JOHE
Journal of Occupational Hygiene Engineering
J Occup Hyg Eng, 2024; 11(3): 181-195 Doi: 10.53208/joohe.11.3.181
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press



Original Article

Risk Assessment of Hydrogen Gasholder using Fault Tree Analysis and Fuzzy Bayesian Network

Mostafa Mirzaei Aliabadi[1], Omid Kalatpour[1], Mahnaz Mirzai[2], Reza Mahmoudi[1*]

1. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran
2. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Article history:
Received: 14 October 2024
Revised: 20 November 2024
Accepted: 23 November 2024
ePublished: 05 March 2025

***Corresponding author:** Reza Mahmoudi, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

E-mail: mahmoudirz78@gmail.com

Abstract

Background and Objective: Due to limited resources for risk reduction, prioritizing risks is crucial. Fault tree analysis (FTA) is one of the best-known methods, which faces uncertainty like other methods. On the other hand, despite its benefits and increasing use in industries, hydrogen poses significant risks. Given the lack of studies in the field of risk assessment of hydrogen tanks, this study aimed to develop a risk assessment method for a type of hydrogen tank.

Materials and Methods: In this study, by using fuzzy logic, a connection was established between industrial experts and modern risk assessment methods; therefore, the uncertainty resulting from the lack of knowledge was mitigated as much as possible. Then, by transferring the fault tree to a Bayesian network, logical relationships between the system components were established, and obtaining updated probabilities became possible. By integrating fault tree analysis and these tools, the probability of fire and explosion in a hydrogen gasholder in one of Iran's industries was calculated.

Results: The probability of fire and explosion was calculated to be 1.147E-05. The presence of sufficient oxygen and an electrical spark, a delay in inspection, and an open flame were identified as the most influential basic events in causing this incident.

Conclusion: While calculating the probability of an accident, the proposed method improves the effectiveness of risk control plans by identifying the most important basic events. It also provides a framework for examining new cases.

Keywords: Bayesian network, Fault tree analysis, Fuzzy, Hydrogen, Risk assessment, Storage

Please cite this article as follows: Mirzaei Aliabadi M, Kalatpour O, Mirzai M, Mahmoudi R. Risk Assessment of Hydrogen Gasholder using Fault Tree Analysis and Fuzzy Bayesian Network. J Occup Hyg Eng. 2024; 11(3): 181-195. DOI: 10.53208/joohe.11.3.181

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

Copyright © 2024 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

Extended Abstract

Background and Objective

Hydrogen, due to its lightweight and highly flammable nature, presents unique safety challenges despite its growing use in industrial applications. As global concerns about environmental pollution and climate change rise, hydrogen has emerged as a promising clean energy source due to its high energy content, low emissions, and renewability. However, the safety hazards associated with its storage and use, including its low ignition energy and wide flammability range, make it a potential risk for fires and explosions. These risks are particularly significant when hydrogen is stored in pressurized gas holder tanks, which are commonly used in industries, such as vegetable oil hydrogenation. These tanks are designed with a steel drum floating in water to maintain gas pressure and prevent leakage. However, leakage remains a significant concern in these storage systems.

Given the limited research on assessing the risks associated with hydrogen gas holder tanks, this study employs a structured risk assessment approach to identify potential hazards and mitigate safety risks. Traditional risk assessment models often struggle to address uncertainty, especially in cases where data is insufficient. Fuzzy logic offers a promising solution by enabling multi-valued risk assessments. Additionally, combining Fault Tree Analysis (FTA) with Bayesian Networks (BN) can enhance the assessment by accounting for complex system interactions and uncertainty.

Materials and Methods

Fault Tree Analysis

FTA is a systematic, deductive approach used to identify the causes leading to a hazardous event. By utilizing logical gates, such as AND and OR, FTA creates a graphical representation of events, from the basic underlying causes to the final undesirable event. This approach is particularly useful in identifying risks within industrial systems by analyzing the causal relationships between events.

Bayesian Network

BN offer a probabilistic model that helps assess risk in complex systems. BN employs a directed acyclic graph, where nodes represent variables and edges represent conditional dependencies. The strength of BN lies in its ability to update probabilities dynamically based on new evidence or data, such as real-time process data or incident reports. This feature allows for continuous risk assessment in evolving industrial systems.

Expert Judgment Elicitation

Given the lack of sufficient data for the failure probabilities of basic events in the hydrogen storage tank system, expert opinions were solicited. A panel of six experts from different organizational levels provided their insights. These opinions were then converted into fuzzy values using linguistic terms such as "low" and "high," and these values were aggregated to form a composite probability estimate. The integration of expert knowledge into the analysis improves the accuracy of the results, especially in systems with complex dynamics and insufficient historical data.

Aggregation of Fuzzy Opinions

To ensure the reliability of expert opinions, a methodology for aggregating and defuzzifying multiple expert inputs was developed. The aggregation process takes into account the degree of similarity among experts' views, their level of agreement, and their credibility based on their expertise and experience. This results in a more robust probability estimation, which is then converted into a crisp value that can be used in subsequent risk analyses.

Final Failure Probability Calculation

Once the aggregated expert opinions were defuzzified, the failure probability was calculated for each basic event. These probabilities were then integrated into the fault tree and Bayesian network models, allowing for the determination of the overall probability of the top event—fire and explosion in the hydrogen storage tank.

Case Study: Fire and Explosion of a Hydrogen Storage Tank

A case study from a hydrogen production unit in a vegetable oil refinery in Iran was used to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The hydrogen storage tank, critical to the oil hydrogenation process, was identified as a potential source of significant risk, particularly in the event of a fire or explosion. Using the HAZID method, all potential hazards in the hydrogen production and storage unit were identified and qualitatively assessed based on the U.S. military standard (i.e., MIL-STD-88). The highest risk scenario identified was the release of hydrogen, followed by fire and explosion.

To evaluate the risk of this scenario, a fault tree was created, and expert panels were convened to assess the failure probabilities of various events. The fault tree was then modeled as a Bayesian network to allow for dynamic updating of probabilities based on new evidence. This updated model provided a comprehensive risk profile, highlighting the key events that could lead to the primary risk of fire and explosion.

Results

The assessment revealed that the probability of fire and explosion in the hydrogen storage tank was 1.147×10^{-5}. Additionally, the Bayesian network allowed for the calculation of probabilities for all intermediate events, which helped refine the risk analysis. The results were used to create a Fuzzy Vulnerability Index (FVI), which ranked the impact of

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

each base event on the likelihood of the main event. This ranking process helps organizations prioritize resources to address the most significant contributors to risk. From the FVI assessment, the presence of sufficient oxygen was identified as a critical factor in the occurrence of the fire and explosion, with an FVI value of 1. Other significant factors included electrical sparks, delays in inspections, and the presence of flames. Events related to corrosion and external environmental stresses were found to have minimal impact on the incident.

Discussion

This study highlights the advantages of using fuzzy logic and BN in risk assessments for complex industrial systems. The integration of expert opinions and the dynamic updating of probabilities using BN provide a more accurate and reliable assessment than traditional risk analysis methods. The FVI index proved to be an effective tool for identifying and ranking the critical factors contributing to risk, enabling the organization to focus its resources on mitigating the most impactful hazards. Despite the advantages, the study faced challenges in obtaining process data due to confidentiality policies. This limitation affected the thoroughness of the data analysis but did not detract from the overall robustness of the proposed methodology. Future studies could benefit from more access to real-time data and further validation of the proposed approach in other industrial settings.

Conclusion

This study presents an innovative approach to assessing the risk of fire and explosion in hydrogen storage tanks using FTA, BN, and fuzzy logic. The results demonstrated that the probability of such incidents can be accurately estimated even in complex systems with limited data. By identifying the critical events that contribute to risk, organizations can allocate resources more effectively to prevent accidents and improve safety. The proposed methodology offers significant improvements over traditional risk assessment models, particularly in dealing with uncertainty and dynamic risk factors.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

JOHE
مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
دوره ۱۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحات:۱۹۵-۱۸۱
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

مقاله اصلی

ارزیابی ریسک مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن با استفاده از آنالیز درخت خطا (FTA) و شبکه فازی– بیزین

مصطفی میرزایی علی‌آبادی[۱]، امید کلات‌پور[۱]، مهناز میرزایی[۲]، رضا محمودی[۱*]

۱.گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران
۲. گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳
تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* **نویسنده مسئول:** رضا محمودی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

ایمیل: mahmoudirz78@gmail.com

چکیده

سابقه و هدف: ازآنجایی‌که منابع سازمان جهت کاهش ریسک خطرات محدود است، به روش‌های ارزیابی ریسک نیاز است تا با رتبه‌بندی خطرات، منابع سازمان را در نقاط بحرانی‌تر متمرکز کنند. آنالیز درخت خطا (FTA) یکی از بهترین روش‌های شناخته‌شده است که همانند سایر روش‌ها با عدم قطعیت مواجه است. ازسوی‌دیگر، هیدروژن باوجودِ تمامی ویژگی‌های مثبت خود و افزایش روزافرون کاربرد آن در صنایع، خطرات قابل‌توجهی را ایجاد می‌کند. با توجه به کمبود مطالعات درزمینه ارزیابی ریسک مخازن هیدروژن، هدف این مطالعه پیشنهاد یک روش ارزیابی ریسک جهت بررسی خطرات نوع خاصی از مخزن هیدروژن است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه با به کارگیری منطق فازی، ارتباطی بین متخصّصان صنعتی و روش‌های نوین ارزیابی ریسک ایجاد شد و بدین‌وسیله عدم قطعیت ناشی از کمبود دانش تاحدّامکان برطرف گردید. سپس با انتقال درخت خطا به شبکه بیزین روابط منطقی بین اجزای سیستم برقرار شد و دستیابی به احتمالات به‌روزشده امکان‌پذیر گردید. با ادغام آنالیز درخت خطا و این ابزارها، احتمال بروز آتش‌سوزی و انفجار در مخزن نگهدارنده هیدروژن یکی از صنایع ایران محاسبه شد.

یافته‌ها: احتمال بروز آتش‌سوزی و انفجار $۱/۱۴۷\times۱۰^{-۵}$ محاسبه شد. موارد وجود اکسیژن کافی، وجود جرقه الکتریکال، تأخیر در انجام بازرسی و وجود شعله به ترتیب به‌عنوان موثرترین رویدادهای پایه در ایجاد این حادثه شناخته شدند.

نتیجه‌گیری: روش پیشنهادی ضمن محاسبه احتمال بروز حادثه با مشخص کردن مهم‌ترین رویدادهای پایه، اثربخشی طرح‌های کنترل ریسک را بهبود می‌بخشد و همچنین چهارچوبی جهت بررسی موارد جدید ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: ارزیابی ریسک، درخت خطا، شبکه بیزین، فازی، هیدروژن، مخزن

استناد: میرزایی علی آبادی، مصطفی؛ کلات پور، امید؛ میرزایی، مهناز؛ محمودی، رضا. ارزیابی ریسک مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن با استفاده از آنالیز درخت خطا (FTA) و شبکه فازی- بیزین. مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، پاییز ۱۴۰۳؛۱۱(۳): ۱۹۵-۸۱

مقدمه

هیدروژن گازی بسیار سبک و مستعد نشت است که استفاده از آن در صنایع به‌سرعت در حال افزایش است [۱]. علاوه‌براین، نگرانی‌های زیست‌محیطی نظیر گرمایش جهانی و آلودگی هوای ناشی از سوخت‌های فسیلی، نیاز به حامل انرژی پاک را ضروری می‌سازد. هیدروژن به‌دلیل انرژی کافی، آلودگی کم، تجدیدپذیری و به‌طور خلاصه مزایای زیست‌محیطی، یکی از بهترین گزینه‌ها برای ایفای نقش حامل انرژی در آینده صنایع است [۲، ۳]. هیدروژن باوجودِ مصارف متعدد به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی خود، چالش‌ها و خطرات خاص ایمنی را ایجاد می‌کند. گاز هیدروژن دارای حداقل انرژی اشتعال ۰/۰۲ میلی‌ژول و محدوده اشتعال‌پذیری وسیع (حدود ۴ تا ۷۵ درصد در هوا) است. علاوه‌براین، به‌دلیل ماهیّتی بدون رنگ و بو، تشخیص نشت آن دشوار است [۴]. با توجه به ویژگی‌هایی ازاین‌قبیل درصورتی‌که هیدروژن رهایش پیدا کند، در حضور سایر اضلاع حریق می‌تواند به‌راحتی به آتش‌سوزی و انفجار

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

منجر شود.[۵]. شعله هیدروژن از دید انسان تقریباً نامرئی است. بنابراین در صورت بروز آتش‌سوزی، امکان ایجاد آسیب به پرسنل حاضر در محیط وجود دارد [۶]. یکی از کاربردهای بی‌شمار هیدروژن، استفاده در صنایع تصفیه‌کننده روغن نباتی و در فرایند هیدروژنه کردن روغن است [۷].

تکنولوژی و روش‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی هیدروژن وجود دارد که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ذخیره‌سازی در ظروف تحت فشار اشاره کرد. در واحد تولید هیدروژنِ برخی از صنایع نظیر صنایع تصفیه روغن‌نباتی، هیدروژن درون مخازن نگهدارنده گاز Gasholder ذخیره می‌شود [۸]. مخزن نگهدارنده گاز از یک درام فولادی تشکیل شده است که درون یک مخزن استوانه‌ای پُر از آب شناور است؛ همین امر به آب‌بندی شدن مخزن منجر می‌شود. درام فوقانی از چندین ناحیه به وزنه‌هایی متصل است که فشار گاز درون درام را تعیین می‌کنند. مخازن نگهدارنده گاز نقش مهمی در تولید هیدروژن ایفا می‌کنند، اما ذخیره هیدروژن در آن‌ها همواره با خطر نشت گاز همراه است [۹]. با توجه به اینکه مطالعات چندانی درزمینه ارزیابی ریسک مخزن نگهدارنده هیدروژن صورت نگرفته است، هدف محقّق در این مطالعه استفاده از یک مدل ارزیابی ریسک جهت بررسی خطرات مرتبط با نوع خاصی از مخزن هیدروژن تحت‌عنوان مخزن نگهدارنده گاز است.

ارزیابی ریسک یکی از مؤثرترین اقدامات در پیشگیری از بروز حوادث صنعتی و ایجاد آسیب به سرمایه‌های سازمان است. در ارزیابی ریسک با ایجاد ارتباط بین اجزای سیستم و همچنین برآورد شدت و احتمال بروز حوادث، می‌توان نقاط ضعف و قوّت سیستم را تعیین کرد. درنتیجه، منابع سازمان بر روی نقاط آسیب‌پذیر متمرکز می‌شوند و بیشترین اثربخشی در کاهش ریسک خطرات موجود حاصل می‌شود [۱۰-۱۲]. درهمین‌راستا، مدل‌های ارزیابی ریسک متعددی توسعه داده شده است، اما تمامی آن‌ها با چالش عدم قطعیت مواجه‌اند [۱۳، ۱۴]. در شرایطی که رویدادی هرگز رخ نداده یا دارای نرخ بروز پایین است، اطلاعات کافی درمورد احتمال خرابی اجزای سیستم وجود نخواهد داشت. در چنین شرایطی که عدم قطعیت ناشی از کمبود دانش است، منطق فازی می‌تواند با ایجاد گزینه‌های چندارزشی این محدودیت را تاحدّامکان برطرف سازد [۱۳، ۱۵]. مطالعات زیادی از منطق فازی جهت کاهش عدم قطعیت بهره گرفته‌اند؛ نظیر محمّدفام و همکاران (۲۰۲۰) که با استفاده از ترکیب DEMATEL و فازی توانستند روابط علّت‌ومعلولی و تأثیرات متقابل عوامل مؤثر بر وقوع حادثه را تعیین کنند [۱۶].

ازطرفی، سیستم‌های صنعتی مدرن دارای پیچیدگی هستند که همین امر تعیین ارتباط دقیق میان اجزای آن‌ها را دشوار می‌سازد. همین امر نوع دیگری از عدم قطعیت را ایجاد می‌کند که در آن متخصّص قادر به ایجاد رابطه علّت‌ومعلولی بین اجزای سیستم نیست. دراین‌صورت، ابزار قدرتمند شبکه بیزین Bayesian Network می‌تواند با برقراری ارتباط میان اجزای مختلف سیستم، محیطی پویا ایجاد کند و این چالش را مرتفع سازد [۱۷-۱۹]. درهمین‌راستا، علی‌آبادی و همکارش (۲۰۲۰) از شبکه بیزین جهت کمّی‌سازی آنالیز پاپیونی Bow-tie Analysis استفاده و احتمال وقوع سناریوهای مختلف مرتبط با جایگاه‌های گاز طبیعی فشرده را محاسبه کردند [۲۰].

آنالیز درخت خطا Fault Tree Analysis یک روش ارزیابی ریسک است که رویدادهای اوّلیه Basic Event را شناسایی و آن‌ها را تا زمان بروز رویداد اصلی Top Event دنبال می‌کند. درصورتی‌که عدم قطعیت موجود در این روش توسط ابزارهای ذکرشده برطرف شود، این روش می‌تواند انتخاب مناسبی جهت بررسی خطرات و حوادث احتمالی باشد؛ همان‌طور که رمضانی‌فر و همکاران (۲۰۲۳) از آنالیز درخت خطا برای شناسایی و ارزیابی خطر آتش‌سوزی مخزن متانول استفاده کردند که احتمال بروز این حادثه $۲/۵۸\times۱۰^{-۱}$ در سال محاسبه شد [۲۱]. با توجه به آنچه گفته شد، هدف محقّق در این مطالعه به کارگیری یک مدل ارزیابی ریسک برپایه آنالیز درخت خطا و شبکه بیزین به‌منظور ارزیابی ریسک حوادث مرتبط با نگهدارنده گاز هیدروژن است.

روش کار

۱- آنالیز درخت خطا

روش آنالیز درخت خطا مدلی گرافیکی و یک نمودار منطقی است که ترکیب عواملی که می‌توانند به بروز حادثه منجر شوند را ارزیابی می‌کند. این روش، روشی استنتاجی یعنی از کل به جزء است که در آن از نمادهای ریاضیاتی بولین مانند AND و OR استفاده می‌شود تا رویداد اصلی را به رویدادهای پایه مرتبط کند [۲۲، ۲۳]. رویداد اصلی موردنظر موقعیت‌های خطرناکی هستند که معمولاً در طول ارزیابی‌های انجام‌شده با استفاده از سایر روش‌های ارزیابی مخاطرات مشخص شده‌اند. نتایج حاصل از آنالیز درخت خطا روابطی منطقی است که بین رویدادهای پایه، میانی Intermidiate Event و اصلی برقرار می‌شوند.

۲- شبکه بیزین

شبکه بیزین یک روش گرافیکی است که در مطالعات تحلیل ریسک و ایمنی برپایه دانش احتمال و عدم قطعیت امروزه کاربرد زیادی پیدا کرده است. این شبکه یک گراف جهت‌دار غیرمدوّر است که هر نود Node یا گره نشان‌دهنده یک متغیّر و کمان‌ها روابط مستقیم بین نودهای به‌هم‌متصل‌شده را نشان می‌دهند و جداول احتمالی شرطی به نودهایی که وابستگی شرطی دارند، اختصاص داده می‌شود. براساس استقلال شرطی منتج‌شده از مفهوم d-separation و قاعده زنجیره‌ای، شبکه بیزین توزیع احتمال مشترک $P(U)$ از متغیّرهای $U=(X_1,X_2,\dots,X_n)$ را طبق رابطه ۱ نشان می‌دهد.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

$$P(U)=\prod_{i=1}^{n}P(X_i|Pa(X_i)) \quad (1)$$

$P(U)$ نشان‌دهنده احتمال والد متغیّر X_1 است. براین‌اساس، احتمال متغیّر X_1 ازطریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$P(X_i)=\sum_{U\setminus X_i}P(U) \quad (2)$$

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد شبکه بیزین نسبت به سایر روش‌ها، توانایی بهره‌گیری از تئوری بیز برای به‌روزرسانی احتمال وقوع رویدادهای اوّلیه به‌محض دریافت شواهد جدید مانند آمار وقوع حوادث، شبه‌حوادث و داده‌های فرایندی لحظه‌ای است. به‌منظور محاسبه مقادیر احتمالات به‌روزشده، از رابطه ۳ استفاده می‌شود [۲۴].

$$P(U|E)=\frac{P(U,E)}{P(E)}=\frac{P(U,E)}{\sum_U P(U,E)} \quad (3)$$

U نشان‌دهنده متغیّر موردنظر و E شواهد دریافتی است.

۳- استخراج نظر متخصّصان

به‌منظور محاسبه احتمال بروز رویداد اصلی در درخت خطا، داده‌های شکست در رویدادهای پایه موردنیاز است. با توجه به کمبود دانش در این زمینه، طبق مراحل زیر می‌توان با کمک منطق فازی و نظر متخصّصان تاحدّامکان این محدودیت را برطرف کرد.

۳-۱ انتخاب و وزن‌دهی متخصّصان

در شرایطی که اطلاعات کافی درباره احتمال شکست در رویدادهای پایه وجود ندارد، از نظر متخصّصان استفاده می‌شود. محقّقان در این مطالعه برای دستیابی به دقت کافی در نتایج، از ۶ متخصّص دعوت به همکاری کرده است. با توجه به اینکه متخصّصان منتخب از سطوح مختلف سازمانی و دارای دانش و تجربه متفاوتی هستند، از یک رویکرد وزن‌دهی شامل معیارهای عنوان شغلی، تجربه و تحصیلات برای اختصاص اهمیت مناسب به نظر هر متخصّص استفاده شده است [۲۵]. معیار امتیازدهی به اهمیت متخصّصان در جدول ۱ نشان داده شده است. فاکتور وزن‌دهی هر متخصّص از تقسیم مجموع نمرات کسب‌شده توسط وی تقسیم‌بر مجموع نمرات کسب‌شده توسط کلّیه متخصّصان شرکت‌کننده در مطالعه به دست آمد.

جدول ۱. معیار وزن‌دهی به نظر متخصّصان

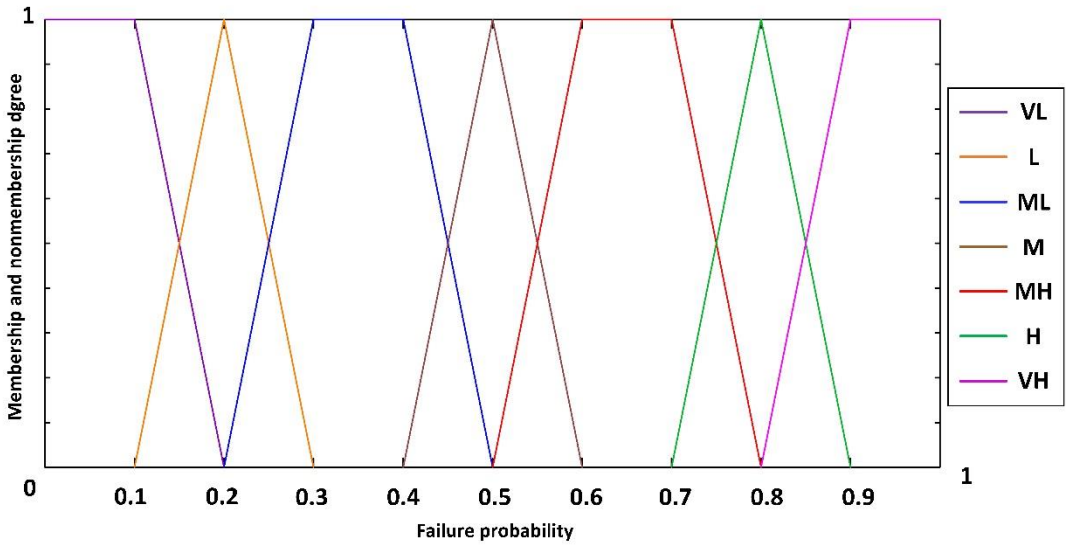
ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	عنوان شغلی	اُپراتور	۱
		تکنسین	۲
		مهندس	۳
		مدیر، بازرس کارخانه	۴
		رئیس، مهندس ارشد	۵
۲	تجربه (سال)	≤۵	۱
		۶ تا ۹	۲
		۱۰ تا ۱۹	۳
		۲۰ تا ۲۹	۴
		≥۳۰	۵
۳	تحصیلات	دبیرستان	۱
		دیپلم	۲
		کارشناسی	۳
		کارشناسی‌ارشد	۴
		دکترا	۵

۳-۲ کمّی‌سازی نظر متخصّصان

برای کمّی‌سازی نظر متخصّصان درخصوص احتمال بروز رویدادهای پایه، از اصطلاحات زبانی و توابع ذوزنقه‌ای استفاده شد. هفت اصطلاح زبانی شامل خیلی کم، کم، نسبتاً کم، متوسط، نسبتاً زیاد، زیاد و خیلی زیاد به کار گرفته شد. دامنه فازی اصطلاحات زبانی به‌کاررفته در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر کمّی اعداد فازی ذوزنقه‌ای که در کمّی‌سازی نظر متخصّصان استفاده شد، در جدول ۲ قابل‌مشاهده است.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]



شکل ۱. نمایش گرافیکی اعداد فازی ذوزنقه‌ای

جدول ۲. اعداد فازی ذوزنقه‌ای معادل با اصطلاحات زبانی

اصطلاحات زبانی	وزن‌های مربوط
بسیار کم (Very Low)	(0, 0, 0.1, 0.2)
کم (Low)	(0.1, 0.2, 0.2, 0.3)
نسبتاً کم (Mildly Low)	(0.2, 0.3, 0.4, 0.5)
متوسط (Medium)	(0.4, 0.5, 0.5, 0.6)
نسبتاً زیاد (Mildly High)	(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)
زیاد (High)	(0.7, 0.8, 0.8, 0.9)
بسیار زیاد (Very High)	(0.8, 0.9, 1.0, 1.0)

۳-۲-۲ ادغام نظرات فازی‌شده

با توجه به اینکه متخصّصان دارای دیدگاه متفاوتی هستند، نسبت به یک مورد یکسان نظرات مختلفی جمع‌آوری می‌شود. بنابراین به‌منظور استفاده از نظرات آن‌ها در ارزیابی، بایستی این نظرات ادغام و به یک مقدار واحد تبدیل شوند. الگوریتم مورداستفاده برای این کار در ادامه شرح داده شده است:

گام اول- درصورتی‌که نظرات دو متخصّص E_i و E_j **در قالب دو عدد ذوزنقه‌ای استاندارد نظیر** $A_i = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ **و** $A_j = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ **در نظر گرفته شود**، درجه شباهت بین دو نظر A_i و A_j که در بازه صفر تا یک قرار دارد، ازطریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$S(A_i, A_j) = 1 - \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} |a_i - b_i| \qquad (4)$$

گام دوم- درجه موافقت میانگین برای هریک از متخصّصان به کمک رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$AA\ (E_i) = \frac{1}{n-1}\sum_{\substack{i\neq j \\ j=1}}^{n} S_{ij}\ (A_i, A_j) \qquad (5)$$

گام سوم- درجه موافقت نسبی برای هر متخصّص با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$RA\ (E_i) = AA\ (E_i) / \sum_{i=1}^{n} AA\ (E_i) \qquad (6)$$

گام چهارم- فاکتور وزن‌دهی برای هر متخصّص براساس جدول ۱ و رابطه ۷ تعیین می‌شود.

$$W\ (E_i) = \frac{WS\ (E_i)}{\sum_{i=1}^{m} WS\ (E_i)} \qquad (7)$$

گام پنجم- حال با مشخص شدن درجه موافقت نسبی و فاکتور وزن‌دهی متخصّصان، فاکتور وزن‌دهی ادغام‌شده ازطریق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد.

$$C\ (E_i) = \beta . W\ (E_i) + (1-\beta) . RA\ (E_i) \qquad (8)$$

در این رابطه فاکتور $\beta \in [0و1]$ میزان اهمیت فاکتور وزن‌دهی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

را در برابر درجه موافقت نسبی بیان می‌کند.

گام ششم- درنهایت با استفاده از فاکتور وزن‌دهی ادغام‌شده، نظرات طبق رابطه ۹ ادغام می‌شوند.

$$R_{AG} = C\ (E_1) \times R_1 + C\ (E_2) \times R_2 + \cdots + C\ (E_i) \times R_i \quad (9)$$

در این رابطه R_{AG} احتمال فازی ادغام‌شده برای رویداد پایه و R_i احتمال فازی‌شده است که توسط متخصّص بیان شده است.

۴- دیفازی کردن احتمالات ادغام‌شده

به‌منظور استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از متخصّصان، بایستی نظرات ادغام‌شده آن‌ها دیفازی و به‌صورت عدد واضح امکان‌پذیری تعیین شود. درصورتی‌که عدد فازی ذوزنقه‌ای به‌صورت $A_i = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ **در نظر گرفته شود،** فرایند دیفازی کردن طبق رابطه ۱۰ قابل‌انجام است.

$$CFP = \frac{1}{3}\left(\frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{a_4 + a_3 - a_1 - a_2}\right) \quad (10)$$

۵-۲ محاسبه احتمال نهایی شکست

عدد حاصل از مرحله دیفازی کردن هنوز به‌صورت امکانی است. ازآنجایی‌که درخت خطا احتمال می‌پذیرد، باید عدد به‌دست‌آمده از حالت امکانی به احتمالی تبدیل شود. این فرایند توسط روابط ۱۱ و ۱۲ قابل‌انجام است.

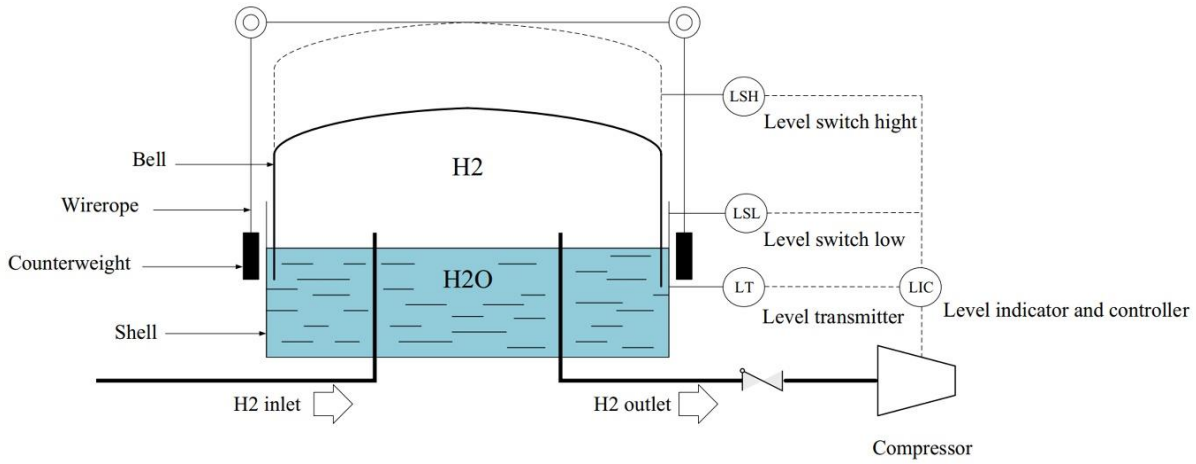
$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$K = \left(\frac{1 - CFP}{CFP}\right)^{1/3} \times 2.301 \quad (12)$$

مطالعه موردی: آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن

به‌منظور نشان دادن کاربرد روش پیشنهادی، واحد تولید هیدروژنِ یکی از صنایع تصفیه روغن‌نباتی در ایران به‌عنوان موردمطالعه انتخاب شد. در این واحد یک مخزن نگهدارنده گاز قرار دارد که نقشه P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) آن در شکل ۲ قابل‌مشاهده است. این سیستم برای ذخیره هیدروژن جهت فرایند هیدروژناسیون روغن‌نباتی طراحی شده است.

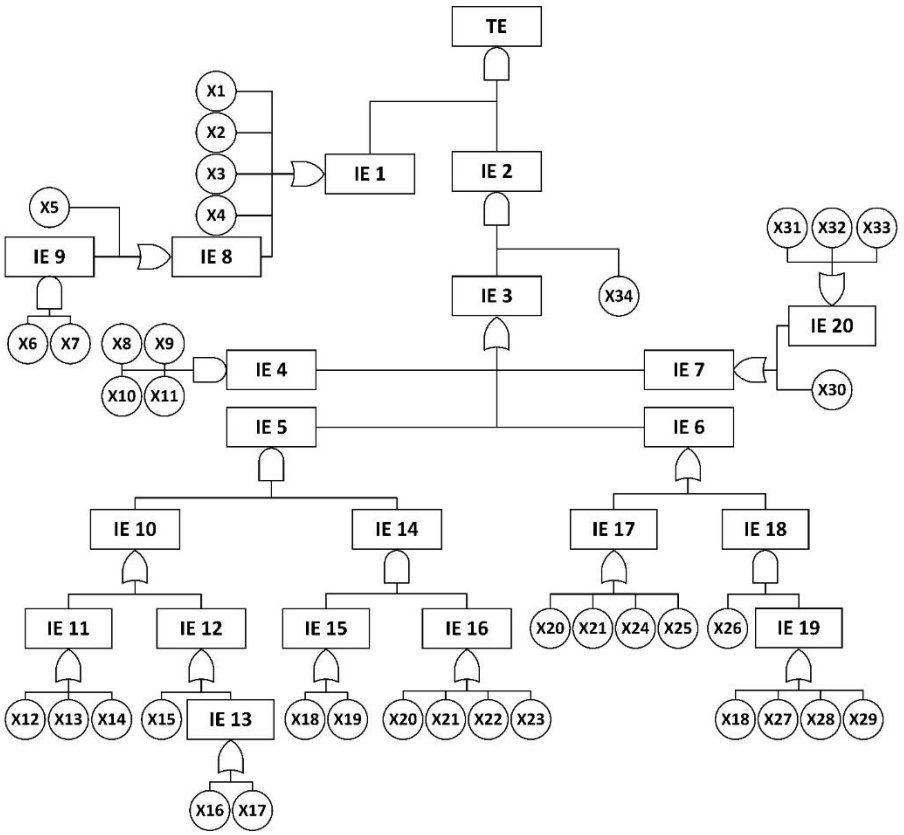
تمامی سناریوهای محتمل و خطرات موجود در واحد تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن توسط روش HAZID (Hazard Identification) شناسایی شد. جهت آنالیز کیفی ریسک سناریوهای شناسایی‌شده، از استاندارد نظامی آمریکا MIL-STD-88 استفاده شد. براین‌اساس، رهایش هیدروژن و به‌دنبال آن آتش‌سوزی و انفجار، بالاترین میزان ریسک را به خود اختصاص داد. درنتیجه، سناریوی آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز به‌عنوان رویداد اصلی در به کارگیری روش پیشنهادی انتخاب شد. در گام بعد درخت خطا براساس سناریوی انتخاب‌شده در پنل‌های تخصّصی و با حضور متخصّصان ایمنی و افراد عملیاتی ترسیم شد. نمایش گرافیکی درخت خطا در شکل ۳ و جزئیات آن در جدول ۳ قابل‌مشاهده است. با توجه به محدودیت‌های تکنیک آنالیز درخت خطا در به‌روزرسانی احتمالات به‌منظور انجام محاسبات بعدی، ساختار درخت خطا در قالب شبکه بیزین مدل شد. این کار با استفاده از نرم‌افزار GeNIe نسخه ۲-۲ انجام گرفت که مدل گرافیکی آن در شکل ۴ قابل‌مشاهده است. پس از تعیین رویدادهای پایه، به‌منظور جمع‌آوری مقادیر احتمال بروز هریک از رویدادهای پایه، شش متخصّص از سطوح مختلف سازمانی انتخاب شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ قابل‌مشاهده است. در گام بعدی، نظر هریک از متخصّصان به‌صورت اصطلاحات کلامی و در قالب پرسش‌نامه دررابطه‌با احتمال بروز هریک از رویدادهای پایه مطابق جدول ۵ جمع‌آوری شد. سپس با توجه به آنچه در بخش روش کار ارائه شد، نظرات متخصّصان برای هریک از رویدادهای پایه وزن‌دهی و ادغام گردید و درنهایت مقادیر امکان‌پذیری توسط رابطه مربوط به مقادیر احتمال تبدیل شدند. مراحل وزن‌دهی، ادغام و دیفازی کردن نظرات متخصّصان برای رویداد پایه X1 در جدول ۶ به‌عنوان‌مثال آورده شده است. فرایندی مشابه برای تمامی رویدادهای پایه صورت گرفت و احتمال پیشین و پسین بروز هریک از رویدادهای پایه محاسبه شد که در جدول ۷ قابل‌مشاهده است.



شکل ۲. نقشه P&ID مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن موجود در یکی از صنایع

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]



شکل ۳. ساختار درخت خطا برای حادثه آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز

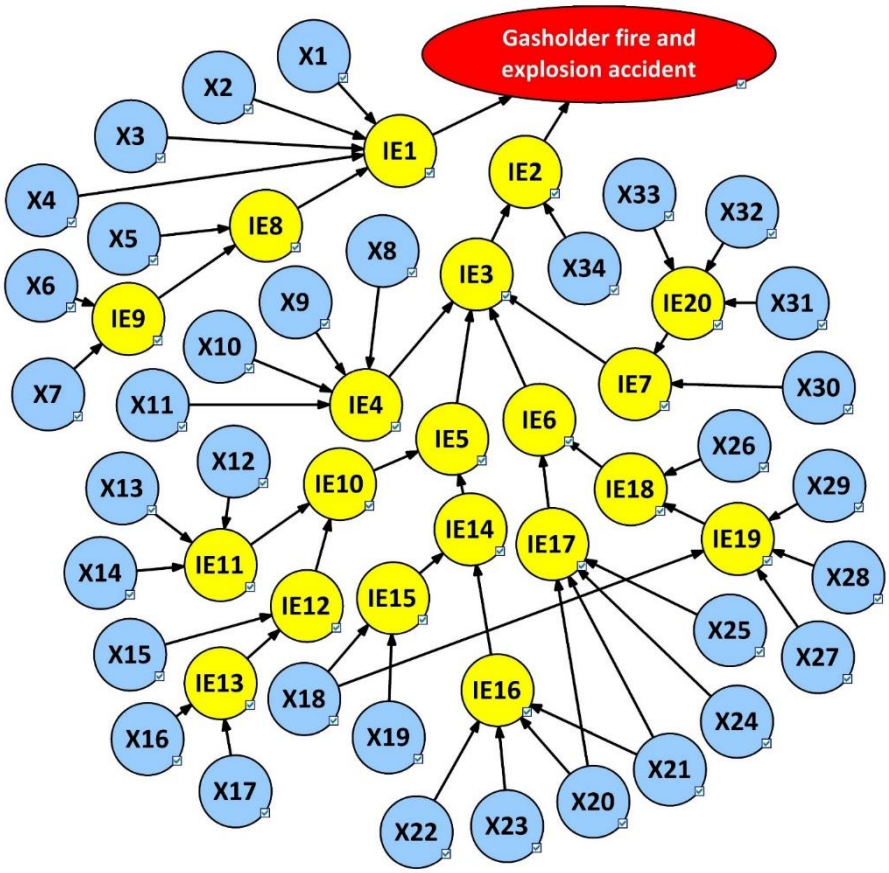
جدول ۳. توصیف اجزای درخت خطا

رویدادها	توصیف رویداد	رویدادها	توصیف رویداد
TE	آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز	X8	عدم وجود مواد ضدّخورندگی
IE 1	منبع احتراق	X9	نقص در پوشش ضدّزنگ
IE 2	مخلوط قابل‌اشتعال گاز هیدروژن و هوا	X10	بالا رفتن pH
IE 3	رهایش هیدروژن	X11	عدم وجود سیستم حفاظت کاتدی
IE 4	خوردگی	X12	بارش برف
IE 5	نقص واشر گاز	X13	باد شدید
IE 6	آسیب به درام شناور	X14	زمین لرزه
IE 7	رفتار ناایمن	X15	گیر کردن سیم بکسل وزنه‌های تعادل
IE 8	جرقّه براثر تخلیه الکتریسیته ساکن	X16	فرسایش سیم بکسل
IE 9	جرقّه در زمان تعمیرات	X17	اتّصالات ضعیف
IE 10	کج شدن درام شناور	X18	نقص در سیستم LIC
IE 11	استرس خارجی	X19	نقص در سنسور حدّ پایین
IE 12	نقص در سیستم تعادل	X20	خراب‌کاری عمدی
IE 13	عدم برقراری فرایند توزین	X21	اصابت ترکش ناشی از انفجار مخازن دیگر
IE 14	نقص در سیستم اتوماتیک	X22	تبخیر آب
IE 15	کاهش سطح آب	X23	نقص در اتصالات
IE 16	تخلیه آب درون مخزن	X24	اصابت رعدوبرق
IE 17	ضربه مکانیکی	X25	برخورد وسایل‌نقلیه
IE 18	افزایش بیش از حد فشار	X26	نقص در سیستم تخلیه فشار
IE 19	محبوس بودن گاز	X27	نقص در سیستم حدّ بالای مخزن نگهدارنده گاز
IE 20	خطای تعمیرات	X28	نقص در سیستم کمپرسور
X1	جرقّه الکتریکال	X29	نقص در check valve پایین‌دست

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

X2	رعدوبرق	X30	خطای عملیاتی
X3	جرقّه براثرِ برخورد	X31	بازرسی کمتر از حدّ کفایت
X4	وجود شعله	X32	عدم انجام بازرسی
X5	بار الکتریکی ایجادشده براثرِ اصطکاک لباس فرد	X33	تأخیر در انجام بازرسی
X6	الکتریسیته ساکن	X34	وجود اکسیژن کافی در محیط
X7	اتصال به زمین ضعیف		



شکل ۴. نمایش گرافیکی شبکه بیزین برای حادثه آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز

جدول ۴. مشخصات متخصّصان منتخب

ردیف	عنوان شغلی	تجربه کاری (سال)	میزان تحصیلات	نمره وزن‌دهی	فاکتور وزن‌دهی
۱	مدیر، بازرس کارخانه (۴)	۶ تا ۹ (۲)	کارشناسی‌ارشد (۴)	۱۰	۰/۲۰۴
۲	مهندس (۳)	۱۰ تا ۱۹ (۳)	کارشناسی (۳)	۹	۰/۱۸۳
۳	مهندس (۳)	۱۰ تا ۱۹ (۳)	کارشناسی (۳)	۹	۰/۱۸۳
۴	مهندس (۳)	۱۰ تا ۱۹ (۳)	کارشناسی (۳)	۹	۰/۱۸۳
۵	تکنسین (۲)	تا ۹ (۲)	دیپلم (۲)	۶	۰/۱۲۲
۶	اپراتور (۱)	۱۰ تا ۱۹ (۳)	دیپلم (۲)	۶	۰/۱۲۲

جدول ۵. نظرات جمع‌آوری‌شده از متخصّصان در قالب اصطلاحات کلامی

رویدادها	کارشناس ۱	کارشناس ۲	کارشناس ۳	کارشناس ۴	کارشناس ۵	کارشناس ۶	رویدادها	کارشناس ۱	کارشناس ۲	کارشناس ۳	کارشناس ۴	کارشناس ۵	کارشناس ۶
X1	M	M	M	ML	ML	ML	X18	M	L	ML	M	M	L
X2	VL	ML	ML	M	ML	L	X19	VL	L	L	ML	ML	L
X3	L	ML	ML	VL	VL	VL	X20	ML	L	VL	ML	ML	VL
X4	ML	M	M	VL	VL	VL	X21	ML	L	ML	M	M	L

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

L	ML	ML	L	ML	ML	X22	VL	ML	L	ML	L	VL	X5
L	ML	ML	L	M	L	X23	ML	ML	L	MH	MH	ML	X6
VL	VL	VL	L	L	VL	X24	L	L	VL	L	VL	ML	X7
L	L	VL	L	VL	VL	X25	L	ML	ML	L	ML	ML	X8
VL	VL	VL	L	VL	VL	X26	MH	MH	ML	M	H	MH	X9
ML	ML	L	M	ML	ML	X27	ML	L	ML	M	ML	M	X10
M	M	MH	ML	L	M	X28	ML	L	ML	ML	ML	ML	X11
L	L	ML	L	L	L	X29	VL	VL	VL	ML	VL	VL	X12
ML	L	L	ML	L	L	X30	L	VL	L	VL	VL	VL	X13
MH	M	M	MH	M	M	X31	L	VL	L	VL	L	L	X14
ML	MH	MH	MH	ML	ML	X32	ML	L	L	ML	ML	L	X15
M	MH	MH	MH	H	M	X33	M	M	MH	MH	M	M	X16
VH	VH	VH	H	VH	VH	X34	L	L	L	L	ML	ML	X17

جدول ۶. مراحل وزن‌دهی، ادغام و محاسبه احتمال رویداد پایه X1

کارشناس	نظر کلامی	a1	a2	a3	a4
۱	M	0.4	0.5	0.5	0.6
۲	M	0.4	0.5	0.5	0.6
۳	M	0.4	0.5	0.5	0.6
۴	ML	0.2	0.3	0.4	0.5
۵	L	0.1	0.2	0.2	0.3
۶	M	0.4	0.5	0.5	0.6
	درجه شباهت			**موافقت میانگین**	
S12	1	S26	1	AA1	0.91
S13	1	S34	0.85	AA2	0.91
S14	0.85	S35	0.7	AA3	0.91
S15	0.7	S36	1	AA4	0.85
S16	1	S45	0.85	AA5	0.73
S23	1	S56	0.85	AA6	0.91
S24	0.85	S56	0.7	**عدد فازی ادغام‌شده**	
S25	0.7			a1	0.326005
موافقت نسبی		**فاکتور وزن ادغام‌شده**		a2	0.426005
RA1	0.17433	CE1	0.1892056	a3	0.44333
RA2	0.17433	CE2	0.1790015	a4	0.54333
RA3	0.17433	CE3	0.1790015	**نتایج نهایی**	
RA4	0.162835	CE4	0.1732544	CFP	0.43466
RA5	0.139847	CE5	0.1311479	k	2.51168
RA6	0.17433	CE6	0.1483892	FP	3.078E-03

جدول ۷. احتمالات به‌روزشده برای هریک از رویدادهای پایه

رویدادها	عدد فازی ذوزنقه‌ای ادغام‌شده	امکان‌پذیری	احتمال پیشین	احتمال پسین
X1	0.3260, 0.4260, 0.4433, 0.5433	0.4346	3.078E-03	5.055E-01
X2	0.1018, 0.1691, 0.2364, 0.3364	0.2124	2.747E-04	4.512E-02
X3	0.1332, 0.2165, 0.2832, 0.3832	0.2548	5.126E-04	8.419E-02
X4	0.2556, 0.3556, 0.4072, 0.5072	0.3814	1.980E-03	3.252E-01
X5	0.0987, 0.1660, 0.2303, 0.3303	0.2079	2.547E-04	4.183E-02
X6	0.2844, 0.3844, 0.4675, 0.5675	0.4259	2.873E-03	2.952E-03
X7	0.0829, 0.1481, 0.2007, 0.3007	0.1849	1.687E-04	2.478E-04
X8	0.1687, 0.2687, 0.3375, 0.4375	0.3031	9.186E-04	9.186E-04
X9	0.4674, 0.5674, 0.6329, 0.7329	0.6001	9.782E-03	9.782E-03
X10	0.2576, 0.3576, 0.4082, 0.5082	0.3829	2.006E-03	2.006E-03
X11	0.1864, 0.2864, 0.3728, 0.4728	0.3296	1.215E-03	1.215E-03
X12	0.0316, 0.0475, 0.1475, 0.2475	0.1211	3.509E-05	3.509E-05
X13	0.0313, 0.0627, 0.1313, 0.2313	0.1170	3.068E-05	3.068E-05
X14	0.0686, 0.1372, 0.1686, 0.2686	0.1626	1.064E-04	1.064E-04
X15	0.1494, 0.2494, 0.2989, 0.3989	0.2742	6.564E-04	6.565E-04

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

X16	0.4343, 0.5343, 0.5686, 0.6686	0.5514	7.114E-03	7.115E-03
X17	0.1353, 0.2353, 0.2706, 0.3706	0.2529	4.999E-04	5.000E-04
X18	0.1535, 0.2535, 0.3071, 0.4071	0.2803	7.070E-04	7.079E-04
X19	0.1820, 0.2820, 0.3143, 0.4143	0.2981	8.694E-04	8.699E-04
X20	0.0137, 0.0274, 0.1137, 0.2137	0.0950	1.326E-05	5.571E-04
X21	0.0313, 0.0627, 0.1313, 0.2313	0.1170	3.068E-05	1.289E-03
X22	0.1687, 0.2687, 0.3375, 0.4375	0.3031	9.186E-04	9.191E-04
X23	0.1820, 0.2820, 0.3143, 0.4143	0.2981	8.694E-04	8.699E-04
X24	0.0344, 0.0688, 0.1344, 0.2344	0.1208	3.475E-05	1.460E-03
X25	0.0464, 0.0928, 0.1464, 0.2464	0.1356	5.416E-05	2.275E-03
X26	0.0167, 0.0335, 0.1167, 0.2167	0.0988	1.560E-05	1.943E-05
X27	0.2167, 0.3167, 0.3832, 0.4832	0.3500	1.484E-03	1.485E-03
X28	0.3329, 0.4329, 0.4674, 0.5674	0.4502	3.471E-03	3.473E-03
X29	0.1166, 0.2166, 0.2332, 0.3332	0.2249	3.347E-04	3.349E-04
X30	0.1312, 0.2312, 0.2624, 0.3624	0.2468	4.600E-04	1.932E-02
X31	0.4312, 0.5312, 0.5624, 0.6624	0.5468	6.899E-03	2.898E-01
X32	0.3484, 0.4484, 0.5484, 0.6484	0.4984	4.946E-03	2.078E-01
X33	0.5009, 0.6009, 0.6515, 0.7515	0.6262	1.155E-02	4.852E-01
X34	0.7832, 0.8832, 0.9664, 0.9832	0.9011	7.916E-02	1.000E+00

نتایج

در این مطالعه سناریوی آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن واقع در واحد تولید هیدروژن یکی از صنایع تصفیه روغن‌نباتی در ایران با روش پیشنهادی بررسی شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی، احتمال بروز آتش‌سوزی و انفجار در مخزن نگهدارنده گاز، $۱/۱۴۷\times۱۰^{-۵}$ تعیین شد. به‌علاوه، با به‌روزرسانی احتمالات توسط شبکه بیزین، میزان احتمال بروز تمامی رویدادهای میانی نیز تعیین شد که نتایج آن در جدول ۸ قابل‌مشاهده است.

به‌منظور کاهش میزان ریسک آتش‌سوزی و انفجار، نیاز است منابع سازمان صرف نقاط بحرانی شود. به‌همین‌منظور، در این مطالعه از شاخص اهمیت فاسل- وسلی Fussell-Vesely Importance (FVI) به‌منظور رتبه‌بندی تأثیر رویدادهای پایه استفاده شد. با این رتبه‌بندی می‌توان منابع سازمان را در کاهش احتمال بروز رویدادهایی متمرکز کرد که اثر بیشتری در بروز حادثه اصلی دارند. درهمین‌راستا، از رابطه ۱۳ برای محاسبه مقادیر FVI استفاده شد و نتایج رتبه‌بندی رویدادهای پایه در جدول ۹ قابل‌مشاهده است. در این رابطه P_T احتمال بروز رویداد اصلی است.

$$FVI\ (x_i) = \frac{P_T(TE = occur) - P_T(TE = occur|x_i = 0)}{P_T(TE = occur)} \quad (13)$$

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی شاخص FVI، وجود اکسیژن کافی در محیط به‌عنوان شرط لازم برای ایجاد حادثه شناخته شد؛ چراکه مقدار شاخص آن یک تعیین گردید. پس از آن، موارد وجود جرقّه الکتریکال، تأخیر در انجام بازرسی و وجود شعله به ترتیب دارای بیشترین اهمیت در بروز حادثه مذکور هستند. به‌علاوه طبق رتبه‌بندی، رویدادهای مربوط به خوردگی و استرس‌های خارجی مرتبط با شرایط محیطی در بروز این حادثه نقشی ندارند.

جدول ۸. احتمالات به‌روزشده برای هریک از رویدادهای میانی و رویداد اصلی

رویدادها	توصیف	احتمال پیشین	احتمال پسین
TE	آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز	1.147E-05	1.00E+00
IE1	منبع احتراق	6.089E-03	1.00E+00
IE2	مخلوط قابل‌اشتعال گاز هیدروژن و هوا	7.962E-04	1.00E+00
IE3	رهایش هیدروژن	2.380E-02	1.00E+00
IE4	خوردگی	2.190E-11	9.201E-10
IE5	نقص واشر گاز	2.433E-08	1.022E-06
IE6	آسیب به درام شناور	1.329E-04	5.585E-03
IE7	رفتار ناایمن	2.367E-02	9.945E-01
IE8	جرقّه براثر تخلیه الکتریسیته ساکن	2.552E-04	4.191E-02
IE9	جرقّه در زمان تعمیرات	4.847E-07	7.960E-05
IE10	کج شدن درام شناور	8.432E-03	8.433E-03
IE11	استرس خارجی	1.722E-04	1.722E-04
IE12	نقص در سیستم تعادل	8.262E-03	8.263E-03
IE13	عدم برقراری فرایند توزین	7.610E-03	7.611E-03

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

IE14	نقص در سیستم اتوماتیک	2.885E-06	6.695E-06
IE15	کاهش سطح آب	1.576E-03	1.577E-03
IE16	تخلیه آب درون مخزن	1.831E-03	3.631E-03
IE17	ضربه مکانیکی	1.328E-04	5.581E-03
IE18	افزایش بیش‌ازحد فشار	9.338E-08	3.923E-06
IE19	محبوس بودن گاز	5.986E-03	5.990E-03
IE20	خطای تعمیرات	2.322E-02	9.757E-01

جدول ۹. نتایج رتبه‌بندی اهمیت رویدادهای پایه براساس شاخص FVI

رتبه	رویداد	FVI	رتبه	رویداد	FVI
1	X34	1	18	X28	2.212E-06
2	X1	5.040E-01	19	X27	9.268E-07
3	X33	4.792E-01	20	X18	8.670E-07
4	X4	3.238E-01	21	X16	8.073E-07
5	X31	2.849E-01	22	X19	5.382E-07
6	X32	2.038E-01	23	X22	4.784E-07
7	X3	8.372E-02	24	X23	4.784E-07
8	X2	4.485E-02	25	X29	2.093E-07
9	X5	4.159E-02	26	X15	5.980E-08
10	X30	1.887E-02	27	X17	5.980E-08
11	X25	2.221E-03	28	X8	0
12	X24	1.425E-03	29	X9	0
13	X21	1.258E-03	30	X10	0
14	X20	5.438E-04	31	X11	0
15	X6	7.911E-05	32	X12	0
16	X7	7.911E-05	33	X13	0
17	X26	3.827E-06	34	X14	0

بحث

در این مطالعه به بررسی خطر آتش‌سوزی و انفجار یک نوع خاص از مخازن هیدروژن تحت‌عنوان مخزن نگهدارنده گاز پرداخته شد. تمامی خطرات و سناریوهای احتمالی توسط روش HAZID شناسایی و توسط روش پیشنهادی در استاندارد MIL-STD-88 به‌صورت کیفی ارزیابی ریسک شدند. درنتیجه این فرایند، سناریوی آتش‌سوزی و انفجار بیشترین میزان ریسک را به خود اختصاص داد و به‌عنوان رویداد اصلی در ارزیابی‌ها انتخاب شد. این سناریو در پنل تخصّصی و در حضور مختصّصان بررسی گردید و تمامی رویدادهای پایه و میانی که به این حادثه منجر می‌شوند، شناسایی شدند و سپس ساختار درخت خطا ترسیم شد. در قدم بعد، برای تعیین احتمال بروز هریک از رویدادهای پایه، به داده‌های صحیح نیاز بود. تعیین میزان احتمال صحیح برای رویدادهای پایه یکی از مراحل مهم در چنین مطالعاتی است. عموماً محقّقان و پژوهشگران در زمینه‌های مختلف از جامعه دانشگاهی بوده و به تمامی جوانب سیستم‌های صنعتی آشنایی ندارند. ازطرفی، متخصّصان و مدیرانِ حاضر در صنایع نیز با روش‌های نوین شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک آشنا نیستند. بنابراین ایجاد یک رویکرد جهت استخراج نظر متخصّصان صنعتی و استفاده از این اطلاعات در روش‌های نوین ارزیابی ریسک می‌تواند تأثیر زیادی در افزایش دقّت و صحّت کار پژوهشگران داشته باشد [۲۶]. درهمین‌راستا، نظر متخصّصان در قالب اصطلاحات کلامی دریافت شد و سپس به مقادیر معادل فازی تبدیل گردید. با توجه به اینکه متخصّصان از سطوح مختلف سازمانی و دارای دانش و تجربه متفاوتی هستند، از یک رویکرد جهت وزن‌دهی به نظرات آن‌ها استفاده شد. درنهایت، نظرات جمع‌آوری‌شده با توجه به فاکتورهای وزن‌دهی ادغام شدند و مقادیر احتمال بروز هریک از رویدادها به‌دست آمد. در ادامه به‌منظور بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر، به ایجاد رابطه بین اجزا نیاز است. بدین‌منظور، ساختار درخت خطا به شبکه بیزین منتقل شد. در ابتدا با یک رویکرد روبه‌جلو با به‌روزرسانی شبکه، میزان احتمال بروز رویداد اصلی، یعنی همان آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز، مقدار $۱/۱۴۷\times۱۰^{-۵}$ به دست آمد. سپس با یک رویکرد عقب‌گرد، با در نظر گرفتن بروز حادثه، میزان احتمال به‌روزشده برای هریک از رویدادها تعیین شد. در پایان، با محاسبه شاخص FVI میزان اهمیت هریک از رویدادهای پایه در بروز رویداد اصلی محاسبه گردید. این امر سازمان را درجهت استفاده بهینه‌تر از منابع برای کاهش میزان ریسک هدایت می‌کند؛ همان‌طور که شان Shan و همکاران (۲۰۱۷) از ترکیب روش آنالیز پاپیونی و شبکه بیزین استفاده کردند و موارد نادیده گرفتن علائم، اضافه بار و خطا در طراحی را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل در بروز حادثه نشت خط لوله گاز تعیین کردند [۲۷].

مدل پیشنهادی با به کارگیری منطق فازی توانست عدم

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

قطعیت‌ها را تاحدّ زیادی کاهش دهد؛ این امر قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های رایج ارزیابی ریسک افزایش داد. همچنین با استفاده از رویکرد ادغام نظرات، شکاف میان دانش متخصّصان و تجربه صنعتی پر شده است و مقادیر احتمال شکست با دقت و صحت بالایی تعیین شدند. از دیگر مزیّت‌های مدل پیشنهادی، ایجاد ساختاری پویا برمبنای شبکه بیزین است که امکان ارزیابی ریسک برای شرایط متفاوت فرایندی را امکان‌پذیر می‌کند. علاوه‌براین، ساختار بیزین با به‌روزرسانی احتمالات و به کارگیری شاخص FVI، مهم‌ترین علل بروز حادثه را شناسایی کرد که این امر سازمان را درجهت استراتژی‌های کاهش ریسک هدایت می‌کند. ازطرف‌دیگر، با توجه به سیاست‌های حفظ اطلاعات سازمان، جمع‌آوری اطلاعات فرایندی با مشکلاتی مواجه بود که این امر از محدودیت‌های موجود در مطالعه حاضر است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت ارزیابی ریسک در کاهش بروز حوادث، در این مطالعه میزان احتمال بروز آتش‌سوزی و انفجار در مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن محاسبه شد. محدودیت‌های رایج در روش‌های ارزیابی ریسک نظیر عدم قطعیت و عدم وجود روابط پویا، با به کارگیری منطق فازی و شبکه بیزین تاحدّامکان برطرف شد. احتمال بروز حادثه آتش‌سوزی و انفجار در مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن در شرایط موردمطالعه، $۱/۱۴۷\times۱۰^{-۵}$ محاسبه گردید. ازطرفی، با بررسی میزان تأثیر هریک از رویدادهای پایه در بروز آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز، نقاط ضعف سیستم مشخص شد؛ این امر به سازمان در کنترل بهتر خطرات و استفاده بهینه‌تر از منابع کمک می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش یاری رسانده اند، تشکر می کنند.

تضاد منافع

هیچگونه تضاد منافعی بین نویسندگان وجود ندارد

ملاحظات اخلاقی

مقاله حاضر نتیجه طرح تحقیقاتی و پایان نامه دانشگاه علوم پزشکی همدان است. هم چنین این مطالعه دارای کد اخلاق IR.UMSHA.REC.1403.211 می باشد

سهم نویسندگان

نویسندگان سهم یکسانی در نگارش مقاله داشته اند.

حمایت مالی

در انجام این پژوهش از حمایت مالی خاصی استفاده نشده است.

REFERENCES

1. Gye H-R, Seo S-K, Bach Q-V, Ha D, Lee C-J. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International journal of hydrogen energy*. 2019;44(2):1288-98. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035
2. Kasai N, Fujimoto Y, Yamashita I, Nagaoka H. The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(30):13308-14. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.231
3. labidine Messaoudani Z, Rigas F, Hamid MDB, Hassan CRC. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: A critical review. *International Journal of hydrogen energy*. 2016;41(39):17511-25. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.171
4. Crowl DA, Jo Y-D. The hazards and risks of hydrogen. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007;20(2):158-64. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.02.002
5. Fan N, Zhenmin L, Cheng F, Yang X, Ruikang L, Bin S, Tao W. Research progress and development trends of hydrogen explosion suppression materials and mechanisms. *Process Safety and Environmental* Protection. 2024. Link
6. Studer E, Jamois D, Jallais S, Leroy G, Hebrard J, Blanchetiere V. Properties of large-scale methane/hydrogen jet fires. *International journal of hydrogen energy*. 2009;34(23):9611-9. Link
7. 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.DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.082
8. Andersson J, Grönkvist S. Large-scale storage of hydrogen. International *journal of hydrogen energy*. 2019;44(23):11901-19. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063
9. Aliabadi MM, Pourhasan A, Mohammadfam I. Risk modelling of a hydrogen gasholder using Fuzzy Bayesian Network (FBN). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(1):1177-86. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.198
10. Bilal Z, Mohammed K, Brahim H. Bayesian network and bow tie to analyze the risk of fire and explosion of pipelines. *Process safety progress*. 2017;36(2):202-12. DOI: 10.1002/prs.11860
11. Eskandari T, Mirzaei M, Mohammadfam I. Fire and explosion risk analysis using bow-tie method and fuzzy-Bayesian network in process industries. *CABI Databases* 2020.Link
12. 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). PMID: 37593646 DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18842
13. Li M, Wang D, Shan H. Risk assessment of mine ignition sources using fuzzy Bayesian network. Process Safety and Environmental Protection. 2019;125:297-306. DOI: 10.1016/j.psep.2019.03.029
14. Mirzaei Aliabadi M, Mohammadfam I, Salimi K. Identification and evaluation of maintenance error in catalyst replacement using the HEART technique under a fuzzy environment. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2022;28(2):1291-303. PMID: 33648429 DOI: 10.1080/10803548.2021.1890423
15. Xu J, Yang M, Li S. Hardware reliability analysis of a coal mine gas monitoring system based on fuzzy-FTA. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10616. DOI: 10.3390/app112210616
16. Mohammadfam I, Mirzaei Aliabadi M, Soltanian AR, Mahdinia M. Modeling the causes-effect relationships among major accident predictors based on a fuzzy multi-criteria decision-making method. *Work*. 2020;67:313-21. PMID: 33044212 DOI: 10.3233/WOR-203281
17. Wu X, Huang H, Xie J, Lu M, Wang S, Li W, et al. A novel dynamic risk assessment method for the petrochemical industry using bow-tie analysis and Bayesian network

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]

analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023;237:109397. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109397
18. Borgheipour H, Tehrani G, Eskandari T, Mohammadieh O, Mohammadfam I. Dynamic risk analysis of hydrogen gas leakage using Bow-tie technique and Bayesian network. International *Journal of Environmental Science and Technology*. 2021:1-12. Link
19. Mahdinia M, Mohammadfam I, Soltanzadeh A, Aliabadi MM, Aghaei H. A fuzzy Bayesian network DEMATEL model for predicting safety behavior. International *journal of occupational safety and ergonomics*. 2023;29(1):36-43. PMID: 34898390 DOI: 10.1080/10803548.2021.2015741
20. Aliabadi MM, Gholamizadeh K. Locating urban CNG stations using quantitative risk assessment: using the Bayesian network. *Safety and Reliability*. 2021;40(1):48-64.DOI: 10.1080/09617353.2020.1858242
21. 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. PMID: 36888639 DOI: 10.1371/journal.pone.0282657
22. 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. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.01.010
23. Lavasani SM, Ramzali N, Sabzalipour F, Akyuz E. Utilisation of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) for quantified risk analysis of leakage in abandoned oil and natural-gas wells. *Ocean Engineering*. 2015;108:729-37. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.008
24. Ancione G, Bragatto P, Milazzo MF. A Bayesian network-based approach for the assessment and management of ageing in major hazard establishments. *Journal of Loss Prevention in the process industries*. 2020;64:104080. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104080
25. Yu J, Ding H, Yu Y, Wu S, Zeng Q, Ma W. A novel risk analysis approach for FPSO single point mooring system using Bayesian Network and interval type-2 fuzzy sets. *Ocean Engineering*. 2022;266:113144. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113144
26. Laal F, Pouyakian M, Jafari MJ. The Reliability Assessment of Firefighting Systems Using Fuzzy Bayesian Network in the Floating Roof Tanks of a Petrochemical Company. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*. 2023;10(1):17-24. Doi: 10.32592/joohe.10.1.17
27. Shan X, Liu K, Sun P-L. Risk Analysis on Leakage Failure of Natural Gas Pipelines by Fuzzy Bayesian Network with a Bow-Tie Model. *Scientific programming*. 2017;2017(1):3639524. DOI: 10.1155/2017/3639524

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.3.181]