Original Article

Iran Occupational Health

http://ioh.iums.ac.ir

Iran Occupational Health. 2025 (01 Aug);22: 12

Quantitative Risk Assessment of A Carbon Dioxide Storage Tank by Using Consequence Modeling and Fuzzy Bayesian Networks

Mohammadhosein Keyvani Brojeni, Student Research Committee, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
Somayeh Kheirandish Sarabi, Student Research Committee, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
Shahram Vosoughi, Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
Behzad Souri, Student Research Committee, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
Fatemeh Akbarzadeh Miandoab, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran.
Saber Moradi Hanifi, (*Corresponding author), Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. moradi.sab@iums.ac.ir

Abstract

Background and aims: Given the asphyxiant and odorless nature of carbon dioxide gas, which, while non-toxic, can pose a serious threat to human life at high concentrations, this study aims to conduct a more precise risk assessment. Since the conventional Bowtie method, by itself, is incapable of dynamic analysis and does not adequately account for uncertainties, this research integrates the causal framework of the Bowtie method with Bayesian Networks, together with consequence modeling and risk assessment using SAFETI 8.4 software. This integrated approach provides a practical framework for enhanced hazard identification, more accurate evaluation of CO_2 leak consequences, and improved preparedness against potential accidents.

Methods: In this study, after hazard identification using the HAZOP method, leakage scenarios were defined and analyzed through an integrated Bowtie–Bayesian Network approach implemented in GeNIe 5.0. Event probabilities were estimated using a fuzzy logic-based method, and the consequences of leakages were modeled with PHAST 8.4. Finally, risk assessment was conducted using the probit equation in SAFETI 8.4.

Results: In the Bowtie approach, a total of 17 basic events and 13 intermediate events were identified. The probability of the final consequence resulting from CO_2 leakage, calculated using the Bowtie method and the integrated Bowtie–Bayesian Network approach, was 7.832726×10^{-6} using the Bowtie approach and 7.305449×10^{-6} when combined with the Bayesian Network. The most critical basic events were identified as: (1) failure in equipment maintenance, (2) failure in connections and clamp No. 1, and (3) poor quality of purchased equipment. The highest concentration in the event of catastrophic rupture was determined to be 10^6 ppm at a distance of 5 meters from the tank. The risk level was less than 10^{-4}, which is within the acceptable range.

Conclusion: The social risk curve showed that the risk associated with the carbon dioxide tank is at an acceptable level, indicating a low level of risk. Complex models, such as Fuzzy Bayesian Networks (FBN), can significantly contribute to optimal decision-making in safety and crisis management, particularly when modeling high-risk accidents and assessing associated risks.

Conflicts of interest: None

Funding: This article is the result of a research project approved by the Student Research Committee of Iran University of Medical Sciences.

Keywords

Carbon Dioxide

Bayes Theorem

Accidents

Risk Assessment

Received: 2025/03/6

Accepted : 2025/07/8

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Carbon dioxide (CO_2), though commonly regarded as a colorless, odorless, and non-toxic gas, poses significant health threats at elevated concentrations. Numerous documented industrial accidents involving CO_2 release—some of which have been fatal underscore the necessity for accurate risk assessment of pressurized CO_2 storage tanks. Due to its physical properties, particularly its density approximately 50% greater than that of air CO_2 tends to accumulate in low-lying areas, thereby amplifying exposure risks in the event of leakage.

Various risk assessment methodologies are employed across industries; however, each presents distinct limitations. Among them, the Bowtie approach—a hybrid of Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA) stands out as a powerful graphical tool for assessing complex accident scenarios [17]. Despite the advantages of this approach such as capturing causes, consequences, and preventive barriers in an integrated manner one of its limitations is the static nature of the model, making it unable to analyze system dynamics and potential uncertainties.

To overcome these limitations, the present study integrates Bayesian Network modeling using GeNIe 5.0 software to update probabilities dynamically and represent causal relationships under uncertainty. Moreover, to quantitatively assess the consequences of potential CO_2 release scenarios, the SAFETI 8.4 software was utilized. The software enables the modeling of complex scenarios, estimating the severity of consequences and accurately delineating high-risk zones. This integrated framework which combines Bowtie-based risk analysis, Bayesian networks, and consequence modeling provides a comprehensive and reality-based model for risk assessment.

The outcomes of this study provide valuable insights for decision-makers in high-risk industries, facilitating a deeper understanding of accident causality and the severity of consequences. Ultimately, the innovative contribution of this research lies in the synergistic use of classical and contemporary tools to enhance the accuracy, adaptability, and practical relevance of risk analyses in complex industrial environments.

METHODOLOGY

This study, conducted in 2024, aimed to conduct a Quantitative Risk Assessment (QRA) of CO_2 leakage from a cryogenic vertical storage tank. Initially, hazards were identified using the HAZOP technique by a multidisciplinary expert panel comprising process engineers, operations specialists, instrumentation experts, and process safety specialists. Through structured sessions, critical nodes within the process were identified, and three likely scenarios a 2-inch leak, a 4-inch leak, and a catastrophic rupture were selected as the basis for further assessment.

The Bowtie approach was utilized to construct a cause-and-effect diagram. For the qualitative and quantitative analysis of basic events, Fault Tree Analysis (FTA) was employed, while Event Tree Analysis (ETA) was utilized for consequence assessment. Due to the lack of sufficient statistical data, the basic event probabilities were estimated using expert judgment and fuzzy theory. Expert selection was based on criteria such as educational level, professional experience, and peer validation. A seven-point scale was used to estimate the probabilities of these basic events. The fuzzy numbers were then defuzzified. Equation 1 was used for consensus among experts:

$$Z_i = \sum_{j=1}^{n} w_j f_{ij}, i = 1, 2, ..., m, j = 1, 2, ..., n \quad (1)$$

Z_i: Aggregated fuzzy number for Basic Event i, w_j: represents the weight of expert j, and f_{ij}: the corresponding fuzzy number of BE_i given by expert j. n and m: the number of experts and BE_s.

Therefore, the fuzzy possibility scores of fuzzy number Zi can be obtained by Equation 2:

$$FPS(Z_i) = [FPS_{Right}(Z_i) + 1 - FPS_{Left}(Z_i)]/2 \quad (2)$$

Zi: Aggregated fuzzy number for Basic Event i, FPS(Zi): Fuzzy Possibility Score of Zi, $FPS_{Right}(Zi)$

Right-side possibility score of Z_i, $FPS_{left}(Z_i)$: left-side possibility score of Z_i.

FPS are converted to failure probability by using the following Equation 3:

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

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

To compute the probability of both the critical event (CO_2 release) and its final consequence (toxic gas dispersion), Bayesian Networks (BN) were employed. Sensitivity analysis using GeNIe 5.0 helped identify the most critical basic events. For consequence modeling, PHAST 8.4 was used to model toxic gas dispersion across different seasons, incorporating weather parameters obtained from the local meteorological office—such as wind speed, temperature, humidity, and atmospheric stability.

Risk estimation was performed using SAFETI 8.4, which modeled the release scenarios and employed the probit equation to determine individual and Social risk contours. The probit constants for CO_2 were set at

Equation 4 [53]:

$$pr = -90.80 + 1.01\ln(C^{8} \times t) \quad (4)$$

Pr: The probit variable, C: concentration of toxic gas (ppm), t: time of exposure (min).

This comprehensive modeling approach provided a realistic assessment of potential consequences on surrounding populations and infrastructure.

RESULTS

This study presents a comprehensive risk assessment of pressurized carbon dioxide (CO_2) tank leakage using an integrated approach combining Bowtie diagrams, Fuzzy Theory, and Bayesian Networks (BN). Initially, the Bowtie diagram was developed based on Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA), illustrating potential causes of leakage on the left side and preventive barriers and consequences on the right. The calculated probability of the top event (CO_2 leakage) was 2.105571×10^{-2}.

To estimate the probabilities of basic events, a panel of seven experts with diverse backgrounds was formed. Using Fuzzy Theory, each expert was assigned a weight based on education, work experience, and profession. These weights were then used to adjust the base probabilities.

Subsequently, BN modeling was conducted using GeNIe 5.0 software to estimate the final probability of consequences. According to the Bowtie approach, the probability of "no consequence" was 2.104788×10^{-2}, while the probability of "toxic dispersion" was 6.832726×10^{-6}. In contrast, the BN approach yielded slightly different estimates: 2.963100×10^{-2} for "no consequence" and 6.305449×10^{-6} for "toxic dispersion," highlighting methodological differences in consequence estimation.

Sensitivity analysis identified three key basic events with the highest impact on the top event: BE11 (failure in equipment maintenance), BE7 (failure in connections and clamp No. 1), and BE15 (poor quality of purchased equipment).

For consequence modeling, seasonal variations in maximum CO_2 gas concentration (ppm) were analyzed as a function of distance from the leak point, based on local meteorological data. Additionally, gas cloud dispersion was modeled along longitudinal and lateral axes.

Finally, risk estimation was performed by combining consequences with event frequencies for various scenarios, including 2-inch and 4-inch leaks, as well as catastrophic rupture. All calculations were automated within the software environment. The resulting individual and Social risk contours were generated, illustrating, respectively, the fatality probability at specific locations and the relationship between event frequency and number of fatalities. The highest concentration in the event of catastrophic rupture was determined to be 10^{6} ppm at a distance of 5 meters from the tank. The risk level was less than 10^{-4}, which is within the acceptable level, as shown in Fig. 1.

DISCUSSION

In this study, the Quantitative Risk Assessment process for a cryogenic CO_2 storage tank was conducted using a hybrid approach combining the Bowtie approach, fuzzy theory, and Bayesian networks (BN). The primary objective of this study is to develop a comprehensive risk assessment method and evaluate the consequences associated with CO_2 leakage, utilizing advanced techniques to establish a robust framework for managing such risks under diverse environmental conditions.

The Bowtie approach identified 17 basic events and 13 intermediate events. The highest probability among the basic events was related to BE11 (equipment maintenance failure), while the lowest belonged to BE5 (inlet/outlet valve failure No. 1). The probability of the top event (CO_2 leakage) was estimated at 2.105571×10^{-2} using FTA, and 1.963830×10^{-2} using BN. Similarly, the toxic dispersion consequence was estimated at 7.832726×10^{-6} using ETA and 7.305449×10^{-6} using GeNIe 5.0, highlighting the advantage of BN in addressing uncertainty and interdependencies.

Sensitivity analysis revealed that BE11 (failure in equipment maintenance), BE7 (failure in connections and clamp No. 1), and BE15 (poor quality of purchased equipment) were the most critical basic events. These findings align with previous studies, including Eskandari et al. and Munahar et al. A catastrophic rupture scenario of the tank under seasonal variations indicated that within a 5-meter radius, CO_2 concentrations remained above 10^{6} ppm, designated as the "immediate death zone." Beyond this radius, a rapid exponential decrease was observed especially during summer due to enhanced turbulent mixing.

Meteorological parameters such as atmospheric stability, wind speed, and temperature significantly affected dispersion behavior. In winter, due to increased stability, gas clouds extended further from the source. These findings are consistent with Hsieh et al. and Akedala Station, emphasizing the impact of environmental factors.

In the risk estimation, individual and Social risk curves were generated using the SAFETI 8.4 software and compared with the ALARP criteria of the Netherlands and the United Kingdom. The results indicated that the risk level falls within the acceptable level. For instance, at a frequency of 1×10^{-5}, the estimated number of fatalities was one, and at 6×10^{-5},

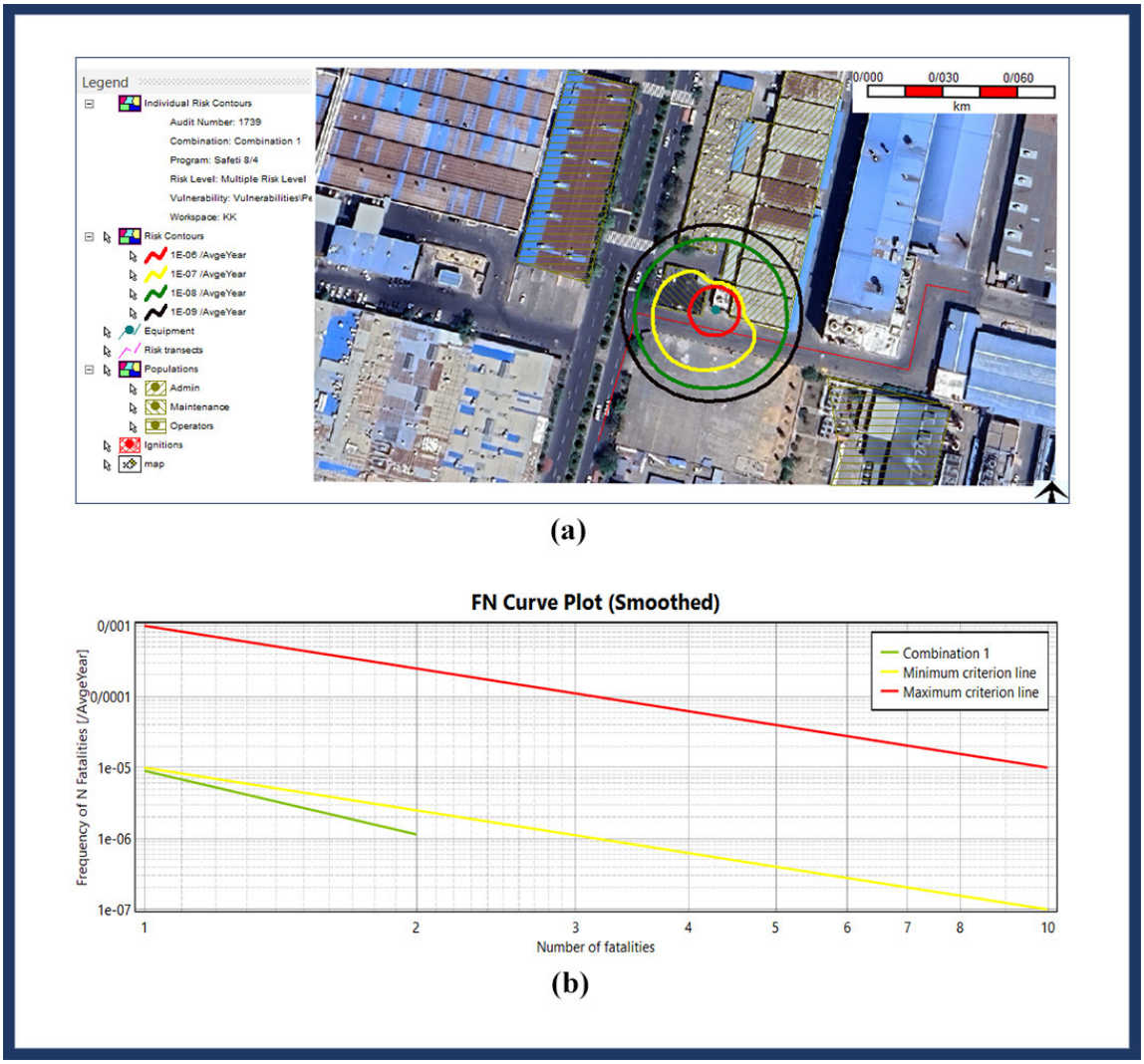


Fig. 1. (A) Individual Risk Contour; (B) Social Risk Contour Resulting from The Effects of Carbon Dioxide Leakage.

the estimated fatalities increased to two.

This study demonstrated that integrating Fuzzy Theory and Bayesian Networks (BN) with the Bowtie approach can serve as a powerful tool for more precise analysis of complex risks. However, certain limitations were identified, including the omission of some environmental parameters such as diurnal temperature variations and specific physical characteristics of the storage tank. For future research, it is recommended to incorporate more field data, apply multidimensional modeling, and further explore the integration of fuzzy–Bayesian approaches.

CONCLUSION

The research results demonstrate that modeling software such as SAFETI 8.4 and GeNIe 5.0 possesses high accuracy and reliability in assessing CO_2 leakage hazards. The alignment of results obtained from the Bowtie diagram and GeNIe 5.0 software with ALARP criteria validates this assessment as a reliable tool for estimating risk levels. The findings revealed that the hazard zone, and the individual and social risk curves, fall within acceptable levels. Complex models such as the Fuzzy Bayesian Network (FBN) play a crucial role in modeling high-risk accidents and assessing associated risks, thereby facilitating optimal decision-making in safety and crisis management.

ACKNOWLEDGMENT

This article is the result of a research project approved by the Student Research Committee of Iran University of Medical Sciences, with the project code IR.IUMS.REC.1403.028. The Vice Chancellor for Research and Technology of Iran University of Medical Sciences is gratefully acknowledged.

CONFLICT OF INTEREST

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

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors have contributed equally to this research.

OPEN ACCESS

ETHICAL CONSIDERATION

This study has been approved by the Vice Chancellor for Research and Technology of Iran University of Medical Sciences with the ethics code IR.IUMS.REC.1403.028.All information collected from the industrial unit has been kept strictly confidential and used only for the purpose of this research.

CODE OF ETHICS

IR.IUMS.REC.1403.028

How to cite this article:

Keyvani Brojeni M.H., Kheirandish Sarabi S., Vosoughi Sh., Souri 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. 2025 (01 Aug);21:12.

سلامت کار ایران
دوره ۲۰۲۲ - ۱۲/۱۴۰۴

مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

ارزیابی کمّی ریسک مخزن ذخیره دی‌اکسیدکربن با استفاده از مدل‌سازی پیامد و شبکه‌های بیزین فازی

محمد حسین کیوانی بروجنی: کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
سمیّه خیراندیش سرابی: کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
شهرام وثوقی: استادتمام، مرکز تحقیقات بهداشت کار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران،ایران.
بهزاد سوری: کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.
فاطمه اکبرزاده میاندوآب: دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران.
صابر مرادی حنیفی: (* نویسنده مسئول) استادیار، مرکز تحقیقات بهداشت کار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران.
moradi.sab@iums.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: با توجه به ماهیت خفه‌کننده و بی‌بو بودن گاز دی‌اکسیدکربن، که علیرغم غیرسمّی بودن، در غلظت‌های بالا می‌تواند تهدیدی جدّی برای جان انسان باشد، تلاش شده است تا به شیوه‌ای دقیق‌تر به ارزیابی ریسک پرداخته شود. از آنجا که روش سنتی Bowtie به‌تنهایی قادر به تحلیل پویا و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها نیست، در این مطالعه، ترکیب Bowtie با شبکه‌های بیزین و مدل‌سازی پیامد وتخمین ریسک از طریق نرم‌افزار SAFETI.8.4 است. این رویکرد یکپارچه، چارچوبی عملی برای شناسایی بهتر مخاطرات، ارزیابی دقیق‌تر پیامدهای نشت دی‌اکسیدکربن و ارتقاء سطح آمادگی در برابر حوادث احتمالی فراهم می‌آورد.

روش بررسی: در این مطالعه، پس از شناسایی مخاطرات با روش HAZOP، سناریوهای نشتی تعریف و با استفاده از رویکرد ترکیبی Bowtie و شبکه‌های بیزین در GeNIe 5.0 تحلیل شدند. احتمالات رویدادهای پایه با رویکرد فازی برآورد و پیامدهای نشت با PHAST 8.4 شبیه‌سازی گردید. در نهایت، تخمین ریسک با کمک معادله پروبیت در SAFETI 8.4 انجام شد.

یافته ها: در آنالیز Bowtie در مجموع ۱۷ رویداد پایه و ۱۳ رویداد میانی شناسایی شد که احتمال پیامد نهایی ناشی از نشت دی‌اکسیدکربن با روش Bowtie و تلفیق BN برابر با $۷/۸۳۲۷۲۶\times۱۰^{-۶}$ و $۷/۳۰۵۴۴۹\times۱۰^{-۶}$ بود. مهمترین رویدادهای پایه به ترتیب نقص در تعمیر تجهیزات، نقص در اتصالات و بست‌های شماره ۱ و نقص در کیفیت تجهیزات خریداری شده تشخیص داده شد. بیشترین غلظت در گسیختگی کامل مخزن $۱۰^{۶}$ ppm در شعاع ۵ متری از مخزن تعیین شد. سطح ریسک کمتر از $۱۰^{-۴}$ بود که در محدوده قابل قبول قرار گرفت.

نتیجه گیری: منحنی ریسک جمعی نشان داد که ریسک نشتی مخزن دی‌اکسیدکربن در ناحیه قابل قبول است که نشان دهنده پایین بودن سطح ریسک می‌باشد.استفاده از مدل‌های پیچیده مانند FBN به‌ویژه در شبیه‌سازی حوادث پرخطر و ارزیابی ریسک‌ها، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه ایمنی و مدیریت بحران کمک کند.

تعارض منافع: *گزارش نشده است.*

منبع حمایت کننده: *این مقاله حاصل طرح مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران می‌باشد.*

کلیدواژه‌ها
دی‌اکسیدکربن
تئوری بیزین
حوادث
ارزیابی ریسک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۱۷

شیوه استناد به این مقاله:
Keyvani Brojeni M.H., Kheirandish Sarabi S., Vosoughi Sh., Souri 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. 2025 (01 Aug);21:12.

مقدمه

دی‌اکسیدکربن (CO_2)گازی بی‌رنگ و بی‌بو است که به عنوان یک خفقان‌آور غیرسمّی در نظر شناخته می‌شود (۱). این تصور احتمالاً از آنجا ناشی می‌شود که طبق معیارهای قانونی، از جمله سیستم هماهنگ جهانی طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری مواد شیمیایی(GHS)[1]، این گاز در گروه سموم حاد طبقه‌بندی نمی‌شود. با این حال، این امر به‌معنای بی‌خطر بودن کامل آن نیست (۲). مقدار حد غلظت آنی تهدیدکننده جان انسان (IDLH)[2] برای دی‌اکسید کربن ۴۰۰۰۰ppm گزارش شده است (۳). حدود تماس شغلی دی‌اکسیدکربن ۵۰۰۰ppm و حدتماس میانگین وزنی زمانی آن ppm ۳۰۰۰۰ تعیین شده است (۴). براساس گزارش (EPA)[3] در فاصله سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۰، ۵۱ حادثه ناشی از انتشار دی‌اکسیدکربن به ثبت رسیده که منجر به ۷۲ مورد مرگ و ۱۴۵ مورد جراحت شده‌اند (۵). همچنین، موارد متعددی از مسمومیت با دی‌اکسیدکربن گزارش شده است که از جمله شناخته‌شده‌ترین آن‌ها می‌توان به حادثه مرگبار دریاچه نیوس در کشور کامرون اشاره کرد (۶). دانسیته گاز دی‌اکسیدکربن۵۰ درصد سنگین‌تر از هوا است. این ویژگی موجب می‌شود که در صورت نشت، گاز تمایل به تجمع در ارتفاعات پایین مانند کف فضاها یا مناطق پست داشته باشد (۷). همچنین در سال ۱۹۸۸ به میزان ۳۰ تن دی‌اکسیدکربن که در مخازن تحت فشاری ذخیره شده بودند در معدن پتاش آلمان نشت یافته و موجب مرگ سه کارگر شد (۸). بر اساس مطالعه‌ای که توسط Xi و همکاران انجام شده، فراوانی وقوع حوادث مرتبط با دی‌اکسیدکربن در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۷روندی صعودی داشته و سپس از ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ تا حدی کاهش یافته است (۹).

با این حال، پیشرفت صنعت و فناوری همچنان به افزایش حوادث ناشی از رهایش مواد سمّی و انفجار مواد شیمیایی در واحدهای صنعتی منجر شده است که سلامت کارکنان و جامعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ از این رو، پیشگیری از وقوع حوادث و حفظ سرمایه انسانی به عنوان محور اصلی توسعه هر کشور از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۰). پیشگیری موفق حوادث مستلزم انجام به موقع مطالعات ارزیابی و مدلسازی کمّی ریسک است تا بتوان استراتژی‌های پیشگیرانه و کنترلی طراحی و اجرا کرد (۱۱, ۱۲). روش‌های ارزیابی ریسک مختلفی وجود دارد که با ویژگی و توانایی خود به بررسی ریسک می‌پردازد: ازجمله تحلیل حالات و اثرات خرابی (FMEA)[4]، تحلیل خطرات و قابلیت‌های عملیاتی (HAZOP)[5]، تحلیل فرضی (What-if)، تحلیل درخت رویداد (ETA)[6] و تحلیل درخت خطا (FTA)[7] و... اشاره نمود (۱۳, ۱۴).

در میان روش‌های موجود، می‌توان از رویکرد ترکیبی FTA و ETA که تحت عنوان «رویکرد پاپیونی»[8] شناخته می‌شود، برای ارزیابی ریسک سناریوهای حوادث بهره گرفت (۱۵). رویکرد Bowtie در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی ریسک مانند FMEA و HAZOP، دارای مزایای منحصربه‌فردی است که آن را به ابزاری قدرتمند برای مدیریت ریسک در سیستم‌های پیچیده تبدیل می‌کند. مهم‌ترین مزیت Bowtie، قابلیت نمایش گرافیکی ساده از رابطه بین علل، رویداد اصلی[9]، پیامدها، و موانع کنترلی است. برخلاف FTA یا ETA که صرفاً به بررسی جنبه‌های علّی یا پیامدی می‌پردازند، Bowtie هر دو جنبه را در یک ساختار واحد تلفیق می‌کند، در نتیجه تحلیل جامع‌تری ارائه می‌دهد. همچنین، برخلاف FMEA که بیشتر بر خرابی‌های اجزاء تمرکز دارد و ممکن است برای درک سیستماتیک کل فرایند کافی نباشد، Bowtie دیدی سیستم‌محور و ساختارمند ارائه می‌دهد (۱۶). Bowtie علاوه بر نمایش رویدادهای مهم، می‌تواند رویدادهای کم‌اهمیت را نیز نشان دهد (۱۷). در صورت ترکیب این روش با سایر روش‌های ارزیابی ریسک، می‌توان عوامل خطرناک و در نتیجه رویداد اصلی را شناسایی کرد. روش HAZOP در میان روش های شناسایی مخاطرات روش مناسبی جهت شناسایی اینگونه خطرات است (۱۸).

با این‌حال، یکی از محدودیت‌های اصلی Bowtie ماهیت استاتیک آن است؛ که قابلیت مدل‌سازی دینامیک زمانی، عدم قطعیت‌های احتمالی و تعاملات پیچیده بین رویدادها و عوامل مختلف را ندارد. برای رفع این مشکل، از شبکه‌های بیزین[10] استفاده می‌شود که قادرند روابط علّی بین متغیرها را در شرایط عدم قطعیت مدل‌سازی کرده و با ورود شواهد جدید، احتمالات را به‌روزرسانی می‌کنند (۱۹).

1 Globally Harmonized System
2 Immediately Dangerous to Life or Health
3 Environmental Protection Agency

4 Failure Modes and Effects Analysis
5 Hazard and Operability
6 Event Tree Analysis
7 Fault Tree Analysis
8 Bowtie Approach
9 Top Events
10 Bayesian Networks

از سوی دیگر،Bowtie عمدتاً بر ارزیابی احتمال وقوع رویدادها و پیامدهای آن‌ها تمرکز دارد، در حالی‌که برای محاسبه ریسک هم احتمال وقوع و هم شدت پیامدها باید در نظر گرفته شوند. جهت ارزیابی شدت پیامدها از روش‌های مختلف مدل‌سازی جهت مشخص کردن حریم امن و منطقه خطر استفاده می‌شود (۲۰). دانستن این که حداکثر شعاع ایمن برای نشر مواد سمی ،آتش، انفجار چه مقدار باشد، تاثیر بسیاری در مقابله با حوادث در زمان وقوع آنها دارد. همچنین با استفاده از ارزیابی پیامدها، تصمیم گیری بهتری برای طرح ریزی واکنش در شرایط اضطراری داشته باشیم (۱۱). به منظور تعیین شعاع ایمن در بروز حوادث مربوط به انتشار گازهای سمّی و پیامدهای حاصل از یک رویداد، روش‌های مدل‌سازی همچون SAFETI[1](PHAST risk)، DEGADIS[2]، SLAB، ALOHA[3]، HGSYSTEM و TRACE[4] وجود دارند که بسته به نوع مطالعه می توان از آنها استفاده نمود (۲۱, ۲۲). در میان این مدل‌ها، PHAST و TRACE به دلیل برخورداری از ماژول‌های دقیق تخمین منبع و توانایی شبیه‌سازی جریان‌های دو فازی، عملکرد بسیار دقیق‌تری دارند و به‌عنوان ابزارهای قابل‌اطمینان و مناسب برای ارزیابی پیامدها و تحلیل کمّی ریسک شناخته می‌شوند، در حالی که سایر مدل‌ها بیشتر برای ارزیابی‌های عمومی یا استفاده اضطراری طراحی شده‌اند (۲۳). نرم‌افزار SAFETI که توسط شرکت DNV معرفی شده، یکی از ابزارهای پیشرفته و تخصصی در حوزه مدیریت بحران و مدل‌سازی پیامدها است. این نرم‌افزار با استفاده از معادلات تجربی و شبیه‌سازی‌های پیچیده، به تحلیل و ارزیابی خطرات و پیامدهای ناشی از حوادث مختلف می‌پردازد. کاربرد اصلی SAFETI در مدل‌سازی و پیش‌بینی حوادث احتمالی به‌ویژه در صنایع پرخطر، مانند نفت، گاز و شیمیایی است. این نرم‌افزار قادر است تا با محاسبه دقیق ریسک‌ها و تحلیل پیامدها، به متخصصان کمک کند تا برنامه‌ریزی‌های بهتری برای مقابله با بحران‌ها و کاهش آثار منفی حوادث انجام دهند (۲۴, ۲۵). اعتبار بسته نرم افزاری PHAST قبلا توسط پژوهشگرانی همچون هاننا و همکاران ارزیابی شده است (۲۶).

در این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک کمّی مخازن دی‌اکسیدکربن، به مسمومیت ناشی از این گاز و محدودیت‌های روش سنتی Bowtie پرداخته شده است. Bowtie به‌دلیل ماهیت ایستای خود، توانایی تحلیل پویا و درک عدم قطعیت‌ها را ندارد؛ از این‌رو، از شبکه بیزین در نرم‌افزار GeNIe 5.0 بهره گرفته شد. همچنین برای تحلیل پیامدهای نشت، از نرم‌افزار SAFETI 8.4 استفاده گردید. این مطالعه با هدف پر کردن شکاف موجود در ادغام تحلیل‌های کیفی-کمّی و مدل‌سازی پیامد، چارچوبی یکپارچه ارائه می‌دهد که راهکار عملی برای کاهش خطر ترسیم می‌کند.

روش کار

در این مطالعه که در سال ۱۴۰۳ انجام شد، ابتدا اهداف ارزیابی کمّی ریسک و واحد صنعتی تعیین گردید. خطرات با روش HAZOP شناسایی شدند و سناریو محتمل با نظر تیم تخصصی نشت دی‌اکسیدکربن مشخص گردید. به کمک رویکرد Bowtie، دیاگرام علت-پیامد ترسیم شد. برآورد احتمالات رویدادهای پایه با تئوری فازی و محاسبه احتمال رویداد و پیامد نهایی با BN انجام گرفت. بعد از مدل‌سازی پیامدها، تخمین ریسک با استفاده از نرم‌افزار SAFETI8.4 انجام شد. شکل شماره ۱ مراحل ارزیابی کمّی ریسک مخزن ذخیره دی‌اکسیدکربن را به صورت خلاصه نمایش می‌دهد.

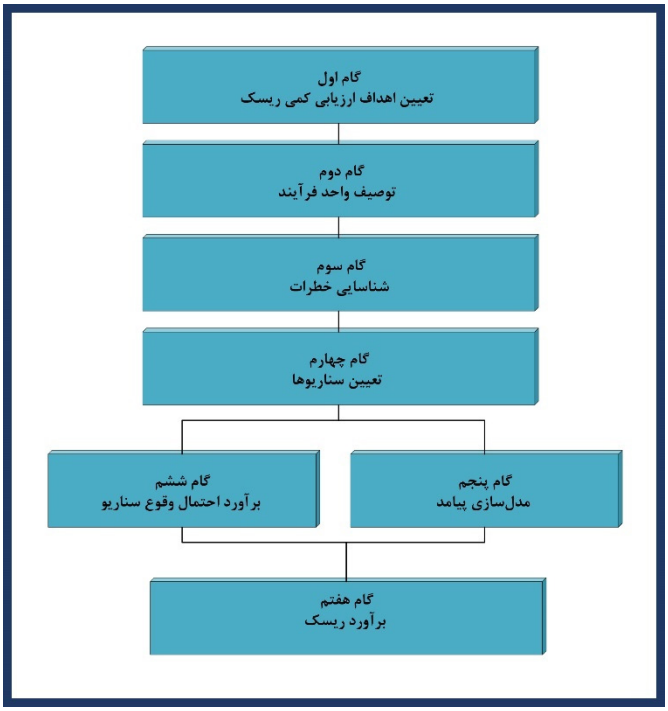
اطلاعات مخزن دی‌اکسیدکربن

مخزن مورد مطالعه یک مخزن کرایوژنیک عمودی با قطر ۱/۵ متر و ارتفاع ۷ متر است که به منظور نگهداری دی‌اکسیدکربن مایع با ظرفیت ۵۰۰۰ لیتر مورد استفاده قرار گرفت. مخزن یاد شده در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری بالاتر از سطح زمین نصب شده است. حداکثر فشار عملیاتی مخزن ۲۲ بار و فشار تست آن ۳۴/۵ بار است.

شناسایی مخاطرات

برای شناسایی مخاطرات مرتبط با مخزن مورد بررسی به روش HAZOP، تیمی متشکل از ۴ متخصص کارشناس فرایند، کارشناس عملیات و بهره برداری، کارشناس ابزار دقیق و کارشناس ایمنی فرایند تشکیل شد (۲۷). در مرحله ابتدایی، شناخت دقیق محل پروژه، ارزیابی جامع فرآیندها و سامانه‌های ایمنی، بررسی سوابق حوادث و شبه‌حوادث، و جمع‌آوری دیدگاه‌های تخصصی اعضای تیم با همکاری یکدیگر انجام شد. در ادامه، طی ۷ جلسه تحلیلی ۳ ساعته و پس از گردآوری داده‌های عملیاتی لازم، بخش‌های کلیدی فرآیند بر

1 Software for the Assessment of Flammable, Explosive, and Toxic Impacts
2 Dense Gas Dispersion Model
3 Areal Locations of Hazardous Atmospheres
4 Transportation Routing Analysis Computer Evaluation



شکل ۱ .روند اجرای این مطالعه

مبنای نقشه‌های فنی (P&ID)[1] شناسایی شدند.

انتخاب سناریو

سناریو عبارت است از یک رخداد مستقل که می‌تواند منجر به بروز یکی از مخاطرات مانند آتش‌سوزی، انفجار یا رهایش مواد سمّی شود، به‌گونه‌ای که هر سناریو ممکن است چندین پیامد حادثه‌ای از جمله آتش، انفجار و پخش مواد خطرناک داشته باشد و سناریوها پایه‌ای برای شناسایی، ارزیابی و مدیریت مخاطرات فرآیندی محسوب می‌شوند (۲۸). در اغلب موارد، سناریوها به‌صورت نشتی یا پارگی محتمل در تجهیزات فرآیندی در نظر گرفته می‌شوند که می‌تواند منجر به رهایش مواد سمّی یا قابل اشتعال گردد (۲۹, ۳۰). تیم متخصص با توجه به نتایج حاصل از شناسایی مخاطرات، دو سناریو نشتی با قطرهای ۲ و ۴ اینچ و یک سناریو گسیختگی کامل را مدنظر قرار داد.

دیاگرام Bowtie

رویکرد Bowtie به منظور شناسایی و ارزیابی ریسک مورد استفاده قرار گرفت که به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها در حوزه مدیریت و ارزیابی ریسک شناخته می‌شود (۳۱). در این پژوهش، برای شناسایی رویدادهای مؤثر پایه در بروز رهایش دی‌اکسیدکربن، از FTA و برای بررسی پیامد ناشی از رویداد اصلی از ETA بهره گرفته شد. پس از انجام تجزیه و تحلیل کیفی FTA با تمرکز بر علل وقوع رویداد اصلی، احتمال وقوع رویدادهای پایه از طریق نظرات کارشناسان، طوفان ذهنی، بررسی تاریخچه حوادث، داده‌های موجود در انجمن مهندسی ریسک آمریکا (۳۲) و اطلاعات استخراج‌شده از کتب مرجع و مطالعات مشابه برآورد و کمّی‌سازی FTA انجام گردید (۳۳).

تئوری فازی

به علّت عدم اطلاعات کافی در کتب مرجع در مورد احتمال رویدادهای پایه می‌توان با استفاده از نظرات خبرگان و تئوری فازی احتمال هر یک از رویدادهای پایه را محاسبه نمود (۳۴). برپایه مطالعه Cooke و همکاران (۳۵) برای انتخاب خبرگان سه شاخص: میزان مقالات منتشر شده توسط فرد، تجربه انجام مطالعات مشابه در گذشته و تائید صلاحیت فرد خبره توسط افراد دیگر در نظر گرفته شد (۳۶, ۳۷). به هر یک از این شاخص‌ها، بر اساس معیارهای مشخص‌شده در جدول شماره ۱، امتیاز مشخصی تعلق گرفت.

سپس، مجموع امتیاز هر خبره از جمع امتیازهای کسب‌شده در همه شاخص‌ها محاسبه شد. وزن نسبی

1 Piping and Instrumentation Diagram

جدول ۱. معیارهای امتیازات نهایی خبرگان

ردیف	عنوان	امتیاز	تجربه(سال)	امتیاز	تحصیلات	امتیاز	سن(سال)	امتیاز
۱	استاد تمام	۵	≥۳۰	۵	دکتری	۵	≥۵۰	۴
۲	دانشگاهی جوان[1]	۴	۲۰-۲۹	۴	کارشناسی ارشد	۴	۴۰-۴۹	۳
۳	مهندس	۳	۱۰-۱۹	۳	کارشناسی	۳	۳۰-۳۹	۲
۴	تکنسین	۲	۶-۹	۲	دیپلم	۲	≤۳۰	۱
۵	کارگر	۱	≤۵	۱	زیر دیپلم	۱	-	-

[1] Junior Academic

هر خبره با تقسیم مجموع امتیاز وی بر مجموع کل امتیازهای کسب‌شده توسط تمام خبرگان تعیین گردید. آنگاه وزن نسبی خبره‌ی i از رابطه شماره ۱ محاسبه شد

$$W_i = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^{n} S_j} \qquad (۱)$$

در این رابطه S_i، مجموع امتیاز خبره i – $\sum_{j=1}^{n} S_j$، مجموع امتیازهای تمامی خبرگان است.

برای کمّی سازی نظر خبرگان در نرخ شکست رویدادهای پایه، براساس مطالعه Saaty و Ozdemir (۳۸)، از گویه‌های هفت تایی استفاده شد (۳۹). برای هر یک از اصطلاحات زبان‌شناسی شامل «خیلی کم»، «کم»، «نسبتاً کم»، «متوسط»، «نسبتاً زیاد»، «زیاد» و «خیلی زیاد» یک مجموعه اعداد فازی در نظر گرفته شد؛ به این ترتیب که برای «خیلی کم» (۰، ۰/۱، ۰/۲) ،برای «کم» (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳) ،برای «نسبتاً کم» (۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵) ،برای «متوسط» (۰/۴، ۰/۵، ۰/۶) ،برای «نسبتاً زیاد» (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸) ،برای «زیاد» (۰/۷، ۰/۸، ۰/۸، ۰/۹)و برای «خیلی زیاد» (۰/۸، ۰/۹، ۱، ۱)به عنوان اعداد فازی مربوطه تعیین شد. قضاوت کارشناسان که به شکل ترم‌های زبانی است به اعداد فازی تبدیل گردید. سپس به یک عدد نهایی به نام امکان شکست قطعی (FPS)[1] دست یافتیم. در مطالعات انجام شده تکنیک‌های مختلفی برای اجماع نظر خبرگان مثل نظرسنجی خطی، روش بیشینه-کمینه دلفی max-product، sum-product وجود دارد. ما در این مطالعه از الگوریتم sum-product برای اجماع نظر خبرگان که نحوه محاسبه آن در رابطه شماره ۲ آورده شده است، استفاده نمودیم (۴۰).

$$Z_i = \sum_{j=1}^{n} w_j f_{ij}, i = 1,2,....,m, j = 1,2,....,n \qquad (۲)$$

Z_i، عدد فازی تجمیع‌شده برای رویداد پایه i – W_j، وزن یا درجه اهمیت کارشناس j – f_{ij}، عدد فازی ارائه‌شده توسط کارشناس j برای ویداد پایه i – n، تعداد کارشناسان –m ، تعداد رویدادهای پایه است.

جهت اخذ تصمیم در محیط فازی، غیرفازی کردن اعداد فازی روش بسیار مهمّی است. بدین منظور، چندین روش برای غیرفازی کردن وجود دارد که عبارتند از روش مرکز سطح max-min،(COA)[2] ، مرکز بزرگترین سطح، Weighted average, Mean maxوBisector . در این مطالعه از روش max-min که توسط Chen و Hwang ارائه شده است، استفاده گردید (۴۱-۴۳). روش مجموعه فازی Max-Min در مطالعات متعددی از جمله Sharma و همکاران (۴۴)، Shi و همکاران (۴۲)، Yazdi و همکاران (۴۰) مورد استفاده قرارگرفته است. در این روش امتیازهای امکان‌پذیری فازی (FPS) برای عدد احتمال فازی Z_i از رابطه شماره ۳ استفاده گردید.

$$FPS(Z_i) = [FPS_{Right}(Z_i) + 1 - FPS_{Left}(Z_i)] / 2 \qquad (۳)$$

Z_i، عدد فازی تجمیع‌شده برای رویداد پایه FPS(Zi)-i ، نمره امکان فازی عدد فازی FPS $_{Right}$ (Zi)-i، نمره امکان فازی سمت راست عدد فازی FPS $_{left}$ (Zi)-i ، نمره امکان فازی سمت چپ عدد فازی است.

عدد بدست آمده از مرحله دی‌فازی کردن بایستی از حالت امکانی به احتمال تبدیل شود، به منظور محاسبه احتمال وقوع خرابی (FP)[3] رویدادها از رابطه شماره ۴ استفاده شد (۴۵).

1 Failure Possibility Scores

2 Center of Area

3 Failure Probability

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

$$K = \left[\frac{1-FPS}{FPS}\right]^{1/3} \times 2.301 \quad (۴)$$

FP، نرخ احتمال هر رویداد پایه - FPS، عدد امکانی حاصل از مرحله دی‌فازی کردن - K، یک متغیر حدواسط که تابع FPS است. در نهایت، با استفاده از روابط شماره ۵ و۶ و ۷ احتمال وقوع رویدادهای میانی و رویداد اصلی با توجه به نوع دروازه مربوطه محاسبه شد (۴۶).

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1-p_i) \quad (۵)$$

$$P_{AND} = \prod_{i=1}^{n} P_i \quad (۶)$$

$$P(TE) = 1 - \prod_{j=1}^{k}(1-P(MCS_j)) \quad (۷)$$

در این روابط P_i ، احتمال رویداد پایه ای i-$P(MCS_j)$، احتمال وقوع مجموعه برش اصلی[1] j-P(TE)، احتمال وقوع رویداد اصلی می‌باشند. تحلیل ETA در دیاگرام Bowtie به دو روش کمّی و کیفی انجام می‌شود. در رویکرد کیفی، حداقل برش‌ها شناسایی می‌شوند و در رویکرد کمّی، احتمال هر برش با استفاده از رابطه شماره ۸ محاسبه می‌گردد (۳۳).

$$P_r = P_r(TE) \times \prod_{j=1}^{n} P_r(E) \quad (۸)$$

در این رابطه P_r ، احتمال وقوع هریک از پیامدها - $P_r(TE)$، احتمال وقوع رویداد اصلی - $P_r(E)$، احتمال شکست یا موفقیت لایه حفاظتی است.

محاسبه احتمالی پیامد نهایی با BN

در این مرحله از BN برای محاسبه رویداد اصلی (احتمال نشست دی‌اکسیدکربن) و پیامد نهایی (انتشار ماده سمّی) استفاده گردید. به طور خاص هر گره (نود) در گراف BN نشان دهنده یک متغیر تصادفی است و شاخه‌ها (کمان) وابستگی‌های احتمالاتی بین متغیرها را نشان می‌دهد (۴۷). نحوه ترسیم دیاگرام Bowtie در BN در شکل شماره ۲ نشان داده می‌شود.

در BN برای محاسبه توزیع احتمال مشترک مجموعه‌ای از متغییرها $U = \{X_1, X_2, ..., X_n\}$ از رابطه شماره ۹ استفاده شد (۴۸):

$$P(U) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i \,|\, P_a(A_i)) \quad (۹)$$

$P_a(A_i)$، مجموعه والدین A_i در P(U) - BN نشان دهنده خواص BN می‌باشد (۴۸). برای شناسایی مؤثرترین رویدادهای پایه (در رخداد رویداد اصلی بیشترین تاثیر را دارند) از آنالیز حساسیت در نرم‌افزار GeNIe 5.0 که براساس رابطه شماره ۱۰ می‌باشد، محاسبه شد (۴۹):

$$Rov(BE_i) = \frac{\pi(BE_i) - \theta(BE_i)}{\theta(BE_i)} \quad (۱۰)$$

$\theta(BE_i)$، نشان دهنده احتمالات پیشین - $\pi(BE_i)$ ، نشان دهنده احتمال به روزشده رویداد پایه (BE_i) است.

مدل‌سازی پیامد

به منظور مدل‌سازی از نرم افزار PHAST8.4 استفاده شد. با استفاده از داده‌های مخزن و شرایط آب و هوایی منطقه در چهار فصل (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) و عوامل موثر بر وقوع سناریو (گسیختگی کامل مخزن) نرم‌افزار PHAST انتشار و گسترش دی‌اکسیدکربن در محیط را مدل‌سازی کرده و نتایج کمّی در خصوص محدوده اثر و غلظت گاز در فاصله‌های مختلف استخراج گردید. این رویکرد امکان تحلیل دقیق‌تری از پیامدهای بالقوه آزادسازی گاز و ارزیابی ریسک بر اساس شرایط واقعی محیطی را فراهم ساخت (۳۳). تمامی اطلاعات مربوط به شرایط جوی از اداره هواشناسی منطقه دریافت شد که در جدول شماره ۲ نشان داده می‌شود.

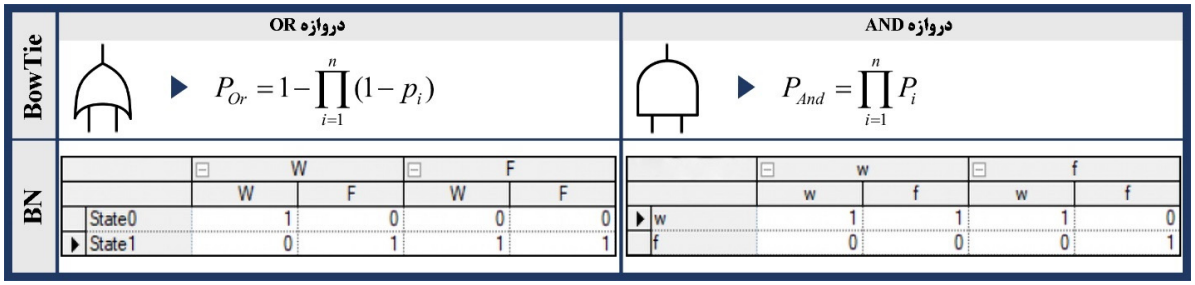
تخمین ریسک

در این مطالعه، از نرم‌افزار SAFETI نسخه ۸.۴ جهت برآورد ریسک فردی و ریسک جمعی، کانتورهای ریسک را با استفاده از معادله پروبیت[2] برای شدت اثرات سمّی انتشار مطابق رابطه شماره ۱۱ محاسبه شد (۵۰).

$$\Pr = k_1 + k_2 \ln(C^n \times t) \quad (۱۱)$$

1 Minimal Cut Set

2 Probit Equation



شکل ۲. نحوه رسم دیاگرام BOWTIE در BN

جدول ۲. میانگین پارامترهای جوی

پارامتر جوی	میانگین فصل بهار	میانگین فصل تابستان	میانگین فصل پاییز	میانگین فصل زمستان
سرعت باد(متر بر ثانیه)	۵	۲/۵	۴	۳
کلاس پایداری جو	D	F	D	F
دمای محیط(درجه سانتیگراد)	۱۶	۳۶	۱۵	۱۱
رطوبت نسبی (٪)	۳۹	۲۵	۳۵	۴۵
جهت وزش باد	شمالی	شمال شرقی	شمال غربی	شمال غربی

c، غلظت ماده سمّی برحسب t،ppm - زمان در معرض مواجهه با ماده سمّی بر حسب دقیقه - مقادیر k_1 و k_2 و n در معادله پروبیت برای هریک از مواد مختلف متفاوت است این ضرایب برای انتشار سمّی دی‌اکسیدکربن به ترتیب (۹۰/۸۰-)، (۱/۰۱) و ۸ تعیین گردید (۵۱).

نرم‌افزار سناریوهای مطالعه را مدل‌سازی کرده و با تخمین ریسک، کانتورهای ریسک فردی و جمعی را ترسیم می‌نماید. استفاده از این ابزار، درک جامعی از پیامدهای بالقوه بر جمعیت و زیرساخت‌های اطراف فراهم می‌کند.

یافته‌ها

ترسیم دیاگرام Bowtie

دیاگرام Bowtie با استفاده از داده‌ها و اطلاعات مربوط به FTA و ETA ترسیم و تحلیل شد. در دیاگرام Bowtie عوامل ایجادکننده رویداد اصلی به همراه شاخه‌ها و دروازه‌های منطقی در سمت چپ دیاگرام قرار دارند و در سمت راست دیاگرام لایه حفاظتی و همچنین شکست یا موفقیت این لایه و پیامدهای احتمالی نمایش داده می‌شود. در شکل شماره ۳ دیاگرام Bowtie نشت دی‌اکسیدکربن نشان داده شده است.

تئوری فازی

پس از تشکیل تیم هفت نفره خبرگان (متشکل از: هیات علمی ،کارشناس فرایند، کارشناس HSE، کارشناس) اقدام به وزن دهی کرده تا بتوان احتمالات رویدادهای پایه را متناسب با وزن خبرگان از طریق تئوری فازی محاسبه نمود. در جدول شماره۳ نحوه امتیازدهی تیم خبرگان بر اساس فاکتورهای ذکر شده و نحوه محاسبه امتیازنهایی و عدد فازی را نشان می‌دهد.

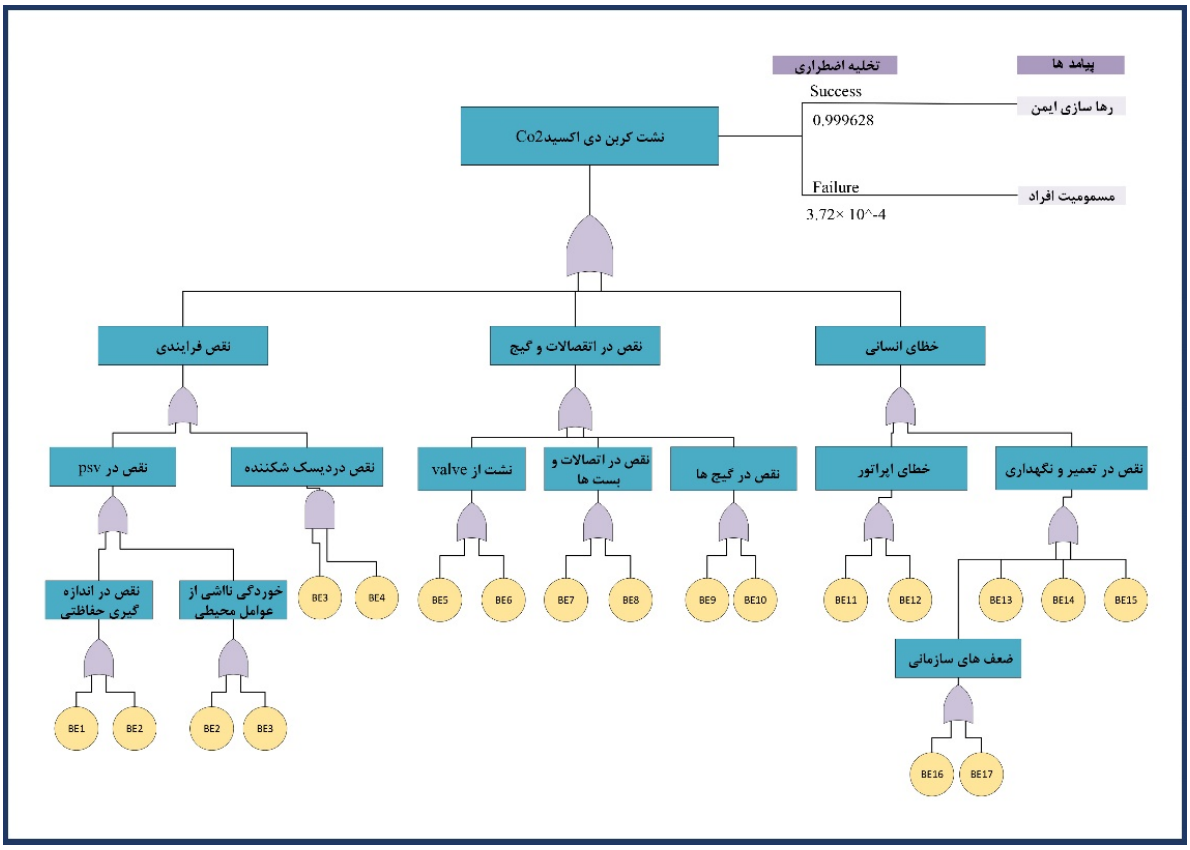
توصیف این رویدادها در جدول شماره ۴ ارائه شده است. در رویکرد Bowtie احتمال وقوع رویداد اصلی(TE)[1] یعنی نشت دی‌اکسیدکربن برابر $۲/۱۰۵۵۷۱ \times ۱۰^{-۲}$ است.

محاسبه احتمالی پیامد نهایی با BN

به منظور محاسبه احتمال پیامدهای نهایی از BN در نرم افزار GeNIe 5.0 استفاده شد. شکل شماره ۴ شبکه ترسیم شده در نرم‌افزار GeNIe 5.0 را نشان می‌دهد.

براساس مطالعه یونگ و همکاران که با هدف تعیین میزان لایه‌های کنترلی انجام شده‌است، احتمال شکست سامانه تخلیه اضطراری (ESD)[2] برای مخزن دی‌اکسیدکربن برابر $۳/۷۲\times۱۰^{-۴}$ مورد استفاده قرار گرفت (۵۲). بر اساس محاسبات Bowtie، احتمال وقوع حالت «بدون پیامد» برابر با $۲/۱۰۴۷۸۸\times۱۰^{-۲}$ و احتمال «انتشار سمی» برابر با $۷/۸۳۲۷۲۶\times۱۰^{-۶}$ برآورد شد. در حالیکه در روش BN، احتمال «بدون پیامد» $۱/۹۶۳۱۰۰\times۱۰^{-۲}$

1 Top events
2 Emergency shutdown



شکل ۳. دیاگرام Bowtie نشت مخزن دی‌اکسیدکربن

جدول ۳. امتیازات تیم خبرگان

کد خبره	شغل	سطح تحصیلات	تجربه کاری	سن	جمع امتیازات	نمره وزن هر خبره
Expert 1	هیات علمی	دکترا	۶-۹	۳۰-۳۹	۱۳	۰/۱۴۱۳
Expert 2	هیات علمی	دکترا	۱۰-۱۹	۳۰-۳۹	۱۴	۰/۱۵۲۱
Expert 3	هیات علمی	دکترا	۱۰-۱۹	۴۰-۴۹	۱۶	۰/۱۷۳۹
Expert 4	کارشناس فرایند	لیسانس	۱۰-۱۹	۴۰-۴۹	۱۲	۰/۱۳۰۴
Expert 5	کارشناس HSE	لیسانس	۱۰-۱۹	۳۰-۳۹	۱۱	۰/۱۱۹۵
Expert 6	کارشناسHSE	دکترا	۱۰-۱۹	۳۰-۳۹	۱۳	۰/۱۴۱۳
Expert 7	کارشناس	فوق لیسانس	۱۰-۱۹	۴۰-۴۹	۱۳	۰/۱۴۱۳

و احتمال «انتشار سمی» $۷/۳۰۵۴۴۹\times۱۰^{-۶}$ تخمین زده شد. این تفاوت‌ها بیانگر رویکردهای متفاوت دو روش در برآورد احتمال پیامدهای ناشی از نشت مخزن دی‌اکسیدکربن هستند.نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای شناسایی موثر ترین رویدادهای پایه در نرم افزار GeNIe 5.0 نشان داد که سه رویداد پایه BE11 (نقص در تعمیر تجهیزات)، BE7 (نقص در اتصالات و بست‌های شماره ۱)، BE15 (نقص در کیفیت تجهیزات خریداری شده)، به ترتیب بیشترین تاثیرگذاری را در وقوع رویداد اصلی داشتند.

مدلسازی پیامد

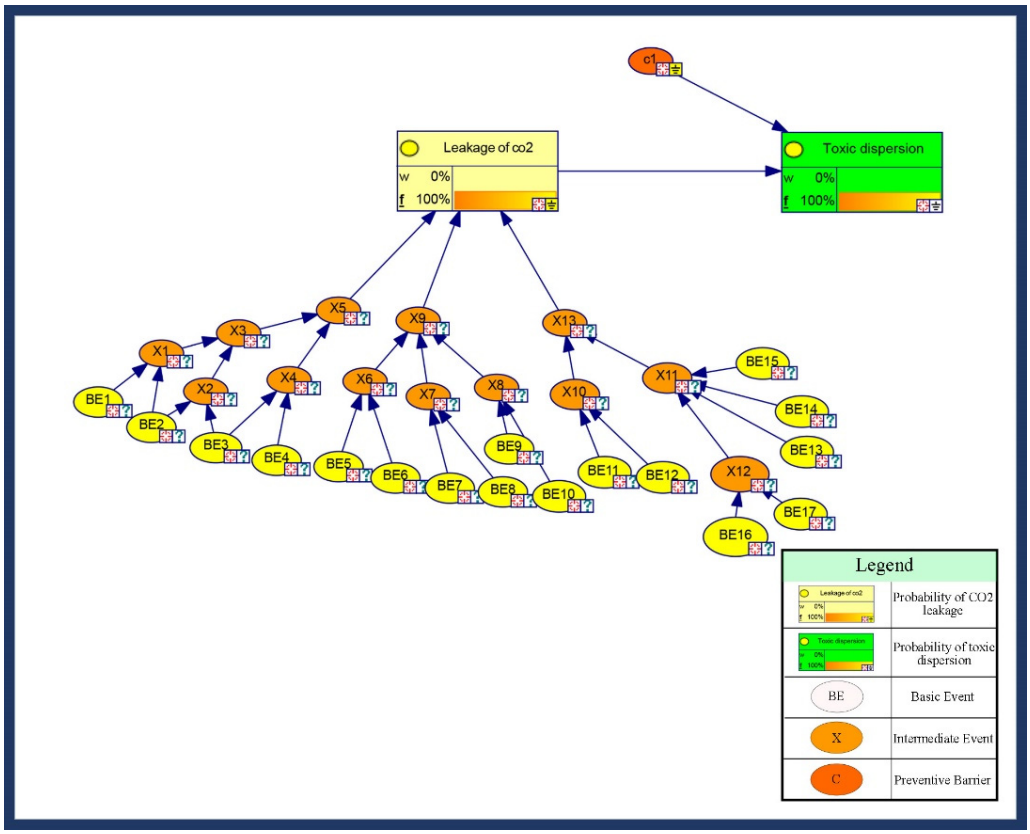
شکل شماره ۵ بخش (الف) تغییرات حداکثر غلظت گاز دی‌اکسیدکربن (ppm) را در برابر فاصله از محل انتشار (متر) نشان می‌دهد. نمودار برای چهار فصل مختلف سال (بهار، تابستان، پاییز، زمستان) رسم شده است. بخش (ب) نمودار توزیع ابر گازی نشت یافته را در راستای محور طولی[1] و عرضی[2] نشان می‌دهد.

براساس شکل شماره ۵ (الف) حداکثر غلظت دی‌اکسیدکربن در فواصل مختلف در سناریو گسیختگی

1 Downwind
2 Crosswind

جدول ۴ .توصیف و میزان احتمال رویدادها

علامت	توصیف رویداد	احتمال	علامت	توصیف رویداد	احتمال
BE1	نقص در پوشش مخزن	۱/۳۴۸۹۶×۱۰$^{-۳}$	BE10	نقص در گیج فشار	۱/۱۸۳۰۴×۱۰$^{-۳}$
BE2	نقص در خشک کن مخزن	۱/۲۳۳۱×۱۰$^{-۳}$	BE11	نقص درتعمیر تجهیزات	۱/۴۲۸۸۹×۱۰$^{-۳}$
BE3	محیط خورنده	۱/۱۹۶۷۴×۱۰$^{-۳}$	BE12	نقص دربرنامه تعمیرونگهداری	۱/۲۴۴۵۱×۱۰$^{-۳}$
BE4	نقص در پوشش داخلی سیستم مخزن	۱/۱۵۸۷۸×۱۰$^{-۳}$	BE13	مهارت ناکافی افراد	۱/۰۶۶۶×۱۰$^{-۳}$
BE5	نقص در ولو ورودی و خروجی شماره ۱	۱/۰۱۱۵۸×۱۰$^{-۳}$	BE14	ضعف در نصب تجهیزات مخزن	۱/۲۰۷۸۱×۱۰$^{-۳}$
BE6	نقص در ولو ورودی و خررجی شماره ۲	۱/۱۳۵۰۱×۱۰$^{-۳}$	BE15	نقص در کیفیت تجهیزات خریداری شده	۱/۴۰۲۸۱×۱۰$^{-۳}$
BE7	نقص در اتصالات و بست‌های شماره ۱	۱/۴۰۲۸۱×۱۰$^{-۳}$	BE16	به روز نقص در تجهیزات استاندارد و	۱/۳۳۳۵۲×۱۰$^{-۳}$
BE8	نقص در اتصالات و بست‌های شماره ۲	۱/۲۱۸۸۹×۱۰$^{-۳}$	BE17	سیستم آموزشی ضعیف	۱/۲۸۲۳۳×۱۰$^{-۳}$
BE9	نقص در قابلیت اطمینان گیج	۱/۱۲۴۶×۱۰$^{-۳}$	TE	نشت دی‌اکسیدکربن	۲/۱۰۵۵۷۱×۱۰$^{-۲}$

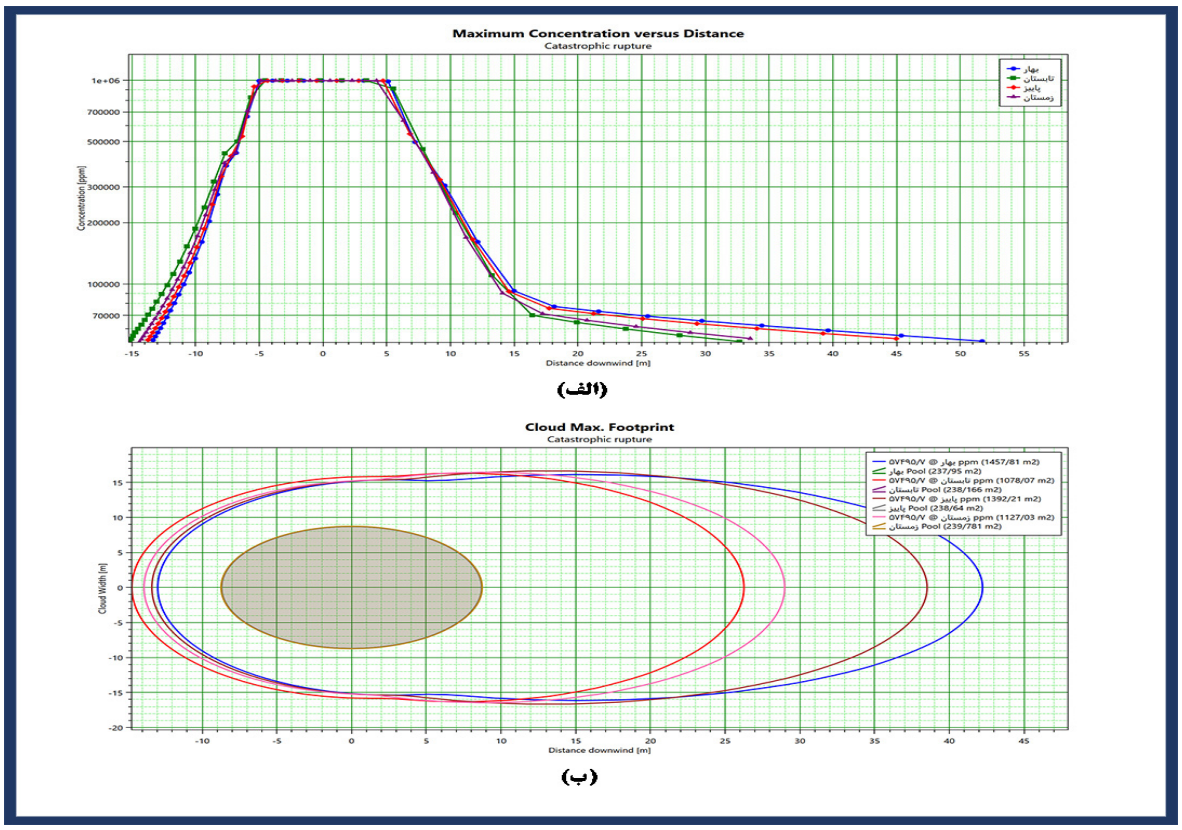


شکل ۴ . ترسیم پیامد نشت دی اکسید کربن و محاسبات BN در نرم افزار GeNIe 5.0

کامل، بیشترین غلظت گاز دی‌اکسیدکربن(نزدیک به ppm ۱۰^{۶}) در شعاع ۵ متری از مخزن می باشد. با افزایش فاصله از منبع انتشار غلظت گاز دی‌اکسیدکربن کاهش می یابد. در مقایسه بین فصول مختلف در فصل تابستان غلظت گاز با فاصله گرفتن از مخزن با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد که نشان دهنده اختلاط سریع تر گاز در فصل تابستان می‌باشد. همچنین مطابق با شکل شماره ۵ (ب) گستره ابرگازی در فصل تابستان در غلظت ppm ۵۷۴۹۵/۷ در مقایسه با سایر فصل ها کمترین(۱۰۷۸/۰۷m^{۲}) مساحت را در برمی‌گیرد.

تخمین ریسک

در این مرحله از ترکیب پیامد و تکرارپذیری سناریوها به منظور تعیین ریسک استفاده شد. بر اساس



شکل ۵ . (الف) حداکثر غلظت دی‌اکسیدکربن در فواصل مختلف و (ب) گستره انتشار دی‌اکسیدکربن در فصول مختلف در سناریوی گسیختگی کامل

نتایج دیاگرام Bowtie، تخمین ریسک برای مخزن دی‌اکسیدکربن در یک سناریو با اندازه نشتی ۲ و ۴ اینچ و یک سناریو گسیختگی کامل مطابق با نظر خبرگان با وضعیت آب و هوایی منطقه (براساس اطلاعات اداره هواشناسی منطقه) انجام شد. تمامی فرمول‌های مربوط به ارزیابی پیامد و ریسک در نرم‌افزار تعریف شده و دیگر نیاز به محاسبات دستی نیست. بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده، کانتور ریسک فردی و جمعی برای واحد مذکور ترسیم شد. شکل ۶ بخش (الف) کانتور ریسک فردی (احتمال مرگ‌ومیر در یک مکان خاص) که قرارگیری این کانتورها در اطراف منبع خطر (نقطه مرکزی) بیانگر کاهش شعاع اثر با افزایش فاصله از محل حادثه است و بخش (ب) کانتور ریسک جمعی (رابطه بین نرخ تکرارپذیری و تعداد تلفات) را نمایش می‌دهد.

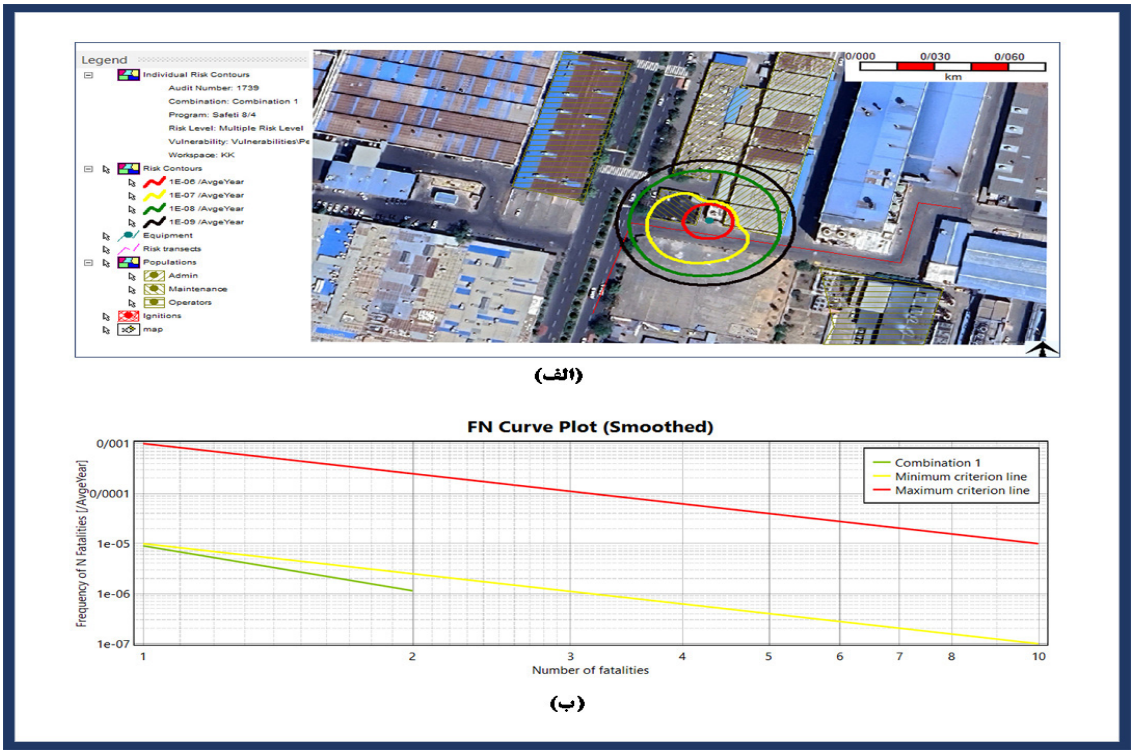
در شکل شماره ۶ منحنی سبزرنگ در نمودار FN[1] نتایج سناریوی مشخص از ریسک جمعی است، که کامل زیر خط زردرنگ قرار دارد. خط زرد به‌عنوان حداقل معیار پذیرش ریسک[2] شناخته می‌شود و نشان‌دهنده مرز ریسک قابل چشم‌پوشی[3] است. خط قرمز رنگ نمایانگر حداکثر معیار پذیرش ریسک[4] بوده و مرز ریسک غیرقابل قبول[5] را مشخص می‌کند. قرارگیری منحنی سبز در پایین‌تر از خط زرد نشان می‌دهد که احتمال وقوع حوادث با تلفات انسانی،کمتر از حدی است که در استانداردها و دستورالعمل‌های ایمنی نگران‌کننده محسوب می‌شود. در نرخ تکرارپذیری ۱×۱۰^{-۵} و ۱×۱۰^{-۶} مقدار تلفات به ترتیب ۱ و ۲ نفر می‌باشد.

بحث

در این تحقیق، فرآیند مدل‌سازی و تخمین ریسک مخزن کرایوژنیک دی‌اکسیدکربن با استفاده از BN و همچنین با ابزار پیشرفته نرم‌افزاری SAFETI 8.4 انجام شد.

هدف اصلی این مطالعه ارزیابی دقیق ریسک و پیامدهای ناشی از نشت دی‌اکسیدکربن و استفاده از روش‌های نوین برای شبیه‌سازی این حوادث در شرایط مختلف است. از دیاگرام Bowtie در تحلیل روابط میان

1 Fatality Number
2 Minimum Criterion Line
3 Negligible Risk
4 Maximum Criterion Line
5 Unacceptable Risk



شکل ۶ . (الف) نمودار ریسک فردی (ب) نمودار ریسک جمعی ناشی از اثرات نشت دی‌اکسیدکربن

رویدادهای پایه و پیامدهای نهایی استفاده شد. در مطالعه‌ای که توسط فضلی و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد با استفاده از دیاگرام Bowtie به تحلیل روابط میان رویدادهای پایه و پیامدهای نهایی پرداخته شد (۳۳). در مطالعه حاضر نتایج مرحله ترسیم کیفی دیاگرام Bowtie نشان داد که در مجموع ۱۷ رویداد پایه و ۱۳ رویداد میانی در وقوع نشت دی‌اکسیدکربن دخیل بودند. در این میان کمترین و بیشترین احتمال رویداد پایه حاصل از تئوری فازی به ترتیب مربوط به رویدادهای پایه BE5 (نقص در ولو ورودی و خروجی شماره ۱) و BE11 (نقص در تعمیر تجهیزات) بود. احتمال وقوع رویداد اصلی (نشت دی‌اکسیدکربن) با استفاده از FTA برابر با $۲/۱۰۵۵۷۱\times۱۰^{-۲}$ و با استفاده از نرم‌افزار GeNIe5.0 برابر با $۱/۹۶۳۸۳۰\times۱۰^{-۲}$ بدست آمد. احتمال پیامدنهایی انتشار گاز سمّی (که باعث مسمومیت افراد می‌شود) با ETA برابر با $۷/۸۳۲۷۲۶\times۱۰^{-۶}$ و در نرم افزار GeNIe 5.0 برابر با $۷/۳۰۵۴۴۹\times۱۰^{-۶}$ بود.

مقایسه نتایج نشان داد که BN قادر است عدم قطعیت‌ها و وابستگی‌های میان متغیرها را با دقت بیشتری مدل‌سازی کند و با تکیه بر تحلیل‌های پیشرفته و داده‌های واقعی، تخمینی واقع‌بینانه‌تر از پیامدها ارائه می‌دهد؛ در حالیکه روش Bowtie بیشتر برای ارزیابی‌های ساختاری و اولیه مناسب است. در مطالعه مشابه محمدی و همکاران (۲۰۲۳) به جهت محاسبه احتمال پیامد نشت مخزن استون از رویکرد Bowtie و به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها، از شبکه بیزین فازی استفاده نمودند (۱۹).

همچنین مطابق با آنالیز حساسیت انجام شده با نرم افزار GeNIe 5.0 سه رویداد پایه BE11 (نقص در تعمیر تجهیزات)، BE7 (نقص در اتصالات و بست های شماره ۱)، BE15 (نقص در کیفیت تجهیزات خریداری شده)، به ترتیب بیشترین تاثیرگذاری را در رخداد نشت دی‌اکسیدکربن دارند. مطالعه اسکندری و همکاران (۲۰۲۴) از همین روش جهت تعیین موثرترین رویداد پایه در وقوع رویداد اصلی استفاده نمودند (۵۳). مطالعه Munahar و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از روش تحلیل مبتنی بر ریسک، به ارزیابی جامع خطرات مخزن ذخیره‌سازی گاز مایع (LPG) پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عواملی مانند ضعف در مدیریت، نقص در تعمیرات و نگهداری، و به کارگیری تجهیزات بی‌کیفیت، نقش مهمی در افزایش احتمال و پیامدهای نشت مخزن دارند (۵۴).

پیامد گسیختگی کامل مخزن کرایوژنیک حاوی

دی‌اکسیدکربن، با تمرکز بر دو جنبه اصلی شامل حداکثر غلظت گاز در امتداد مسیر باد و بیشینه گستره ابر گازی در فضای باز مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفت. غلظت گاز دی‌اکسیدکربن در شعاع ۵ متری از محل نشت، در تمامی فصول در مقدار تقریباً ثابتی (نزدیک به 10^{6} ppm) باقی می‌ماند. این ناحیه به‌عنوان «منطقه مرگ فوری»[1] شناخته می‌شود که قرارگیری انسان در آن حتی برای چند ثانیه منجر به خفگی و مرگ خواهد شد (۵۵). پس از عبور از شعاع ۵ متری، افت غلظت به‌شدت رخ داده و تا حدود ۵۰ متر کاهش معنی‌دار دارد. این روند نمایی از رفتار معمول گازهای سنگین با پایداری جوی بالا تبعیت می‌کند. تغییرات بین فصول گرچه نسبتاً کم‌دامنه هستند، ولی به وضوح قابل‌مشاهده‌اند. در فصل زمستان، به دلیل پایداری جوی بیشتر، غلظت‌ها در فواصل دورتری از منبع، نسبت به سایر فصول بالاتر باقی می‌مانند. در مقابل، در تابستان با اختلاط بهتر هوا، غلظت سریع‌تر افت می‌کند. نتایج مربوط به گستره ابر گازی نشان می‌دهد که ابر گازی دی‌اکسیدکربن در راستای باد کشیده شده و دارای شکلی بیضوی و فشرده است. این موضوع با دانسیته گازهای سنگین که در مجاورت سطح زمین حرکت می‌کنند، همخوانی دارد.

مطالعه Hsieh و همکاران به بررسی تأثیر موانع و توپوگرافی بر انتشار گازهای سنگین در دو سناریو نشت دی‌اکسیدکربن در مخازن ذخیره‌سازی و خطوط لوله پرداخته و نشان داده است که عوامل محیطی مانند پایداری جوی، سرعت و جهت باد، و وجود موانع می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر نحوه انتشار گاز تأثیر بگذارند (۵۶). از سوی دیگر، مطالعه ایستگاه Akedala به بررسی تغییرات بلندمدت غلظت دی‌اکسیدکربن در یک منطقه خاص پرداخته و نشان داده است که عوامل فصلی و منابع دوردست می‌توانند بر غلظت این گازها تأثیرگذار باشند (۵۷).

در تخمین ریسک برای مخزن دی‌اکسیدکربن، وضعیت جوی منطقه (براساس اطلاعات اداره هواشناسی منطقه) نقش مهمی ایفا کرد. به‌ویژه، شرایطی مانند سرعت باد، دما و رطوبت می‌تواند تأثیر زیادی بر نحوه انتشار و پخش گاز در جو داشته باشد. در مطالعه‌ای که توسط یارندی و همکارانش صورت گرفت پارگی مخزن را بخوبی با نرم افزار مدل‌سازی نمود و در شرایط آب و هوایی مختلف و جهات باد متفاوت بررسی کرده (۵۸)، بررسی و تحلیل نتایج با در نظر گرفتن وضعیت آب و هوایی به‌ویژه برای سناریوهایی با اندازه‌های نشت مختلف (۲ اینچ و ۴ اینچ) و پارگی کامل مخزن، نشان‌دهنده اهمیت این پارامترها در شبیه‌سازی دقیق‌تر پیامدها است.

براساس نتایج بدست آمده از منحنی ریسک جمعی مطابق با دو معیار ALARP[2] هلند و انگلستان، منحنی ریسک در محدوده قابل قبول قراردارد که نشان دهنده پایین بودن سطح ریسک می‌باشد. در نرخ تکرارپذیری 1×10^{-5} و 1×10^{-6} مقدار تلفات به ترتیب۱ و ۲ نفر می‌باشد. معیار ALARP (به کمترین حدمعقول دست یافتنی) آژانس بهداشت و ایمنی انگلستان حداکثر ریسک قابل‌قبول برای احتمال یک مرگ را 1×10^{-2} (یک درصد) و ریسک به‌طور کلی قابل‌قبول را 1×10^{-4} (یک در ده‌هزار) تعیین کرده است. در مقابل، معیار ALARP در هلند حد بالای ریسک قابل‌قبول برای احتمال یک مرگ را 1×10^{-3} (یک درهزار) و حداقل ریسک قابل‌قبول را 1×10^{-5} (یک درصدهزار) تعیین کرده است (۵۹، ۶۰).

مطالعه حاضر به‌ویژه در زمینه ایمنی و مدیریت بحران اهمیت دارد، چرا که نشت دی‌اکسیدکربن می‌تواند تأثیرات بهداشتی گسترده‌ای به‌دنبال داشته باشد.

در این تحقیق، استفاده از تئوری فازی و BN به‌عنوان ابزارهای مکمل، به افزایش دقّت تخمین ریسک‌ها و پیامدها کمک کرده است. این روش‌ها علاوه بر فراهم کردن امکان مدیریت عدم قطعیت‌ها، مدل‌های ریسک دقیق‌تری را برای پیش‌بینی حوادث فراهم می‌کنند. این مدل به‌ویژه برای شبیه‌سازی خطرات پیچیده و چندمرحله‌ای مانند نشت گاز دی‌اکسیدکربن که می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی قرار گیرد، بسیار مفید است.

محدودیت‌های این تحقیق شامل نادیده گرفتن برخی متغیرهای محیطی خاص در مدل‌سازی است. به عنوان مثال، پارامترهایی مانند اثرات طولانی‌مدت نشت یا انتشار دی‌اکسیدکربن در شرایط خاص (مانند تغییرات دما در شب و روز) در مدل‌های شبیه‌سازی‌شده ممکن است به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته باشند. همچنین، در نظر گرفتن بیش‌تر جزئیات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی مخازن و تأثیرات آن‌ها بر رفتار گاز، می‌تواند دقت مدل‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که مدل‌های فازی و

1 Immediate Death Zone

2 As Low as Reasonably Practicable

بیزین به‌طور گسترده‌تری در ارزیابی ریسک‌های صنعتی و شبیه‌سازی حوادث پیچیده استفاده شوند. همچنین، گنجاندن داده‌های میدانی و تجربی بیشتر می‌تواند به اعتبارسنجی مدل‌ها کمک کند و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را ارائه دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به کاربردهای اصلی که در این پژوهش مدنظر بود یعنی تعیین محدوده اثر و نیز نمودار ریسک فردی و جمعی، نتایج حاصل شده در غالب نمودارهای مختلف بیان گردیده است. مطابق با نمودار ریسک جمعی، منحنی ریسک در ناحیه قابل قبول قرار گرفته است. در نرخ تکرارپذیری ۱×۱۰^{-۵} و ۱×۱۰^{-۶} مقدار تلفات به ترتیب ۱ و ۲ نفر می‌باشد. استفاده از مدل‌های پیچیده مانند BN به‌ویژه در شبیه‌سازی حوادث پرخطر و ارزیابی ریسک‌ها، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه ایمنی و مدیریت بحران کمک کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح مصوب کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی ایران به کد طرح IR.IUMS.REC.1403.028 می‌باشد. از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران قدردانی می‌شود.

حمایت مالی

این مقاله حاصل طرح مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران می‌باشد.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایران طرح IR.IUMS.REC.1403.028 را دریافت نموده است و همچنین اصل محرمانه بودن اطلاعات واحد صنعتی، در نظر گرفته شده است.

کد اخلاق

IR.IUMS.REC.1403.028

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان سهم یکسانی در طراحی و اجرای این مطالعه داشته‌اند.

دسترسی آزاد

تضاد منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد.

Reference

1. Heinrich JJ, Herzog HJ, Reiner DM, editors. Environmental assessment of geologic storage of CO2. second national conference on carbon sequestration; 2003.
2. Veritas DN. Mapping of potential HSE issues related to large-scale capture, transport and storage of CO2. DNV Re port. 2008(1993).
3. Benson SM, Hepple R, Apps J, Tsang C-F, Lippmann M. Lessons learned from natural and industrial analogues for storage of carbon dioxide in deep geological formations. 2002.
4. Department ILOPI. The social and decent work dimensions of a new Agreement on Climate Change. 2009.
5. Agency USEP. “Carbon Dioxide as a Fire Suppressant: Examining the Risks,. 2025.
6. Haldane JS, Smith JL. The physiological effects of air vitiated by respiration1892.
7. Metz B, Davidson O, De Coninck H, Loos M, Meyer L. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage: Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
8. Hedlund FH. The extreme carbon dioxide outburst at the Menzengraben potash mine 7 July 1953.

the PLS path modeling. WSEAS transactions on environment and development. 2008;4(6):487-502.
21. Nazari S, Karami N, Moghadam H, Nasiri P. Consequence analysis of BLEVE scenario in the propane tank: ACase study at Bandar Abbas gas condensate refinery of Iran. International Journal of Scientific Engineering and Technology. 2015;4(9):472-5.
22. Hanna S, Britter R, Leung J, Hansen O, Sykes I, Drivas P, editors. Source emissions and transport and dispersion models for toxic industrial chemicals (tics) released in cities. Eighth Symposium on the Urban Environment, Room, Italy; 2009.
23. 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.
24. 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.
25. Leoni L, De Carlo F, Paltrinieri N, Sgarbossa F, BahooToroody A. On risk-based maintenance: A comprehensive review of three approaches to track the impact of consequence modelling for predicting maintenance actions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021;72:104555.
26. Mohammadfam I. Safety Engineering.second edition. Tehran: Fanavaran; 2011.
27. Macdonald D. Practical hazops, trips and alarms: Elsevier; 2004.
28. 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).
29. King R. Safety in the process industries: Elsevier; 2013. [Persian]
30. Badri N, Nourai F, Rashtchian D. The role of quantitative risk assessment in improving hazardous installations siting: a case study. 2011.
31. Markowski AS, Kotynia A. "Bow-tie" model in layer of protection analysis. Process Safety and Environmental Protection. 2011;89(4):205-13.
32. 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.

Safety science. 2012;50(3):537-53.
9. Xi D, Lu H, Fu Y, Dong S, Jiang X, Matthews J. Carbon dioxide pipelines: A statistical analysis of historical accidents. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2023;84:105129.
10. Askaripoor T, Kazemi E, Aghaei H, Marzban M. Evaluating and comparison of fuzzy logic and analytical hierarchy process in ranking and quantitative safety risk analysis (case study: a combined cycle power plant). Safety promotion and injury prevention (Tehran). 2015;3(3):169-74.
11. Zarei E, Jafari M, Dormohammadi A, Sarsangi V. The role of modeling and consequence evaluation in improving safety level of industrial hazardous installations: A case study: Hydrogen production unit. Iran Occupational Health. 2013;10(6):54-69. [Persian]
12. Khoshakhlagh AH, Sulaie SA, Yazdanirad S, Park J. Examining the effect of safety climate on accident risk through job stress: a path analysis. BMC psychology. 2023;11(1):89.
13. Bartolozzi V, Castiglione L, Picciotto A, Galluzzo M. Qualitative models of equipment units and their use in automatic HAZOP analysis. Reliability Engineering & System Safety. 2000;70(1):49-57.
14. Fabbrocino G, Iervolino I, Orlando F, Salzano E. Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas. Journal of hazardous materials. 2005;123(1-3):61-9.
15. Markowski AS, Mannan MS, Bigoszewska A. Fuzzy logic for process safety analysis. Journal of loss prevention in the process industries. 2009;22(6):695-702.
16. Alizadeh SS, Moshashaei P. The Bowtie method in safety management system: A literature review. Scientific Journal of Review. 2015;4(9):133-8.
17. Kazemi M, Abbasi A, Kazemi M, Jamshidzadeh N, Rashidi MA. Identification of Hazards and Risk Assessment among Various Units of Ilam Gas Refinery using the Integrated Approach of Bow-tie and FMEA Methods. Journal of Ilam University of Medical Sciences. 2021;29(2):1-12. [Persian]
18. Hatch D, McCulloch P, Travers I. Enhancing PHAs: The power of bowties. Chemical Engineering Progress. 2019;115:20-6.
19. 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).
20. Tseng M-L, Wu W-W, Lin Y-H, Liao C-H. An exploration of relationships between environmental practice and manufacturing performance using

expert elicitation. Journal of hazardous materials. 2010;183(1-3):103-10.
46. 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.
47. Koller D, Friedman N. Probabilistic graphical models: principles and techniques: MIT press; 2009.
48. 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.
49. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. Journal of hazardous materials. 2017;321:830-40.
50. van den Bosch CJH, Weterings RAPM. Methods for the Calculation of Physical Effects: Due to Releases of Hazardous Materials, Liquids and Gases : Yellow Book: Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (VROM); 2005.
51. Kvien K, Flach T, Solomon S, Napoles OM, Hulsbosch-Dam C, Spruijt M. An integrated approach for risk assessment of CO2 infrastructure in the COCATE project. Energy Procedia. 2013;37:2932-40.
52. Yuan S, Cai J, Reniers G, Yang M, Chen C, Wu J. Safety barrier performance assessment by integrating computational fluid dynamics and evacuation modeling for toxic gas leakage scenarios. Reliability Engineering & System Safety. 2022;226:108719.
53. Eskandari T, Mirzaei M, Mohammadfam I. Dynamic Safety Analysis in CNG Stations Using a Hybrid Fault Tree Approach and Bayesian Network Techniques. 2024. [Persian]
54. Munahar S, Purnomo BC, Ferdiansyah N, Widodo EM, Aman M, Rusdjijati R, et al. Risk-Based Leak Analysis of an LPG Storage Tank: A Case Study. Indonesian Journal of Science and Technology. 2022;7(1):37-64.
55. (NIOSH) TNIfOSaH. Carbon dioxide. 2025.
56. Hsieh K-J, Lien F-S, Yee E. Dense gas dispersion modeling of CO2 released from carbon capture and storage infrastructure into a complex environment. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013;17:127-39.
57. Zhao Z, He Q, Lu Z, Zhao Q, Wang J. Analysis of atmospheric CO2 and CO at Akedala Atmospheric Background Observation Station, a regional
33. Fazli Z, Laal F, Keighobadi E, Ebrahimi H, Medvari RF, Hanifi SM. Quantitative Risk assessment of Gasoline Storage Tank Farm Unit using by Fuzzy Set Theory and Consequence modeling. Iran Occupational Health. 2024;20(2):0-. [Persian]
34. Jafari MJ. The application of Fuzzy logic to determine the failure probability in Fault Tree Risk Analysis. Journal of Safety Promotion and Injury Prevention. 2014;Vol. 2:113-23. [Persian]
35. Cooke RM, ElSaadany S, Huang X. On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes. Reliability Engineering & System Safety. 2008;93(5):745-56.
36. Rajakarunakaran S, Kumar AM, Prabhu VA. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015;33:109-23.
37. Lavasani SM, Yang Z, Finlay J, Wang J. Fuzzy risk assessment of oil and gas offshore wells. Process Safety and Environmental Protection. 2011;89(5):277-94.
38. Saaty TL, Ozdemir MS. Why the magic number seven plus or minus two. Mathematical and computer modelling. 2003;38(3-4):233-44.
39. 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.
40. Yazdi M, Kabir S. A fuzzy Bayesian network approach for risk analysis in process industries. Process safety and environmental protection. 2017;111:507-19.
41. Akkurt S, Tayfur G, Can S. Fuzzy logic model for the prediction of cement compressive strength. Cement and Concrete Research. 2004;34(8):1429-33.
42. Shi L, Shuai J, Xu K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. Journal of hazardous materials. 2014;278:529-38.
43. Ross TJ. Fuzzy logic with engineering applications: Wiley Online Library; 2004.
44. Sharma RK, Kumar D, Kumar P. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. International Journal of Quality & Reliability Management. 2005.
45. Renjith V, Madhu G, Nayagam VLG, Bhasi A. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using

station in Northwestern China. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022;19(11):6948.
58. Yarandi MS, Mahdinia M, Barazadeh J, Soltanzadeh A. The modeling of toxic consequence of Ammonia release in industrial refrigerators. J Health Field. 2020;8(3):18-31. [Persian]
59. Pasman H, Reniers G. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). Journal of loss prevention in the process industries. 2014;28:2-9.
60. Frank W, Jones D. Choosing appropriate quantitative safety risk criteria: Applications from the new CCPS guidelines. Process Safety Progress. 2010;29(4):293-8.