبکه بیزین و تئوری دمستر شافر

صابر مرادی حنیفی^۱، سمیه خیراندیش سرابی^۲، فائزه دهقان بنادکی^۲، حسین ابراهیمی^۱، کاظم صمیمی^۲،
محمدحسین کیوانی بروجنی^{*۲}

^۱مرکز تحقیقات بهداشت کار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۲کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
^۳گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۹

چکیده

مقدمه: صنایع پتروشیمی به دلیل اجرای فرایندها در شرایط دما و فشار بالا و به کارگیری مواد خطرناک مانند کلر، با ریسک‌های انسانی و اقتصادی قابل توجهی روبه‌رو هستند. انتشار کلر به واسطه ویژگی‌های سمی و خورنده، اثرات جدی بر ایمنی و سلامت دارد. این پژوهش با هدف برآورد ریسک، از ترکیب شبکه‌های بیزین، تحلیل درخت خطا و نظریه دمپستر-شافر بهره گرفته است. به کارگیری دیدگاه خبرگان در قالب نظریه دمپستر-شافر دقت تحلیل را افزایش می‌دهد. رویکرد تلفیقی ارائه شده با ارزیابی جامع ریسک، زمینه تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد را فراهم کرده و به بهبود ایمنی و تاب‌آوری صنعتی کمک می‌کند.

روش کار: این پژوهش در سال ۱۴۰۴ در یک واحد پتروشیمی انجام شد. پس از شناسایی مخاطرات، سناریوی نشت گاز کلر انتخاب و با استفاده از FTA تحلیل گردید. احتمال رویدادهای پایه با نظریه دمپستر-شافر برآورد شد تا عدم قطعیت کنترل گردد. نتایج به کمک نرم‌افزار GeNIe 5.0 در شبکه بیزین مدل‌سازی شد. تخمین ریسک در نرم‌افزار SAFETI 8.4 انجام شد و منحنی‌های ریسک فردی و جمعی براساس معادلات پروبیت ترسیم گردید تا محدوده متأثر از ریسک فردی و میزان تلفات برآورد شود.

یافته‌ها: سناریوی نشت گاز کلر با قطرهای ۱۰۰ میلی‌متر، ۲۰۰ میلی‌متر و گسیختگی کامل مخزن به عنوان سناریوهای محتمل انتخاب شدند. در FTA، رویداد اصلی نشت گاز کلر تعریف گردید که شامل ۱۸ رویداد میانی و ۵۰ رویداد پایه بود. احتمال رویداد اصلی در مقادیر Bel و Pl به ترتیب 1.0×10^{-6} و 1.74×10^{-6} و 2.92×10^{-6} محاسبه شد. در مقادیر Pl بخشی از منحنی ریسک در ناحیه غیرقابل قبول قرار دارد، در حالی که در مقادیر Bel منحنی ریسک عمدتاً در محدوده قابل تحمل قرار دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد منحنی ریسک جمعی در شرایط خوش‌بینانه در محدوده قابل تحمل و در شرایط بدبینانه در ناحیه غیرقابل قبول قرار دارد. چارچوب ترکیبی شبکه بیزین و نظریه دمپستر-شافر با کاهش عدم قطعیت، ارزیابی دقیق‌تر و اثربخش ریسک مخازن کلر را امکان‌پذیر می‌سازد.

کلمات کلیدی: کلر، نظریه دمپستر-شافر، عدم قطعیت، ارزیابی ریسک، تئوری بیز، مخازن ذخیره، شبکه بیزین

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: keyvanibrojeni.m@iums.ac.ir

مقدمه

۱. اهمیت کلا در صنایع فرآیندی

صنایع فرآیندی از جمله صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، به دلیل ماهیت ذاتی فرآیندهای عملیاتی خود، از پیچیده‌ترین و پرریسک‌ترین سیستم‌های صنعتی به‌شمار می‌روند. وجود فرآیندهای تحت دما و فشار بالا، وابستگی گسترده به سامانه‌های کنترلی و ابزار دقیق پیچیده، و کارکرد پیوسته واحدها، این صنایع را مستعد بروز حوادث بزرگ صنعتی می‌سازد (۱). این صنایع از ارکان اساسی توسعه اقتصادی و شکل‌گیری جوامع مدرن محسوب می‌شوند و نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین مواد اولیه، انرژی و ایجاد اشتغال دارند (۲). با این حال، ماهیت پرخطر آن‌ها موجب می‌شود که وقوع حوادث صنعتی، حتی با فراوانی کم، پیامدهای انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده و بعضاً غیرقابل‌قبولی به‌دنبال داشته باشد (۳). از این رو، مدیریت ریسک و ایمنی فرآیند در صنایع فرآیندی، نه تنها یک الزام فنی، بلکه یک ضرورت اجتماعی محسوب می‌شود. در میان مواد شیمیایی مورد استفاده در صنایع پتروشیمی و پالایشگاهی، کلا جایگاهی ویژه از منظر ایمنی و ریسک دارد. این ماده به‌طور گسترده در فرآیندهای تولیدی نظیر تولید مونومر وینیل کلرید، پلی‌وینیل کلراید و همچنین در عملیات گندزدایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کلا، از جمله سمیت حاد بالا، خاصیت اکسیدکنندگی قوی، خورندگی شدید و فشار بخار قابل‌توجه، سبب می‌شود که حتی نشت‌های جزئی آن نیز بتوانند به سرعت به حوادث شیمیایی جدی با پیامدهای جبران‌ناپذیر انسانی و اقتصادی منجر شوند (۴، ۵). نزدیکی برخی از واحدهای پتروشیمی به مناطق شهری، اهمیت پیش‌بینی، پایش و مدیریت ریسک انتشار کلا را افزایش می‌دهد.

۲. آمار حوادث ناشی از کلا در جهان و ایران

در سال‌های اخیر، مجموعه‌ای از حوادث ناشی از انتشار تصادفی گاز کلا در کشورهای مختلف گزارش شده است که پیامدهای انسانی قابل‌توجهی را به‌همراه داشته

و آسیب‌پذیری سامانه‌های ایمنی در مواجهه با این ماده خطرناک را برجسته کرده است. در سطح بین‌المللی، در سال ۲۰۲۲، در جریان عملیات جابه‌جایی یک کانتینر حاوی کلا مایع در بندر عقبه اردن و در پی نقص تجهیزات لیفتینگ، گاز کلا آزاد شده و ابر سمی در محدوده عملیاتی بندر شکل گرفت که به مرگ ۱۳ نفر و مصدومیت بیش از ۲۵۰ نفر منجر شد و پیامدهای انسانی گسترده‌ای بر جای گذاشته شد (۶). در سال ۲۰۲۰، نشت تصادفی گاز کلا در یک کارخانه شیمیایی در پاکستان باعث مواجهه ۱۳۷ نفر با این گاز شد که از میان آن‌ها ۵۱ نفر برای ارزیابی و درمان به مراکز درمانی مراجعه کردند و اگرچه مرگ‌ومیری گزارش نشد، بروز عوارض شدید تنفسی در برخی موارد مشاهده شد (۷). در سال ۲۰۱۰، پارگی یک مخزن یک‌تئنی کلا در یک واحد بازیافت فلز در ایالات متحده موجب آزادسازی گاز شد و ۲۳ نفر به‌دلیل مواجهه حاد به مراکز درمانی منتقل شدند، در حالی که تلفات جانی رخ نداد (۸). در سال ۲۰۰۵، انتشار گسترده کلا در چین به تشکیل یک ابر سمی منجر شد که طی آن ۲۷ نفر جان خود را از دست دادند، ۲۸۵ نفر دچار مسمومیت شدند و حدود ۱۰۰۰۰ نفر تخلیه گردیدند (۹). در ایران، در سال ۲۰۱۷، نشت گاز کلا از یک انبار متروکه وابسته به شرکت آب و فاضلاب در شهر دزفول و در پی نقص یک سیلندر با ظرفیت حدود ۵۰۰ کیلوگرم رخ داد که به مسمومیت بیش از ۴۷۵ نفر با علائم غالباً تنفسی و تحریک چشم و مخاط انجامید و ۴۰ نفر نیازمند بستری شدند (۱۰).

۳. روش‌های ارزیابی ریسک و محدودیت‌ها

ارزیابی ریسک، فرآیندی است که ریسک‌ها را بر اساس احتمال وقوع (نرخ تکرارپذیری) و شدت پیامد اولویت بندی می‌کند (۱۱). در صنایع فرآیندی، ارزیابی ریسک به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی مدیریت ایمنی فرایند، نقش اساسی در شناسایی نظام‌مند مخاطرات، پیش‌بینی سناریوهای حادثه و کنترل پیامدهای بالقوه ایفا کرده و به‌طور مستقیم با تضمین ایمنی عملیاتی، پایداری

تولید و کاهش احتمال وقوع حوادث بزرگ در طول چرخه عمر فرآیند ارتباط دارد. روش‌های ارزیابی ریسک رایج در صنایع فرآیندی شامل HAZOP^۱، FTA^۲، FMEA^۳ و ETA^۴ است که هر کدام اهداف خاص خود را دنبال می‌کنند (۱۳، ۱۲).

ETA روشی نظام‌مند برای بررسی مسیرهای مختلف پیامدها پس از وقوع یک رویداد آغازگر است که با نمایش توالی موفقیت یا شکست لایه‌های ایمنی، درک روشنی از پیشرفت سناریوهای حادثه ارائه می‌دهد و امکان برآورد احتمال پیامدهای مختلف را فراهم می‌سازد. با این حال، این روش به تعریف دقیق رویداد آغازگر و کیفیت داده‌های احتمالی وابسته است و ممکن است تمامی توالی‌های ممکن را پوشش ندهد (۱۳).

FTA با تمرکز بر یک رویداد نامطلوب رأس، روابط علی میان خرابی‌های پایه را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد و امکان تحلیل کمی احتمال وقوع رویداد رأس را فراهم می‌کند. این روش در شناسایی علل ریشه‌ای خرابی‌ها مؤثر است، اما در سیستم‌های پیچیده توسعه و تفسیر آن دشوار بوده و به داده‌های دقیق نرخ خرابی وابستگی بالایی دارد (۱۳).

HAZOP یک تکنیک ساختاریافته برای شناسایی انحرافات فرایندی و مخاطرات بالقوه است که با مشارکت تیمی متخصصان، علل و پیامدهای انحرافات را به طور جامع بررسی می‌کند. با وجود پوشش گسترده سناریوهای نایمن، این روش در سیستم‌های بسیار پیچیده یا غیرخطی و در تحلیل تهدیدات عمدی با محدودیت مواجه است (۱۳).

FMEA با تمرکز بر تجهیزات و اجزای سیستم، حالات خرابی و پیامدهای آن‌ها را شناسایی و اولویت‌بندی می‌کند و به‌ویژه در تحلیل قابلیت اطمینان تجهیزات کاربرد دارد. با این حال، این روش در شناسایی خطاهای انسانی و سناریوهای پیچیده چندعلتی ضعف داشته و معمولاً

به صورت ترکیبی با سایر روش‌ها استفاده می‌شود (۱۴). مسئله اساسی بکارگیری ارزیابی ریسک، پیچیدگی محاسبات و زمان‌بر بودن برآورد احتمال است (۱۵) که با استفاده از پایگاه‌های داده‌ای مانند CCPS^۵، OREDA^۶ و Lees^۷ تسهیل می‌شود (۱۶، ۱۷). اما با توجه به محدودیت‌های این پایگاه‌ها در عدم پوشش کامل سناریوهای خطر و تردید در صحت اطلاعات بعثت نبود داده‌های مناسب، بهره‌گیری از تجربیات خبرگان در کنار منطق فازی برای کاهش عدم قطعیت از طریق لحاظ دیدگاه‌های کیفی ضروری است (۱۷، ۱۸). عدم قطعیت‌ها در روش‌های متداول ارزیابی ریسک به طور قابل توجهی مشهود است؛ امری که عمدتاً ناشی از ماهیت ایستا و ناتوانی این رویکردها در لحاظ کردن تغییرات زمانی و پویایی‌های سیستم در طول بهره‌برداری فرایند می‌باشد (۱۹). عدم قطعیت‌های آماری و ساختاری، دقت مدل‌سازی ریسک را بعثت ناکافی و غیردقیق بودن نرخ نقص‌ها و احتمال خرابی‌های منجر به انتشار کلر در پایگاه‌های اطلاعاتی، کاهش می‌دهد (۲۰)؛ لذا برای پوشش این عدم قطعیت‌ها، رویکردهای داده‌محور مانند شبکه بیزین (BN)^۸ (۲۱)، سیستم‌های فازی (۲۲) و شبیه‌سازی مونت کارلو در حال گسترش هستند (۲۳). BN به عنوان مدل‌های گرافیکی احتمالاتی، روابط شرطی متغیرهای تصادفی را در شرایط عدم قطعیت مدل‌سازی کرده، داده‌های کمی و کیفی را همزمان پردازش می‌نمایند و با ساختار گرافیکی، استدلال و تحلیل سناریوهای پیچیده را تسهیل می‌کنند (۲۴). نرم‌افزارهایی مانند GeNIe با مدل‌سازی ریاضی، پردازش داده‌ها و شناسایی روابط علت و معلولی، دقت BN را افزایش داده و نسبت به روش‌های سنتی، برتری قابل توجهی در پیش‌بینی و مدیریت ریسک ارائه می‌دهند (۲۵). با این حال، BN محدودیت‌هایی دارد که مهم‌ترین آن ناتوانی مقابله ساختاری با تناقض‌های شواهد یا خبرگان است که منجر به ساده‌سازی‌های

5. Offshore reliability data association
6. Center for chemical process safety
7. Lees' loss prevention in the process industries, butterworth, london, 2005.
8. Bayesian networks

1. Hazard and operability study
2. Fault tree analysis
3. Failure mode and effects analysis
4. Event tree analysis

واقع‌بینانه‌تر است (۳۴). مدل‌های آن با داده‌های تجربی و آزمایش‌های معتبر جهانی به‌طور گسترده اعتبارسنجی شده‌اند (۳۶). همچنین پوشش گسترده سناریوها و پارامترهای فرایندی مختلف (۳۸) (مانند شرایط جوی متنوع، انواع مواد) SAFETI را به ابزاری بسیار مناسب و قابل اعتماد برای ارزیابی ریسک در پروژه‌های صنعتی تبدیل کرده است (۳۹). در نرم‌افزار SAFETI 8.4، با به‌کارگیری روابط پربیت و استفاده از داده‌های جمعیتی، پارامترهای محیطی و شرایط آب‌وهوایی، امکان برآورد کمی ریسک‌های فردی و جمعی و ارائه تخمینی دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر از سطح ریسک فراهم می‌گردد (۴۰، ۴۱).

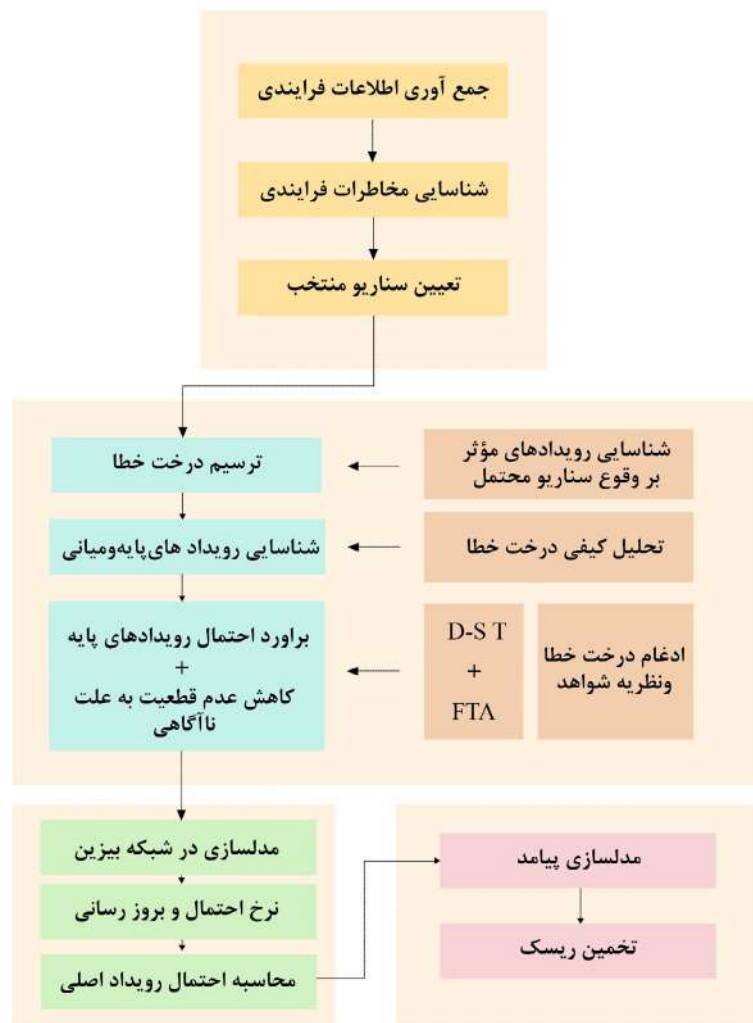
۴. ضرورت و هدف مطالعه

با توجه به پیامدهای گسترده انسانی، مالی و زیست‌محیطی ناشی از انتشار کالر و وقوع مکرر حوادث نشت مواد خطرناک در صنایع داخلی و جهانی، تقویت رویکردهای پیشگیرانه در مدیریت ایمنی فرایند و حرکت به‌سوی مدیریت ریسک و هوشمند از اهمیت بالایی برخوردار است. ماهیت سمی کالر و اثرات شدید آن بر سلامت انسان و پایداری صنعتی، ضرورت دسترسی به برآوردهای قابل‌اعتماد از ریسک و امکان تحلیل سناریوهای مختلف انتشار را برجسته می‌سازد. در این راستا، تخمین ریسک می‌تواند نقش مؤثری در کاهش خسارات انسانی و مالی، ارتقای پایداری صنعتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ایفا کند و زمینه‌ساز بهبود برنامه‌ریزی تعمیرات، ارتقای سیستم‌های ایمنی، آموزش کارکنان و بهبود زیرساخت‌ها در صنایع پرریسک باشد.

براین اساس هدف این مطالعه تخمین ریسک نشت مخازن ذخیره‌سازی کالر با استفاده از یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر تحلیل درخت خطا، شبکه‌های بیزین و تئوری دمپستر-شافر است. در این رویکرد، ابتدا از FTA برای شناسایی و تحلیل ساختاری علل بالقوه وقوع حادثه و تعیین مسیرهای منجر به نشت استفاده می‌شود. سپس D-S T به‌منظور تخمین احتمال وقوع رویدادهای پایه از طریق ترکیب اطلاعات موجود و مدیریت عدم قطعیت‌های

گمراه‌کننده می‌شود (۲۶). برای رفع این محدودیت، می‌توان از نظریه‌هایی چون نظریه فازی (برای قضاوت زبانی خبرگان) (۲۷)، و نظریه دمپستر-شافر (D-S T)^۱ (استفاده از توابع بازه‌ای برای نمایش فقدان داده) (۲۸) استفاده نمود. D-S T که توسط دمپستر (۱۹۶۰) معرفی و توسط شافر (۱۹۷۰) توسعه داده شد، چارچوبی برای مواجهه با عدم قطعیت فراهم می‌کند که با استفاده از مفاهیمی مانند درجه اعتماد (Bel)^۲، درجه مقبولیت (Pl)^۳ و احتمال جرم پایه^۴ بر مجموعه‌ای از حالت‌های ممکن، امکان بیان صریح نادانی و کمبود اطلاعات را فراهم کرده و از طریق قاعده ترکیب دمپستر، شواهد حاصل از منابع مختلف مانند داده‌های آماری و قضاوت‌های خبرگان را حتی در صورت وجود ناسازگاری، به‌صورت منسجم ادغام می‌کند (۲۹، ۳۰)؛ به‌دلیل نبود اطلاعات کافی و ناآگاهی از احتمال دقیق وقوع رویدادهای مؤثر در روش تحلیل درخت خطا، D-S T با اتکا بر نظرات خبرگان، عدم قطعیت را از طریق پارامترهای Bel و Pl مدل‌سازی کرده و احتمال وقوع رویدادها را، برخلاف رویکردهای فازی که معمولاً به برآوردهای احتمال نقطه‌ای متکی هستند، به‌صورت یک بازه عدم قطعیت بیان می‌کند (۳۱). ارزیابی جامع ریسک نیازمند بررسی همزمان احتمال و شدت پیامدها است (۳۲). به‌منظور ارزیابی شدت پیامدها و شبیه‌سازی انتشار گازهای سمی، مدل‌هایی نظیر PHAST^۵ (SAFETI^۶ ALOHA^۷ HGSYSTEM، SLAB، DEGADIS^۸، risk) و TRACE^۹ و RISKCURVES مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۳-۳۶). SAFETI به دلیل جامع بودن زنجیره شبیه‌سازی از لحظه نشت مواد تا مراحل پخش، آتش‌سوزی، انفجار و محاسبه تلفات، فرایند کامل و دقیقی ارائه می‌دهد (۳۷). این نرم‌افزار در شبیه‌سازی فواصل دور و شرایط پایدار جوی دقت بسیار بالایی دارد و نتایج آن

1. Dempster-shafer theory
2. Belief
3. Plausibility
4. Basic probability assignment
5. Software for the assessment of flammable, explosive, and toxic impacts
6. Dense gas dispersion model
7. Areal locations of hazardous atmospheres
8. Transportation routing analysis computer evaluation



شکل ۱: مراحل ارزیابی کمی ریسک این مطالعه

بیزین و تئوری دمستر-شافر برای تخمین ریسک نشت در واحد مخازن ذخیره سازی کلر در یک شرکت پتروشیمی استفاده شده را نشان می‌دهد.

۱- شناسایی مخاطرات مخزن کلر با روش HAZOP

به منظور شناسایی مخاطرات فرآیندی سیستم مورد نظر، تیمی متشکل از ۵ متخصص (مهندس شیمی، مهندس ایمنی فرآیند، مهندس ابزار دقیق، کارشناس تعمیر و نگهداری) در چارچوب روش HAZOP تشکیل شد. در مرحله نخست سیستم فرآیندی و اجزای کلیدی

ناشی از کمبود داده‌های آماری به کار گرفته می‌شود. در ادامه، نتایج حاصل در BN مورد استفاده قرار می‌گیرند تا با بازنمایی وابستگی‌های شرطی میان اجزای سیستم و تبیین روابط علی میان متغیرها، تخمین ریسک نشت کلر به صورت کمی و منسجم انجام پذیرد.

روش کار

این مطالعه کاربردی در سال ۱۴۰۴ در یکی از واحدهای پتروشیمی کشور انجام شد. شکل (۱) نمودار مورد استفاده در این مطالعه که از روش تلفیقی شبکه

از شناسایی رویداد پایانی، علل وقوع رویدادهای میانی که باعث اتفاق افتادن رویداد پایانی می‌شود مشخص می‌گردد. رویدادهای میانی توسط دروازه های منطقی "و" و "یا" به رویدادهای پایه متصل می‌گردد.

از طریق روابط ریاضی بولین امکان محاسبه احتمال وقوع رویدادهای اصلی و میانی را فراهم می‌کند (۴۷). در نهایت، با استفاده از روابط (۱) و (۲) و (۳) احتمال وقوع رویدادهای میانی^۵ (MCS) و رویداد اصلی^۶ (TE) با توجه به نوع دروازه مربوطه محاسبه می‌گردد (۴۸).

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (1)$$

$$P_{And} = \prod_{j=1}^n p_j \quad (2)$$

$$P(TE) = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - P(MCS_j)) \quad (3)$$

۴- نظریه شواهد دمپستر-شافر (D-S T)

به‌منظور برآورد احتمال وقوع رویدادهای پایه در شرایط عدم قطعیت و کمبود داده‌های آماری، از قضاوت خبرگان به‌عنوان منبع اصلی اطلاعات استفاده شد. در گام نخست، رویدادهای پایه سیستم بر اساس تحلیل‌های اولیه شناسایی گردیدند و سپس نظرات خبرگان از طریق فرم‌های نظرسنجی ساختاریافته جمع‌آوری شد. در این فرآیند، از خبرگان خواسته شد احتمال وقوع هر یک از رویدادهای پایه را در قالب گویه‌های زبانی درست (T)^۷، غلط (F)^۸ و هم درست و هم غلط (T,F)^۹ بیان کنند؛ گزینه سوم بیانگر حالتی است که خبره نسبت به وقوع یا عدم وقوع رویداد اطمینان کامل ندارد. به‌منظور تبدیل این قضاوت‌های کیفی به مقادیر عددی قابل استفاده در تحلیل، نگاشتی مشخص میان گویه‌های زبانی و مقادیر

3. AND
4. OR
5. Minimal cut sets
6. Top events
7. True
8. False
9. True/false

مخازن ذخیره سازی کلا شناسایی شد. سپس تیم HAZOP با استفاده از نقشه‌های P&ID^۱، انحرافات و خطرات فرآیندی را شناسایی و مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (۴۲، ۴۳).

سیستم مورد بررسی شامل چهار مخزن افقی استوانه‌ای تحت فشار برای ذخیره‌سازی کلا مایع است که هر مخزن با قطر ۲/۴۵ متر، طول ۹ متر و حجم اسمی ۴۱ مترمکعب طراحی شده و در شرایط عملیاتی با فشار ۱۲ بار و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد؛ ماده ذخیره‌شده در این مخازن در حالت مایع بوده و این مشخصات فنی، مبنای تحلیل سناریوهای نشتی، مدل‌سازی پیامدها و ارزیابی ریسک واحد ذخیره‌سازی کلا در این مطالعه را تشکیل می‌دهد.

۲- انتخاب سناریو

به‌طور کلی، سه سناریوی اصلی شامل وقوع آتش، انفجار و مسمومیت ناشی از رهائش مواد شیمیایی محتمل است (۴۴). کلا گازی زرد رنگ، غیرقابل اشتعال، بسیار سمی و خورنده است که در دمای معمولی به‌صورت گاز و تحت فشار به شکل مایع فشرده نگهداری می‌شود. این گاز از هوا سنگین‌تر بوده و در فضاهای بسته تجمع می‌یابد. کلا به‌خودی‌خود انفجارپذیر نیست و به‌طور مستقیم باعث آتش‌سوزی یا انفجار نمی‌شود (۴۵).

۳- ترسیم درخت خطا (FTA)^۲

در این تحقیق از روش FTA جهت ارزیابی حالات نشت گاز کلا از مخازن ذخیره‌سازی در شرکت پتروشیمی استفاده شده است. جمع‌آوری اطلاعات و شناسایی خطرات و رویدادهای محتمل از طریق نظرات کارشناسان، طوفان ذهنی، داده‌های موجود در انجمن مهندسی ریسک آمریکا (۴۶) و اطلاعات استخراج‌شده از کتب مرجع و مطالعات مشابه انجام شد. اولین گام در ساخت درخت خطا، تعریف رویداد پایانی می‌باشد. پس

1. Piping and instrumentation diagram
2. Fault tree

$$Bel(A) \leq p(A) \leq Pl(A) \quad (8)$$

رابطه باور از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$Bel(A) = \sum_{B|B \subseteq A \neq \emptyset} m(B) \quad (9)$$

چارچوب اطمینان نیز از رابطه (۱۰) محاسبه گردید:

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B|B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (10)$$

۵-مدل سازی در شبکه‌های بیزین (BN)

نتایج حاصل از مراحل پیشین در قالب BN بازنمایی شدند. هر گره^۲ در این شبکه یک رویداد پایه و یال‌ها^۳ نشان‌دهنده‌ی وابستگی‌های احتمالاتی بین متغیرها هستند.

در BN برای محاسبه توزیع احتمال مشترک مجموعه‌ای از متغیرها $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ از رابطه (۱۱) استفاده شد (۵۱):

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(A_i | P_a(A_i)) \quad (11)$$

$Pa(A_i)$ ، نشان‌دهنده احتمال والد متغیر A_i می‌باشد (۵۱).

بر این اساس احتمال متغیر A_i از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد.

$$P(A_i) = \sum_{A_i} \frac{U}{A_i} P(U) \quad (12)$$

سپس تحلیل‌های کیفی و کمی شامل محاسبه احتمال وقوع رویداد نهایی با استفاده از نرم‌افزار GeNIe (نسخه ۵/۰) انجام گرفت.

برای شناسایی مؤثرترین رویدادهای پایه (در رخداد رویداد اصلی بیشترین تاثیر را دارند) از آنالیز حساسیت

عددی تعریف شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار ۰/۶ به حالت درست، مقدار ۰/۳ به حالت غلط و مقدار ۰/۱ به حالت هم درست و هم غلط اختصاص داده شد. این مقادیر به‌عنوان تابع تخصیص جرم پایه در چارچوب D-S T در نظر گرفته شدند در نظر گرفته شدند، به‌طوری که مجموع جرم‌های تخصیص‌یافته برای هر رویداد برابر با یک باشد. این نظریه مبتنی بر مفاهیم کلیدی BBA، Bel و Pl است که بر اساس چارچوب تشخیص و مجموعه توان متناظر آن، مطابق روابط (۴) و (۵) تعریف شدند (۴۹).

$$\theta = \{H_1, H_2, H_3, \dots, H_n\} \quad (4)$$

مجموعه توان^۱ قاب تشخیص، که با 2^θ نشان داده می‌شود. شامل تمام زیرمجموعه‌های ممکن از θ است:

$$2^\theta = \{\emptyset, \{E_1\}, \dots, \{E_N\}, \{E_1, E_2\}, \dots, \{E_1, E_2, \dots, E_N\}, \dots, \theta\} \quad (5)$$

در مجموع، مجموعه توان θ شامل 2^N زیرمجموعه است که هر یک بیانگر یک فرضیه منفرد یا ترکیبی از فرضیات اصلی به شمار می‌آید (۵۰).

سپس توابع جرم، باور و اطمینان با استفاده از روابط (۶) تا (۱۰) محاسبه گردیدند. جرم مجموعه خالی مطابق با رابطه (۶) صفر است.

$$m(\emptyset) = 0 \quad (6)$$

مجموع جرم همه اعضای مجموعه توان مطابق با رابطه (۷) برابر ۱ است.

$$\sum_{A \subseteq 2^\theta} m(A) = 1 \quad (7)$$

مرزهای بالایی (امکان‌پذیری) و پایینی (باور) یک بازه احتمال مطابق رابطه (۸) تعریف شد.

2. Bayesian network modeling
3. Node
4. Arcs

1. Power set

جدول ۱: میانگین پارامترهای جوی فصول مختلف

فصل	سرعت باد (m/s)	کلاس پایداری جو	دما (°C)
بهار	۴/۰	F	۳۰
تابستان	۳/۲	E	۴۳
پاییز	۳/۸	F	۲۰
زمستان	۵/۰	F	۱۶

و در نرم افزار SAFETI 8.4 وارد شدند. این داده‌ها شامل پارامترهای جوی مربوط به فصول مختلف هستند. جدول (۱) پارامترهای کلیدی مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که بر اساس محتمل‌ترین سناریوهای استخراج‌شده از FTA تنظیم و انتخاب شده‌اند.

ما در این مطالعه جهت اطمینان از نتایج، از یک سیستم اعتبارسنجی چندمرحله‌ای استفاده کردیم. از آنجا که انجام آزمایش‌های واقعی نشت کلر در ابعاد وسیع، به دلیل محدودیت‌های عملی و خطرات جدی در اجرای آزمایش‌های میدانی نشت کلر در مقیاس بزرگ و وجود خطرات زیست‌محیطی و ایمنی عملاً غیرممکن است، از نتایج ارزیابی‌های جامع Witlox و همکاران (۲۰۱۸) به عنوان ملاک اصلی صحت‌سنجی استفاده کردیم. در واقع، انتخاب مدل انتشار یکپارچه^۱ (UDM) پیش‌تر از طریق مقایسه با داده‌های تجربی نشت کلر به اثبات رسیده است، این مدل به عنوان زیربنای محاسباتی انتخاب شد. این استناد علمی اطمینان می‌دهد که زیرمدل‌های ترمودینامیکی و الگوریتم‌های انتشار به‌کاررفته، از قابلیت اطمینان کافی برای بازسازی دقیق سناریوها و تخمین واقع‌گرایانه فواصل خطر برخوردار هستند (۵۷). در این مطالعه با تلفیق D-S T محاسبات پیامد، مشابه با رویکرد ارائه شده توسط Bahrami و همکاران، طراحی شد تا امکان لحاظ کردن عدم قطعیت‌های عملیاتی به شکلی واقع‌گرایانه فراهم گردد (۵۸).

یافته‌ها

نتایج حاصل از مدل‌سازی و پیاده‌سازی روش تلفیقی شبکه بیزین و تئوری دمپستر-شافر برای تخمین ریسک

در نرم افزار GenIE 5.0 که براساس رابطه (۱۳) می‌باشد، محاسبه شد (۵۲).

$$ROV(BE_i) = \frac{\pi(BE_i) - \theta(BE_i)}{\theta(BE_i)} \quad (13)$$

۶- تخمین ریسک با نرم‌افزار SAFETI

ریسک فردی و اجتماعی ناشی از سناریوهای منتخب با استفاده از نرم افزار SAFETI 8.4 محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی پیامدهای انسانی ناشی از انتشار مواد سمی، کانتورهای ریسک بر اساس شدت اثرات سمی ترسیم گردید. این کانتورها با استفاده از مدل پروبیت و بر مبنای روابط (۱۴) و (۱۵)، که ارتباط بین دوز دریافتی و پاسخ انسانی را توصیف می‌کنند، برای برآورد احتمال بروز آسیب یا مرگ و در نتیجه تخمین تلفات انسانی در فواصل مختلف از منبع انتشار به‌کار گرفته شدند (۵۳).

$$Pr = k_1 + k_2 \ln(C^n \times t) \quad (14)$$

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-u^2/2} du \quad (15)$$

سطح ریسک محاسبه‌شده با استفاده از معیار ALARP کشور انگلستان مورد ارزیابی قرار گرفت. انتخاب این معیار به دلیل عدم وجود استاندارد ملی مشخص در این حوزه در ایران صورت گرفته است؛ افزون بر این، بررسی مطالعات مشابه نشان می‌دهد که این معیار به‌طور گسترده برای تعیین و مقایسه سطح ریسک در پژوهش‌های مرتبط مورد استفاده قرار گرفته است (۳۳، ۴۰، ۵۴-۵۶).

به‌منظور مدل‌سازی و تخمین دقیق ریسک، داده‌های هواشناسی منطقه از ایستگاه هواشناسی مربوطه استخراج

1. Unified dispersion model

جدول ۲: نتایج روش HAZOP

کد	انحراف	سطح ریسک	علل محتمل	پیامدها	اقدامات کنترلی
۱	نشت گاز کلر از مخزن	۲B	-خوردگی بدنه مخزن یا نازلها -خرابی فلنجها و آببندها -آسیب مکانیکی -خطای انسانی در بهره‌برداری یا تعمیرات	-نشت کلر سمی -مسمومیت کارکنان آسیب -شدید تنفسی -آلودگی محیط زیست	-آشکارساز گاز کلر -آلارم صوتی و نوری -برنامه بازرسی و کنترل خوردگی -دستورالعمل واکنش اضطراری
۲	افزایش فشار داخلی مخزن	۲C	-افزایش دمای محیط -پرسیدن بیش از حد مخزن	-فعال شدن شیر اطمینان -نشت محدود کلر	-شیر اطمینان (PSV) -آلارم فشار بالا
۳	کاهش فشار داخلی مخزن	۲D	-تخلیه ناخواسته -آسیب مکانیکی خارجی -خرابی پمپها	-اختلال در فرآیند -افزایش خوردگی داخلی	-سیستم کنترل فشار -پایش فشار -برنامه بازرسی مکانیکی دوره‌ای
۴	افزایش دمای داخلی مخزن	۱C	-دمای بالای محیط -نقص در عایق کاری	-افزایش تدریجی فشار -افزایش تیخیر کلر	-عایق حرارتی -پایش دما
۵	افزایش بیش از حد سطح کلر در مخزن	۲D	-خطای اپراتور -خرابی نشان‌دهنده سطح	-سرریز محدود -افزایش فشار	-آلارم سطح بالا -سیستم کنترل پمپ
۶	کاهش سطح کلر در مخزن	۱C	-مصرف عادی -خطای سنسور	-اختلال عملیاتی	-آلارم سطح پایین -نشان‌دهنده سطح

سایر انحراف‌های شناسایی شده شامل افزایش و کاهش فشار داخلی مخزن، افزایش دمای داخلی و تغییرات سطح کلر می‌باشند که عمدتاً ناشی از عوامل محیطی، خطای انسانی و نقص تجهیزات هستند. به‌منظور کاهش سطح ریسک، اقدامات کنترلی فنی و مدیریتی نظیر سیستم‌های پایش، آلارم‌ها، شیرهای ایمنی و برنامه‌های بازرسی و واکنش اضطراری پیشنهاد شده است (۵۹).

۲- نتایج انتخاب سناریو

بر اساس تحلیل نتایج HAZOP، سناریو نشت گاز کلر از مخازن ذخیره‌سازی به‌عنوان سناریوی اصلی در نظر گرفته شد. در این مطالعه دو سناریو نشتی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ۲۰۰ میلی‌متر (۶۰) و یک سناریو گسیختگی کامل^۱ که منجر به انفجار مخزن می‌گردد، برای مخزن مذکور مورد بررسی قرار گرفت (۶۱).

۳- نتایج FTA

با بهره‌گیری از روش FTA، نشت گاز کلر از مخزن

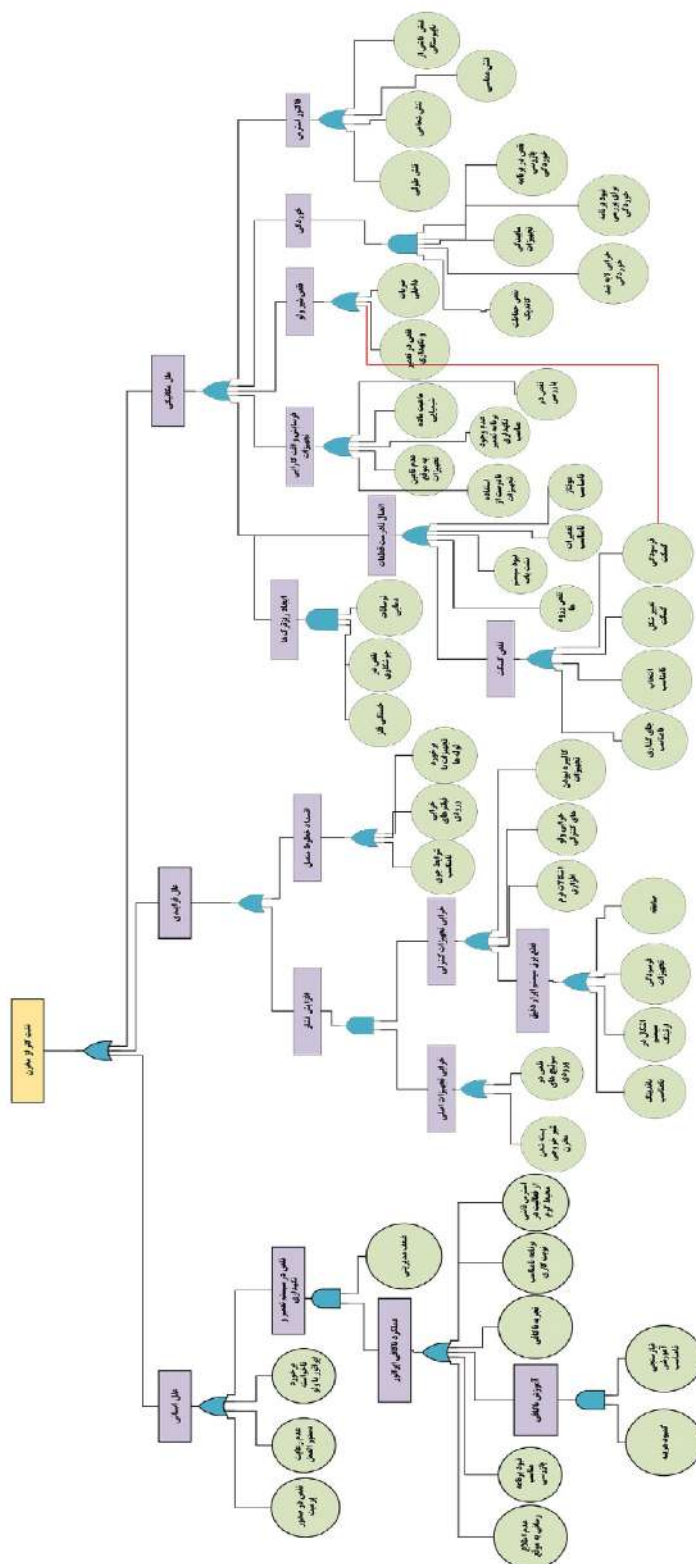
1. Catastrophic rupture

ناشی از انتشار مخزن کلر ارائه شده و به‌منظور نظم و وضوح بیشتر، یافته‌ها در زیربخش‌های موضوعی مرتبط تشریح و تحلیل شده‌اند.

۱- نتایج روش HAZOP

در این مطالعه، به‌منظور شناسایی و ارزیابی نظام‌مند مخاطرات مرتبط با مخزن، از روش HAZOP استفاده شده است که در جدول (۲) نشان داده می‌شود. انحرافات اصلی فرایندی شامل تغییرات فشار، دما و سطح سیال در مخزن مورد بررسی قرار گرفته و برای هر انحراف، علل محتمل، پیامدهای ایمنی و عملیاتی، و اقدامات کنترلی موجود شناسایی شده‌اند. سطح ریسک هر سناریو بر اساس ماتریس ریسک تعریف‌شده در این مطالعه تعیین شده است.

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۲)، شناسایی خطرات با روش HAZOP نشان داد که مهم‌ترین انحراف مربوط به نشت گاز کلر از مخزن با سطح ریسک 2B است که به‌دلیل سمی بودن کلر می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت کارکنان و محیط‌زیست به‌همراه داشته باشد.



شکل ۲: FTA ترسیم شده مربوط به سناریو نشست گاز کلر در Microsoft Visio (version 2019)

به عنوان رویداد اصلی در نظر گرفته شد. در ادامه، با استفاده از گیت‌های منطقی AND و OR، تمامی مسیرهای منجر به نشت (شامل علل مکانیکی، علل فرآیندی و علل انسانی) تشریح گردید. در مجموع ۵۰ رویداد پایه و ۱۸ رویداد میانی استخراج شد. ساختار نهایی درخت خطا با مشارکت متخصصان ایمنی تکمیل شد و نسخه نهایی آن در شکل (۲) ارائه شده است.

۴- کاهش عدم قطعیت با D-S T

تحلیل اولیه بر پایه D-S T انجام شد تا میزان اعتماد کارشناسان به احتمال وقوع هر رویداد پایه تعیین گردد. در این چارچوب، برای هر رویداد دو مقدار Bel و Pl محاسبه شد؛ مقادیری که بازه‌ای از احتمال را تعیین می‌کنند و سطح عدم قطعیت موجود در داده‌ها و قضاوت کارشناسان را منعکس می‌سازند. جداسازی شواهد قطعی از شواهد ناقص یا مبهم، تصویر دقیق‌تری از احتمال وقوع رویدادهای پایه ارائه می‌دهد. جدول (۳) مقادیر احتمال Bel و احتمال Pl رویدادهای پایه بر اساس D-S T را نشان می‌دهد.

در متون بررسی شده اگر احتمال وقوع رویداد بسیار کوچک باشد، تحت فرض رویداد نادر، احتمال وقوع عملاً با نرخ یا فرکانس تکرارپذیری آن یکسان در نظر گرفته می‌شود (۶۲).

۵- محاسبه احتمال رویداد اصلی با BN

داده‌های به دست آمده از مرحله D-S T به احتمال‌های میانگین تبدیل شدند و در ساختار شبکه بیزین وارد شدند تا روابط منطقی میان رویدادها شبیه‌سازی شوند. به منظور محاسبه احتمال پیامدهای نهایی از BN در نرم افزار GeNIe 5.0 استفاده شد. شکل (۳) شبکه ترسیم شده در این نرم افزار را نشان می‌دهد.

در شکل (۴) آنالیز حساسیت رویداد رأس در حالت احتمال نشت مخزن کلر را نشان می‌دهد. در این شکل، میزان تأثیر رویدادهای پایه مختلف بر مقدار احتمال رویداد رأس با استفاده از شاخص حساسیت نمایش داده

شده است، به طوری که شکل (الف) مربوط به تحلیل بر اساس معیار Bel و شکل (ب) مربوط به تحلیل بر اساس معیار Pl است.

بر اساس شکل (۴)، رویدادهای پایه مؤثر بر وقوع TE در دو حالت Bel و Pl از نظر میزان حساسیت دارای اولویت‌های متفاوتی هستند. در حالت Bel شکل بخش (الف)، رویدادهای پایه X38، X39 و X43 به ترتیب بیشترین تأثیر را بر تغییر مقدار TE داشته و به عنوان مهم‌ترین رویدادهای پایه بحرانی شناسایی می‌شوند. در حالت Pl شکل بخش (ب)، رویدادهای پایه X39، X43 و X38 به ترتیب بیشترین حساسیت را نسبت به TE دارا هستند که این موضوع بیانگر جابه‌جایی در ترتیب اهمیت رویدادهای بحرانی نسبت به حالت Bel و پررنگ‌تر شدن نقش رویداد X43 است.

۶- تخمین ریسک

در این مرحله ریسک فردی و اجتماعی ناشی از سناریوی نشت کلر با استفاده از نرم افزار SAFETI 8.4 محاسبه گردید. بر اساس نتایج دیاگرام FTA، تخمین ریسک برای مخزن گاز کلر در یک سناریو با اندازه نشتی ۱۰۰ میلی‌متر و ۲۰۰ میلی‌متر و یک سناریو گسیختگی کامل^۱ که منجر به انفجار مخزن می‌گردد، برای مخزن مذکور با وضعیت آب و هوایی منطقه (براساس اطلاعات اداره هواشناسی منطقه) انجام شد. تمامی فرمول‌های مربوط به ارزیابی پیامد و ریسک در نرم افزار تعریف شده و دیگر نیاز به محاسبات دستی نیست.

بر اساس نتایج به دست آمده، کانتورهای ریسک فردی و جمعی برای واحد مورد مطالعه ترسیم شد. شکل (۵) بخش (الف) کانتور ریسک فردی Bel و بخش (ب) کانتور ریسک فردی Pl را نشان می‌دهد. کانتور ریسک فردی PL احتمال مرگ و میر افراد را در یک مکان مشخص نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که ترسیم این کانتورها در اطراف منبع خطر (نقطه مرکزی حادثه) بیانگر آن است که با افزایش فاصله از محل وقوع حادثه، شدت اثرات و در نتیجه

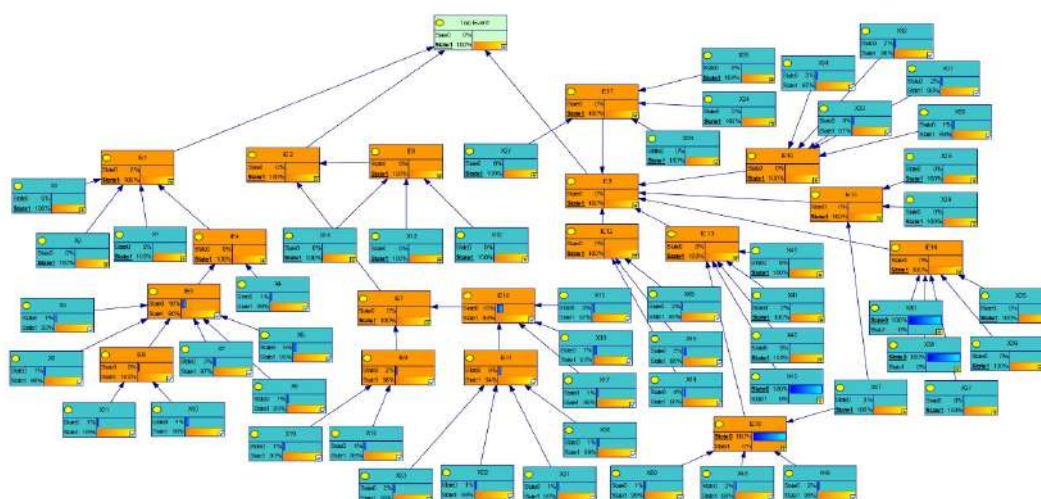
1. Catastrophic rupture

جدول ۳: مقادیر Bel و Pl رویدادهای پایه بر اساس D-S T

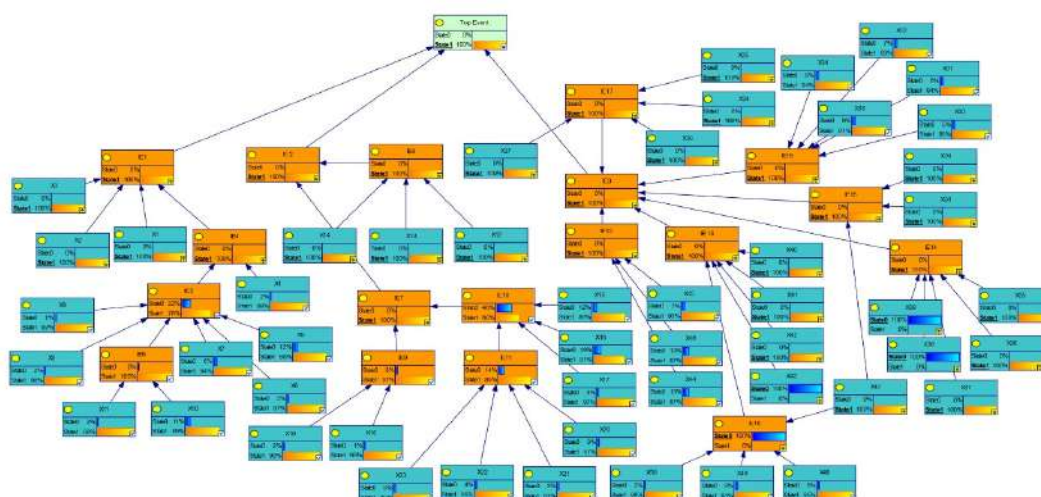
علامت	توصیفات رویدادهای پایه	احتمال Bel	احتمال Pl
X1	نقص در صدور پرمیت	۰/۱۹۱۴۱۴۰۷	۰/۰۵۰۵۷۷۸۱
X2	عدم رعایت دستور العمل	۰/۰۲۶۱۸۴۶۴۱	۰/۰۵۶۳۰۷۴۸۲
X3	برخورد ناخواسته اپراتور با ولو	۰/۰۲۵۶۱۱۲۹۳	۰/۰۵۹۰۳۶۰۵
X4	عدم اطلاع رسانی به موقع	۰/۰۰۷۹۳۵۲۸۳	۰/۰۲۴۹۰۶۸
X5	نبود برنامه مناسب بازرسی	۰/۰۴۵۷۵۸۵۱۷	۰/۱۱۸۵۹۲۶۲
X6	کمبود هزینه	۰/۰۱۴۸۳۴۵۶۵	۰/۰۲۹۹۱۷۳
X7	نیازسنجی آموزشی نامناسب	۰/۰۲۸۹۴۴۸۰۲	۰/۰۶۲۴۵۶۵۸
X8	تجربه ناکافی	۰/۰۰۷۰۴۹۹۹۷	۰/۰۱۸۱۲۹۰۱
X9	برنامه نامناسب نوبت کاری	۰/۰۰۳۷۹۵۵۹	۰/۰۱۴۵۶۶۱۱
X10	استرس ناشی از فعالیت در محیط گرم	۰/۰۴۳۷۳۰۰۲۳	۰/۰۵۵۲۱۴۶
X11	ضعف مدیریتی	۰/۰۰۹۰۵۵۳۰۱۶	۰/۰۱۹۰۱۸۸۴
X12	بسته شدن شیر خروجی مخزن	۰/۰۱۲۹۶۴۳۸۱	۰/۰۶۶۰۲۶۱۴۰
X13	نقص در سوئیچ های ورودی	۰/۰۱۵۷۹۰۳۴۶	۰/۰۷۹۶۸۱۵۷
X14	باندینگ نامناسب	۰/۰۳۱۸۷۶۷۸۷	۰/۱۳۹۴۴۱۸۵
X15	اشکال در سیستم ارتینگ	۰/۰۳۲۹۹۹۴۸۸	۰/۱۲۱۲۱۵۱۲
X16	فرسودگی تجهیزات	۰/۰۶۸۳۵۴۰۳۴	۰/۱۹۳۷۹۵۷۱
X17	صاعقه	۰/۰۰۸۷۷۸۱۶۱	۰/۰۳۱۶۴۳۶۱
X18	اشکالات نرم افزاری	۰/۰۰۹۸۰۲۶۹۷	۰/۰۲۲۰۰۸۳۸
X19	خرابی ولو های کنترلی	۰/۰۱۳۹۳۰۲۹۵	۰/۰۳۵۱۴۳۷۸
X20	کالیبره نبودن تجهیزات	۰/۰۱۴۲۷۰۱۸۶	۰/۰۲۹۵۵۷۵۶
X21	شرایط جوی نامناسب	۰/۰۱۳۱۴۳۹۲۲	۰/۰۲۷۴۱۱۴۶
X22	خرابی فیلترهای ورودی	۰/۰۱۱۰۶۶۲۴۸	۰/۰۴۲۳۶۷۶۸
X23	برخورد تجهیزات با لوله ها	۰/۰۲۰۰۸۱۱۰۴	۰/۰۴۸۴۷۶۱۶
X24	خستگی فلز	۰/۰۲۰۴۴۲۷۳۶	۰/۰۴۹۲۲۳۰۱
X25	نقص در جوشکاری	۰/۰۲۰۳۸۴۸۶۵	۰/۰۵۰۴۸۹۹۷
X26	نوسانات دمایی	۰/۰۰۸۲۰۲۲۸۱	۰/۰۲۵۶۳۹۶۵
X27	جای گذاری نامناسب	۰/۰۱۸۵۱۹۱۸۲	۰/۰۵۰۷۸۲۴۸
X28	انتخاب نامناسب	۰/۰۳۵۳۸۱۸۷۵	۰/۰۸۳۵۷۸۶۵
X29	تغییر شکل گسکت	۰/۰۰۵۹۸۱۵۲۴	۰/۰۱۶۷۲۵۰۴
X30	فرسودگی گسکت	۰/۰۱۴۰۵۵۳۸۳	۰/۰۴۸۶۴۷۹۵
X31	نقص رزوه ها	۰/۰۱۹۶۰۹۶۱	۰/۰۵۷۲۴۷۲۵
X32	نبود سیستم نشت یاب	۰/۰۱۶۲۴۵۶۵۲	۰/۰۷۱۴۵۱۰۹
X33	تعمیرات نامناسب	۰/۰۲۵۶۵۹۷۸۷	۰/۰۸۶۰۴۸۸۴
X34	مونتاز نامناسب	۰/۰۲۹۴۹۹۹۵۲	۰/۰۶۱۲۱۱۱۹
X35	استفاده نادرست از تجهیزات	۰/۰۱۰۲۶۷۴۳۶	۰/۰۱۸۹۲۷۷۷
X36	عدم تامین به موقع تجهیزات	۰/۰۱۶۲۹۳۲۱۹	۰/۰۶۱۶۵۱۵۷
X37	عدم وجود برنامه تعمیر نگهداری مناسب	۰/۰۵۹۹۶۳۰۱۷	۰/۱۷۰۲۷۱۹۴
X38	ماهیت ماده شیمیایی	۰/۰۱۳۱۰۵۵۴۴	۰/۰۱۷۶۲۱۱
X39	نقص در بازرسی	۰/۰۰۷۳۹۶۰۲	۰/۰۱۲۴۸۰۷۸
X40	نقص در تعمیر و نگهداری	۰/۰۲۹۸۰۹۹۶۴	۰/۰۶۶۵۲۳۴۴
X41	ضربات داخلی	۰/۰۴۲۷۶۹۷۴۸	۰/۱۰۷۳۸۶۴۵
X42	نقص حفاظت کاتدیک	۰/۰۱۵۴۵۵۷۹۹	۰/۰۳۷۶۳۱۵۱
X43	خرابی لایه ضد خوردگی	۰/۰۳۳۱۵۴۰۲۹	۰/۱۶۱۹۴۷

ادامه جدول ۳: مقادیر Bel و Pl رویدادهای پایه بر اساس D-S T

علامت	توصیفات رویدادهای پایه	احتمال Bel	احتمال Pl
X44	سایبیدگی تجهیزات	۰/۰۳۷۴۰۵۶۸۱	۰/۱۲۹۸۹۱۴
X45	نبود برنامه برای بررسی خوردگی	۰/۰۲۰۴۳۸۳۵	۰/۰۷۴۴۴۲۱۲
X46	نقص در برنامه بازرسی خوردگی	۰/۵۳۷۵۲۷۷	۰/۱۳۲۳۲۳۸۱
X47	تنش طولی	۰/۰۴۸۶۷۱۸۵	۰/۰۹۷۹۸۶۸
X48	تنش شعاعی	۰/۰۱۳۹۲۳۰۷۵	۰/۰۴۲۱۱۲۱۲
X49	تنش مماسی	۰/۰۱۶۲۱۲۶۴۹	۰/۰۴۸۱۷۲۴۸
X50	تنش ناشی از ناپیوستگی	۰/۱۷۱۷۱۵۸	۰/۱۷۱۷۱۵۸
TE	نشت کلر از مخزن	$۱/۷۴۰۵۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۸/۲۹۲۴۷۳۲ \times ۱۰^{-۶}$

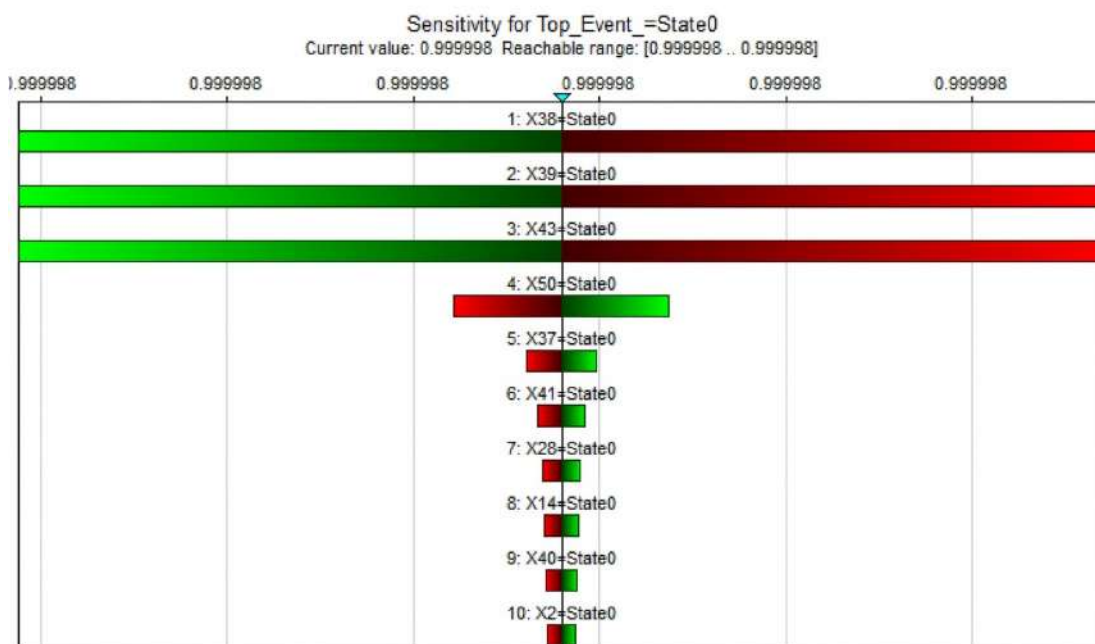


(الف)

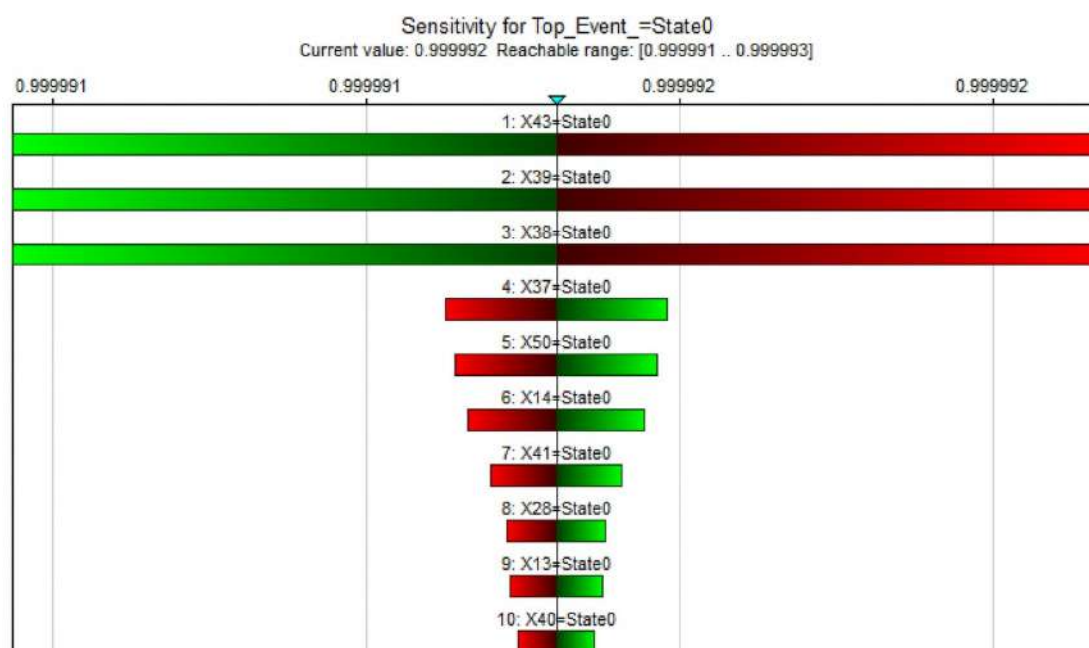


(ب)

شکل ۳: ترسیم رویداد نهایی نشت گاز کلر و محاسبات BN بخش (الف) احتمال Bel و در بخش (ب) احتمال Pl



(الف)

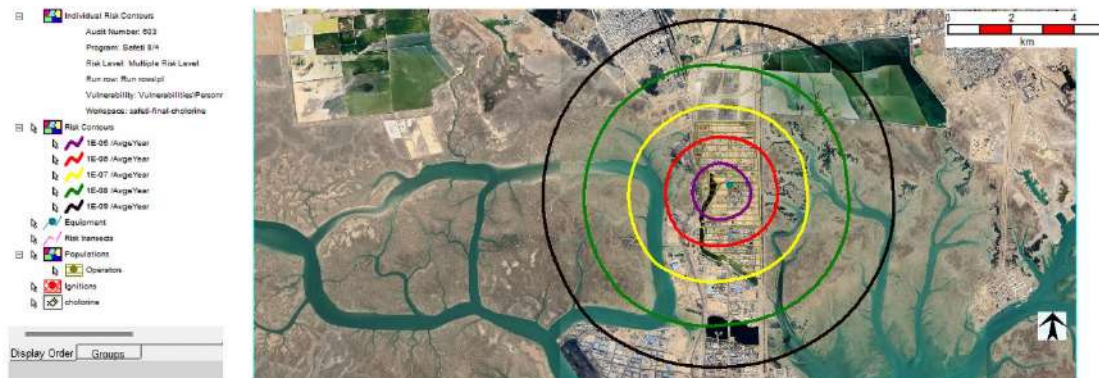


(ب)

شکل ۴: محاسبات آنالیز حساسیت BN بخش (الف) احتمال Bel و در بخش (ب) احتمال PI

این نمودارها به منظور نمایش تغییرات مکانی احتمال خطر برای افراد در فواصل مختلف از محل انتشار ترسیم شده‌اند و پایه تحلیل رفتار فضایی ریسک ناشی از حادثه

احتمال تلفات انسانی به تدریج کاهش می‌یابد. شکل (۶) نمایانگر پروفیل تغییرات سطح ریسک فردی در امتداد مسیر انتشار گاز کلر از مخزن است.



(الف)



(ب)

شکل ۵: بخش (الف) کانتور ریسک فردی Bel و بخش (ب) کانتور ریسک فردی PI

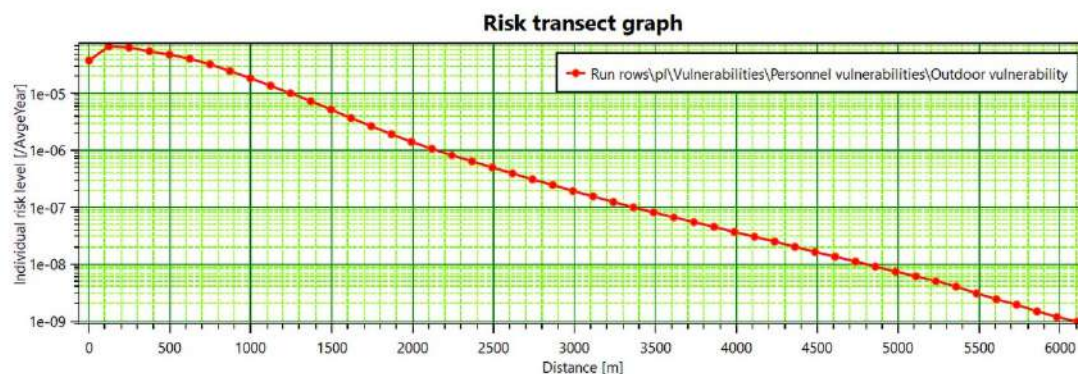
Bel می‌باشد، مقدار ریسک فردی در فواصل نزدیک به منبع حدود 500×10^{-7} متر $5/28447 \times 10^{-7}$ در سال قرار دارد، در فواصل 1500×10^{-8} متر $4/52163 \times 10^{-8}$ در سال کاهش می‌یابد و در فواصل بیش از ۳۰۰۰ متر به مقادیر کمتر $10^{-9} \times 1/77656$ در سال می‌رسد.

در شکل (۷) کانتورهای ریسک جمعی Bel و PI را نشان می‌دهد. این کانتورها رابطه بین نرخ تکرارپذیری و تعداد تلفات را براساس ALARP انگلستان را نمایش می‌دهد (۵۵، ۵۶).

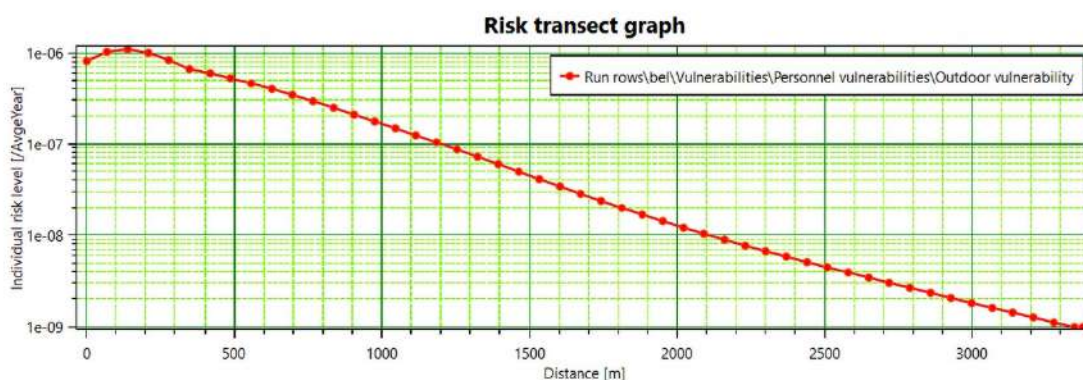
همان‌گونه که در شکل منحنی FN مشاهده می‌شود، فراوانی تجمعی تلفات سالانه FN با افزایش تعداد تلفات روند کاهشی دارد و هر دو منحنی PI و Bel رفتار نزولی مشخصی را در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهند. در

فرضی محسوب می‌شوند. در این شکل، نمودار بخش (الف) مربوط به نتایج محاسبه‌شده با استفاده از مقادیر PI و نمودار بخش (ب) مربوط به رویکرد کانتور ریسک فردی با استفاده از مقادیر Bel است.

نتایج ترسیم کانتورهای ریسک فردی نشان می‌دهد که ریسک سالانه مرگ‌ومیر افراد با افزایش فاصله از منبع خطر به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در بخش (الف) که مربوط به کانتور PI می‌باشد مقدار ریسک فردی در فواصل نزدیک به منبع حدود ۵۰۰ متر $4/86602 \times 10^{-5}$ در سال قرار دارد، در فواصل 1500×10^{-6} در سال $5/23191 \times 10^{-6}$ در سال کاهش می‌یابد و در فواصل بیش از ۳۰۰۰ متر به مقادیر کمتر $10^{-7} \times 1/94339$ در سال می‌رسد، در حالی‌که در بخش (ب) که مربوط به کانتور

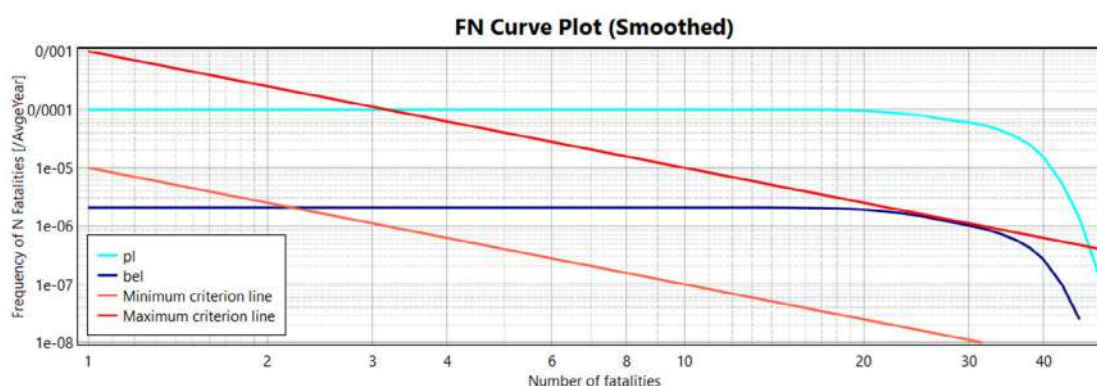


(الف)



(ب)

شکل ۶: بخش (الف) تغییرات سطح ریسک فردی PI و بخش (ب) کانتور ریسک فردی Bel



شکل ۷: کانتور ریسک جمعی Bel و Pl

منحنی bel در همین بازه در حدود $2/0886 \times 10^{-6}$ می ماند و پایین تر از Pl قرار دارد. از حدود نفر ۳۰ تلفات، افت فرکانس شدیدتری در هر دو منحنی دیده می شود؛

بازه تلفات کم (حدود ۱ تا ۲۰ نفر)، منحنی Pl در مقادیر حدود $9/9509 \times 10^{-5}$ در سال قرار داشته و در نزدیکی یا بالاتر از معیار ALARP واقع شده است، در حالی که

به طوری که مقادیر فرکانس مرگ و میر ۳۰ نفر در منحنی Bel ($10^{-6} \times 26/0$) در سال کاهش یافته و منحنی‌ها در زیر خط معیار حداقل پذیرش قرار می‌گیرند. این روند نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تلفات، فراوانی وقوع سناریوها به صورت نمایی کاهش یافته و بیشترین مقادیر فراوانی مربوط به سناریوهای با تلفات پایین‌تر است.

بحث

ارزیابی ریسک انتشار مواد سمی به‌ویژه در سیستم‌های ذخیره‌سازی مواد خطرناک مانند مخازن ذخیره سازی کلر، مستلزم درک عمیق خطر و مدیریت عدم قطعیت‌های ذاتی است. در شرایط واقعی صنعتی، داده‌های مربوط به احتمال نشت، شرایط محیطی و کارکرد سامانه‌های ایمنی معمولاً ناقص، متناقض و نامطمئن هستند؛ از این رو، تکیه بر روش‌های کلاسیک احتمالات نقطه‌ای نمی‌تواند تصویر دقیقی از سطح واقعی ریسک ارائه دهد.

در این پژوهش، با هدف افزایش دقت در تحلیل خطر، چارچوبی تلفیقی مبتنی بر شبکه بیزین و نظریه دمپستر-شافر توسعه داده شد. این رویکرد با ترکیب ساختار احتمالاتی شبکه بیزین و توانایی نظریه دمپستر-شافر در مدیریت داده‌های دارای ابهام، بستری برای تخمین ریسک انتشار مخزن ذخیره سازی کلر فراهم می‌سازد. در این مطالعه سناریو نشست کلر از مخزن به عنوان محتمل‌ترین سناریو برای ارزیابی دینامیکی ریسک در نظر گرفته شد. در ارزیابی کیفی FTA در مجموع ۱۸ رویداد میانی و ۵۰ رویداد پایه شناسایی شد. روش سنتی FTA که صرفاً بر پایه احتمالات نقطه‌ای و گیت‌های بولین استوارند، در مواجهه با عدم قطعیت اپیستمیک (ناشی از کمبود داده یا تناقض نظرات خبرگان) (۶۳) و عدم قطعیت آلتاتوری (ناشی از تغییرات زمانی) (۶۴) دچار خطای سیستماتیک می‌شوند.

مطالعه صمیمی و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که احتمال‌های بازه‌ای در مقایسه با احتمال‌های نقطه‌ای، برتری دارند و در شرایطی که داده‌ها ناقص هستند،

عملکرد دقیق‌تری ارائه می‌کنند. همچنین بیان کردند که تلفیق نظریه دمپستر-شافر با شبکه‌های بیزین می‌تواند دقت و اطمینان ارزیابی ریسک را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد (۴۹). در این پژوهش، جهت تحلیل احتمالاتی FTA از شبکه‌های بیزین استفاده شد. نتایج مطالعه Hamza و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان داد که ساختار FTA در BN زمینه‌های معتبری برای تحلیل احتمالاتی پویا فراهم می‌کند (۶۵). احتمال رویداد اصلی با مقادیر Bel و Pl (به ترتیب برابر با $10^{-6} \times 1/74$ و $10^{-6} \times 8/29$ در هر سال) محاسبه شد. Bel و Pl گستره‌ای از مقادیر محتمل را پوشش می‌دهند و به جای تکیه بر داده‌های دقیق، امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از شرایط نامطمئن را فراهم می‌سازند. به منظور تخمین ریسک، از معیار ALARP انگلستان^۱ استفاده شد. بر پایه این معیار، حداکثر ریسک قابل تحمل برای وقوع یک مرگ برابر با 10^{-3} در سال و حداقل ریسک قابل قبول معادل 10^{-5} در سال تعیین شده است (۴۱). مطابق با منحنی کانتور ریسک جمعی (شکل ۸) در بازه Bel در ناحیه ALARP (قابل تحمل) واقع شده و در بازه Pl در ناحیه غیرقابل قبول و قابل تحمل قرار گرفت.

نمودار FN ارائه‌شده (شکل ۷)، ارزیابی ریسک اجتماعی را در چارچوب نظریه شواهد نمایش می‌دهد و بیانگر وجود عدم قطعیت اپیستمیک معنادار در برآورد فراوانی تجمعی مرگ‌ومیر ناشی از سناریوهای حادثه‌ای است. در این چارچوب، دو کران Pl و Bel به ترتیب بازتاب‌دهنده دیدگاه‌های بدبینانه (محافظه‌کارانه) و خوش‌بینانه نسبت به ریسک مرگ‌ومیر اجتماعی هستند. منحنی Pl به عنوان کران بالای محافظه‌کارانه، معرف بدترین حالت معقول در برآورد فراوانی تجمعی مرگ‌ومیر است و با فرض بیشینه‌سازی عدم قطعیت، احتمال وقوع سناریوهای با تلفات بالاتر را در سطحی بالاتر برآورد می‌کند. در مقابل، منحنی bel که حداقل درجه باور را نمایش می‌دهد، نمایانگر برآورد خوش‌بینانه‌تر از ریسک مرگ‌ومیر بوده و عمدتاً بر شواهدی با سطح اطمینان

1. UK HSE

داده‌های فازی تبدیل و پس از ترکیب شواهد با قواعد دمپستر-شافر، در شبکه بیزین برای تحلیل احتمال‌ها به کار گرفته شد. این رویکرد موجب بهبود دقت و اطمینان نتایج در شرایط داده‌های ناقص گردید (۵۲). همچنین Sánchez و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که با استفاده از نظریه دمپستر-شیفر می‌توان عدم قطعیت ناشی از کمبود یا ناسازگاری داده‌ها را بهتر مدیریت کرد؛ به طوری که تکیه بر استنتاج مبتنی بر شواهد باعث می‌شود مدل حتی زمانی که داده‌ها ناقص یا متناقض هستند، نتایج قابل اعتمادتر و پایدارتری ارائه دهد (۶۷). هم‌راستا با این یافته، نتایج گزارش شده توسط عباسی خرجو و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان می‌دهد که تلفیق شبکه‌های بیزین فازی با مدل سازی پیامد، مؤثرترین عامل در ارتقای دقت تخمین کمی ریسک و کاهش خطای ناشی از قطعیت‌های عددی در رویدادهای پایه است (۴۱). با توجه به اینکه مخزن ذخیره سازی کلر مورد مطالعه، در این پژوهش در بازه ریسک احتمالاتی که در ناحیه ریسک غیرقابل قبول قرار دارد نیازمند اجرای فوری اقدامات کاهش ریسک شامل نصب سیستم خودکار، حسگرهای چندگانه H_2S/Cl_2 و بازطراحی پایه‌های مخزن است. این تفاوت میان مقادیر Pl و Bel در پژوهش حاضر، همسو با نتایج مدل سازی Kwak و همکاران (۲۰۲۴) در ارزیابی ریسک ایستگاه‌های هیدروژن شهری است. نتایج مطالعه آنها نشان داد که خروجی‌های حاصل از نرم‌افزار SAFETI 8.4، در بازه Pl کانتورهای ریسک فردی را عمدتاً در محدوده‌ی غیرقابل قبول قرار می‌دهد؛ وضعیتی که تنها با افزودن سامانه‌های حفاظت فعال نظیر شیرهای قطع خودکار، کنترل هوشمند نرخ انتشار، و سامانه‌های اضطراری تهویه گاز به سطح ALARP قابل انتقال است. این تطابق نشان می‌دهد که در هر دو مدل، پویایی ساختار شبکه و ماهیت داده‌های ورودی نقش تعیین‌کننده‌ای در عبور یا ماندن در مرزهای پذیرش ریسک داشته و تقویت زیرسامانه‌های کنترل فعال شرط ضروری برای بازگشت سطوح ریسک از وضعیت Pl به محدوده‌ی قابل تحمل محسوب می‌شود (۴۰). هم‌راستایی نتایج به دست آمده از کانتورهای

بالتر تکیه دارد. قرارگیری این منحنی در مقادیر پایین‌تر و ورود زودتر آن به فاز کاهشی نشان می‌دهد که با اتکا به داده‌های معتبرتر و حذف فرضیات محافظه کارانه، برآورد فراوانی تجمعی مرگ‌ومیر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. با وجود آنکه بخش قابل توجهی از بازه عدم قطعیت میان منحنی‌های Pl و Bel در محدوده معیارهای پذیرش ریسک قرار می‌گیرد، تقاطع کران بدبینانه Pl با ناحیه ریسک غیرقابل قبول در برخی مقادیر بالاتر مرگ‌ومیر FN نشان می‌دهد که ریسک مرگ‌ومیر اجتماعی در تمامی سناریوها به طور کامل قابل قبول نیست. این امر بیانگر آن است که در چارچوب تصمیم‌گیری محافظه کارانه، صرف اتکا به معیارهای پذیرش کلی کفایت نداشته و لزوم مداخله کاهشی ریسک همچنان پابرجاست. بر این اساس، رویکرد ALARP اقتضا می‌کند که تمرکز تصمیم‌گیری بر کاهش هدفمند ریسک در ناحیه‌های بحرانی—به ویژه سناریوهای با پیامدهای مرگ‌ومیر بالا—قرار گیرد، به گونه‌ای که با اعمال اقدامات فنی، عملیاتی یا مدیریتی متناسب، منحنی Pl به سمت ناحیه قابل تحمل رانده شود، در حالی که از تحمیل اقدامات نامتناسب در نواحی با سطح باور بالاتر Bel اجتناب گردد.

در راستای یافته‌های این پژوهش، Guo و همکاران (۲۰۲۱) با به کارگیری مدل Fuzzy Dynamic Bayesian Network نشان دادند که به کارگیری منطق فازی در ساختار شبکه‌های بیزین می‌تواند دقت ارزیابی خطر و توان کمی سازی عدم قطعیت را به صورت چشمگیری افزایش دهد (۵). همچنین Guo و همکاران (۲۰۲۳) از نظریه دمپستر-شافر برای تجمیع قضاوت‌های کارشناسان و کاهش عدم قطعیت ناشی از اختلاف نظرها استفاده شده تا احتمال وقوع حالات مختلف عملکرد در روش تحلیل تشدید عملکردی به صورت کمی تعیین شود (۶۶). در مطالعه‌ای همسو، یزدی و همکاران (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از مجموعه‌های فازی، نظریه شواهد دمپستر-شافر و شبکه بیزین، چارچوبی تلفیقی برای کاهش عدم قطعیت در ارزیابی ریسک فرآیندی ارائه کردند. در این روش، قضاوت‌های زبانی خبرگان به

ریسک Bel و Pl با مطالعات Kwak و عباسی خرجو نیز دلالت بر صحت مدل BN-DS T دارد؛ به گونه‌ای که هر سه مدل، رفتار ریسک را در مرز گذار از وضعیت قابل تحمل به غیرقابل قبول آشکار ساخته‌اند. این مجموعه شواهد تأکید می‌کند که پایداری و اعتبار نقشه‌های کانتوری تنها زمانی تضمین خواهد شد که تحلیل بر پایه داده‌های هواشناسی واقعی و ماهانه انجام گیرد؛ عاملی که تضمین‌کننده سازگاری مدل با شرایط زمانی و مکانی واقعی انتشار است.

در این پژوهش، یک چارچوب تحلیلی پیشرفته برای ارزیابی ریسک انتشار ناشی از مخازن کلر ارائه شده است که با تلفیق شبکه بیزین و D-ST، امکان تحلیل جامع‌تری از عدم قطعیت در فرآیند ارزیابی ریسک فراهم می‌کند. در این رویکرد، به جای استفاده از مقادیر عددی نقطه‌ای برای احتمال وقوع و پیامد، از بازه‌های (Pl, Bel) بهره گرفته شده است تا دامنه تغییرپذیری و ابهام در داده‌ها و قضاوت‌های کارشناسی دقیق‌تر بازتاب یابد. ساختار پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده که تغییرات شرایط عملیاتی و داده‌های جدید را در فرآیند استنتاج ریسک لحاظ کرده و بدین ترتیب ارزیابی ریسک از حالت نقطه‌ای به بازه‌ای سازگار با شرایط واقعی تبدیل می‌شود. افزون بر این، نتایج مدل DS T-BN با خروجی‌های نرم‌افزار SAFETI 8.4 تلفیق شده است تا محاسبه بازه‌ای ریسک و پیامدهای انتشار به صورت هم‌زمان امکان‌پذیر شود.

بر اساس مطالعات منتشرشده، مدل‌های آنالیز پیامد به کاررفته در نرم‌افزار PHAST به طور گسترده مورد صحت‌گذاری و اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند و عملکرد آن‌ها از طریق مقایسه خروجی‌های عددی با داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی در مقیاس‌های مختلف ارزیابی شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که معادلات حاکم بر رهايش، انتشار، پخش و رفتار گازها و بخارات خطرناک در PHAST، از جمله برای موادی نظیر گاز طبیعی مایع‌شده، پروپان، بوتان، اتیلن، آمونیاک، کلر، هیدروژن، دی‌اکسید کربن و HF، توانایی بازتولید مناسب رفتار فیزیکی ابرهای گازی

را داشته و تطابق قابل قبولی با داده‌های واقعی نشان می‌دهند. از این رو، استفاده از PHAST در این مطالعه به عنوان یک ابزار معتبر و ولیدشده برای شبیه‌سازی سناریوهای انتشار مواد خطرناک قابل توجیه بوده و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده می‌تواند به عنوان مبنایی قابل اعتماد برای تحلیل پیامد و تفسیر مهندسی مورد استفاده قرار گیرد (۳۹، ۳۳).

برآیند این دستاوردها، ایجاد چارچوبی یکپارچه، هوشمند و انطباق‌پذیر برای برآورد واقع‌گرایانه و لحظه‌ای ریسک در سامانه‌های ذخیره‌سازی کلر است که قابلیت پشتیبانی از تصمیم‌گیری ایمن در شرایط عدم قطعیت را دارا می‌باشد.

مهم‌ترین محدودیت پژوهش حاضر، نبود داده‌های برخط و میدانی از حسگرهای نظارتی است که دقت مدل ارزیابی ریسک را در شرایط واقعی محدود می‌سازد. این چالش با استقرار سامانه‌های هوشمند اینترنت اشیا (IoT) برای جمع‌آوری داده‌های فرآیندی و محیطی به صورت لحظه‌ای قابل رفع است. در گام‌های آتی، توسعه مدل‌های ترکیبی مبتنی بر یادگیری و استنتاج پیشنهاد می‌شود تا بر پایه داده‌های هواشناسی و عملیاتی در زمان واقعی، پیش‌بینی کوتاه‌مدت و میان‌مدت ریسک انتشار با دقت بالاتری انجام گیرد. همچنین، تعمیم مدل از سطح یک واحد صنعتی به کل زنجیره تأمین کلر مایع می‌تواند بستر شکل‌گیری یک سامانه ملی برای پایش و تصمیم‌گیری یکپارچه در مدیریت ریسک مواد خطرناک را فراهم آورد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که سطح ریسک جمعی انتشار گاز کلر از مخازن ذخیره‌سازی در شرایط خوش‌بینانه در محدوده قابل تحمل و در شرایط بدبینانه در ناحیه غیرقابل قبول قرار دارد. این تفاوت بیانگر اثر مستقیم سامانه‌های کنترلی، شرایط عملیاتی و میزان عدم قطعیت موجود در داده‌ها و قضاوت‌های کارشناسی بر میزان نهایی ریسک است. چارچوب تلفیقی طراحی‌شده بر پایه

== کد اخلاق

این پژوهش توسط کمیته اخلاق در پژوهش دانشگاه علوم پزشکی ایران با شماره کد اخلاق IR.IUMS. REC.1404.549 تأیید شده است.

== تأمین مالی

نویسندگان اعلام می کنند که برای انجام پژوهش، نگارش و/یا انتشار این مقاله حمایت مالی دریافت کرده اند. این پژوهش با حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران انجام شده است.

شبکه های بیزین و نظریه دمپستر-شافر با ترکیب منسجم تحلیل احتمالاتی و مدیریت ابهام، امکان ارزیابی دقیق تر و واقع گرایانه تر سطح ریسک را فراهم ساخته است. این روش با توانایی خود در بازتاب تغییرات شرایط فرآیندی و کیفیت داده ها، ابزاری علمی و کارآمد برای تحلیل، پایش و مدیریت ریسک در سامانه های ذخیره سازی مواد خطرناک و به ویژه مخازن کلر به شمار می رود.

== تشکر و قدردانی

نویسندگان صمیمانه مراتب قدردانی خود را از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران ابراز می دارند.

== REFERENCES

1. Crowl DA, Louvar JF. Chemical process safety: fundamentals with applications: Pearson Education; 2001.
2. Lyu Y, Tian J, Chen L. Enabling sustainable chemical manufacturing from product to industrial ecosystem. Resources, Conservation and Recycling. 2023;192:106915.
3. Benson C, Obasi IC, Akinwande DV, Ile C. The impact of interventions on health, safety and environment in the process industry. Heliyon. 2024;10(1).
4. Safety CfCP. Guidelines for safe and reliable instrumented protective systems: John Wiley & Sons; 2010.
5. Guo X, Ji J, Khan F, Ding L, Tong Q. A novel fuzzy dynamic Bayesian network for dynamic risk assessment and uncertainty propagation quantification in uncertainty environment. Safety science. 2021;141:105285.
6. Zainulabidin S, Rashid ZA, Ahmad MA, Zamri LHM. Chlorine-related from two (2) incidents in water treatment plant: A comprehensive review on root cause analysis. Process Safety and Environmental Protection. 2025;199:107286.
7. Ali N, Khan N, Mustahsan S, Ali S, Waheed S, Khan U. Chlorine gas hazardous material incident in Karachi, Pakistan: A clinical experience from an emergency department of a tertiary care hospital. JPMA The Journal of the Pakistan Medical Association. 2023;73(4):834-7.
8. Węsierski T, Majder-Łoparka M. Wykolejenie się wagonów kolejowych z chlorem w Białymstoku, Analiza zdarzenia i możliwych scenariuszy. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. 2012;2:71-80.
9. Govier P, Coulson J. Civilian exposure to chlorine gas: a systematic review. Toxicology letters. 2018;293:249-52.
10. Masoumi G, Maniey M, Aghababaeian H, Ostadtaghizadeh A, Ahvazi LA. Lessons learned from a chlorine gas leakage in Dezful City, Iran. Disaster medicine and public health preparedness. 2022;16(2):818-24.
11. Mahmoudabadi M, Sakhaeipour F. Numerical analysis on the influence of the cross section of ultimate capacity of reinforced concrete columns reinforced with CFRP. Journal of Structural and Construction Engineering. 2020;7(Special Issue 1):107-25.
12. Cristea G, Constantinescu DM, editors. A comparative critical study between FMEA and FTA risk analysis methods. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2017: IOP Publishing.
13. Ab Rahim MS, Reniers G, Yang M, Bajpai S. Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2024;88:105274.
14. Chastain JW, Delanoy P, Devlin C, Mueller T, Study K. Beyond HAZOP and LOPA: Four different company approaches. Process Safety Progress. 2017;36(1):38-53.
15. Senova A, Tobisova A, Rozenberg R. New approaches to project risk assessment utilizing the Monte Carlo

- method. *Sustainability*. 2023;15(2):1006.
16. Safety CfCP. Guidelines for risk based process safety: John Wiley & Sons; 2010.
17. Leondes CT. Fuzzy logic and expert systems applications: Elsevier; 1998.
18. Zadeh LA. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*. 1978;1(1):3-28.
19. Kabir S, Papadopoulos Y. A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2018;100:29-55.
20. Hendershot DC. A history of process safety and loss prevention in the American Institute of Chemical Engineers. *Process Safety Progress*. 2009;28(2):105-13.
21. Keyvani Brojeni M, Kheirandish Sarabi S, Vosoughi S, Sourì B, Akbarzadeh Miandoab F, Moradi Hanifi S. QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT OF A CARBON DIOXIDE STORAGE TANK BY USING CONSEQUENCE MODELING AND FUZZY BAYESIAN NETWORKS. *Iran Occupational Health Journal*. 2025;22(1):12.
22. Mohammadi H, Fazli Z, Kaleh H, Azimi HR, Moradi Hanifi S, Shafiee N. Risk analysis and reliability assessment of overhead cranes using fault tree analysis integrated with Markov chain and fuzzy Bayesian networks. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021;2021(1):6530541.
23. Vose D. Risk analysis: a quantitative guide: John Wiley & Sons; 2008.
24. Pourret O, Na P, Marcot B. Bayesian networks: a practical guide to applications: John Wiley & Sons; 2008.
25. HELTON JC, BURMASTER DE. Treatment of aleatory and epistemic uncertainty. *Reliability engineering & systems safety*. 1996;54(2-3).
26. Barth V, Serrão F, Maciel C. Assessing Credibility in Bayesian Networks Structure Learning. *Entropy*. 2024;26(10):829.
27. Lu L, Goerlandt F, Banda OAV, Kujala P. Developing fuzzy logic strength of evidence index and application in Bayesian networks for system risk management. *Expert Systems with Applications*. 2022;192:116374.
28. Koks D, Challa S. An introduction to Bayesian and Dempster-Shafer data fusion: DSTO Systems Sciences Laboratory Laverton Ave, ACT, Australia; 2003.
29. Shafer G. A mathematical theory of evidence. 2020.
30. Smets P. What is Dempster-Shafer's model. *Advances in the Dempster-Shafer theory of evidence*. 1994:5-34.
31. Park SJ, Ogunseitan OA, Lejano RP. Dempster-Shafer theory applied to regulatory decision process for selecting safer alternatives to toxic chemicals in consumer products. *Integrated environmental assessment and management*. 2014;10(1):12-21.
32. Nazari S, Karami N, Moghadam H, Nasiri P. Consequence analysis of BLEVE scenario in the propane tank: A Case study at Bandar Abbas gas condensate refinery of Iran. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, Volume. 2015(4):472-5.
33. Hanna S, Dharmavaram S, Zhang J, Sykes I, Witlox H, Khajehnajafi S, et al. Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents. *Process Safety Progress*. 2008;27(3):248-59.
34. Pouyakian M, Ashouri M, Eidani S, Madvari RF, Laal F. A systematic review of consequence modeling studies of the process accidents in Iran from 2006 to 2022. *Heliyon*. 2023;9(2).
35. Mazzola T, Hanna S, Chang J, Bradley S, Meris R, Simpson S, et al. Results of comparisons of the predictions of 17 dense gas dispersion models with observations from the Jack Rabbit II chlorine field experiment. *Atmospheric Environment*. 2021;244:117887.
36. Nashira A, Nugrahani AP, Rahmah AU, Cahyono T. Quantitative risk assessment of ammonia release from storage tanks using RISKCURVES software. *Engineering Proceedings*. 2025;84(1):80.
37. Özay ME, Güzel P, Can E. Consequence Modelling and Analysis of Methane Explosions: A preliminary Study on Biogas Stations. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. 2021;7(1):132-44.
38. Alivi AT, Shahraki F, Birjandi MS, Langerudi MK. Consequences modeling and determining of safe distance in the natural gas pressure reduction station using PHAST software (Case study: Borumi station in Ahvaz). *Occupational Medicine*. 2023.
39. Witlox HW, Fernández M, Harper M, Oke A, Stene J, Xu Y. Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2018;55:457-70.
40. Kwak H, Kim M, Min M, Park B, Jung S. Assessing the quantitative risk of urban hydrogen refueling station

- in Seoul, South Korea, using SAFETI model. *Energies*. 2024;17(4):867.
41. Abbasi Kharajou B, Ahmadi H, Rafiei M, Moradi Hanifi S. Quantitative risk estimation of CNG station by using fuzzy bayesian networks and consequence modeling. *Scientific reports*. 2024;14(1):4266.
 42. Pitts MJ. An introduction to HAZOP: A hazard and operability technique. *Journal of Chemical Education*. 1987;64(2):A44.
 43. de la O Herrera MA, Luna AS, da Costa ACA, Lemes EMB. Risk Analysis: A generalized Hazop methodology state-of-the-art, applications, and perspective in the process industry. *Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia*. 2018;6(2):106-21.
 44. Aliabadi MM, Ramezani H, Kalatpour O. Quantitative Risk Assessment of Condensate Storage Tank, Considering Domino Effects. *Journal of Health & Safety at Work*. 2022;12(1).
 45. Kramer CG. Chlorine. *Journal of Occupational Medicine*. 1967;9(4):193-6.
 46. Grossel SS. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis: ; By Center for Chemical Process Safety; American Institute of Chemical Engineers, New York, NY, 2000, pp. 750. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2001;14(5):438-9.
 47. Signoret J-P, Leroy A, Signoret J-P, Leroy A. Fault tree analysis (FTA). *Reliability Assessment of Safety and Production Systems: Analysis, Modelling, Calculations and Case Studies*. 2021:209-25.
 48. Mandali H, Ghasemi F, Farshad AA, Moradi Hanifi S, Abedi K, Ghorbani M, et al. Risk and Reliability Assessment of Metal Lathe Machining Operation with DBN--FFTA Hybrid Approach. *Mathematical Problems in Engineering*. 2023;2023(1):8873531.
 49. Samimi K, Zareie E, Omidavar M, Ghiasi J, Azimi P, Pouyakian M. Developing an Integrated Framework to Reduce Uncertainty in Process Risk Assessment Based on Dempster-Shafer Evidence Theory and Bayesian Network: A Case Study in Oil Reservoirs Using Multiple Sources of Evidence. *Journal of Health and Safety at Work*. 2025;15(3):532-57.
 50. Chen Q, Whitbrook A, Aickelin U, Roadknight C. Data classification using the Dempster–Shafer method. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2014;26(4):493-517.
 51. Abimbola M, Khan F, Khakzad N, Butt S. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Safety science*. 2015;76:133-44.
 52. Yazdi M, Kabir S. Fuzzy evidence theory and Bayesian networks for process systems risk analysis. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2020;26(1):57-86.
 53. Assael MJ, Kakosimos KE. Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis: CRC Press; 2010.
 54. Mohammadi H, Laal F, Mohammadian F, Yari P, Kangavari M, Hanifi SM. Dynamic risk assessment of storage tank using consequence modeling and fuzzy Bayesian network. *Heliyon*. 2023;9(8).
 55. Hesami Arani M, Jaafarzadeh N, Khaleghi Dehabadi P, Mostafaei G, Tazik M, Karimi Z, et al. Health and safety hazards identification and risk assessment in the swimming pools using combined HAZID and ALARP. *Environmental Health Engineering and Management Journal*. 2020;7(3):151-60.
 56. Zarghami R, Karimpour K, Mousavian M, Bahmaniar H. Individual Risk Assessment in an Olefin Plant. 2014.
 57. Witlox H, Fernandez M, Harper M, Oke A, Stene J, Xu Y. VERIFICATION AND VALIDATION OF PHAST CONSEQUENCE MODELS FOR ACCIDENTAL RELEASES OF TOXIC OR FLAMMABLE CHEMICALS TO THE ATMOSPHERE. *journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018.
 58. Bahrami A, Akbari H, Nezamabadi A, Khajevandi AA. Risk assessment and modeling of chlorine leakage consequences using fuzzy HAZOP technique and PHAST software. 2023.
 59. Amsc N, SAFT AA. Department of defense standard practice system safety. US; 2012.
 60. Shao H, Duan G. Risk quantitative calculation and ALOHA simulation on the leakage accident of natural gas power plant. *Procedia Engineering*. 2012;45:352-9.
 61. Renjith VR, Madhu G, Nayagam VLG, Bhasi AB. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. *Journal of hazardous materials*. 2010;183(1-3):103-10.
 62. Song GS, Kim MC. Mathematical formulation and analytic solutions for uncertainty analysis in probabilistic safety assessment of nuclear power plants. *Energies*. 2021;14(4):929.

63. Sahlin U, Helle I, Perepolkin D. "This is what we don't know": Treating epistemic uncertainty in Bayesian networks for risk assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2021;17(1):221-32.
64. Yazdi M, Golilarz NA, Adesina KA, Nedjati A. Probabilistic risk analysis of process systems considering epistemic and aleatory uncertainties: a comparison study. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2021;29(02):181-207.
65. Hamza Z, Abdallah T, editors. Mapping Fault Tree into Bayesian Network in safety analysis of process system. 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE); 2015: IEEE.
66. Guo Y, Hu S, Jin Y, Xi Y, Li W. A hybrid probabilistic risk analytical approach to ship pilotage risk resonance with FRAM. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(9):1705.
67. Sánchez L, Vasile M, Sanvido S, Merz K, Taillan C. Treatment of epistemic uncertainty in conjunction analysis with Dempster-Shafer theory. *Advances in Space Research*. 2024;74(11):5639-86.