


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

Mostafa Mirzaei Aliabadi¹ , Omid Kalatpour¹, Mahnaz Mirzai², 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

Abstract

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

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



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

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.

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

مصطفی میرزایی علی‌آبادی^۱ ID، امید کلات‌پور^۱، مهناز میرزایی^۲، رضا محمودی^۳ ID*

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

چکیده

سابقه و هدف: از آنجایی که 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. از سوی دیگر، هیدروژن با وجود تمامی ویژگی‌های مثبت خود و افزایش روزافزون کاربرد آن در صنایع، خطرات قابل‌توجهی را ایجاد می‌کند. با توجه به کمبود مطالعات در زمینه 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 متخصصان صنعتی و روش‌های نوین ارزیابی ریسک ایجاد شد و بدین‌وسیله عدم قطعیت ناشی از کمبود دانش تاحدامکان برطرف گردید. سپس با انتقال درخت خطا به شبکه بیزین روابط منطقی بین اجزای سیستم برقرار شد و دستیابی به احتمالات به‌روز شده 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 $1/147 \times 10^{-5}$ محاسبه شد. موارد وجود اکسیژن کافی، وجود جرقه الکتریکی، 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

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: mahmoudir78@gmail.com

استناد: میرزایی علی‌آبادی، مصطفی؛ کلات‌پور، 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): ۱۹۵-۱۸۱

مقدمه

با وجود 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 ماهیتی بدون رنگ و بو، تشخیص نشت آن دشوار است [۴]. با توجه به ویژگی‌هایی از این قبیل در صورتی که هیدروژن ره‌ایش پیدا کند، در حضور سایر اضلاع حریق می‌تواند به‌راحتی به آتش‌سوزی و انفجار

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

محیطی پویا ایجاد کند و این چالش را مرتفع سازد [۱۷-۱۹]. در همین راستا، علی آبادی و همکارش (۲۰۲۰) از شبکه بی‌زین جهت کمی‌سازی 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 اولیه Basic Event را شناسایی و آن‌ها را تا زمان بروز رویداد اصلی Top Event دنبال می‌کند. در صورتی که عدم قطعیت موجود در این روش توسط ابزارهای ذکر شده برطرف شود، این روش می‌تواند انتخاب مناسبی جهت بررسی خطرات و حوادث احتمالی باشد؛ همان‌طور که رضانی‌فر و همکاران (۲۰۲۳) از آنالیز درخت خطا برای شناسایی و ارزیابی خطر آتش‌سوزی مخزن متانول استفاده کردند که احتمال بروز این حادثه^{۱-۲/۵۸×۱۰} در سال محاسبه شد [۲۱]. با توجه به آنچه گفته شد، هدف محقق در این مطالعه به کارگیری یک مدل ارزیابی ریسک برپایه آنالیز درخت خطا و شبکه بی‌زین به منظور 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 و Intermediate 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 غیرمدرور است که هر نود Node یا گره نشان‌دهنده یک متغیر و کمان‌ها روابط مستقیم بین نودهای به‌هم‌متصل شده 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 متغیرهای $U = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ را طبق رابطه ۱ نشان می‌دهد.

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 از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ذخیره‌سازی در ظروف تحت فشار اشاره کرد. در واحد تولید هیدروژن 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 نشست گاز همراه است [۹]. با توجه به اینکه مطالعات چندانی در زمینه ارزیابی ریسک مخزن نگهدارنده هیدروژن صورت نگرفته است، هدف محقق 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 قوت سیستم را تعیین کرد. در نتیجه، منابع سازمان بر روی نقاط آسیب‌پذیر متمرکز می‌شوند و بیشترین اثربخشی در کاهش ریسک خطرات موجود حاصل می‌شود [۱۰-۱۲]. در همین راستا، 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 تا حد امکان برطرف سازد [۱۳، ۱۵]. مطالعات زیادی از منطق فازی جهت کاهش عدم قطعیت بهره گرفته‌اند؛ نظیر محمدفام و همکاران (۲۰۲۰) که با استفاده از ترکیب DEMATEL و فازی توانستند روابط علت‌ومعلولی و تأثیرات متقابل عوامل مؤثر بر وقوع حادثه را تعیین کنند [۱۶].

از طرفی، 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 متخصص قادر به ایجاد رابطه علت‌ومعلولی بین اجزای سیستم نیست. در این صورت، ابزار قدرتمند شبکه بی‌زین Bayesian Network می‌تواند با برقراری ارتباط میان اجزای مختلف سیستم،

به منظور محاسبه احتمال بروز رویداد اصلی در درخت خطا، داده‌های شکست در رویدادهای پایه مورد نیاز است. با توجه به کمبود دانش در این زمینه، طبق مراحل زیر می‌توان با کمک منطق فازی و نظر متخصصان تاحد امکان این محدودیت را برطرف کرد.

۳-۱ انتخاب و وزن‌دهی متخصصان

در شرایطی که اطلاعات کافی درباره احتمال شکست در رویدادهای پایه وجود ندارد، از نظر متخصصان استفاده می‌شود. محققان در این مطالعه برای دستیابی به دقت کافی در نتایج، از ۶ متخصص دعوت به همکاری کرده است. با توجه به اینکه متخصصان 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 متخصص استفاده شده است [۲۵]. معیار امتیازدهی به اهمیت متخصصان در جدول ۱ نشان داده شده است. فاکتور وزن‌دهی هر متخصص از تقسیم مجموع نمرات کسب‌شده توسط وی تقسیم‌بهر مجموع نمرات کسب‌شده توسط کلیه متخصصان شرکت‌کننده در مطالعه به دست آمد.

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

$P(U)$ نشان‌دهنده احتمال والد متغیر X_1 است. براین اساس، احتمال متغیر X_1 از طریق 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 اولیه به محض 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 متغیر موردنظر و E شواهد دریافتی است.

۳-۲ استخراج نظر متخصصان

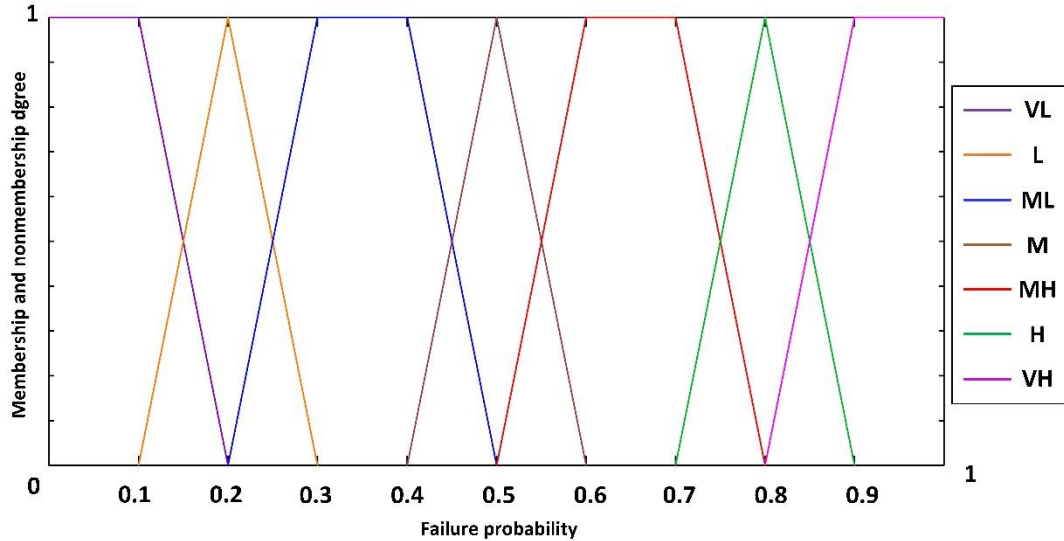
جدول ۱. معیار وزن‌دهی به نظر متخصصان

ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	عنوان شغلی	اُپراتور	۱
		تکنسین	۲
		مهندس	۳
		مدیر، بازرس کارخانه	۴
		رئیس، مهندس ارشد	۵
۲	تجربه (سال)	≤ 5	۱
		۶ تا ۹	۲
		۱۰ تا ۱۹	۳
		۲۰ تا ۲۹	۴
		≥ 30	۵
۳	تحصیلات	دبیرستان	۱
		دیپلم	۲
		کارشناسی	۳
		کارشناسی‌ارشد	۴
		دکتر	۵

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 کمی اعداد فازی دوزنقه‌ای که در کمی‌سازی نظر متخصصان استفاده شد، در جدول ۲ قابل مشاهده است.

۳-۲ کمی‌سازی نظر متخصصان

برای کمی‌سازی نظر متخصصان درخصوص احتمال بروز رویدادهای پایه، از اصطلاحات زبانی و توابع دوزنقه‌ای استفاده شد. هفت اصطلاح زبانی شامل خیلی کم، کم، نسبتاً کم، متوسط، نسبتاً



شکل ۱. نمایش گرافیکی اعداد فازی دوزنقه‌ای

جدول ۲. اعداد فازی دوزنقه‌ای 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)

۲-۲-۳ ادغام نظرات فازی شده

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

گام اول - در صورتی که نظرات دو متخصص E_i و E_j در قالب دو عدد دوزنقه‌ای 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، از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

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

گام دوم - درجه موافقت میانگین برای هر یک از متخصصان به کمک رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

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

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

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

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

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

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

$$C(E_i) = \beta \cdot W(E_i) + (1 - \beta) \cdot RA(E_i) \quad (8)$$

در این رابطه فاکتور $\beta \in [0, 1]$ میزان اهمیت فاکتور وزن‌دهی

قابل مشاهده 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 شناسایی شده، از استاندارد نظامی آمریکا -MIL STD-88 استفاده شد. براین اساس، رهایش هیدروژن و به دنبال آن آتش‌سوزی و انفجار، بالاترین میزان ریسک را به خود اختصاص داد. در نتیجه، سناریوی آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز به عنوان رویداد اصلی در به کارگیری روش پیشنهادی انتخاب شد. در گام بعد درخت خطا براساس سناریوی انتخاب شده در پنل‌های تخصصی و با حضور متخصصان ایمنی و افراد عملیاتی ترسیم شد. نمایش گرافیکی درخت خطا در شکل ۳ و جزئیات آن در جدول ۳ قابل مشاهده 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 قابل مشاهده است. پس از تعیین رویدادهای پایه، به‌منظور جمع‌آوری مقادیر احتمال بروز هر یک از رویدادهای پایه، شش متخصص از سطوح مختلف سازمانی انتخاب شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ قابل مشاهده است. در گام بعدی، نظر هر یک از متخصصان به‌صورت اصطلاحات کلومی و در قالب پرسش‌نامه در رابطه با احتمال بروز هر یک از رویدادهای پایه مطابق جدول ۵ جمع‌آوری شد. سپس با توجه به آنچه در بخش روش کار ارائه شد، نظرات متخصصان برای هر یک از رویدادهای پایه وزن‌دهی و ادغام گردید و در نهایت مقادیر امکان‌پذیری توسط رابطه مربوط به مقادیر احتمال تبدیل شدند. مراحل وزن‌دهی، ادغام و دیفازی کردن نظرات متخصصان برای رویداد پایه X1 در جدول ۶ به‌عنوان مثال آورده شده است. فرایندی مشابه برای تمامی رویدادهای پایه صورت گرفت و احتمال پیشین و پسین بروز هر یک از رویدادهای پایه محاسبه شد که در جدول ۷ قابل مشاهده است.

را در برابر درجه موافقت نسبی بیان می‌کند.

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

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

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

۴- دیفازی کردن احتمالات ادغام‌شده

به‌منظور استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از متخصصان، بایستی نظرات ادغام‌شده آن‌ها دیفازی و به‌صورت عدد واضح امکان‌پذیری تعیین شود. در صورتی که عدد فازی ذوزنقه‌ای به‌صورت $A_i = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ در نظر گرفته شود، فرایند دیفازی کردن طبق رابطه ۱۰ قابل انجام 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

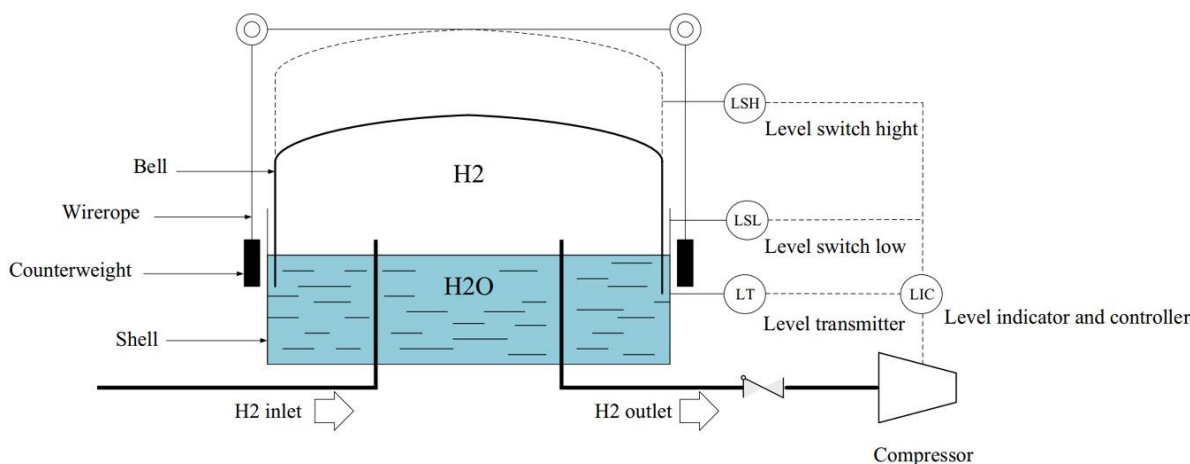
عدد حاصل از مرحله دیفازی کردن هنوز به‌صورت امکانی است. از آنجایی که درخت خطا احتمال می‌پذیرد، باید عدد به‌دست‌آمده از حالت امکانی به احتمالی تبدیل شود. این فرایند توسط روابط ۱۱ و ۱۲ قابل انجام است.

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

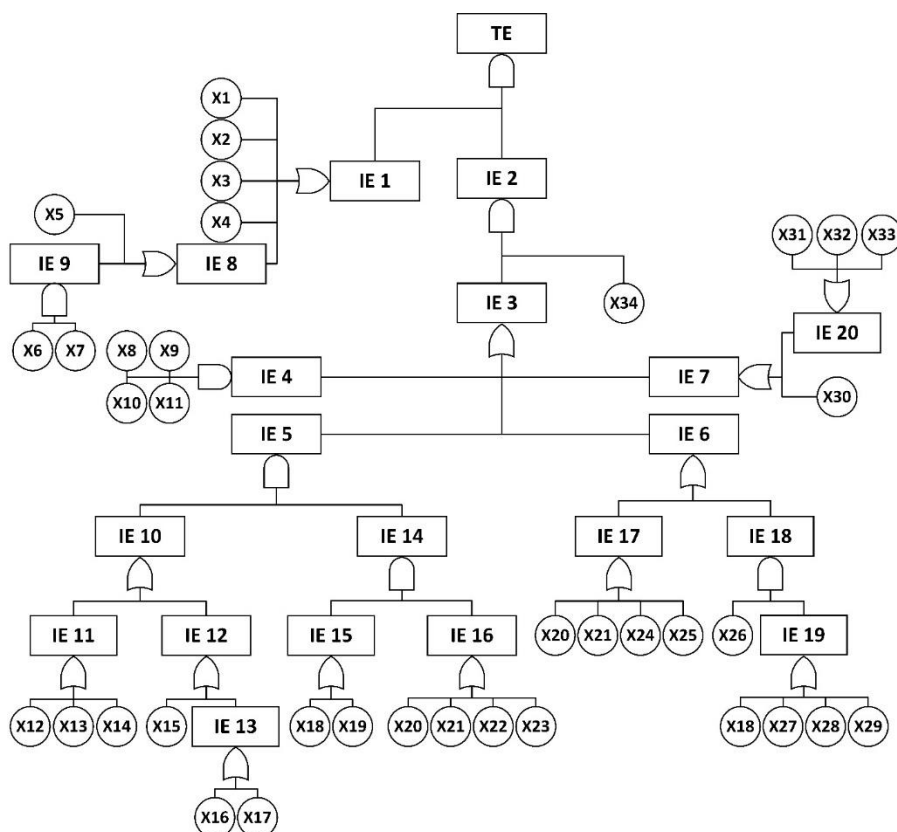
$$K = \left(\frac{1 - CFP}{CFP} \right)^{1/3} \times 2.301 \quad (12)$$

مطالعه موردی: آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن

به‌منظور نشان دادن کاربرد روش پیشنهادی، واحد تولید هیدروژن یکی از صنایع تصفیه روغن‌نباتی در ایران به‌عنوان مورد مطالعه انتخاب شد. در این واحد یک مخزن نگهدارنده گاز قرار دارد که نقشه P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) آن در شکل ۲



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

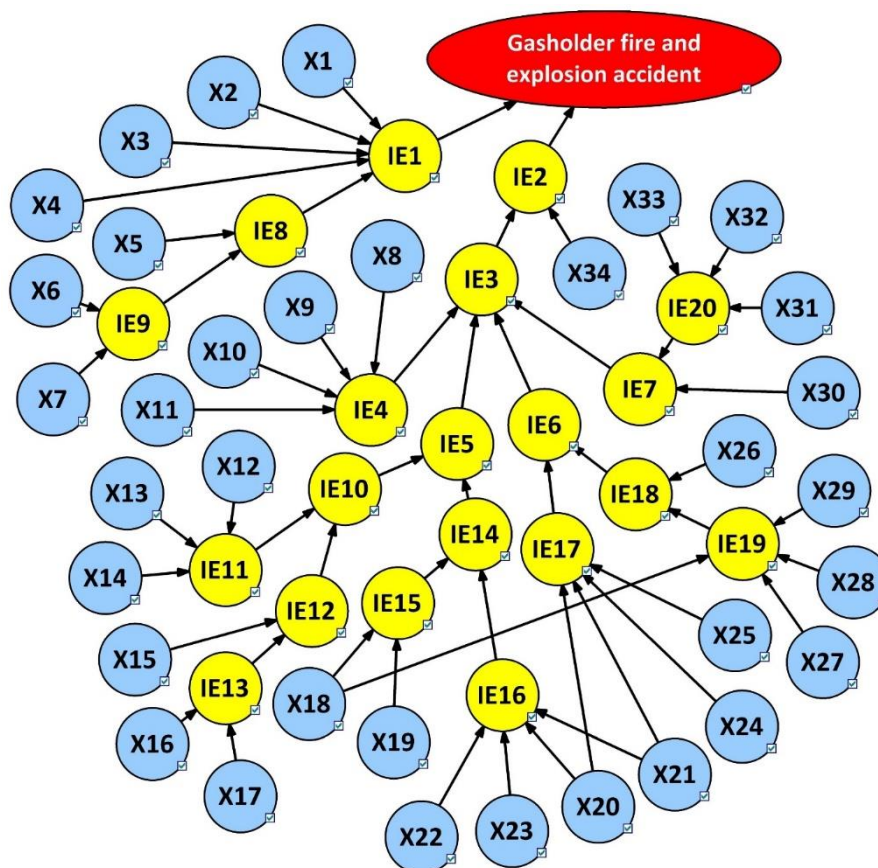


شکل ۳. ساختار درخت خطا برای حادثه آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز

جدول ۳. توصیف اجزای درخت خطا

رویدادها	توصیف رویداد	رویدادها	توصیف رویداد
TE	آتش‌سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز	X8	عدم وجود مواد ضد‌خوردگی
IE 1	منع احتراق	X9	نقص در پوشش ضدزنگ
IE 2	مخلوط قابل‌اشتعال گاز هیدروژن و هوا	X10	بالا رفتن pH
IE 3	رهايش 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 نایمن	X15	گیر کردن سیم بکسل وزنه‌های تعادل
IE 8	جرقه بر اثر تخلیه الکتریسیته ساکن	X16	فرسایش سیم بکسل
IE 9	جرقه در زمان تعمیرات	X17	اتصالات ضعیف
IE 10	کج شدن درام شناور	X18	نقص در سیستم LIC
IE 11	استرس خارجی	X19	نقص در سنسور حد پایین
IE 12	نقص در سیستم تعادل	X20	خراب کاری 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 وسایل نقلیه
IE 18	افزایش بیش از حد فشار	X26	نقص در سیستم تخلیه فشار
IE 19	محبوس بودن گاز	X27	نقص در سیستم حد بالای مخزن نگهدارنده گاز
IE 20	خطای تعمیرات	X28	نقص در سیستم کمپرسور
X1	جرقه الکتریکال	X29	نقص در check valve پایین‌دست

X2	رعدوبرق	X30	خطای عملیاتی
X3	جرقه بر اثر برخورد	X31	بازرسی کمتر از حد کفایت
X4	وجود شعله	X32	عدم انجام بازرسی
X5	بار الکتریکی ایجادشده بر اثر 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 آتش سوزی و انفجار مخزن نگهدارنده گاز

جدول ۴. مشخصات متخصصان منتخب

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

جدول ۵. نظرات جمع آوری شده از متخصصان در قالب اصطلاحات کلامی

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

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 وزن دهی، 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 ادغام شده	
S25	0.7			a1	0.326005
				a2	0.426005
موافقت نسبی		فاکتور وزن ادغام شده		a3	0.44333
RA1	0.17433	CE1	0.1892056	a4	0.54333
RA2	0.17433	CE2	0.1790015	نتایج نهایی	
RA3	0.17433	CE3	0.1790015	CFP	0.43466
RA4	0.162835	CE4	0.1732544	k	2.51168
RA5	0.139847	CE5	0.1311479	FP	3.078E-03
RA6	0.17433	CE6	0.1483892		

جدول ۷. احتمالات به روز شده برای هریک از رویدادهای پایه

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

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

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، $1/147 \times 10^{-5}$ 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. در همین‌راستا، 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 جرّقه 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	رهايش 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	جرّقه برائتر تخلیه الکتریسیته ساکن	2.552E-04	4.191E-02
IE9	جرّقه 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

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

جدول ۹. نتایج رتبه‌بندی اهمیت رویدادهای پایه براساس شاخص FVI

رتبه	FVI	رویداد	رتبه	FVI	رویداد
1	1	X34	18	X28	2.212E-06
2	5.040E-01	X1	19	X27	9.268E-07
3	4.792E-01	X33	20	X18	8.670E-07
4	3.238E-01	X4	21	X16	8.073E-07
5	2.849E-01	X31	22	X19	5.382E-07
6	2.038E-01	X32	23	X22	4.784E-07
7	8.372E-02	X3	24	X23	4.784E-07
8	4.485E-02	X2	25	X29	2.093E-07
9	4.159E-02	X5	26	X15	5.980E-08
10	1.887E-02	X30	27	X17	5.980E-08
11	2.221E-03	X25	28	X8	0
12	1.425E-03	X24	29	X9	0
13	1.258E-03	X21	30	X10	0
14	5.438E-04	X20	31	X11	0
15	7.911E-05	X6	32	X12	0
16	7.911E-05	X7	33	X13	0
17	3.827E-06	X26	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. در نتیجه 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 پلن تخصصی و در حضور متخصصان 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 محققان و پژوهشگران در زمینه‌های مختلف از جامعه دانشگاهی بوده و به تمامی جوانب سیستم‌های صنعتی آشنایی ندارند. از طرفی، متخصصان و مدیران حاضر در صنایع نیز با روش‌های نوین شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک آشنا نیستند. بنابراین ایجاد یک رویکرد جهت استخراج نظر متخصصان صنعتی و استفاده از این اطلاعات در روش‌های نوین ارزیابی ریسک می‌تواند تأثیر زیادی در افزایش دقت و صحت کار پژوهشگران داشته باشد [۲۶]. در همین راستا، نظر متخصصان در

قالب اصطلاحات کلامی دریافت شد و سپس به مقادیر معادل فازی تبدیل گردید. با توجه به اینکه متخصصان از سطوح مختلف سازمانی و دارای دانش و تجربه متفاوتی هستند، از یک رویکرد جهت وزن‌دهی به نظرات آن‌ها استفاده شد. در نهایت، 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 $10^{-5} \times 1/147$ به دست آمد. سپس با یک رویکرد عقب‌گرد، با در نظر گرفتن بروز حادثه، میزان احتمال به‌روزرسانی 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 در جهت 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

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 رسانده‌اند، تشکر می‌کنند.

تضاد منافع

هیچگونه تضاد منافی 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 می‌باشد

سهم نویسندگان

نویسندگان سهم یکسانی در نگارش مقاله داشته‌اند.

حمایت مالی

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

REFERENCES

- 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](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.035)
- 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](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.231)
- 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](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.171)
- 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](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.02.002)
- 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
- 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
- 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](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.082)
- 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](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063)
- Aliabadi MM, Pourhasan A, Mohammadfam I. Risk modelling of a hydrogen gasholder using Fuzzy Bayesian

قطعیته‌ها را تا حد 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 متخصصان و تجربه صنعتی پر شده است و مقادیر احتمال شکست با دقت و صحت بالایی تعیین شدند. از دیگر مزیت‌های مدل پیشنهادی، ایجاد ساختاری پویا بر مبنای شبکه بیزین است که امکان ارزیابی ریسک برای شرایط متفاوت فرایندی را امکان‌پذیر می‌کند. علاوه بر این، ساختار بیزین با به‌روزرسانی احتمالات و به کارگیری شاخص FVI، مهم‌ترین علل بروز حادثه را شناسایی کرد که این امر سازمان را در جهت استراتژی‌های کاهش ریسک هدایت می‌کند. از طرف دیگر، 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 تا حد امکان برطرف شد. احتمال بروز حادثه آتش‌سوزی و انفجار در مخزن نگهدارنده گاز هیدروژن در شرایط مورد مطالعه، $1/147 \times 10^{-5}$ محاسبه گردید. از طرفی، با بررسی میزان

Network (FBN). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(1):1177-86. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2019.10.198](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.198)

- 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](https://doi.org/10.1002/prs.11860)
- 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
- 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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37593646/) DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e18842](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18842)
- 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](https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.029)
- 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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33648429/) DOI: [10.1080/10803548.2021.1890423](https://doi.org/10.1080/10803548.2021.1890423)
- 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](https://doi.org/10.3390/app112210616)
- 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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33044212/) DOI: [10.3233/WOR-203281](https://doi.org/10.3233/WOR-203281)
- 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

- analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023;237:109397. DOI: [10.1016/j.ress.2023.109397](https://doi.org/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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34898390/) DOI: [10.1080/10803548.2021.2015741](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36888639/) DOI: [10.1371/journal.pone.0282657](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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/johe.10.1.17](https://doi.org/10.32592/johe.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](https://doi.org/10.1155/2017/3639524)