JOHE
Journal of Occupational Hygiene Engineering
J Occup Hyg Eng, 2023; 10(1): 17-24. Doi: 10.32592/joohe.10.1.17
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

Original Article

The Reliability Assessment of Firefighting Systems Using Fuzzy Bayesian Network in the Floating Roof Tanks of a Petrochemical Company

Fereydoon Laal[1], **Mostafa Pouyakian**[2*], **Mohammad Javad Jafari**[2]

[1] Social Determinants of Health Research Center, Department of Occupational Health Engineering, Birjand University of Medical Sciences, Birjand, Iran
[2] Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Article history:
Received: 20 June 2021
Revised: 12 january 2023
Accepted: 17 January 2023
ePublished: 23 January 2023

***Corresponding author:** Mostafa Pouyakian, Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
Email: pouyakian@sbmu.ac.ir

Abstract

Background and Objective: This study aimed to provide a risk assessment method based on a Fuzzy Bayesian Network (FBN) to prevent the failure of firefighting systems (FSs).

Materials and Methods: In this research, the fault tree structure was validated, and the failure factors were identified. Triangular fuzzy numbers and the combined CoA/Sum-Product method were used to calculate the failure rate. Subsequently, deductive and inductive reasoning, as well as sensitivity analysis were performed using fuzzy logic and fault tree transmission in a Bayesian Network (BN).

Results: The results of a case study on methanol storage tanks showed that the combination of FBN and validation of structures can be presented as a suitable method to evaluate the reliability of FSs. The content validity index of the final basic events was over 0.79. The highest and lowest failure rates were related to the foam system and valve, respectively. Moreover, the failure rate for the failure of FSs was 5.7×10^{-6} based on the fuzzy fault tree (FFT). After updating with BN, the previous rate of failure of FSs with FBN was calculated to be 0.022978, which was greater than the value of the FFT. The reliability of the system was equal to 0.77022.

Conclusion: The present approach can help the decision-making process of managers and analysts of the petrochemical industry to prevent the failure of FSs in tanks due to changes in systems.

Keywords: Bayesian network, Firefighting system, Fuzzy bayesian network, Petrochemical industry, Reliability, Uncertainty

Please cite this article as follows: 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. *J Occup Hyg Eng*. 2023; 10(1): 17-24. DOI: 10.32592/joohe.10.1.17

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]

Copyright © 2023 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

JOHE
مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
دوره ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، صفحات: ۲۴-۱۷
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

مقاله پژوهشی

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های اطفای حریق با استفاده از شبکه بیزین فازی در مخازن سقف شناور یک شرکت پتروشیمی

فریدون لعل[۱]، مصطفی پویاکیان[۲*]، محمد جواد جعفری[۲]

[۱] مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشگاه علوم پزشکی بیرجند، بیرجند، ایران
[۲] گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰
تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* **نویسنده مسئول:** مصطفی پویاکیان، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

ایمیل: pouyakian@sbmu.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: این مطالعه در نظر دارد یک روش ارزیابی ریسک مبتنی بر شبکه بیزین فازی را به‌منظور جلوگیری از شکست سیستم‌های اطفای حریق ارائه دهد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، ساختار درخت خطا، اعتبارسنجی و عوامل مختلف تأثیرگذار بر خطاها تجزیه‌وتحلیل شد. برای محاسبه نرخ شکست‌ها، از اعداد فازی مثلثی و روش ترکیبی CoA/Sum Product استفاده شد. سپس با استفاده از منطق فازی و انتقال درخت خطا در شبکه بیزین (Bayesian Network)، استدلال قیاسی، استقرایی و آنالیز حساسیت انجام شد.

یافته‌ها: نتایج مطالعه موردی در مخازن ذخیره متانول نشان داد تلفیق شبکه بیزین فازی و اعتبارسنجی ساختارها می‌تواند به‌عنوان روش مناسبی برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم‌های اطفای حریق ارائه شود. رویدادهای پایه نهایی شاخص روایی محتوای بیش از ۰/۷۹ داشت. بیشترین و کمترین نرخ شکست به ترتیب مربوط به شکست سیستم فوم و خرابی ولو بود. همچنین نرخ شکست مربوط به شکست سیستم‌های اطفای حریق بر اساس درخت خطای فازی $۵/۷\times۱۰^{-۶}$ بود. پس از به‌روزرسانی با BN، احتمال پیشین رخداد شکست سیستم‌های اطفای حریق با شبکه بیزین فازی برابر با ۰/۰۲۲۹۷۸محاسبه شد که بزرگ‌تر از مقدار محاسبه‌شده با درخت خطای فازی بود. قابلیت اطمینان سیستم نیز ۰/۷۷۰۲۲ بود.

نتیجه‌گیری: رویکرد حاضر به تصمیم‌گیری مدیران و تحلیلگران صنایع پتروشیمی برای جلوگیری از شکست سیستم‌های اطفای حریق در مخازن با توجه به تغییرات سیستم‌ها کمک می‌کند.

واژگان کلیدی: سیستم اطفای حریق، شبکه بیزین فازی، صنعت پتروشیمی، عدم قطعیت، قابلیت اطمینان

استناد: لعل، فریدون؛ پویاکیان، مصطفی؛ جعفری، محمدجواد. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های اطفای حریق با استفاده از شبکه بیزین فازی در مخازن سقف شناور یک شرکت پتروشیمی. مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، بهار ۱۴۰۲؛۱۰(۱): ۲۴-۱۷.

مقدمه

تأسیسات فرایندی پرمخاطره مانند شرکت‌های نفتی، پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی حجم زیادی از مواد شیمیایی خطرناک و قابل اشتعال را در مخازن ذخیره‌سازی می‌کنند. این مخازن از نظر اقتصادی و عملیاتی مهم هستند. با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای انرژی در سراسر جهان با توسعه اقتصادی، ذخیره‌سازی سوخت‌های مایع در مخازن چندگانه واقعیتی است که چالش‌های مربوط به آتش‌سوزی، انفجار و انتشار مواد سمی را به وجود آورده است که آتش‌سوزی شایع‌ترین و انفجار از نظر شدت پیامد، بسیار مهم است [۱-۳]. مخازن ذخیره‌سازی اغلب نمایانگر دارایی‌های مهم هستند و مواد مهم عملیاتی دارند. اگرچه آتش‌سوزی در مخازن ذخیره‌سازی به علت افزایش ایمنی و نگهداری بعید به نظر می‌رسد، شکست مخازن اثرات نامطلوب متعددی از قبیل به خطر انداختن کارکنان، تأثیرگذاری بر محیط‌زیست و وقفه در کسب‌وکار دارد.

در مطالعه Lieb (۲۰۰۲)، علل حوادث مشترک مخازن ذخیره‌سازی، بالای سطح زمین خلاصه شده است [۴]. با توجه به مطالعات مربوطه در این زمینه، جهان در سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۳ شاهد ۴۸۰ حادثه آتش‌سوزی در مخازن بوده است [۵]. یکی از

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]

مهم‌ترین حوادث فرایندی در کشور ایران در مخازن سقف شناور، حادثه پتروشیمی بوعلی ماهشهر بود. کمبود تجهیزات و مواد اولیه مناسب اطفای حریق، کمبود فشار آب مورد نیاز آتش‌نشانی و عدم آمادگی کامل سامانه اطفای حریم مجتمع از علل اصلی آن بود [۶]. همچنین، اخیراً حادثه آتش‌سوزی مخازن پالایشگاه نفت تهران نیز اگرچه خسارات جانی نداشت، باعث توقف روند تولید و از دست رفتن منابع زیادی شد [۷]. از این رو، سیستم اضطراری آتش‌نشانی در یک مزرعه مخزن، نقش مهمی در مقابله با آتش‌سوزی و انفجار دارد که در صورت از دست رفتن کنترل سیستم، مقیاس حادثه تشدید خواهد شد.

سیستم‌های مهم و حساس اغلب در راستای بهبود رویکردهای مدیریت ریسک برای مقابله بهتر با انواع ریسک‌ها تلاش می‌کنند [۸]. از طرف دیگر، روش‌های موجود ارزیابی ریسک نیز نواقصی مانند ساختار استاتیک و عدم قطعیت دارند [۸]. لذا رویکرد این مطالعه بهره‌گیری از شبکه بیزین، منطق فازی و اعتبارسنجی ساختار اولیه درخت خطا با استفاده از شاخص‌های روایی محتوا و بارش افکار به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌های موجود است. پروفسور لطفی عسگرزاده در سال ۱۹۶۵ نظریه مجموعه‌های فازی را مطرح کرد. این نظریه قادر است بسیاری از مفاهیم و عبارات غیردقیق را با زبان ریاضی بیان کند و زمینه را برای استدلال، نتیجه‌گیری، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم کند [۹، ۱۰]

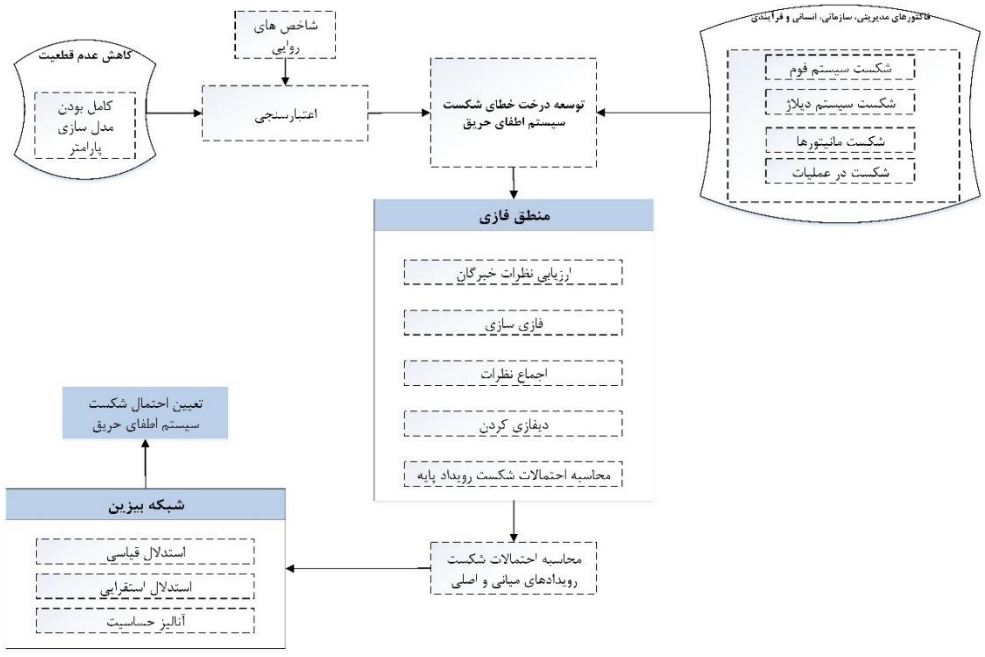
امروزه با توجه به ماهیت پویای متغیرهای تأثیرگذار بر خطر حوادث فرایندی و حساسیت زیاد ایمنی در این صنایع، روش‌های موجود نیز باید این قابلیت را داشته باشند. از روش‌های موجود، روش بیزین ماهیتی پویا دارد و قادر به در نظر گرفتن وابستگی شرطی بین رویدادهای از نوع نقص با علل مشترک است. همچنین، این روش قابلیت استدلال قیاسی و استقرایی دارد که باعث پویایی ساختار شبکه و امکان به‌روزرسانی احتمال رخداد رویدادهای ریشه‌ای با دریافت داده‌های پیش‌درآمد حوادث مانند شبه‌حوادث و شکست تجهیزات و فرایند می‌شود. این امر سبب می‌شود که داده‌های مدلِ ساخته‌شده به واقعیت نزدیک‌تر شود و عدم قطعیت کاهش یابد [۱۱].

بنابراین، مطالعه حاضر به بررسی عوامل مختلف ایجاد شکست در سیستم اطفای حریق مخازن پتروشیمی مانند عوامل فنی، انسانی و مدیریتی می‌پردازد. با توجه به محدودیت‌های موجود، این مطالعه در نظر دارد یک روش ارزیابی ریسک مبتنی بر شبکه بیزین فازی به‌منظور جلوگیری از شکست سیستم‌های اطفای حریق ارائه دهد.

روش کار

شکل ۱ رویکرد ارزیابی ریسک پویای مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، این رویکرد از چندین مرحله تشکیل شده است که درباره آن بحث خواهیم کرد.

اولین مرحله مطالعه، تجزیه‌وتحلیل ریسک و توسعه درخت خطا بود. پس از اعتبارسنجی ساختار درخت خطا، عوامل پنهان حوادث شامل عوامل مدیریتی، سازمانی، انسانی و فرایندی تجزیه‌وتحلیل شد. به‌منظور محاسبه نرخ شکست‌ها، از اعداد فازی مثلثی (TFNs) و روش ترکیبی CoA/Sum Product استفاده شد. پس از تعیین احتمال رویدادهای مختلف با منطق فازی و انتقال آن در شبکه بیزین (BN)، استدلال قیاسی، استقرایی و آنالیز حساسیت انجام شد.



شکل ۱: فلوچارت کلی مطالعه

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]

سیستم اطفای حریق

در شرکت پتروشیمی مطالعه‌شده، سه نوع سیستم اطفای حریق شامل سیستم فوم (Foam system)، سیستم دیلاژ (Deluge System Fire) و مانیتورهای آتش‌نشانی (Firefighting Monitors) وجود داشت. از سیستم فوم به‌منظور اطفای حریق در ابتدای حریق استفاده می‌شود که به شکل دستی یا اتوماتیک فعال می‌شود. سیستم دیلاژ نیز از سیستم‌های ثابت آتش‌نشانی است که با آب شبکه آتش‌نشانی سراسری منطقه تغذیه و به دو صورت دستی و اتوماتیک فعال می‌شود. مانیتورهای آتش‌نشانی نیز وسیله پرتاب آب با فشار زیاد قابل کنترل با ظرفیت بالاست که در آتش‌نشانی به شکل دستی یا کنترل از راه دور استفاده می‌شوند.

اعتبارسنجی و منطق فازی

به‌منظور بررسی ضرورت و ارتباط رویدادهای پایه در رویداد میانی مدنظر از شاخص روایی محتوا (Content Validity Index: CVI) و نسبت روایی محتوا (Content Validity Ratio: CVR) استفاده شد [۱۲]. در این مطالعه، از روش قضاوت خبره (Expert Judgment Method) به‌عنوان یک رویکرد اجماع علمی برای محاسبه احتمالات شکست رویدادهای پایه استفاده شد [۱۳]. خبره کسی است که درباره سیستم اطلاعات کافی و با ساختار درخت خطا آشنایی دارد. به‌منظور کمّی‌سازی احتمالات، از توابع عضویت مثلثی به دلیل سادگی و کاربرد در مطالعات ارزیابی ریسک استفاده شد [۱۴-۱۶]. سپس اعداد فازی مربوطه برای ترم‌های زبانی به‌دست آمد و نظرات خبرگان در قالب یک نظر با استفاده از روش Sum-Product (رابطه ۱) مجتمع شد. روش مرکز ناحیه (Center of Area: CoA) که از رویکردهایی است که عمومیت و مقبولیت بیشتری دارد [۱۷]، برای دیفازی کردن استفاده شد (رابطه ۲). لذا در این مرحله، برای محاسبه احتمال وقوع نقص رویدادهای پایه از مقادیر احتمالات شکست ترد (Crisp Failure Probability: CFP)، از رابطه Onisawa استفاده شد (رابطه ۳) [۱۷]. در پایان، از رویکرد Gate by Gate و گیت‌های نوع OR و AND برای محاسبه احتمالات رویدادهای میانی و اصلی استفاده شد.

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

$$X = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} = \frac{1}{3}(a_1+a_2+a_3) \quad (2)$$

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad K = \left[\frac{1-CFP}{CFP}\right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (3)$$

در روابط ۱، ۲ و ۳، Zi عدد فازی اجماع‌یافته برای رویدادهای پایه، wj بیانگر وزن خبره j، fij نیز مربوط به اعداد فازی رویداد پایه i با توجه به خبره j، a_1, a_2, a_3 اعداد فازی مثلثی و K نیز یک متغیر حد واسط است.

شبکه بیزین

با توجه به دریافت شواهد جدید مانند آمار وقوع حوادث، اطلاعات مرتبط با پایش لحظه‌ای فرایندها و شبه‌حوادث برای محاسبه احتمالات به‌روزشده از شبکه بیزین مورد استفاده قرار گرفت [۱۸، ۱۹]. یکی از تفاوت‌های BN و درخت خطا، در نظر گرفتن احتمالات با استفاده از قواعد شرطی در BN است. در شبکه بیزین، توزیع احتمال مشترک یا توأم (Joint Probability Distribution) مجموعه‌ای از متغیرهای X1 تا Xn با استفاده از استدلال استقرایی محاسبه شد [۲۰]. یکی از ویژگی‌های مختص BN، توانایی آن در استدلال قیاسی است. این موضوع امکان به‌روزرسانی رخداد رویدادهای پایه را با دریافت داده‌های پیش‌درآمد حوادث مانند شکست‌های انسانی، فنی و فرایندی صنعت مطالعه‌شده فراهم می‌آورد که در این مطالعه نیز بررسی شد [۲۱]. همچنین، از آنالیز حساسیت به روش RoV (رابطه ۴)، برای شناسایی مهم‌ترین گره‌های ریشه‌ای استفاده شد که باعث خرابی سیستم اطفای حریق می‌شود [۲۱، ۲۲].

$$RoV_{X_i} = \frac{\pi(X_i) - \theta(X_i)}{\theta(X_i)} \quad (4)$$

در اینجا θ(Xi) احتمالات پیشین و π(Xi) احتمالات پسین گره‌های ریشه‌ای است.

قابلیت اطمینان سیستم نیز با توجه به احتمال شکست رویداد اصلی با استفاده از رابطه ۵ و ۶ تعیین شد.

$$(5)\ P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$(6)\ R(t) = 1 - P(t)$$

در اینجا، P(t) و R(t)، به ترتیب احتمال وقوع رویداد خروجی و قابلیت اطمینان سیستم است.

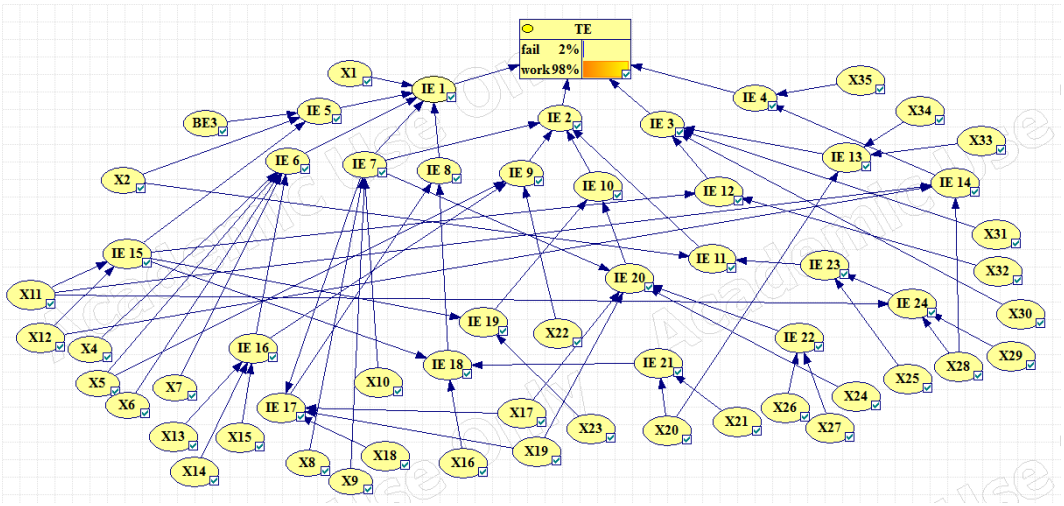
نتایج

بر اساس نتایج، پس از بحث و بررسی خبرگان روی ساختار درخت خطا، مانند محل قرارگیری انواع رویدادها و گیت‌های بین آن‌ها، به روش بارش افکار، روایی محتوای رویدادها با استفاده از شاخص‌های CVI و CVR بررسی شد. رویدادهای پایه نهایی مطالعه، CVI بیش از ۰/۷۹ داشتند. در پایان، ۳۵ رویداد پایه (X) و ۲۴ رویداد میانی (IE) برای شکست سیستم اطفای حریق شناسایی شد (شکل ۲). مطابق شکل، رویدادهای میانی ۱ تا ۴ به ترتیب شکست در سیستم دیلاژ، شکست سیستم فوم، شکست در مانیتورهای آتش‌نشانی و شکست در عملیات اطفای حریق بود. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب رویدادهای پایه و میانی مطالعه حاضر آمده است.

پس از فازی سازی و وارد کردن اعداد فازی متناظر، اجماع نظرات خبرگان، قطعی‌سازی و محاسبه احتمال هر رویداد پایه، احتمالات رویدادهای میانی و اصلی به‌دست آمد (چند مورد از محاسبات رویدادهای پایه در جدول ۳ آورده شده است). نتایج نشان داد بیشترین و کمترین نرخ شکست رویدادهای میانی به ترتیب مربوط به شکست سیستم فوم (۰/۰۷۸۲۸۵) و خرابی ولو

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]



شکل ۲: به‌روزرسانی احتمالات پسین با شبکه بیزین فازی

جدول ۱. رویدادهای پایه

رویداد پایه	توصیف رویداد	رویداد پایه	توصیف رویداد
X 1	نقص در اسپرینکلر	X 19	خرابی سلنوئید ولو
X 2	نشتی بزرگ در خطوط لوله انتقال و اتصالات	X 20	خرابی شیر کروی (Globe valve) مسیر بای‌پس
X 3	در دسترس و کافی نبودن منبع آب اصلی	X 21	نبود آچار یا اهرم مناسب برای فعال‌سازی چرخ دستی (Hand Wheel) توسط اپراتور هنگام تقاضا
X 4	نقص در ارسال سیگنال PSL مبنی بر بروز حریق در مخزن	X 22	خرابی دتکتور حرارتی (HD)
X 5	نقص در بوزر (Buzzer) و لامپ هشدار	X 23	خرابی شیر دستی
X 6	خرابی LHD	X 24	خرابی فلو سوئیچ
X 7	ناکافی بودن تعداد رینگ‌های روی مخزن	X 25	پر نکردن مخزن فوم
X 8	شکست نرم‌افزاری	X 26	پذیرش ریسک بالای مدیر
X 9	شکست سخت‌افزاری	X 27	بستن شیر ورودی آب که در حالت نرمال باز است.
X 10	نبود منبع تغذیه (Power supply)	X 28	عدم رعایت SOP
X 11	نقص در آموزش و آگاهی کارکنان	X 29	عدم تنظیم فشار تعادلی (Balanced pressure)
X 12	نداشتن مهارت لازم (مهارت ناکافی)	X 30	تأمین نکردن فشار لازم برای پرتاب آب
X 13	فرسودگی	X 31	نشتی و گرفتگی لوله‌ها و نازل‌ها
X 14	صدمه در اثر ضربه	X 32	خرابی قفل‌های فیکس‌کننده
X 15	شرایط فرایندی و آب‌وهوایی	X 33	خرابی شیر اصلی (Main Valve)
X 16	خرابی شیر توپی (Ball Valve) موجود در ایستگاه آزاد شدن اضطراری	X 34	خرابی شیر پروانه‌ای
X 17	خرابی دیلاژ ولو	X 35	نقص در تجهیزات پرتابل
X 18	نقص در محرک پنوماتیکی		

(۰/۰۰۱۵۶۶) بود. همچنین نرخ شکست مربوط به شکست کلی سیستم اطفای حریق بر اساس درخت خطای فازی $۵/۷\times۱۰^{-۶}$ بود. پس از به‌روزرسانی با BN، احتمال پیشین رخداد شکست سیستم اطفای حریق با استفاده از شبکه بیزین فازی ۰/۰۲۲۹۷۸ به‌دست آمد که خیلی بزرگ‌تر از مقدار محاسبه‌شده با درخت خطای فازی بود.

مقادیر به‌روزشده نشان داد رویداد پایه ۱۱ (۰/۰۲۱۳۶۵) و رویداد پایه ۱۲ (۰/۰۰۱۶۴۹) بیشترین سهم را در وقوع TE داشته‌اند (شکل ۲). در پایان، برای شناسایی مهم‌ترین گره‌های ریشه‌ای که باعث شکست سیستم اطفای حریق در این مطالعه شد، از روش RoV در نرم‌افزار GeNIe استفاده شد. با توجه به نتایج، اهمیت گره‌های ریشه‌ای در شبکه بیزین با استفاده از این روش طبقه‌بندی شد که رویداد پایه ۱۱ و رویداد پایه ۱۲، مهم‌ترین بودند (جدول ۴). با توجه به احتمال شکست در شبکه بیزین، قابلیت اطمینان سیستم ۰/۷۷۰۲۲ بود.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]

جدول ۲. رویدادهای میانی

رویداد	توصیف رویداد	رویداد	توصیف رویداد
IE 1	شکست سیستم کنترل فشار	IE 13	خرابی شیرها
IE 2	شکست سیستم کنترل سطح	IE 14	خطای آتش‌نشان (IE41)
IE 3	شکست در مانع سازمانی و مدیریتی	IE 15	خطای سایت من
IE 4	شکست در تعمیرات پیشگیرانه	IE 16	اتصال کوتاه کابل‌های ارتباطی
IE 5	برخورد وسایل نقلیه	IE 17	شکست در فعال‌سازی اتوماتیک (سیستم دیلاژ)
IE 6	شکست سیستم گاز بی‌اثر (Inert Gas Blanketing System: IGBS) و BV	IE 18	شکست در فعال‌سازی دستی (سیستم دیلاژ)
IE 7	منبع گرما در طول شرایط Box Up	IE 19	شکست در فعال‌سازی دستی (سیستم فوم)
IE 8	خطای انسانی	IE 20	شکست در فعال‌سازی اتوماتیک (سیستم فوم)
IE 9	شکست در سیستم IGBS	IE 21	عدم فعال‌سازی از طریق بای‌پس
IE 10	شکست در PTW	IE 22	خطای مدیریتی (IE57)
IE 11	خرابی نمایشگرها و آلارم‌ها	IE 23	خطای آتش‌نشان (IE48)
IE 12 رویداد اصلی	خرابی PT شکست سیستم اطفای حریق	IE 24	عدم تأمین نسبت فوم و آب

جدول ۳: محاسبه احتمال وقوع رویداد پایه نقص در اسپرینکلر

رویداد پایه (X)	اجماع نظرات خبرگان	قطعی‌سازی	متغیر حد واسط	درخت خطای فازی
۱ (نقص در اسپرینکلر)	(۰/۳۳۸۸، ۰/۴۳۰۰، ۰/۵۲۱۲)	۰/۰۴۳۰۰	۲/۵۲۷۶۶۰	۰/۰۰۲۹۶۷
۳۴ (شکست در شیر پروانه‌ای)	(۰/۰۹۴، ۰/۱۶۳۶، ۰/۲۳۳۲)	۰/۱۶۳۶	۳/۹۶۳۹۳۸	۰/۰۰۰۱۰۸
۳۵ (شکست در تجهیزات پرتابل)	(۰/۱۴۸۴، ۰/۲۳۳۶، ۰/۳۱۸۸)	۰/۲۳۳۶	۳/۴۱۹۰۹۲	۰/۰۰۰۳۸۰

جدول ۴: آنالیز حساسیت با روش RoV

رویداد پایه (X)	RoV	رتبه RoV
۱۱ (شکست در آموزش و آگاهی کارکنان)	۴۲/۵۱۸۲۶۰۷۱	۲
۱۲ (نداشتن مهارت لازم)	۴۲/۵۱۶۰۷۶	۱

بحث

اعتبارسنجی یکی از مراحل مهم در مطالعات درخت خطا است. اصولاً محققان و پژوهشگران در صنایع مختلف از طیف دانشگاهی هستند و به تمام جوانب سیستم‌های صنعتی آشنایی کاملی ندارند. از طرف دیگر، خبرگان و صنعتگران نیز اطلاعات کافی درباره شیوه‌های نوین پژوهشی در حوزه مربوطه را ندارند. لذا ارتباط دانشگاه با صنعت، امکان تبادل اطلاعات و بهبود روش‌های پژوهشی را به دنبال خواهد داشت و تأثیر مثبتی در فعالیت نوآورانه شرکت‌های بزرگ تولیدی دارد [۲۳]. به‌کار بردن برخی از روش‌های ارزیابی ریسک نسبتاً آسان است، اما ممکن است به دلیل محدودیت‌هایی که در تجربه تحلیلگر و در خود روش وجود دارد، خطر به‌درستی شناسایی نشود. روش‌های نظیر تحلیل خطر اولیه، تحلیل درخت خطا و مطالعه خطر و عملیات (HAZOP) بیشتر سازمان‌یافته هستند و این روش‌ها هرچه بیشتر سیستماتیک باشند، سناریوهای بالقوه حادثه را بیشتر پوشش می‌دهند. اما این سازمان‌یافتگی به کاربردهای گران‌تر و زمان‌بر منجر می‌شود و به‌تدریج به تحلیلگران باتجربه‌تری نیاز خواهد بود [۲۴].

فاکتور وزنی (WF) خبرگان (۴ خبره) بر اساس روش Renjith و همکاران محاسبه شد [۲۵]. انتخاب خبرگان برای محاسبه احتمالات با استفاده از منطق فازی نیز بر اساس مطالعات Cooke و همکاران [۲۶]، Lavasani [۲۷] و Renjith و همکاران [۲۵] انتخاب شد. طبق مطالعه Cooke و همکاران، سه شاخص کلی برای انتخاب متخصصان شامل تعداد مقالات علمی منتشرشده، تجربه انجام مطالعات مشابه در گذشته و تأیید صلاحیت‌های تخصصی توسط افراد مختلف است که اساس انتخاب خبرگان در این مطالعه نیز بود [۲۶]. در واقع، دانش تخصصی افراد تحت تأثیر دیدگاه‌ها و اهداف فردی است [۲۸].

نتایج مطالعه نشان داد در نظر گرفتن رویدادهای با علل

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]

مشترک، مثل شکست در آموزش و آگاهی کارکنان به‌طور هم‌زمان می‌تواند سبب خطای سایتمن، آتشنشان و عدم تأمین نسبت فوم به آب شود، درحالی‌که درخت خطا توانایی این کار را ندارد و احتمالات را به صورت استاتیک بررسی می‌کند. نتایج آنالیز حساسیت نیز در راستای سایر استنتاج‌های بیزین بود. بنابراین، نه‌تنها رویدادهایی که بیشترین تأثیر را در شکست سیستم اطفای حریق داشتند، بلکه محتمل‌ترین پیکربندی رویدادها که منجر به شکست سیستم ایمنی می‌شود نیز تعیین شدند [۲۹].

انتخاب روش تعیین احتمال وقوع رویداد پایه به شرایط و موقعیت‌های کاری بستگی خواهد داشت که در مطالعه حاضر از قضاوت خبره و نظریه فازی استفاده شد. ایـن نظریه در شـرایط ابهام و عدم اطمینان به‌جای حذف و نادیده گرفتن آن و ترویج منطق چندارزشی به‌جای دو ارزشی کاربرد دارد [۳۰]. با توجه به مطالعات مختلف در مورد بسیاری از تجهیزات نرخ نقایصی وجود ندارد و اگر هم وجود داشته باشد، به دلیل تفاوت‌های متعدد (مثلاً در مورد خطاهای انسانی و مدیریتی: تفاوت‌های فرهنگی و اجتماعی و در مورد خطاهای فنی: جنس تجهیز و خصوصیات متفاوت آن است) همواره با عدم قطعیت روبه‌رو هستیم که در مطالعه حاضر، همانند بسیاری از مطالعات مشابه [۳۱، ۳۲]، از منطق فازی به‌منظور کاهش عدم قطعیت استفاده شد. در مطالعه Yazdi و همکاران در سال ۲۰۱۸، از روش Fuzzy AHP و Fuzzy TOPSIS به ترتیب برای وزن‌دهی به خبرگان و کاهش احتمال رویداد اصلی استفاده شد. به‌منظور کاهش احتمال رویداد اصلی، از نظر سه پارامتر پیامدهای ایمنی، هزینه و سود از روش Fuzzy TOPSIS استفاده شد [۳۳].

از ویژگی‌های ویژه BN، استدلال قیاسی است که امکان به‌روزرسانی احتمال رخداد رویدادهای پایه را فراهم می‌کند و به‌نوعی باعث پویایی شبکه می‌شود. با به‌روزرسانی، احتمال رخداد رویدادهای پایه محاسبه و امکان انتخاب بحرانی‌ترین رویدادهای پایه فراهم شد. نتایج آنالیز حساسیت و استدلال قیاسی در این مطالعه تقریباً هم‌راستا بود. بنابراین، شبکه بیزین فازی معیار قابل اعتمادی از عملکرد مشارکت هر عامل خطری را ارائه می‌دهد. در تحلیل ریسک ایمنی در تأسیسات فرایندی می‌توان از ویژگی BN برای به‌روزرسانی احتمال به‌طور مؤثری استفاده کرد و آن دسته از دلایل ریشه‌ای یا حالت‌های شکست (مثل مؤلفه‌های سیستم ایمنی) را شناسایی کرد که بیشترین تأثیر را در شکست سیستم مدنظر دارند (برای مثال، در این مطالعه، نقص در آموزش و آگاهی) [۲۹، ۳۴، ۳۵].

در این راستا، نه‌تنها رویدادهایی شناسایی می‌شوند که بیشترین تأثیر را دارند، بلکه محتمل‌ترین پیکربندی رویدادها که منجر به شکست سیستم ایمنی می‌شود نیز تعیین می‌شود [۲۹]. با ارائه بحرانی‌ترین رویدادهای پایه می‌توان به مدیران ذی‌ربط برای اولویت‌بندی اقدامات کنترلی کمک کرد. به‌منظور بهبود ایمنی و جلوگیری از شکست سیستم اطفای حریق با توجه به نرخ شکست ها، چند راهکار کلیدی معرفی می‌شود که عبارت‌اند از: آموزش ایمنی شغلی به‌طور مداوم و بهبود مهارت‌های مرتبط با برگزاری مانورهای مختلف آتش‌نشانی، رعایت دستورالعمل‌های ایمن و استاندارد کار و به‌روزرسانی آن‌ها با توجه به تغییرات سیستم، باز کردن مسیر ورودی آب با آموزش وآگاهی دادن به مدیران سطح بالا در خصوص اهمیت این موضوع برای کاهش احتمال شکست سیستم فوم.

نتیجه‌گیری

این مطالعه در مخازن ذخیره‌سازی سقف شناور متانول یک صنعت پتروشیمی انجام شد و نتایج نشان داد شبیه‌سازی شبکه بیزین فازی و اعتبارسنجی درخت خطا، یک روش عملی برای شناسایی دقیق و علل شکست سیستم‌های اطفای حریق فراهم می‌کند. این رویکرد می‌تواند به تصمیم‌گیری مدیران و تحلیلگران صنایع پتروشیمی برای جلوگیری از شکست سیستم‌های اطفای حریق در مخازن با توجه به تغییرات سیستم‌ها کمک کند.

تشکر و قدردانی

تشکر و قدردانی: از کلیه پرسنلی که در این پروژه همکاری داشتند کمال تشکر را داریم.

تضاد منافع

تضاد منافع: در نگارش این مقاله هیچ تضاد منافعی وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی

ملاحظات اخلاقی: در این مطالعه تمام ملاحظات اخلاقی رعایت شده است.

سهم نویسندگان

سهم نویسندگان: نویسنده اول در تحلیل، جمع آوری داده ها و نگارش مقاله، نویسنده دوم در طراحی، تحلیل و نگارش مقاله و نویسنده سوم نیز در طراحی مطالعه و ویرایش مقاله نقش داشتند.

حمایت مالی

حمایت مالی: این پژوهش حامی مالی ندارد.

REFERENCES

1. Leite RM, Centeno FR. Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires. *J Hazard Mater*. 2018;**342**:544-52. PMID: 28888187. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.052
2. Shaluf IM, Abdullah SA. Floating roof storage tank boilover. *J Loss Prev Process Ind*. 2011;**24**(1):1-7. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.06.007
3. Chang JI, Lin C-C. A study of storage tank accidents . *J Loss Prev Process Ind*. 2006;**19**(1):51-9. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015
4. Lieb JM. Recent developments in API storage Tank standards to improve Spill prevention and leak detection/prevention November; 2001.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]

5. Persson H, Lönnermark A. Tank fires-review of fire incidents 1951-2003, 2004. https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:962266
6. Iranian students news agency (ISNA); 2016. https://www.isna.ir/news/
7. Aqlan F, Ali EM. Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry. *J Loss Prev Process Ind*. 2014;**29**:39-48. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.01.006
8. Azadeh A, Salehi V, Arvan M, Dolatkhah M. Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps: A petrochemical plant. *Saf Sci*. 2014;**68**:99-107. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.03.004
9. Liu Y, Fan Z-P, Yuan Y, Li H. A FTA-based method for risk decision-making in emergency response. *Comput Oper Res*. 2014;**42**:49-57. PMID: 32287928. DOI: 10.1016/j.cor.2012.08.015
10. Ross TJ. Fuzzy logic with engineering applications. J *Korean Soc Steel Const.* 2013;**25**(4):71-.
11. Zarei E, Khan F, Yazdi M. A dynamic risk model to analyze hydrogen infrastructure. *Int J Hydrog Energy*. 2021;**46**(5):4626-43. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.191
12. Pedrycz W. Why triangular membership functions? *Fuzzy Sets Syst*. 1994;**64**(1):21-30. DOI: 10.1016/0165-0114(94)90003-5
13. Liu Y, Zhou H, Liu L. Firefighting emergency capability evaluation on crude oil tank farm. *Procedia Eng*. 2018;**211**:506-13. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.042
14. Buckley JJ. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets Syst*. 1985;**17**(3):233-47. DOI: 10.1016/0165-0114(85)90090-9
15. Chang D-Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *Eur J Oper Res.* 1996;**95**(3):649-55. DOI: 10.1016/0377-2217(95)00300-2
16. Abbassi R, Khan F, Khakzad N, Veitch B, Ehlers S. Risk analysis of offshore transportation accident in arctic waters. *IJME*. 2017;**159**(A3):213-24. DOI: 10.5750/ijme.v159iA3.1025
17. Yazdi M, Zarei E. Uncertainty handling in the safety risk analysis: an integrated approach based on fuzzy fault tree analysis. *JFAP*. 2018;**18**(2):392-404. DOI: 10.1007/s11668-018-0421-9
18. Nielsen TD, Jensen FV. Bayesian networks and decision graphs. New York: Springer; 2007.
19. Kjaerulff UB, Madsen AL. Bayesian networks and influence diagrams. New York: Springer; 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-74101-7
20. Khakzad N, Yu H, Paltrinieri N, Khan F. Reactive approaches of probability update based on Bayesian methods. Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry. Elsevier; 2016.
21. Reference Manual Bevi Risk Assessments v. 3.2. National Institute of Public Health and Environment (RIVM). Netherlands:Bilthoven; 2009.
22. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *J Hazard Mater*. 2017;**321**:830-40. PMID: 27720467. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.09.074
23. Vesely WE, Goldberg FF, Roberts NH, Haasl DF. Fault tree handbook. Nuclear Regulatory Commission Washington DC; 1981.
24. Paltrinieri N, Tugnoli A, Cozzani V. Advanced technique for dynamic hazard identification. Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry. Elsevier; 2016.
25. Renjith V, Madhu G, Nayagam VLG, Bhasi A. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. *J Hazard Mater*. 2010;**183**(1-3):103-10. PMID: 20674168. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.116
26. Cooke RM, ElSaadany S, Huang X. On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes. *Reliab Eng Syst*. 2008;**93**(5):745-56. DOI: 10.1016/j.ress.2007.03.017
27. Lawshe CH. A quantitative approach to content validity. *J Pers Psychol*. 1975;**28**(4):563-75. DOI: 10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x
28. Ford DN, Sterman JD. Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models. *Syst Dyn Rev*. 1998;**14**(4):309-40. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1727(199824)14:4%3C309::AID-SDR154%3E3.0.CO;2-5
29. Modarres M, Kaminskiy MP, Krivtsov V. Reliability engineering and risk analysis: a practical guide: CRC press; 2016.
30. Miri Lavasani M, Wang J, Yang Z, Finlay J. Application of fuzzy fault tree analysis on oil and gas offshore pipelines. *J Mar Sci Eng*. 2011;**1**(1):29-42.
31. Hosseini N, Givehchi S, Maknoon R. Cost-based fire risk assessment in natural gas industry by means of fuzzy FTA and ETA. *J Loss Prev Process Ind*. 2020;**63**:104025. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.104025
32. Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety. John Wiley & Sons; 2015.
33. Yazdi M, Korhan O, Daneshvar S. Application of fuzzy fault tree analysis based on modified fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for fire and explosion in the process industry. *Int J Occup Saf Ergon*. 2018:1-17. PMID: 29557291. DOI: 10.1080/10803548.2018.1454636
34. Nguyen HT, Prasad NR. Fuzzy modeling and control: selected works of sugeno. CRC press; 1999.
35. Khakzad N, Khan F, Amyotte P, Cozzani V. Domino effect analysis using Bayesian networks. *Risk Anal*. 2013;**33**(2):292-306. PMID: 22681862. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2012.01854.x

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.32592/joohe.10.1.17]