



Quantitative Risk Assessment of Butadiene Storage Tanks in A Process Unit Using Fault Tree Analysis By Fuzzy Bayesian and Consequence Modeling

Usef Khani Golabbas, Department of HSE, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Zahra Panjali, Department of Occupational Health and Work Safety, TeMS.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Majid Bayatian, (*Corresponding author), Department of Occupational Health and Work Safety, TeMS.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. majid_bayatian@yahoo.com

Abstract

Background and aims: Butadiene storage tanks in process industries pose substantial risks due to the highly flammable nature of their contents. Accurate risk assessment is essential not only for protecting personnel and equipment but also for ensuring overall process safety and safeguarding surrounding communities. This study aims to evaluate the risk levels of potentially catastrophic scenarios using Fault Tree Analysis (FTA) and to define the safety perimeter through risk contour modeling with DNV's SAFETI v8.4 software.

Methods: An expert panel collaborated to reduce uncertainties, and the worst-case scenario—characterized by the highest probability and severity—was selected. Experts' opinions were applied through a fuzzy logic-based approach to estimate the probabilities of basic events in the chosen scenario. Root causes of failures were first outlined qualitatively, followed by a quantitative FTA. Defuzzified data provided deterministic probabilities for each event, which were then utilized in a Bayesian Network model using GeNIe software to calculate the probability of the top event. SAFETI software was used to generate risk contours and determine safety perimeters for a catastrophic rupture.

Results: FTA identified 45 basic and 17 intermediate events potentially leading to catastrophic outcomes. Bayesian analysis revealed intentional procedural violations (probability: 0.0091622) as the most significant contributor, while shear stress (0.00089743) was the least significant. SAFETI modeling indicated that maximum damage was localized within the tank area, with risk diminishing at 900 meters from the explosion. The social risk was found to be at an unacceptable level (10^{-3}), and the top event occurrence probability was 0.00020267.

Conclusion: FTA combined with SAFETI provides a robust framework for assessing and managing risk in hazardous process scenarios, offering practical insights for safety improvements and emergency planning.

Conflicts of interest: None

Funding: None

Keywords

Risk Assessment

Butadiene Tanks

Bayesian Network

Explosion

Consequence Modeling

Received: 2025/03/8

Accepted : 2025/09/6

INTRODUCTION

In the field of toxic gas dispersion and consequence modeling, various tools are available—including SAFETI, DEGADIS, SLAB, HGSYSTEM, and ALOHA—each tailored to different study requirements. Butadiene is typically stored in liquid form under specific pressure conditions, and leaks from storage tanks can occur due to several factors, such as wall corrosion and operational errors.

The International Chemical Evaluation Document on Butadiene, published in 2001, emphasized strict adherence to guidelines for the transportation, distribution, and storage of this chemical. Various techniques, such as FMEA, HAZOP, What-If analysis, Dow Index, ETA, and FTA, have been developed for risk assessment in process industries. Fault Tree Analysis (FTA) is a powerful approach for identifying logical relationships between components of manufacturing processes. FTA is a deductive (top-down) method used for modeling safety and reliability. Its goal is to model how a system can fail (in the lower state) due to the logical combination of errors (lower states) in its components. FTA uses directed acyclic arrows and logical gates to model system failures and is represented using specific symbols (basic events) and logical gates, such as OR, AND, and NOT.

Traditional risk assessment methods have limitations when dealing with complex and dynamic systems. To overcome these limitations, modern approaches such as Bayesian Networks (BN) have been introduced. These methods provide more accurate assessments by reducing uncertainty and allowing for rapid updates.

Finally, SAFETI software, developed by DNV, is a specialized tool for quantitative risk assessment, consequence modeling, and emergency planning. Utilizing empirical equations is crucial for studies involving consequence modeling and risk estimation.

METHODOLOGY

This study aimed to assess human vulnerability and social risk associated with catastrophic butadiene tank explosions. The first step involved site identification, process evaluation, review of incident history, and gathering expert opinions using the HAZOP method.

Based on the hazard sources identified by the expert panel, the leak and explosion scenario was deemed the worst-case scenario. To overcome the limitations of Fault Tree Analysis (FTA) and reduce uncertainties, expert opinions were combined with fuzzy logic theory to estimate the probability of basic event occurrences. In this study, fuzzy logic was applied to address uncertainties arising from the lack of data on the failure rates of basic events.

After completing the qualitative FTA of the butadiene tank explosion, the probabilities of the

basic events were determined. The FTA was quantified using a combination of logical gates, with the review and identification of minimum cut sets considered in the qualitative model.

Following the identification of causes for the butadiene tank explosion, both qualitative and quantitative analyses of the resulting consequences were performed using the FTA method. Due to the lack of historical data on basic events, expert opinions were used to estimate event probabilities through fuzzy theory. Experts were selected based on their expertise and experience, with their opinions weighted accordingly. Three criteria were considered in expert selection: the number of published articles, prior experience in similar studies, and endorsement of the expert's competence by peers. Trapezoidal fuzzy numbers were used to quantify the expert panel's opinions. To convert fuzzy numbers into deterministic values, the defuzzification method was applied, ultimately determining the possibility as the probability of occurrence.

To implement the FTA, the Bayesian network modeling software GeNIe was used. GeNIe calculates the impact of root and intermediate causes on outcomes and safety controls for each respective node, with relationships represented by arrows. The software also determines the sensitivity of each root cause in relation to the occurrence of the main scenario.

Estimation and consequence modeling for the selected scenarios were conducted using SAFETI software to generate risk contours. Based on the results of the FTA and consequence modeling, the risk number was estimated.

RESULTS

The expert panel, consisting of five members, identified the explosion scenario as one of the most hazardous events in the risk analysis, based on data from similar accidents involving butadiene tanks. Their insights were instrumental in constructing the Fault Tree Analysis (FTA) for this scenario. The FTA identified 45 basic causes or failures and 17 intermediate events associated with a potential butadiene tank explosion. Among these, the lowest probability was linked to BE32 (shear stress), while the highest was associated with BE10 (intentional procedural violations).

According to results from the Fuzzy Bayesian Network (FBN) modeled in GeNIe software, the annual probability of a butadiene tank explosion was calculated to be 0.000020267. Basic events BE43, BE44, and BE45 were identified as the most influential contributors to the occurrence of the top event.

The highest rate of vapor release in the wind direction was observed during the summer season, exceeding 150,000 ppm. The explosion wave pressure

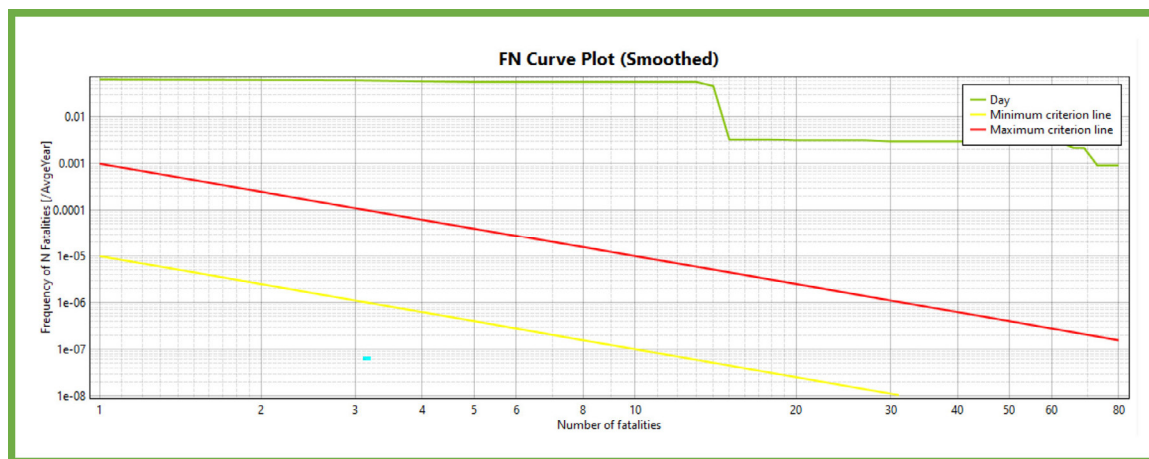


Fig. 1. Social risk associated with the catastrophic rupture scenario of the butadiene tank

at a distance of 150 to 250 meters from the incident site surpassed 15 bar. The impact range extended up to 870 meters in the wind direction and 800 meters in the opposite direction.

The range of explosion wave pressure effects, based on distance in both downwind and upwind directions for the catastrophic rupture scenario under four weather conditions, was determined to be between 500 meters in the upwind direction and 1,000 meters in the downwind direction. Given the strategic location of the area and the high density of residential buildings and diverse land uses, the model used to rank individual risks was based on HSE UK standards. This assessment indicates that the safe separation distances between the tanks and surrounding land uses are insufficient. According to Figure 1, the social risk estimated by the SAFETI software is at an unacceptable level.

DISCUSSION

Risk analysis and assessment methods can be broadly categorized into three main types: quantitative, semi-quantitative, and qualitative. In a study conducted by Raja et al. using the Fault Tree Analysis (FTA) method, LPG gas was analyzed based on 16 basic events and four intermediate events. When comparing butadiene and LPG—both of which share similar processing methods and physicochemical properties—a noticeable discrepancy in the failure rates of their respective tanks emerged. This difference may be attributed to either insufficient branching in the FTA model or improvements in safety systems that reduced the likelihood of basic event occurrences in the studied tanks. In the present study, the probability of the top event—explosion of a butadiene tank—was estimated at 0.000020267 per year.

Based on the results, the explosion wave pressure at a distance of 100 meters from the source was estimated to be 0.5 bar. According to building

vulnerability standards, this pressure level is sufficient to cause damage to all doors and windows in the surrounding area. Consequently, within a 900-meter radius, neighboring units near the butadiene tanks are at risk of damage from shattered glass.

After calculating the frequency of the main scenario and inputting population data into SAFETI software, the risk levels for the explosion scenario were plotted. The estimated social risk was found to be at an unacceptable level. In a similar study, Xiaoyang et al. analyzed the toxic and flammable characteristics of natural gas during a leakage event using DNV's SAFETI quantitative risk analysis software. The SAFETI computational model was also used to calculate explosion risk and consequences following a formaldehyde leakage accident. These calculations are valuable for predicting and preventing natural gas leakage incidents, thereby reducing both individual and societal risks.

According to the standards of the UK Health and Safety Executive (HSE), which are also adopted in Iran, there are established criteria for construction in high-risk areas. These areas are classified into four main categories: industrial zones, shopping and entertainment centers, residential areas, and sensitive organizations or facilities. Based on individual risk acceptance criteria used in the European Union and the United Kingdom, the results of the social risk assessment in this study fell within the unacceptable range, indicating insufficient safe separation distances around the butadiene tanks.

A study by Abbasi et al. similarly evaluated the consequences of explosion scenarios at a facility located in a densely populated urban area. Their collective risk assessment, with a value exceeding 10^{-3} , highlighted the significant threat such an explosion could pose to individuals and nearby infrastructure. In another study, Fazli et al. effectively applied fuzzy theory to address uncertainties in the input parameters of the

Bowtie method. Through consequence modeling, they found that the estimated risk value exceeded 10^{-4} , also placing it within the unacceptable range. This probability suggests that the consequences could seriously compromise the safety and environmental integrity of the storage facility.

Given the strategic and critical location of the butadiene storage tanks in relation to neighboring units, this study faced a significant limitation due to insufficient data for developing a comprehensive vulnerability map of the area. Consequently, future research could yield more robust and detailed results by completing the missing data and conducting a more thorough analysis of the interactions between various land uses.

CONCLUSION

Given the potential for butadiene storage tanks to cause severe accidents, such as explosions, it is essential to predict risk boundaries and determine the extent of fire or explosion to mitigate human harm. Furthermore, assessing the domino effects resulting from the explosion of these tanks is of significant importance. Analyzing the domino effects caused by the explosion of butadiene tanks is essential. Managers should prioritize examining the placement of these tanks to identify any potential incompatibilities with adjacent units in processing industries.

ACKNOWLEDGMENT

This article is part of the master's thesis by Yousef Khani Golabbas, conducted at the Science and

Research Branch of Islamic Azad University.

CONFLICT OF INTEREST

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

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors contributed equally to this research.

OPEN ACCESS

©2025 The author(s). This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third-party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ETHICAL CONSIDERATION

The research was conducted in accordance with the academic and ethical guidelines of the Science and Research Branch of Islamic Azad University.

How to cite this article:

Usef Khani Golabbas, Zahra Panjali, Majid Bayatian. Quantitative Risk Assessment of Butadiene Storage Tanks in A Process Unit Using Fault Tree Analysis By Fuzzy Bayesian and Consequence Modeling. Iran Occupational Health. 2025 (01 Oct);22:19.

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



ارزیابی ریسک کمی مخازن بوتادیان در یک واحد فرآیندی با استفاده از تحلیل درخت خطا مبتنی بر روش بیزین فازی و مدل سازی پیامد

یوسف خانی گلعباس: گروه سلامت ایمنی محیط زیست: واحد علوم و تحقیقات؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ تهران؛ ایران.
زهره پنجهلی: گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار: واحد علوم پزشکی تهران؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ تهران؛ ایران.
مجید بیاتیان: (* نویسنده مسئول) گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار: واحد علوم پزشکی تهران؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ تهران؛ ایران. majid_bayatian@yahoo.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

ارزیابی ریسک
بوتادیان
شبکه بیزین
انفجار
مدل سازی پیامد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۵

زمینه و هدف: مخازن حاوی هیدروکربن بوتادیان در صنایع فرآیندی، به دلیل ماهیت اشتعال‌زای شان، از اهمیت حیاتی برخوردارند. ارزیابی دقیق ریسک در این واحدها و مناطق مجاور، نه تنها برای حفاظت از تجهیزات و کارکنان، بلکه برای تضمین ایمنی فرآیند و ساکنین اطراف نیز ضروری است. این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک سناریو احتمالی از طریق روش تحلیل درخت خطا و تعیین حریم ایمن مخازن با استفاده از نرم‌افزار 8.4 SAFETI و ترسیم کانتورهای ریسک انجام شد.

روش بررسی: این مطالعه کاربردی در سال ۱۴۰۳ در یکی از واحدهای پتروشیمی کشور انجام شد. شناسایی اولیه مخاطرات مخزن به روش HAZOP توسط تیم تخصصی صورت گرفت و انفجار مخزن بوتادیان به عنوان بدترین سناریوی محتمل انتخاب شد. علل نقص در مخزن بوتادیان با روش کیفی FTA مشخص گردید. احتمال وقوع هریک از رویدادهای پایه با نظرات خبرگان و منطق فازی برآورد گردید. به منظور برآورد احتمال رویداد نهایی از روش کمی FTA به کمک شبکه بیزین در نرم‌افزار Genie 5.0 استفاده شد. جهت ارزیابی کانتور ریسک و برآورد نرخ تکرارپذیری از نرم افزار 8.4 SAFETI استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج روش FTA آشکار ساخت که ۴۵ رویداد پایه و ۳ رویداد میانی می‌تواند منجر به گسیختگی مخزن بوتادیان شود که پس از مدل‌سازی شبکه‌های بیزین در نرم افزار Genie 5.0 رویدادهای پایه "ننش برشی" و "خطای عمدی در اجرای دستورالعمل‌ها" با احتمال شکست ۰/۰۰۰۸۹۷۴ و ۰/۰۰۹۱۶۲۳ به ترتیب کمترین و بیشترین علل ایجاد رویداد اصلی در مخزن بوتادیان بودند. نرم‌افزار SAFETI، بیشترین آسیب را در محدوده مخزن بوتادیان نشان داد، در حالی که کمترین آسیب‌پذیری در فاصله ۹۰۰ متری از نقطه انفجار مشاهده شد. همچنین، مشخص شد که با افزایش فاصله از کانون انفجار، میزان آسیب به کاربری زمین کاهش می‌یابد. ریسک جمعی تخمین زده شده در محدوده غیرقابل قبول ۳-۱۰ قرار گرفت و احتمال وقوع رویداد اصلی با روش FBN، ۰/۰۰۰۰۲۰۲ تعیین شد.

نتیجه گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که وقوع انفجار در مخزن بوتادیان می‌تواند مناطق اطراف مخزن را تحت تأثیر قرار دهد و ریسک به‌دست‌آمده از این سناریو بیشتر از حد قابل قبول ارزیابی شد.

تعارض منافع: گزارش نشده است.

منبع حمایت کننده: ندارد.

شیوه استناد به این مقاله:

Usef Khani Golabbas, Zahra Panjali, Majid Bayatian. Quantitative Risk Assessment of Butadiene Storage Tanks in A Process Unit Using Fault Tree Analysis By Fuzzy Bayesian and Consequence Modeling. Iran Occupational Health. 2025 (01 Oct);22:19.

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

مقدمه

در نیم قرن اخیر شاهد دگرگونی‌های چشمگیری در عرصه صنایع شیمیایی بوده‌ایم (۱). این تحول از نوع مواد تا تغییر در انجام فرایندها را شامل می‌شود. علی‌رغم وضع قوانین سخت‌گیرانه و به‌کارگیری روش‌های متنوع ارزیابی مخاطرات در ایران، همچنان شاهد وقوع حوادث در صنایعی هستیم که از طراحی مدرن و نیروی انسانی آموزش‌دیده برخوردارند (۲).

بوتادی‌ان یک محصول عمده از منابع پتروشیمی است که به طور گسترده به عنوان یک مونومر در ساخت لاستیک‌های مصنوعی استفاده می‌شود. این ماده به دلیل واکنش‌پذیری بالا و تمایل به تشکیل پلیمر، نیازمند رعایت الزامات ایمنی سخت‌گیرانه در فرایندهای حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و بهره‌برداری صنعتی است (۳). طبق گزارش بین‌المللی ارزیابی شیمیایی بوتادی‌ان در سال ۲۰۰۱، رعایت دقیق دستورالعمل‌های ایمنی برای کنترل خطرات ناشی از این ماده ضروری تلقی شده است (۴). آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) این ماده را به عنوان یک سرطان‌زای انسانی طبقه‌بندی کرده و در گروه ۱ مواد سرطان‌زا قرار داده است (۵). مطالعات متعدد در زمینه ارزیابی مواجهه با بوتادی‌ان نیز تأیید کرده‌اند که این ماده با افزایش ریسک ابتلا به سرطان همراه است (۶). معمولاً این ماده به‌شکل مایع و تحت فشار بالا در مخازن ذخیره می‌شود (۷). یکی از مخاطرات اصلی این مخازن، احتمال نشت آن است که می‌تواند ناشی از عواملی مانند خوردگی دیواره‌ها، نقص فنی تجهیزات یا خطاهای عملیاتی باشد (۸). در صورت وقوع نشتی، این ماده می‌تواند منجر به بروز مسمومیت‌های جمعی، انفجار و حریق گردد (۹)؛ به‌طور مثال، نشت بوتادی‌ان در کارخانه‌ای در ژاپن در سال ۱۹۹۴ موجب انفجار و حریق شد (۱۰). همچنین، نشت‌های گسترده بوتادی‌ان در پالایشگاه‌های Shell تگزاس در سال ۲۰۱۵ (۱۱) و ExxonMobil باتون روژ در سال ۲۰۱۰ (۱۲) نگرانی‌هایی جدی درباره ایمنی کارکنان ایجاد کرد.

همچنین نشت گاز بوتادی‌ان از یک مخزن در نزدیکی قزوین نمونه‌ای از حوادث داخلی است که بر اهمیت مدیریت ریسک مواد شیمیایی تأکید دارد (۱۳). از دیگر حوادث مهم فرایندی در داخل کشور، می‌توان به انفجار پالایشگاه اراک بر اثر نشتی اشاره کرد که به کشته شدن ۹ نفر انجامید. حادثه پالایشگاه آبادان در سال ۱۳۹۰ که یک کشته و ۱۰ مصدوم برجای گذاشت (۱۴). از جمله

رخدادهای مهم پالایشگاهی کشور محسوب می‌شوند. این حوادث علاوه بر هزینه‌های مستقیم نظیر خسارات بر تجهیزات، توقف تولید، هزینه‌های درمانی و جریمه‌های قانونی، شامل هزینه‌های غیرمستقیمی مانند آسیب به اعتبار شرکت، از دست رفتن بازار، اختلال در زنجیره تأمین و افزایش هزینه‌های بیمه‌ای نیز هستند. مطالعات نشان می‌دهد که هزینه‌های غیرمستقیم حوادث می‌تواند چندین برابر هزینه‌های مستقیم باشد (۱۵، ۱۶).

در این راستا، ارزیابی ریسک به‌طور فزاینده‌ای به یکی از ارکان اصلی در سیستم‌های مدیریت ایمنی تبدیل شده است. شناسایی، تحلیل و کنترل ریسک‌ها به‌عنوان عوامل کلیدی در مدیریت ایمنی فرایندی شناخته می‌شوند. تجربه حوادث بزرگ در سطح جهان نشان می‌دهد که خطاهایی در مراحل طراحی، ساخت، نصب و نگهداری می‌تواند منجر به فجایع صنعتی گردد؛ مانند بوپال^۲ هندوستان (حداقل ۳۸۰۰ نفر کشته) (۱۷)، فلیکسبارو^۳ انگلستان (با ۲۸ نفر کشته) (۱۸)، چرنوبیل^۴ اوکراین (با ۳۱ نفر کشته) (۱۹) و سوسو^۵ ایتالیا شود (۲۰).

برای این منظور، روش‌های گوناگونی جهت ارزیابی ریسک توسعه یافته‌اند؛ از جمله می‌توان به تکنیک‌هایی مانند تحلیل حالات و اثرات خرابی^۶ (FMEA)، تحلیل خطرات و قابلیت‌های عملیاتی^۷ (HAZOP) (۲۱)، تحلیل فرضی (What-if) (۲۲)، شاخص داو (Dow Index) (۲۳)، تحلیل درخت رویداد^۸ (ETA) (۲۴) و تحلیل درخت خطا^۹ (FTA) (۲۵، ۲۶) اشاره نمود. مطالعات متعددی در ایران و خارج از کشور انجام شده که بر ارزیابی ریسک کمی و بهبود دقت آن تمرکز داشته‌اند. به عنوان نمونه، مطالعه کیوانی (۲۷) در جهت کمی‌سازی ریسک برای مخزن کربن دی‌اکسید انجام شده است. همچنین، در مطالعه عباسی (۲۸) با توسعه یک چارچوب ترکیبی از تحلیل عددی و قضاوت کارشناسی، توانسته است عدم قطعیت نتایج ارزیابی ریسک را کاهش دهد. در سطح بین‌المللی، Kwak (۲۹) که رویکردهای عددی را برای بهبود دقت در تحلیل ریسک به‌کار گرفته‌اند. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و محدودیت‌هایی

2 Bhopal

3 Flixborough

4 Chernobyl

5 Seveso

6 Failure Modes and Effects Analysis

7 Hazard and Operability

8 Event Tree Analysis

9 Fault Tree Analysis

1 International Agency for Research on Cancer

روش‌های مکمل نظیر ETA، شبکه‌های بیزین^۶، یا منطق فازی^۷ (۳۳) ترکیب شود می‌تواند دقت تحلیل را افزایش دهد. همچنین، بهره‌گیری از ابزارهای نرم‌افزاری پیشرفته، نقش مؤثری در ارتقاء قابلیت مدل‌سازی و تحلیل این روش در محیط‌های صنعتی ایفا می‌کند (۳۰، ۳۴). مزیت اصلی، BN توانایی انجام به روزرسانی احتمال است، که آن را به یک روش مناسب برای تحلیل ایمنی سیستم‌های پویا تبدیل کرده است. در مطالعه‌ای که توسط ژانگ و همکارانش انجام شد، ترکیب روش‌های FTA و BN برای تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر خطرات در سیستم‌های پیچیده و کاهش عدم قطعیت FTA، به کار گرفته شد (۳۵).

استفاده از ابزارهای نرم‌افزاری مثل GeNie در تحلیل BN، می‌تواند ارزیابی ریسک را بسیار دقیق‌تر از روش‌های سنتی انجام دهد. این ابزارها با کمک مدل‌سازی ریاضی و پردازش داده‌ها، روابط علت و معلولی بین عوامل مختلف را شناسایی می‌کنند و احتمال وقوع خطرات را به شکل واضح‌تری نشان می‌دهند (۳۶).

از سوی دیگر، روش‌هایی نظیر FTA و BN عمدتاً بر احتمال وقوع پیامدها تمرکز دارند، در حالی که برای محاسبه ریسک به‌صورت کامل، علاوه بر احتمال، ارزیابی شدت پیامدها نیز ضروری است. از این‌رو، در صنایع فرایندی که تصمیم‌گیری‌های ایمنی نیازمند تحلیل دقیق پیامدهای بالقوه نشت مواد خطرناک است، استفاده از مدل‌های تحلیلی و ابزارهای عددی مکمل مانند (SLAB، DEGADIS^۸، SAFETI^۹(PHAST risk)، HGSYSTEM، ALOHA^{۱۰} و TRACE^{۱۱} می‌تواند راه‌حلی مؤثر و کارآمد به‌عنوان بخش کلیدی در ارزیابی کمی ریسک مطرح نمایند. این مدل‌ها بسته به نوع ماده، شرایط انتشار و اهداف مطالعه، امکان شبیه‌سازی اثرات انتشار گازهای سمی یا قابل اشتعال را فراهم می‌سازند (۳۷-۳۹).

اگر هدف افزایش دقت در پیش‌بینی انتشار گازهای متراکم باشد، مدل‌های TRACE و PHAST می‌توانند انتخاب مناسبی باشند. این دو مدل با توجه به استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر در تخمین نرخ انتشار و برخورداری از سیستم‌های مدل‌سازی مرتبط، دقت بالاتری را نسبت

هستند. برای مثال، روش FMEA به دلیل رویکرد از پایین به بالا، در شناسایی خرابی‌های ترکیبی و پیچیده با چالش‌هایی روبروست. همچنین، محاسبه عدد اولویت ریسک^۱ (RPN) در این روش نیازمند تحلیل‌های عددی دقیق بوده و در اولویت‌بندی واقعی ریسک‌ها دقت محدودی دارد. روش HAZOP نیز با وجود دقت بالا در شناسایی انحرافات از شرایط طراحی، نیازمند زمان و منابع انسانی قابل توجهی برای برگزاری جلسات تخصصی بوده و در تحلیل سیستم‌های دارای وابستگی‌های چندگانه و ساختار پیچیده محدودیت دارد (۳۰).

در این میان، روش FTA رویکردی قدرتمند در تشخیص ارتباطات منطقی بین اجزای فرآیندهای تولیدی است (۳۱) و به عنوان روشی ساختاریافته، هدفمند و قابل اتکا، جایگاه ویژه‌ای در ارزیابی سناریوهای پیچیده خطرناک پیدا کرده است. این روش با رویکرد از بالا به پایین، امکان تحلیل علل ریشه‌ای رویدادهای ناخواسته را فراهم کرده و با بهره‌گیری از منطق بولین^۲، توانایی تحلیل خرابی‌های ترکیبی را دارد. از دیگر مزایای آن می‌توان به قابلیت تحلیل کیفی و کمی همزمان، شناسایی نقاط بحرانی از طریق مجموعه‌های حداقل برش^۳ و کاربرد وسیع در صنایع حساس مانند پتروشیمی دارد. FTA رویدادهای اولیه^۴ را شناسایی و آنها را تا زمان بروز رویداد اصلی^۵ دنبال می‌کند. با این حال، روش FTA دارای محدودیت‌هایی است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به ماهیت استاتیک آن اشاره کرد، چرا که این روش عمدتاً بر وضعیت سیستم در یک زمان مشخص تمرکز دارد و نمی‌تواند تغییرات زمانی و وابستگی‌های دینامیکی میان رویدادها را به‌خوبی مدل‌سازی کند. همچنین، وجود عدم قطعیت در داده‌های احتمالاتی مورد استفاده، به‌ویژه در مواردی که اطلاعات دقیق در دسترس نیست، می‌تواند بر دقت نتایج تأثیر منفی بگذارد. افزون بر این، در برخی موارد، تأثیر هم‌زمانی یا وابستگی میان رویدادهای پایه مشترک به‌طور کامل در روش FTA نمایان نمی‌شود که ممکن است به تحلیل ناقص منجر گردد (۳۲).

با وجود این محدودیت‌ها، FTA همچنان یکی از روش‌های قابل اعتماد و مؤثر در تحلیل خطرات و حوادث بالقوه به‌شمار می‌رود. به‌ویژه زمانی که با

6 Bayesian Networks

7 Fuzzy Logic

8 Software for the Assessment of Flammable, Explosive, and Toxic Impacts

9 Dense Gas Dispersion Model

10 Areal Locations of Hazardous Atmospheres

11 Transportation Routing Analysis Computer Evaluation

1 Risk Priority Number

2 Boolean logic

3 Minimal Cut Sets

4 Event Basic

5 Event Top

مراحل ارزیابی ریسک را که شامل شناسایی مخاطرات با روش HAZOP، تحلیل کیفی و کمی خطرات، وزن‌دهی نظرات خبرگان، مدل‌سازی با BN و نرم‌افزار SAFETI و در نهایت ترسیم کانتورهای ریسک برای تصمیم‌گیری بهتر را به طور گرافیکی نشان می‌دهد.

شناسایی مخاطرات مخزن بوتادی‌ان با روش HAZOP

به منظور شناسایی مخاطرات فرآیندی سیستم مورد نظر، تیمی متشکل از ۴ متخصص (مهندس شیمی، مهندس طراحی فرآیند، مهندس ایمنی و ابزار دقیق) در چارچوب روش HAZOP تشکیل شد. در مرحله نخست شناسایی دقیق سایت، ارزیابی جامع فرایندها و سیستم‌های ایمنی، بررسی سوابق حوادث و شبه حوادث و گردآوری نظرات کارشناسی اعضای تیم با استفاده از پروتکل‌های استاندارد روش HAZOP انجام پذیرفت. در گام بعدی، با برگزاری ۸ جلسه تحلیلی دو ساعته همراه با بازدید میدانی از واحد فرآیندی و جمع‌آوری داده‌های عملیاتی ضروری، گره‌های بحرانی^۲ در چرخه فرآیند بر اساس نقشه‌های فنی^۳ (P&ID) تعیین گردید. این تحلیل سیستماتیک منجر به کشف خطرات بالقوه عملیاتی و مشکلات فرآیندی مرتبط با مخزن بوتادی‌ان شد (۴۴).

انتخاب سناریو

برای رهایش مواد شیمیایی به طور کلی سه سناریو : وقوع آتش، انفجار و مسمومیت ناشی از رهایش مواد شیمیایی محتمل است (۴۵). بر اساس کانون‌های خطر شناسایی شده، سناریو نشتی و انفجار به عنوان بدترین سناریو توسط اعضای تیم متخصص و درخواست صنعت مورد مطالعه در نظر گرفته شد. در این مطالعه دو سناریو نشتی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ۲۰۰ میلی‌متر و یک سناریو گسیختگی کامل^۴ که منجر به انفجار مخزن می‌گردد، برای مخزن مذکور مورد بررسی قرار گرفت (۴۶).

اجرای روش FTA

جهت شناسایی علل ریشه‌ای سناریوی انفجار، از روش FTA استفاده شد (۴۷). برای پیش برد روند کیفی روش FTA ابتدا علل وقوع انفجار و رهایش بوتادی‌ان بررسی و رویداد‌های پایه و رویداد‌های میانی مشخص گردید. در روش FTA به منظور تعیین احتمال رویداد‌های

به سایر مدل‌ها نشان داده‌اند (۴۰)، به‌خصوص برای کاربردهای صنعتی یا امنیتی که نیاز به دقت بالاتری دارند. اما اگر دقت کمتر (صرفاً قابل قبول بودن) مدنظر باشد و یا دسترسی رایگان ضرورت داشته باشد، ALOHA، SLAB یا HGSYSTEM گزینه‌های مناسب‌تری خواهند بود (۴۱). در یک مطالعه‌ی مرور سیستماتیک که توسط پویاکیان و همکاران انجام شد، مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعات انجام‌شده با نرم‌افزارهای ALOHA و PHAST نشان داد که نرم‌افزار PHAST در شناسایی و تحلیل سناریوهای نشت و انتشار مواد شیمیایی، عملکردی دقیق‌تر، جامع‌تر و منسجم‌تر نسبت به ALOHA دارد (۴۲).

نرم افزار (SAFETI (PHAST risk)، به عنوان یکی از ابزارهای تخصصی در زمینه مدیریت بحران و مدل‌سازی پیامد است که توسط شرکت DNV^۱ معرفی شده است. این نرم افزار با بهره‌گیری از معادلات تجربی، نقش مهمی در مطالعات مربوط به مدل‌سازی پیامد و تخمین ریسک ایفا می‌کند (۲۸، ۲۹، ۴۳).

در این راستا، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی ریسک کمی مخازن بوتادی‌ان در یکی از واحدهای پتروشیمی انجام گردید. اهمیت این پژوهش ناشی از خطرات ذاتی بوتادی‌ان، از جمله اشتعال‌پذیری بالا، سمیت شدید و پتانسیل انفجار، در کنار محدودیت‌های روش‌های رایج ارزیابی ریسک نظیر FTA است. برای رفع این چالش، از شبکه‌های بیزین (BN) که ترکیبی از نظرات خبرگان و احتمالات فازی است، در محیط نرم‌افزاری GeNIe 5.0 بهره گرفته شد. مدل‌سازی پیامد نیز با استفاده از نرم‌افزار SAFETI 8.4 انجام پذیرفت. شکاف علمی اصلی در این حوزه، فقدان چارچوب یکپارچه و عملیاتی برای ادغام تحلیل‌های کیفی-کمی با شبیه‌سازی دقیق سناریوهای حادثه و پیامدهای آن است. این خلأ موجب شده که بسیاری از ارزیابی‌های ریسک نتوانند دقت کافی در پیش‌بینی احتمال و شدت حوادث را داشته باشند. پژوهش حاضر با ارائه یک مدل نوین یکپارچه، این شکاف را هدف قرار داده و علاوه بر ارتقای دقت ارزیابی ریسک، راهکارهای اجرایی مشخصی برای کاهش و کنترل خطرات ارائه می‌دهد.

روش بررسی

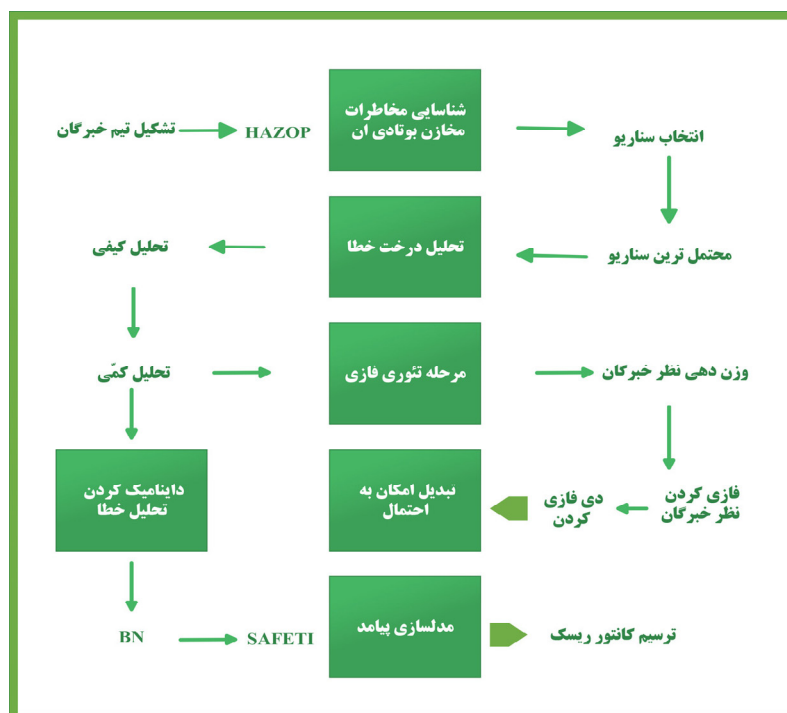
این مطالعه کاربردی در سال ۱۴۰۳ در یکی از واحدهای پتروشیمی کشور انجام شد. شکل شماره ۱

2 Nodes

3 Piping and Instrumentation Diagram

4 Catastrophic Rupture

1 Den Norske Veritas



شکل ۱. چارچوب کلی اجرای این مطالعه

سپس برای کمی کردن روش FTA بوسیله تئوری منطق فازی نظرات خبرگان به اعداد فازی بدل می شوند تا جهت برآورد احتمال وقوع رویدادهای پایه از آنها استفاده شود (۵۱). جهت اجرای این مرحله، ابتدا سه شاخص کلی برای انتخاب تیم متخصص خبرگان که شامل میزان مقالات انتشار یافته فرد، تجربه حضور فرد در مطالعات مشابه و تأیید صلاحیت فرد خبره توسط افراد دیگر در نظر گرفته شد (۵۲). جدول شماره ۱ فاکتور وزنی هریک از اعضا تیم خبرگان را به صورت شاخص وزن دهی نشان می دهد.

برای کمی کردن نظر تیم خبرگان و تعیین وزن نظر آنان از اعداد فازی ذوزنقه ای در قالب طیف زبانی هفت تایی شامل «خیلی کم» (۰/۲، ۰/۱، ۰، ۰، ۰، ۰)، کم (۰/۳، ۰/۲، ۰/۲، ۰/۱، ۰، ۰/۳)، نسبتاً کم (۰/۴، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۴، ۰، ۰/۴)، متوسط (۰/۶، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۴، ۰/۴، ۰/۸)، نسبتاً زیاد (۰/۷، ۰/۶، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۸، ۰/۷) و خیلی زیاد (۱، ۱، ۰/۹، ۰/۸، ۰/۸، ۰/۷) استفاده شد (۵۳). هدف از به کارگیری این روش، مدل سازی عدم قطعیت های موجود در ارزیابی های کیفی FTA مبتنی بر عبارات زبانی بود. برای فازی کردن این طیف، روش های مختلفی مانند توابع فازی مثلثی، ذوزنقه ای، زنگوله ای و گوسی وجود دارند که در این مطالعه به منظور افزایش دقت و انعطاف پذیری در نمایش داده های کیفی، اعداد فازی

پایه می توانیم از بانک های اطلاعاتی مانند OREDA^۱، CCPS^۲ و Lee (۴۸) استفاده کنیم یا اینکه می توان جهت کاهش محدودیت های روش FTA و برطرف کردن عدم قطعیت ها از نظرات خبرگان استفاده نمود که در این مطالعه جلساتی متعددی با حضور تیم خبرگان جهت تعیین احتمال وقوع رویداد های پایه تشکیل شد و بر اساس نظر خبرگان، سناریوهای خطرناک شناسایی شده به روش FTA ترسیم شدند. در مدل کیفی روش FTA، تنها به بررسی و تعیین برش های حداقل پرداخته شد. مجموعه برش های حداقل ترکیبی از رویدادهای پایه است که برای وقوع رویداد اصلی کافی هستند (۴۹). از دروازه های منطقی AND (رابطه شماره ۱) و OR (رابطه شماره ۲) برای نمایش روابط علت ها و برای محاسبه احتمالات رویدادهای میانی و اصلی از نمادهای ریاضی بولین استفاده شد که در رابطه (۱) و (۲) مشاهده می شود (۵۰).

$$P = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (2)$$

1 Odisha Renewable Energy Development Agency
2 Center for Chemical Process Safety

جدول ۱. فاکتورهای وزنی برای اعضای تیم خبرگان

ردیف	عنوان	امتیاز	تجربه (سال)	امتیاز	تحصیلات	امتیاز	سن (سال)	امتیاز
۱	استاد تمام	۵	≥ 30	۵	دکتری	۵	≥ 50	۴
۲	دانشگاهی جوان	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	≤ 30	۱
۵	کارگر	۱	≤ 5	۱	زیر دیپلم	۱		

پایین) با BN به عنوان یک روش استقرایی، یک رویکرد ترکیبی شناخته شده برای تحلیل سیستم های پیچیده است (۵۸). مرحله بعد، برای پیاده سازی روش FTA در BN از نرم افزار مدل سازی GeNIe 5.0 استفاده شد که علل ریشه ای، میانی، پیامدها و کنترل های ایمنی هر کدام به شکل گره^۴ مربوطه نمایش داده می شود و روابط بین آنها بوسیله کمان^۵ به نمایش گذاشته خواهد شد (۳۴).

BN وابستگی های پیامد اصلی را برای توزیع احتمال توام مجموعه ای از متغیرهای تصادفی $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ به عنوان ضرب احتمالات شرطی گره های رویداد پایه با توجه به رویداد اصلی آنها در نظر می گیرد که در رابطه شماره (۶) نشان داده شده است (۵۹):

$$P(U) = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} = \prod_{i=1}^n P(x_i | P_a(x_i)) \quad (6)$$

در این رابطه $P(U)$ توزیع احتمال توام متغیرها و $P_a(X_i)$ مجموعه والد متغیر X_i است.

ترسیم کانتور ریسک با نرم افزار SAFETI
در ادامه، برآورد و مدل سازی پیامدهای احتمالی سناریوهای انتخابی با استفاده از نرم افزار SAFETI 8.4 انجام گرفت. این نرم افزار جهت مدل سازی پیامدهای فردی و جمعی مورد استفاده قرار می گیرد. بدین صورت که پس از تعیین پیامدها به روش FTA و مدل سازی پیامد با این نرم افزار انجام می گردد و عدد ریسک برآورد می شود (۴۲).

یافته ها

با توجه به شاخص های ذکر شده در جدول شماره ۱، میزان امتیاز هریک از اعضای تیم خبرگان مشخص گردید. جدول شماره ۲ فاکتور وزنی نسبی هر یک از

دوزنقه ای به عنوان چارچوب اصلی انتخاب شدند (۵۴). پس از کمی سازی نظرات خبرگان با استفاده از اعداد فازی دوزنقه ای برای اجماع نظر خبرگان و ترکیب ارزیابی های آنها، از روش مجموعه فازی Max-Min برای تفهیم بهتر اعداد فازی و تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی، جهت دی فازی کردن استفاده می شود (۵۵). برای تبدیل اعداد فازی دوزنقه ای به مقادیر قطعی^۱ از روش الویت قطعی فازی^۲ (FPS) استفاده می شود که مبتنی بر رابطه رابطه شماره (۳) است (۵۶).

$$FPS(Z_i) = \frac{[FPS_{Right}(Z_i) + 1 - FPS_{Left}(Z_i)]}{2} \quad (3)$$

به منظور تبدیل قازی به احتمال از روش های دی فازی FPS و تبدیل به احتمال (FP) بر پایه مبانی ریاضی و آماری استفاده می شود. بنابراین عدد بدست آمده از مرحله قبل (FPS) جهت تبدیل امکان به احتمال وقوع و به منظور محاسبه احتمال وقوع نقص^۳ (FP) رویدادها از رابطه شماره (۴) و (۵) استفاده می شود (۵۷).

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & FPS \neq 0 \\ 0 & FPS = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K = 2.301 \left[\frac{(1 - FPS)}{FPS} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

FP: نرخ احتمال وقوع هر رویداد پایه - FPS: عدد امکانی حاصل از مرحله دی فازی کردن - K: یک متغیر حد واسط که تابع FPS است.

ترسیم دیگرام FTA با روش BN

ادغام روش FTA به عنوان یک روش قیاسی (بالا به

4 Node

5 Arc

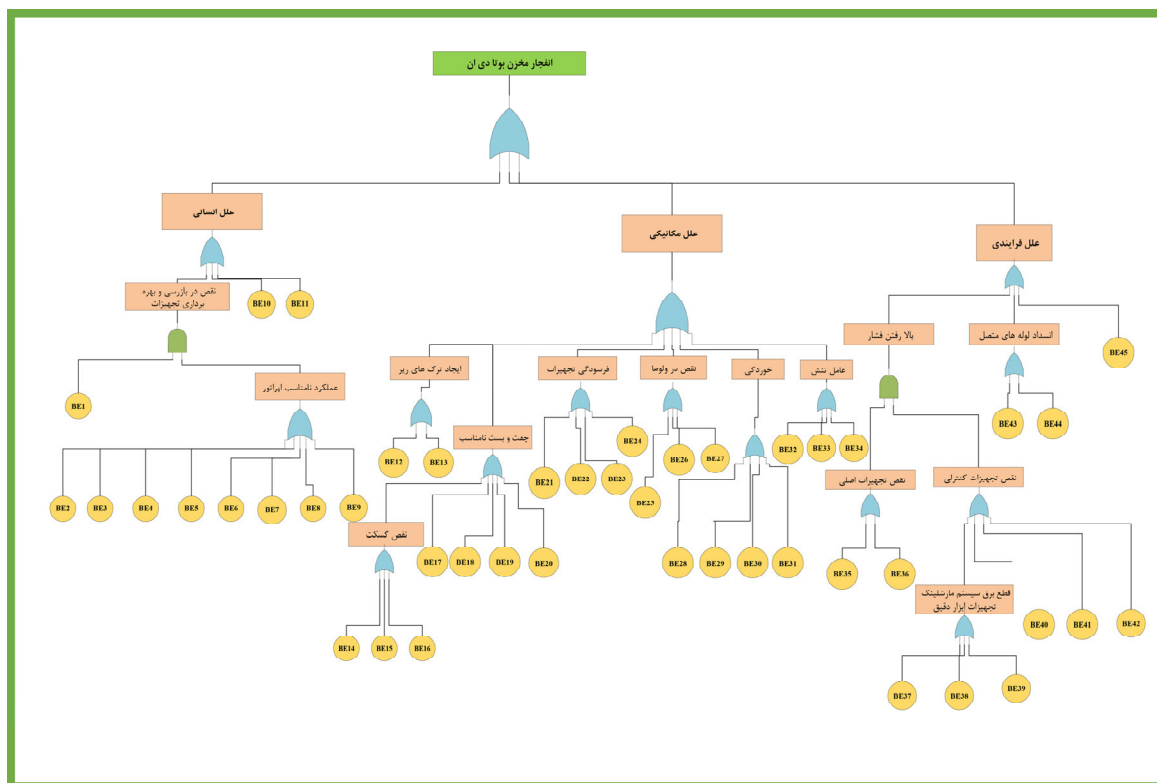
1 Defuzzification

2 fuzzy possibility scores

3 Failure probability

جدول ۲. شاخص‌های اعضای تیم خبرگان

عنوان	میزان سوابق کاری	مدرک تحصیلی	سن	نمره نهایی	امتیاز هر خبره
هیئت علمی	۵ سال	دکتر	۳۵	۱۳	۰.۲۱۴
هیئت علمی	۱۲ سال	دکتر	۴۵	۱۶	۰.۲۶۲
کارشناس ایمنی	۷ سال	ارشد	۳۹	۱۱	۰.۱۸
کارشناس تولید	۳ سال	لیسانس	۳۵	۹	۰.۱۴۸
کارشناس فرایند	۱۷ سال	لیسانس	۴۵	۱۲	۰.۱۹۶



شکل ۲. FTA ترسیم شده مربوط به سناریو انفجار مخزن بوتادیان

می‌شود کمترین میزان احتمال مربوط BE32 (تنش برشی) و بیشترین احتمال مربوط BE10 (خطای عمدی در اجرای دستورالعمل‌ها) می‌باشد. براساس احتمال رویدادهای مشخص شده، ترسیم BN در نرم افزار Genie 5.0 صورت پذیرفت. نتایج BN در نرم افزار نشان داد که احتمال وقوع انفجار مخزن بوتادیان ۰/۰۰۰۰۲۰۲۶۷ در یک سال می‌باشد. بر اساس تحلیل انجام شده توسط نرم‌افزار، آنالیز حساسیت به شناسایی مهمترین دلایل وقوع رویداد نهایی پرداخته و مشخص گردید که در شکل شماره ۴ رویدادهای پایه ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ از اصلی‌ترین عوامل موثر در وقوع رویداد نهایی (انفجار مخزن بوتادیان) نشان داده می‌شود.

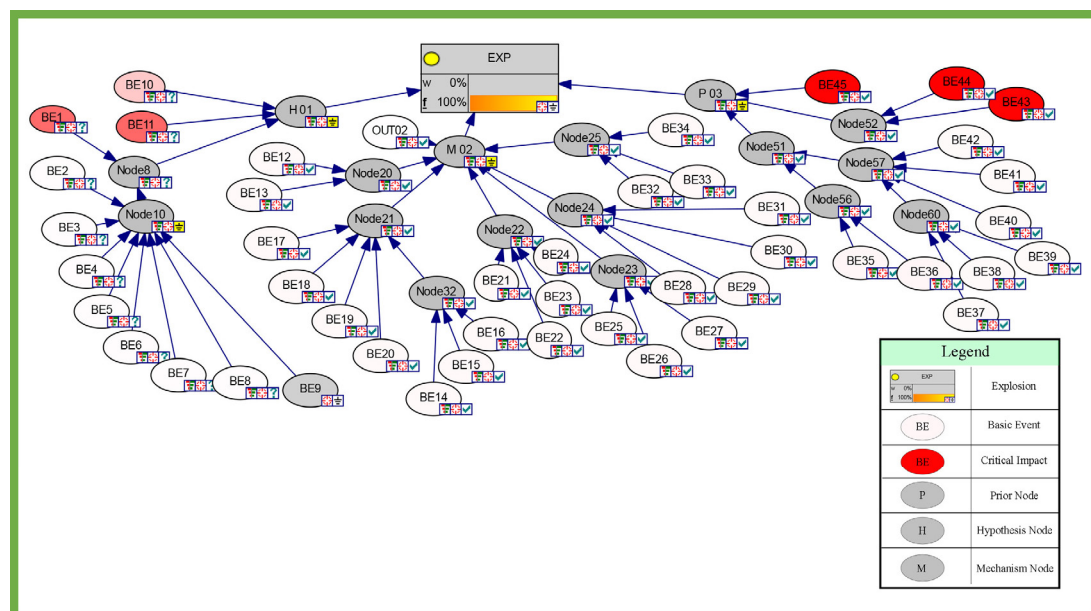
اعضا تیم خبرگان را نشان می‌دهد. پس از تحلیل ریسک و بررسی حوادث مشابه در سایر صنایع، سناریو انفجار به عنوان یکی از سناریوهای خطرناک شناسایی شد. سپس درخت خطای مربوطه مطابق شکل ۲ در پنل‌های تخصصی با حضور متخصصان ایمنی و افراد عملیاتی مربوطه ترسیم گردید. با روش FTA، در مجموع ۴۵ علت یا نقص در انفجار مخزن بوتادیان به عنوان رویدادهای پایه شناسایی شد. در مرحله بعد، اعداد معادل نظریات ذهنی هر خبره به تفکیک برآورد گردید. سپس این اعداد فازی به اعداد دی‌فازی تبدیل شدند و در نهایت احتمال وقوع هر رویدادهای پایه محاسبه گردید (۶۰). نتایج در جدول شماره ۳ ارائه شده است. همانگونه که در جدول مشاهده

جدول ۳. میزان احتمال فازی رویداد های پایه

علامت	رویداد پایه	عدد هم ارز فازی	غیر فازی سازی	ضریب K	امتیاز عملکرد فازی
BE1	ضعف مدیریتی	۰/۵۵۶	۰/۶۱۶	۰/۷۳۴	۰/۷۷۱
BE2	ترس از انفجار و آتش سوزی	۰/۵۲	۰/۶۰۱	۰/۶۸۶	۰/۷۳۸
BE3	نقص در اطلاع رسانی	۰/۵۸۹	۰/۶۶۹	۰/۷۱۵	۰/۷۸۹
BE4	اتاق کنترل	۰/۵۸۴	۰/۶۸۴	۰/۷۴۹	۰/۸۰۵
BE5	کاهش شنوایی اپراتور	۰/۵۸۴	۰/۶۸۴	۰/۷۴۹	۰/۸۰۵
BE6	نداشتن مهارت و تجربه کافی	۰/۴۹۵	۰/۵۷۶	۰/۶۳۶	۰/۶۵۶
BE7	خستگی	۰/۵۱۶	۰/۶۱۶	۰/۶۷۹	۰/۶۰۵
BE8	استرس	۰/۳۹۲	۰/۴۱۴	۰/۴۷۴	۰/۴۸۱
BE9	نوبت کاری	۰/۳۳۱	۰/۳۱۸	۰/۳۳۷	۰/۳۴۶
BE10	آموزش ناکافی و غیر اثربخش	۰/۴۹۷	۰/۴۶۶	۰/۴۹۶	۰/۳۹۸
BE11	خطای عمدی در اجرای دستورالعمل ها	۰/۳۳۲	۰/۴۱۲	۰/۴۳۲	۰/۵۳۲
BE12	بر خورد ناخواسته تجهیزات با ولو ها	۰/۲۸۲	۰/۳۸۲	۰/۴۴۶	۰/۵۴۶
BE13	نقص جوشکاری	۰/۶۵۴	۰/۷۵۴	۰/۸۱۶	۰/۸۹۱
BE14	تغییرات دمایی	۰/۳۵۷	۰/۴۵۷	۰/۴۸۳	۰/۵۸۳
BE15	جایگزینی نامناسب گسکت	۰/۴۲۹	۰/۵۲۹	۰/۵۷۳	۰/۶۷۳
BE16	ایجاد انحنای در گسکت	۰/۲۸۲	۰/۳۶	۰/۴۰۸	۰/۵۰۸
BE17	فرسودگی و استهلاک تجهیز	۰/۵۵۹	۰/۶۵۹	۰/۷۲	۰/۸۰۵
BE18	خراب بودن اتصالات رزوه	۰/۳۰۶	۰/۴۰۶	۰/۴۲۱	۰/۵۲۱
BE19	نقص در نشت یابی	۰/۱۶۶	۰/۲۴۸	۰/۲۸۵	۰/۳۸۵
BE20	باز طراحی غیر اصولی	۰/۵۲۸	۰/۶۲۸	۰/۶۸۷	۰/۷۸۷
BE21	مونتاز نامناسب تجهیزات	۰/۵۱۷	۰/۶۱۷	۰/۶۶۴	۰/۷۴۳
BE22	استفاده نادرست از تجهیزات	۰/۲۹۹	۰/۳۹۹	۰/۴۵۴	۰/۵۵۴
BE23	ناتوانی در جایگزینی تیج	۰/۱۹۷	۰/۲۷۵	۰/۳۱۱	۰/۴۱۱
BE24	هیزات فرسوده	۰/۵۱۸	۰/۶۱۸	۰/۶۵۷	۰/۷۵۷
BE25	ماهیت ماده شیمیایی	۰/۴۳۵	۰/۵۳۵	۰/۵۴۹	۰/۶۴۹
BE26	نقص بازرسی در تشخی ص فرسودگی	۰/۵۱۳	۰/۶۱۳	۰/۶۸۷	۰/۷۶۶
BE27	آسیب وارده به گسکت	۰/۷۱۱	۰/۸۱۱	۰/۸۶۷	۰/۹۲۶
BE28	نقص تعمیر و نگهداری	۰/۴۰۵	۰/۵۰۵	۰/۵۴۹	۰/۶۴۹
BE29	ضربات خارجی	۰/۴۷۶	۰/۵۷۶	۰/۶۱۲	۰/۶۹۱
	نقص حفاظت کاتدیک				
	از بین رفتن لایه ضد خوردگی				

جدول ۳. میزان احتمال فازی رویداد های پایه

علامت	رویداد پایه	عدد هم ارز فازی	غیر فازی سازی	ضریب K	امتیاز عملکرد فازی
BE30	ساییدگی	۰/۲۱۳	۰/۳۶۱	۲/۹۲۷	۰/۰۰۱۱۸۳۰۴
BE31	نقص در بازرسی خوردگی	۰/۴۱۸	۰/۵۷۴	۲/۹۸۱	۰/۰۰۱۰۴۴۷۲
BE32	تنش برشی	۰/۳۱۶	۰/۴۷۹	۳/۰۴۷	۰/۰۰۰۸۹۷۴۳
BE33	تنش محوری	۰/۴۷۹	۰/۶۶۱	۳/۰۰۹	۰/۰۰۰۹۷۹۴۹
BE34	تنش مماسی	۰/۳۴۳	۰/۴۸۷	۲/۹۰۹	۰/۰۰۱۲۳۳۱
BE35	مسدود شدن شیر بعد از مخزن	۰/۵۳۳	۰/۶۸۵	۲/۹۲۲	۰/۰۰۱۱۹۶۷۴
BE36	عمل نکردن سوئیچ های ورودی	۰/۵۸۹	۰/۷۲۷	۲/۷۸۷	۰/۰۰۱۶۳۳۰۵
BE37	نقص در کارایی سیستم ارت	۰/۴۲۳	۰/۵۷۸	۲/۹۱۸	۰/۰۰۱۲۰۷۸۱
BE38	فرسودگی تجهیزات	۰/۴۶۳	۰/۶۰۹	۲/۸۵۳	۰/۰۰۱۴۰۲۸۱
BE39	رعد و برق	۰/۵۹۵	۰/۷۳۶	۲/۸۶۲	۰/۰۰۱۳۷۴۰۴
BE40	نقص نرم افزاری	۰/۵۲۳	۰/۶۹	۲/۹۵۸	۰/۰۰۱۱۰۱۵۴
BE41	نقص در شیرهای کنترلی	۰/۲۲۹	۰/۴۰۳	۲/۹۱۴	۰/۰۰۱۲۱۸۹۹
BE42	کالیبره نبودن تجهیزات ابزار دقیق	۰/۵۵۵	۰/۷۱۸	۲/۹۲۷	۰/۰۰۱۱۸۳۰۴
BE43	سرمای هوا	۰/۴۸۷	۰/۶۰۹	۲/۸۸۳	۰/۰۰۱۳۰۹۱۸
BE44	نقص در فیلترینگ ناخالصی ها	۰/۴۲۳	۰/۵۷۹	۲/۹۸۱	۰/۰۰۱۰۴۴۷۲
BE45	طراحی اولیه نادرست	۰/۵۳۶	۰/۷۸۹	۲/۸۹۷	۰/۰۰۱۳۲۱۳
TE	رویداد نهایی (انفجار مخزن بوتادیان)	۰/۶۳۶	۰/۷۸۹	۲/۸۹۷	۰/۰۰۰۲۰۲۶۷



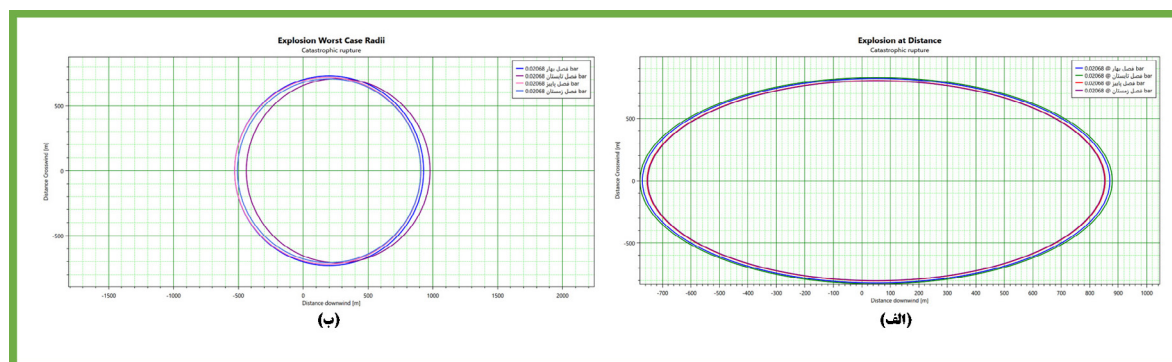
شکل ۴. آنالیز حساسیت انجام شده در نرم افزار GeNie

سازمان های هواشناسی بومی منطقه را به تفکیک فصل نشان می دهد. بیشترین میزان انتشار بخارات بر حسب فاصله در

با توجه به نتایج FTA، مدل سازی پیامد برای مخزن بوتادیان برای وضعیت آب و هوایی انجام شد. جدول شماره ۴ میانگین پارامترهای جوی دریافت شده از

جدول ۴. میانگین پارامترهای جوی

پارامتر جوی	میانگین فصل بهار	میانگین فصل تابستان	میانگین فصل پاییز	میانگین فصل زمستان
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۳/۷	۲/۵	۳/۳	۳
کلاس پایداری جو	D, F	D, F	D, F	D, F
دمای محیط (درجه سانتیگراد)	۲۵	۳۶	۲۲	۱۷
رطوبت نسبی (%)	۴۰	۲۵	۳۵	۴۵
جهت وزش باد (درجه)	۹۰	۲۹۲	۹۰	۲۷۰



شکل ۵. محدوده اثر فشار موج انفجار در سناریو گسیختگی کامل مخزن

جدول ۵. داده های مربوط به تجزیه و تحلیل ریسک

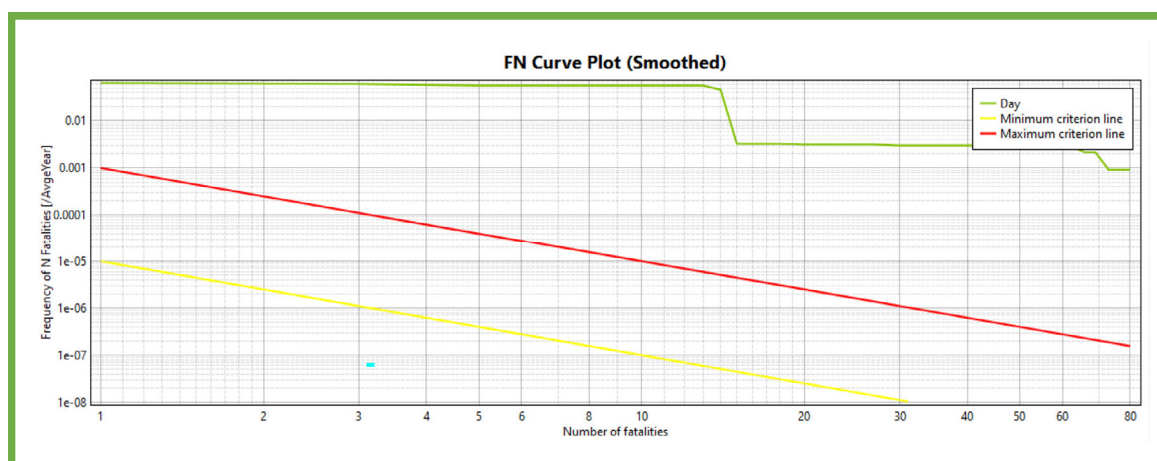
سناریو	شرایط آب و هوایی	تراکم جمعیت	جمعیت	درصد جمعیت در محیط بیرون از واحد	احتمال وقوع جرقه	در دوره زمانی (ثانیه)
گسیختگی کامل	چهار فصل	۰.۰۰۱	۱۰۰	۰/۹	۱	۱۰

۱۰۰۰ متری در جهت باد می باشد. بر اساس موقعیت استراتژیک منطقه و تراکم بالای ساختمان های مسکونی و کاربردهای مختلف زمین، اطلاعات مربوط به مدل در جدول ۵ نشان داده شده است. برای رتبه بندی خطرات فردی از استاندارد HSE UK استفاده شد (۶۱). شکل شماره ۶ میزان ریسک جمعی در شرایط آب و هوایی چهارگانه را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود ریسک جمعی تخمین زده شده در محدوده غیر قابل قبول ۱۰^{-۳} قرار دارد.

بحث

بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر، با استفاده از روش FTA، ۴۵ رویداد به عنوان علت پایه و ۱۷ رویداد میانی در انفجار مخزن بوتادیان شناسایی شد. برآورد احتمال وقوع این انفجار در بازه زمانی یک سال، رقم ۰/۰۰۰۲۰۲۷۶ را نشان داد که بیانگر

جهت باد مربوط به فصل تابستان و بیش از ۱۵۰۰۰۰ پی پی ام می باشد. قدرت موج انفجار بر حسب فاصله در جهت باد برای سناریو گسیختگی کامل مخزن در چهار شرایط آب و هوایی مشخص گردید. فشار موج انفجار در فاصله ۱۵۰ تا ۲۵۰ متری از محل حادثه بیش از ۱۵ بار می باشد. در شکل ۵ قسمت (الف) محدوده اثر فشار موج انفجار بر حسب فاصله در جهت باد و خلاف جهت باد برای سناریو گسیختگی کامل مخزن در چهار شرایط آب و هوایی را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود محدوده اثر در جهت باد تا فاصله ۸۷۰ متری و در خلاف جهت باد ۸۰۰ متر را در بر می گیرد و در قسمت (ب) محدوده اثر فشار موج انفجار بر حسب فاصله در جهت باد و خلاف جهت باد برای سناریو گسیختگی کامل مخزن برای بدترین حالت ممکن در چهار شرایط آب و هوایی را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود محدوده اثر فشار موج در بدترین حالت ممکن در محدوده بین ۵۰۰ متری در خلاف جهت باد تا



شکل ۶. ریسک جمعی ناشی از سناریو گسیختگی کامل مخزن بوتادیان

دفعات رخداد یک حادثه در طول یک سال و شدت پیامد مرتبط با تلفات و خسارات است (۶۳). جعفری و همکارانش بر این باورند که روش‌های کمی ارزیابی ریسک، به عنوان یکی از پرکاربردترین و جامع‌ترین شیوه‌های تحلیل ریسک در صنایع فرآیندی، در سال‌های اخیر توجه ویژه متخصصان ایمنی را به خود جلب کرده‌اند (۶۴).

براساس نظر Marhaviلاس و همکاران، برای درک عمیق ریسک و تدوین راهبردهای کارآمد جهت مهار و پیشگیری از حوادث، انجام مطالعات دقیق تحلیل ریسک ضرورتی انکارناپذیر است. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر روش‌های کمی بیشترین سهم را در تحلیل ریسک صنایع فرآیندی داشته‌اند و روش‌هایی مانند FTA و BN بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند، چنان‌که در پژوهش Raja و همکاران بر مخازن LPG نیز این رویکردها به کار رفته است (۵۲). مقایسه داده‌های کمی میان بوتادیان و LPG نشان‌دهنده اختلاف نرخ نقص میان این دو ماده است که به عواملی نظیر ماهیت فیزیکوشیمیایی، نقص داده یا بهبود سیستم‌های ایمنی بازمی‌گردد. این اختلاف می‌تواند ناشی از عدم توسعه کافی شاخه‌ها در درخت خطا یا بهبود سیستم‌های ایمنی و کاهش احتمال وقوع رویدادهای پایه در مخازن مورد مطالعه باشد (۶۵).

از سوی دیگر، مطالعات جدید مانند پژوهش Pang و همکاران در سال ۲۰۲۵ با ترکیب رویکردهای FTA و شبکه بیزین فازی، به ارائه راهکاری نوین برای تحلیل ریسک ناشی مخازن اتان پرداخته‌اند؛ رویکردی که به صورت مؤثر چالش ناشی از داده‌های ناکامل و نامطمئن

حساسیت بالای مخازن نسبت به بروز حوادث پرمخاطره است. میان رویدادهای میانی، کمترین احتمال وقوع به تنش برشی (BE32) و بیشترین میزان به خطای عمدی در اجرای دستورالعمل‌ها (BE10) اختصاص پیدا کرد که به ترتیب ۰/۰۰۸۹۷۴۳ و ۰/۰۰۹۱۶۲۲ گزارش شد. تحلیل حساسیت مبتنی بر BN در نرم افزار GENIE 5.0 به شناسایی مهمترین دلایل وقوع رویداد نهایی پرداخته و مشخص گردید که رویدادهای پایه ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ (سرماي هوا، نقص در فیلترینگ ناخالصی‌ها و طراحی اولیه نادرست) از موثرترین عوامل در وقوع رویداد نهایی (انفجار مخازن بوتادیان) هستند. مدل‌سازی انفجار مخزن در نرم افزار SAFETI 8.4 نیز مشخص کرد که فشار موج انفجار در فاصله ۱۰۰ متری از منبع انفجار، ۰/۵ بار (معادل ۷/۲۵ psi) برآورد شد و این میزان مطابق با استانداردهای آسیب‌پذیری ساختمان‌هاست که می‌تواند باعث تخریب جدی در سازه‌های سبک، از جمله شکستن شیشه‌ها و آسیب به درها و پنجره‌ها شود (۶۲). همچنین بر اساس نتایج، شعاع خطر آثار انفجار تا فاصله ۹۰۰ متری ادامه یافته و فراتر از آن، تأثیرگذاری محسوسی بر ساختمان‌ها نخواهد داشت. پس از محاسبه میزان تکرار سناریوی اصلی و وارد کردن اطلاعات جمعیتی در نرم افزار SAFETI (نسخه ۸،۴)، سطوح ریسک برای سناریوی انفجار ترسیم شد. ریسک جمعی تخمین زده شده در محدوده غیر قابل قبول 10^{-3} قرار گرفت که بیانگر سطح بسیار بالای ریسک در منطقه است و لزوم اعمال ملاحظات کنترلی را برجسته می‌کند در تحلیل علت ریسک، احتمال و شدت پیامد، نقش کلیدی ایفا می‌کنند؛ به گونه‌ای که احتمال، نشانگر تعداد

را رفع کرده و دقت نتایج را بهبود می‌بخشد (۶۶).

همچنین تحلیل‌های مشابه Xiaoyang و همکاران (۶۷) بر گاز طبیعی و Hyunjun Kwak و همکاران (۲۹) بر ایستگاه‌های هیدروژن نشان داده است که رویکردهای کمی و ابزارهای مدرن مانند SAFETI تا چه میزان می‌توانند در کاهش ریسک و مدیریت بهتر واحدهای صنعتی مؤثر باشند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که استفاده از سیستم دوگانه شیر قطع‌کن منجر به ریسک فردی $7/48 \times 10^{-5}$ شده است که به‌طور مؤثر ریسک را تحت معیار «کمترین حد معقول قابل دست یافتن»^۱ اداره می‌کند و می‌تواند ریسک ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن شهری را به سطوح قابل قبول به‌طور گسترده کاهش دهد.

در مطالعه علی آبادی و همکاران نیز ترکیب FTA و SAFETI می‌تواند به شناسایی عوامل کلیدی خطر و ارائه راهکارهای پیشگیرانه برای کاهش خطرات در مخازن میعانات گازی کمک کند (۶۸).

در کنار اهمیت سنجش ریسک، ملاحظات استانداردسازی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. ساخت اراضی مسکونی در مجاورت واحدهای فرایندی و مواد خطرناک می‌تواند در شرایط اضطراری منجر به آسیب به این مکانها شود. در این خصوص استانداردهایی مطابق استانداردهای آژانس بهداشت و ایمنی انگلستان، معیارهای تعیین شده‌ای برای ساخت و ساز در مناطق پرخطر ارائه می‌دهد که ایران از آن تبعیت می‌نماید. بر اساس این معیار، مناطق به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مناطق صنعتی، مراکز خرید و سرگرمی، مناطق مسکونی، سازمان‌ها و مراکز حساس. علاوه بر این، معیارهای پذیرش ریسک فردی در اتحادیه HSE انگلستان (۳۵)، درسه محدوده قرار دارد: منطقه داخلی، منطقه میانی و منطقه بیرونی. بنابراین ساخت تأسیسات و اماکن در مجاورت مخزن بوتادی ان بایستی با توجه به معایر ریسک ارائه شده و ضوابط استاندارد ها صورت گیرد (۶۹). نتایج میزان ریسک جمعی برآورد شده در این مطالعه بیش از 10^{-3} بود و در محدوده غیرقابل قبول قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نیز بیانگر این واقعیت است که ریسک جمعی در مجاورت مخزن بوتادی‌ان به حدی فراتر از حد قابل قبول رسیده و نشان‌دهنده لزوم تعریف بازه‌های فاصله ایمن است.

مطالعه عباسی و همکارانش (۲۰۲۳) مشابه مطالعه حاضر به تأثیرات شدید ناشی از سناریو انفجار جایگاهی

در محیط شهری، به‌ویژه در مناطق پرجمعیت پرداختند. علاوه بر این، ارزیابی ریسک جمعی آنها نیز که بیش از 10^{-3} بود، نشان داد که وقوع این انفجار می‌تواند خطرات قابل توجهی برای افراد و تأسیسات و ساختمانهای نزدیک ایجاد کند (۷۰). فضلی و همکارانش (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای مشابه، با استفاده از تئوری فازی به‌طور مؤثری عدم قطعیت‌های مرتبط با پارامترهای ورودی را در روش پایبونی محاسبه و سپس با مدل‌سازی پیامدها نشان دادند که عدد ریسک برآورد شده بیش از 10^{-3} و در محدوده غیرقابل قبول قرار دارد که این احتمال تأثیرات شدیدی بر ایمنی و محیط زیست واحد ذخیره‌سازی خواهد گذاشت (۵۶).

یکی از محدودیت‌های کلیدی مطالعه حاضر، عدم دسترسی کافی به داده‌های دقیق برای نقشه‌برداری آسیب‌پذیری منطقه بود؛ عاملی که می‌تواند دقت و جامعیت تحلیل‌ها را بهبود ببخشد. بر این اساس، تحقیقات آینده باید با جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر و تحلیل جامع‌تر ارتباط واحدهای مسکونی، تجاری و صنعتی در محیط اطراف مخزن، تصویری شفاف‌تر و کاربردی‌تر از ریسک ارائه دهند.

در مجموع، پیام اصلی نتایج این مطالعه، تأکید بر خطر بالقوه انفجار مخزن بوتادی‌ان و پیامدهای مخرب آن برای واحدهای مجاور است؛ به نحوی که بازنگری در جانمایی تأسیسات حساس، ارتقاء سیستم‌های ایمنی و مدیریت و پایش مستمر ریسک باید به عنوان راهبردهای کلیدی برای کنترل پیامدهای بالقوه مد نظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب روش‌های تحلیلی کیفی-کمی با مدل‌سازی پیامد می‌تواند چارچوبی کارآمد برای شناسایی عوامل بحرانی و کاهش عدم قطعیت در ارزیابی ریسک فراهم سازد. این رویکرد، با در نظر گرفتن هم‌زمان شرایط فنی، عوامل انسانی و سناریوهای حادثه، تصویری جامع‌تر از وضعیت ایمنی ارائه می‌دهد. یافته‌ها همچنین اهمیت بازنگری در طراحی، اجرای اقدامات کنترلی پیشگیرانه و ارتقای فرهنگ ایمنی را به‌عنوان راهبردهای کلیدی در مدیریت ریسک مخازن مواد شیمیایی پرخطر برجسته می‌سازد. در مجموع، به‌کارگیری مدل‌های یکپارچه تحلیلی کیفی-کمی می‌تواند در بهبود تصمیم‌گیری‌های ایمنی و کاهش پیامدهای بالقوه حوادث در صنایع فرایندی نقش بسزایی داشته باشد.

¹ The As Low as Reasonably Practicable (ALARP)

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به یک میزان در این نوشته سهیم بوده اند

دسترسی آزاد

کپی‌رایت نویسنده(ها) ©2025: این مقاله تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 اجازه استفاده، اشتراک‌گذاری، اقتباس، توزیع و تکثیر را در هر رسانه یا قالبی مشروط بر درج نحوه دقیق دسترسی به مجوز CC، منوط به ذکر تغییرات احتمالی بر روی مقاله می‌داند. لذا به استناد مجوز یادشده، درج هرگونه تغییرات در تصاویر، منابع و ارجاعات یا سایر مطالب از اشخاص ثالث در این مقاله باید در این مجوز گنجانده شود، مگر اینکه در راستای اعتبار مقاله به اشکال دیگری مشخص شده باشد. در صورت درج نکردن مطالب مذکور و یا استفاده فراتر از مجوز بالا، نویسنده ملزم به دریافت مجوز حق نسخه‌برداری از شخص ثالث است.

به‌منظور مشاهده مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 به نشانی زیر مراجعه شود:
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

تقدیر و تشکر

مقاله حاضر، برگرفته از بخشی از رساله کارشناسی ارشد یوسف خانی گلبعاس است، که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات به ثبت رسیده است. نگارندگان بر خود فرض می‌دانند مراتب سپاس و قدردانی خود را از تلاش‌های ارزشمند ایشان ابراز نمایند.

حمایت مالی

ندارد.

ملاحظات اخلاقی

این نوشته برگرفته از رساله کارشناسی ارشد یوسف خانی گلبعاس است، که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات به ثبت رسیده است.

کد اخلاق

بر اساس بررسی‌های انجام شده در دانشکده این پایان نامه نیاز به کد اخلاق نداشته است.

REFERENCES

1. HABIBI EA, KESHAVARZI M, YOUSEFI RHA, HASANZADEH A. Outcome analysis of major accidents and determining the safety integrity level of processes in sour water stripping unit of gas refinery using lopa technique. 2011.
2. Consequence IRSNM. Modeling of Explosion Events by PHAST Software in an Industrial Unit-A Case Study of 2 Phases of South Pars. Bulding of the Georgian National Academy of Science. 2015;9(1):26-316.
3. Aldeeb A, Rogers W, Mannan M. Evaluation of 1, 3-butadiene dimerization and secondary reactions in the presence and absence of oxygen. Journal of hazardous materials. 2004;115(1-3):51-6.
4. Станіславчук ОВ, Чеберячко СІ, Голінько ВІ, Забеліна ВА, Дерюгін ОВ. ANALYSIS OF REASONS OCCURRENCE OF DANGEROUS SITUATIONS DURING THE OPERATION OF GAS STATIONS. 2024.
5. Scarselli A, Corfiati M, Di Marzio D, Iavicoli S. Appraisal of levels and patterns of occupational exposure to 1, 3-butadiene. Scandinavian journal of work, environment & health. 2017;494-503.
6. Yarandi MS, Karimi A, Sajedian AA, Ahmadi V. Comparative assessment of carcinogenic risk of respiratory exposure to 1, 3-Butadiene in a petrochemical industry by the US Environmental Protection Agency (USEPA) and Singapore Health Department methods. J Health Saf Work. 2019;10(3):237-50.
7. Melnick RL, Huff J. 1, 3-Butadiene: toxicity and carcinogenicity in laboratory animals and in humans. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology: Continuation of Residue Reviews. 1992:111-44.
8. QiuHong W, Yilin S, Xin L, Juncheng J, Mingguang Z, Liubing W. Numerical simulation on gas dispersions and vapor cloud explosions induced by gas released from an ethylene storage tank. 爆炸与冲击. 2020;40(12):125401-1--13.
9. Wu X, Li L, Yin J, Wang B, Wang W, Lin G, et al. Studies on principle and prevention of explosion in butadiene systems. Process safety and environmental protection. 2002;80(6):305-9.
10. AL RAZI KMH. 博士 (工学) 甲第 440 号. 2013.
11. Luong C, Zhang K. An assessment of emission event trends within the Greater Houston area

- during 2003–2013. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2017;10:543–54.
12. journal Er. Butadiene leak at ExxonMobil in Baton Rouge 2025 [Available from: https://www.european-rubber-journal.com/article/2078303/butadiene-leak-at-exxonmobil-in-baton-rouge?utm_source=chatgpt.com].
 13. Municipality G. 18-hour operation to neutralize the hazard of the overturned butadiene tanker. 2025.
 14. Haghazarloo H, Parvini M, Lotfollahi MN. Consequence modeling of a real rupture of toluene storage tank. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2015;37:11–8.
 15. Mossink J, de Greef M. Inventory of socioeconomic costs of work accidents: Office for Official Publications of the European Communities Luxembourg; 2002.
 16. Jallon R, Imbeau D, de Marcellis-Warin N. Development of an indirect-cost calculation model suitable for workplace use. *Journal of safety research*. 2011;42(3):149–64.
 17. Broughton E. The Bhopal disaster and its aftermath: a review. *Environmental Health*. 2005;4:1–6.
 18. Venart JES. Flixborough: the Explosion and its Aftermath. *Process Safety and Environmental Protection*. 2004;82(2):105–27.
 19. Ansbaugh LR, Catlin RJ, Goldman M. The Global Impact of the Chernobyl Reactor Accident. *Science*. 1988;242(4885):1513–9.
 20. Carlson CS. Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis: John Wiley & Sons; 2012.
 21. Solukloei HRJ, Nematifard S, Hesami A, Mohammadi H, Kamalinia M. A fuzzy-HAZOP/ant colony system methodology to identify combined fire, explosion, and toxic release risk in the process industries. *Expert Systems with Applications*. 2022;192:116418.
 22. Golfarelli M, Rizzi S, Proli A, editors. Designing what-if analysis: towards a methodology. *Proceedings of the 9th ACM International Workshop on Data Warehousing and OLAP*; 2006.
 23. Zaranejad A, Ahmadi O. Fire and explosion risk assessment in a chemical company by the application of DOW fire and explosion index. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*. 2015;4(3):163–75.
 24. Hazop KS, ile Çalışanların ERDY. Control of Health Risk of Employees in The Chemical Industry With Hazop and Eta Risk Assessment Methods. *AYDIN SAĞLIK DERGİSİ*. 246.
 25. Jafari MJ, Pouyakian M, Hanifi SM. Reliability evaluation of fire alarm systems using dynamic Bayesian networks and fuzzy fault tree analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020;67:104229.
 26. 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.
 27. Keyvani Brojeni M, Kheirandish Sarabi S, Vosoughi S, 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;22(1):0–.
 28. 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.
 29. 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.
 30. Toungetwut M. Analytical Methods for Risk Assessment and reduction of the uncertainty: University of Stavanger, Norway; 2012.
 31. Chin SL, Nor SHM, Al-Shanini A, Ahmad A. OPERATIONAL RISK ANALYSIS FOR UNDESIRE POLYMERIZATION IN OVERHEAD CONDENSER OF BUTADIENE COLUMN. *Jurnal Teknologi*. 2016;78(8–3).
 32. Ramezanifar E, Gholamizadeh K, Mohammadfam I, Mirzaei Aliabadi M. Risk assessment of methanol storage tank fire accident using hybrid FTA-SPA. *PLoS one*. 2023;18(3):e0282657.
 33. Pouyakian M, Azimi HR, Patriarca R, Keighobadi E, Fardafshari M, Hanifi SM. Application of Functional Resonance Analysis and fuzzy TOPSIS to identify and prioritize factors affecting newly emerging risks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024;91:105400.
 34. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*. 2013;91(1–2):46–53.
 35. Chang Z, He X, Fan H, Guan W, He L. Leverage Bayesian network and fault tree method on risk

- assessment of LNG maritime transport shipping routes: Application to the China–Australia route. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(9):1722.
36. Satiarvand M, Orak N, Varshosaz K, Hassan EM, Cheraghi M. Providing a comprehensive approach to oil well blowout risk assessment. *Plos one*. 2023;18(12):e0296086.
37. 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*. 2015;4(9):472-5.
38. 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.
39. Hanifi SM, Omid L, Moradi G. Risk calculation and consequences simulation of natural gas leakage accident using ALOHA software. *Journal of Health & Safety at Work*. 2019;9(1).
40. 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.
41. 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.
42. 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).
43. 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.
44. Gonçalves B, Sá M, Azevedo R. Hazard and operability (HAZOP) study: A systematic process to identify potential hazards and operability problems. *Occupational Safety and Hygiene III: CRC Press*; 2015. p. 217-22.
45. Ahlert RC. Guidelines for consequence analysis of chemical releases. Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, NY,(1999,) 320 Pages,[ISBN No.: 0-8169-0786-2], US. List Price: \$129.00. Wiley Online Library; 2000.
46. Topalis P, Korneliussen G, Hermanrud J, Steo Y, editors. Risk based inspection methodology and software applied to atmospheric storage tanks. *Journal of Physics: conference series*; 2012: IOP Publishing.
47. Shahani NM, Sajid MJ, Zheng X, Jiskani IM, Brohi MA, Ali M, et al. Fault tree analysis and prevention strategies for gas explosion in underground coal mines of Pakistan. *Mining of Mineral Deposits*. 2019.
48. Lees F. Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control: Butterworth-Heinemann; 2012.
49. Asghari B, Omidvari M. Probability assessment of chemical liquid release at floating roof storage tank in the oil refinery by fuzzy fault tree analysis. *Iran Occupational Health*. 2018;15(4):8-20.
50. 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.
51. 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.
52. Rajakurukaran 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.
53. Saaty TL, Ozdemir MS. Why the magic number seven plus or minus two. *Mathematical and computer modelling*. 2003;38(3-4):233-44.
54. Omidvari M, Lavasani S, Mirza S. Presenting of failure probability assessment pattern by FTA in Fuzzy logic (case study: Distillation tower unit of oil refinery process). *Journal of Chemical Health & Safety*. 2014;21(6):14-22.
55. Yazdi M, Kabir S. A fuzzy Bayesian network approach for risk analysis in process industries. *Process safety and environmental protection*. 2017;111:507-19.
56. Fazli Z, Laal F, Keighobadi E, Ebrahimi H, Madvari 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-.
57. Renjith V, Madhu G, Nayagam VLG, Bhasi A.

- 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.
58. Hanifi SM, Laal F, Ghashghaei M, Mandali H. Providing a model to evaluate the spread of fire in a chemical warehouse using numerical simulation and Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024;183:124-37.
 59. Khodabakhsh Z, Omidi L, Dolatabad KM, Aleahmad M, Joveini H. Application of Bayesian networks in fire domino effects modeling in gasoline storage tanks area. *Journal of Health & Safety at Work*. 2024;14(3).
 60. Mohammadi H, Jafari MJ, Pouyakian M, Keighobadi E, Hanifi SM. Development of a new index for assessing the inherent safety level of chemical processes using a multi-criteria fuzzy decision-making approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024;87:105238.
 61. Jones D, Berger S, editors. How to select appropriate quantitative safety risk criteria-applications from the center for chemical process safety (CCPS) guidelines on quantitative safety risk criteria. SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability?; 2010: SPE.
 62. Das S, Roy K. A State-of-the-Art Review on FRF-Based Structural Damage Detection: Development in Last Two Decades and Way Forward. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2021;22.
 63. Ouache R, Adham AAA. Reliability of Risk Assessment in Petrochemical Industries. *International Journal of Industrial Management*. 2015;1.
 64. Jafari MJ, Zarei E, Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. *international journal of hydrogen energy*. 2012;37(24):19241-9.
 65. Kamaei M, Alizadeh SSA, Keshvari A, Kheyrikhah Z, Moshashaei P. Risk assessment and consequence modeling of BLEVE explosion wave phenomenon of LPG spherical tank in a refinery. *Journal of Health and Safety at Work*. 2016;6(2):10-24.
 66. Pang M, Zhang Z, Zhou Z, Li Q. Risk Diagnosis Analysis of Ethane Storage Tank Leakage Based on Fault Tree and Fuzzy Bayesian Network. *Applied Sciences* (2076-3417). 2025;15(4).
 67. Ni X, Yang B, Xu J. Application of SAFETI in the Analysis of Natural Gas Pipeline Leakage Accident. ICPTT 2011: Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines1770. p. 1761-70.
 68. 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).
 69. Frank W, Jones D. Choosing appropriate quantitative safety risk criteria: Applications from the new CCPS guidelines. *Process Safety Progress*. 2010;29(4):293-8.
 70. Kharajou BA, Rafiei M, Ahmadi H, Hanifi SM. Quantitative Assessment of Domino Effects of The Explosion at The North-west Station of Tehran District Six Using Consequence Modeling And GIS.