

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Reliability Assessment of Fixed Foam Systems of Storage Tank Based on Fuzzy Fault Tree Analysis

Ehsan Ramezanifar¹, Kamran Gholamizadeh¹, Iraj Mohammadfam²,
Mostafa Mirzaei Aliabadi^{2*}

¹ Department of Occupational Health Engineering, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

² Department of Health, Safety and Environment Management, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

Received: 2022-01-16

Accepted: 2022-11-09

ABSTRACT

Introduction: Risk assessment is a scale for predicting reliability and can manage interactions between components and process variables. Moreover, the reliability of one component or barrier affects the overall risk of the system. Being one of the most critical safety barriers of the storage tank, the failures of Fixed Foam Systems (FFS) on demand can result in severe consequences. FFS, is of grave importance in decreasing the risks associated with fires and damages.

Material and Methods: This study aims to determine the probability of root causes related to FFS failure through Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) to estimate system reliability. In conventional fault tree analysis, accurate data is usually used to assess the failure probability of basic events. Therefore, the introduced approaches were employed to quantify failure probabilities and uncertainty handling. Finally, system reliability was estimated according to the failure probability of the top event.

Results: The findings showed that 13 baseline events involved FFS performance. According to the results, failures of cable path and detection system (or resistance temperature detectors), set the activation switch (multi-position) incorrectly, and foam makers not continuously running are the three most critical basic events influencing the reliability of fixed foam systems. In addition, this paper estimated the system reliability at 0.8470

Conclusion: The results showed that the FFTA could be used in matters such as reliability evaluation failure and risk assessment using experts' judgment. This paper can also show the adaptation of the fuzzy approach to assess the failure probability of the basic event in the fault tree analysis (FTA).

Keywords: Fixed foam system, Reliability, Fuzzy Fault Tree Analysis, Storage tank, Safety barrier

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ramezanifar E, Gholamizadeh K, Mohammadfam I, Mirzaei Aliabadi M. Reliability Assessment of Fixed Foam Systems of Storage Tank Based on Fuzzy Fault Tree Analysis. *J Health Saf Work*. 2023; 13(1): 1-17.

1. INTRODUCTION

Fuel storage areas usually contain a high density of valuable products and can pose devastating consequences in case of cascading fires or explosions. Fires in industrial storage may cause a series of secondary fires and quickly spread to

adjacent equipment and products. Despite the strict guidelines of American Petroleum Institute (API) 650 and National Fire Protection Association (NFPA) for fire protection and safe administration of storage tanks, fire incidents still occur in storage tanks. Evidence shows that between 1950 and 2018,

* Corresponding Author Email: mirzaei@umsha.ac.ir

480 fires occurred in storage tanks worldwide. These incidents demonstrate the long-run risk of fire in storage tanks, the implications of potential environmental and human issues, and the necessity to prevent similar accidents in the future. Most of the destruction in these incidents stems from the delayed actuation of fire protection systems. The fire protection system is an inevitable safety barrier that prevents fire occurrences. The foaming mechanism is an operational defensive solution that prevents fire in storage tanks, particularly in flammable liquids.

Various methods are applied to study system reliability. There is widespread interest in using fault tree analysis (FTA) as an efficient tool to analyze system safety and reliability risks. FTA is a graphical analytic technique that focuses on the failure behavior of systems by determining potential hazardous states. Furthermore, it can easily estimate unwanted events based on the crisp failure probabilities of system components. Applying quantitative FTA to evaluate system reliability requires knowing the exact failure data of individual basic events (BEs).

Therefore, to handle these limitations related to FTA, one possible way is the fuzzy fault tree analysis (or FFTA), which is an extended form of FTA with fuzzy set theory. In addition, FFTA offers good potential to deal with highly missing data and subjective judgments. We proposed an investigation model based on FFTA to analyze the system reliability of a fixed foam in a storage tank by integrating FTA into a fuzzy set to circumvent actual data inadequacy. Tyagi et al. employed FFTA for the safety and reliability of an electric power transformer. Recently, Salunkhe and Deshpande have worked on FFTA for the reliability estimation of a flash vessel in an ammonia storage tank. The findings suggest the potential of FFTA to overcome the limitations of conventional FTA methods, which can also analyze the system's reliability.

Like other engineering systems, various factors may cause a fixed foam system to fail. Therefore, the present work was implemented to assess the probabilistic reliability of the fixed foam system based on FFTA. This paper is structured as follows: Section 1 introduces the procedures of FFTA. Section 2 evaluates the application of FFTA to estimate the reliability of the fixed foam system used in the petrochemical industry. Section 3 presents the discussion, results, and conclusions.

2. MATERIAL AND METHODS

Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA): As mentioned, to cope with missing data, there is a need to apply the fuzzy theory. Fuzzy sets can handle uncertainty by considering the interrelationships between influencing factors. A framework is introduced based on the FFTA, which can be used to analyze fixed foam reliability in a storage tank. The framework is organized into six steps.

Constructing Fault Tree (FT): At first, FT diagram is built once the top event (TE) is determined. The TE seems like an unwanted event with potential fire and the fire spreading consequences. The FT addresses the chain of events resulting in the TE using logic gates (AND/OR). After defining TE, collecting data, and identifying possible events through interviews, we used processed information and recorded inspections to complete the FT. Various mechanisms may challenge the reliability of fixed foam systems in the storage tank, and this possibility can be caused by maintenance methods, system design, and environmental and external factors. Finally, the accuracy of the FT was evaluated by experts.

Obtaining possibilities based on expert judgments: As obtaining failure data in engineering equipment is complicated, achieving possibilities using linguistic terms is a practical solution. In addition, the usual evaluation of fuzzy linguistic terms and their values are converted into trapezoidal fuzzy numbers (Table 1). Several factors, such as individual perspectives and goals, can influence the views of experts. Therefore, expert views can be outlined following personal experiences, education, and other factors using a more reliable approach that rates experts with weighted scores.

Aggregating obtained possibilities: After exchanging the linguistic terms for fuzzy numbers, the fuzzy numbers must be aggregated to set the fuzzy possibility. The current study selected the linear opinion pool method offered by Chemin and Winkler. Aggregated fuzzy possibility set is defined as:

$$\mu_{Agg}(BE_i) = \sum_{j=1}^m W_j \mu_{ij} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, m \end{matrix} \quad (1)$$

Here, μ_{Agg} is the aggregated Fuzzy number of each BE, W_j represents the weight of expert j , and μ_{ij} fuzzy numbers of BE i judged by the expert, m refers to the total number of experts, and n is the total number of BEs.

Table 1: Possibility of failure and trapezoidal fuzzy number

Linguistic terms	
Possibility of failure	Fuzzy membership function
Very low (VL)	(0.0, 0.0, 0.1, 0.2)
Low (L)	(0.1, 0.25, 0.25, 0.4)
Medium (M)	(0.3, 0.5, 0.6, 0.7)
High (H)	(0.6, 0.75, 0.85, 0.9)
Very high (VH)	(0.8, 0.9, 1, 1)

Table 2: Probability and priority of minimal cut sets and basic events leading to the top event

MCS	Basic event	Description	Failure probability	Priority	Probability of Top Event (per year)
MCS01	BE01	Foam supply is unavailable	2.61E-03	10	1.66E-01
MCS02	BE02	Water supply is unavailable	6.88E-04	12	
MCS03	BE03	Line valves failure	1.58E-03	11	
MCS04	BE04	Large leakage in lines and fittings	6.28E-03	8	
MCS05	BE05	Foam failure	6.39E-03	7	
MCS06	BE06	Logic solver fails on demand	2.68E-03	9	
MCS07	BE07	Set the activation switch (multi position) wrongly	1.39E-02	2	
MCS08	BE08	High risk acceptance of boardman	1.11E-02	5	
MCS09	BE09	Alarm detection error	8.63E-03	6	
MCS10	BE10	Proportioning system fails on demand	1.22E-02	4	
MCS11	BE11	Foam makers are not continuously on demand.	1.37E-02	3	
MCS12	BE12	Defect in buzzer and warning lamp	1.64E-04	13	
MCS13	BE13	Failure of cable path and detection system (RTD) on demand	2.31E-02	1	

Defuzzifying of aggregated expert judgment: Among fuzzy decision analysis steps, defuzzification is one of the essential computational issues. This step is used for transforming triangular or trapezoidal numbers into crisp numbers. The defuzzification of trapezoidal fuzzy numbers $H = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ employed CoA-defuzzification can be illustrated below:

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

Converting possibilities to probabilities: Lavassani et al. and Yazdi applied Onisawa's suggested technique to convert fuzzy possibility score (FPS) into fuzzy probability (FP). According to their approach, Eq. (3) shows how FPS can be

covert into FP values:

$$FP = \begin{cases} 0 & FPS = 0 \\ \frac{1}{10^k} & FPS \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Here, $k = [(1 - FPS) / FPS]^{1/3} \times 2.301$.

Ranking of Minimal Cut Sets (MCS) and probability of TE: After computing the probability of all BEs, the probability of TE, MCs, and their ranking was determined through Equations (4-6). The MCS is the notable element of the FT.

$$P_{MCS_j} = \prod_{i=1}^n FP_{BE_i} \quad (4)$$

$$P_{TE} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_{MCS_j}) \quad (5)$$

$$I_i^{FV} = MCS_i / TE \quad (6)$$

Where, P_{MCS_j} represent as the probability of MCSs j , FP_{BE_i} is as the probability of BE i , and P_{TE} shows as the probability of the TE. I_i^{FV} Fussell–Vessel's measure is employed to rank the MCSs.

Reliability analysis of TE: Next to estimating the probability of the top event by the FFTA, the following equation can estimate system reliability:

$$R(X) = e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Here, $R(X)$ is the system reliability, λ is the annual failure rate, and t represents the time interval.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Application: In this study, a method based on FFTA was presented to analyze the root causes and determine the failure probability of a fixed foam system. Fixed foam systems include equipment employed for tank firefighting in emergencies. Therefore, estimating the fixed foam system reliability in fire hazard risk assessment may be crucial to preventing cascading fires. Thus, the BEs were determined using the opinions of qualified experts and treating data.

As stated in experts' opinions and the results of previous studies, five Intermediate Events (IE) and thirteen basic events (BE) all lead to TE through the OR gates. It should be noted that when drawing an FT, the occurrence of any of the BEs is sufficient for the failure of the fixed foam system. Based on the studies, failure and inefficiency of foam systems include detection defects and electrical systems failures (defects in buzzers and warning lamps), failure in the executing pathway (valve failure and large leaks in the path), and Boardman's error (high-risk acceptance of Boardman).

According to the characteristics of each expert, we calculated the weights of the five experts chosen to evaluate the probabilities as 0.147, 0.230, 0.230, 0.163, and 0.230. After applying the weight of experts to their opinions, the questionnaire was administered to them. Additionally, the probability and priority of MCS and BEs obtained by the fuzzy set theory are presented in Table 2.

When the probability of all BEs is estimated, it is time to compute TE and IEs. In this respect,

the failure probability of the TE was estimated at 0.1660 per year. The main objective of many safety and reliability analyses is to recognize critical MCSs. Based on the results, failure of the cable path and detection system (or RTD failures) were the highest risks (Table 2). According to the failure probability of TE and Eq. (7), the system's reliability was 0.8470. Generally, in evaluating the reliability of the foam system, human aspects (Boardman errors) can be impressive as an IE. Therefore, in comparing the present study with the global foam system failure, human intervention and its effect on reliability are also considered in the present study. In the global foam system failure identified foam maker (56.6%), proportioning (22.9%), and water supply (12.65%). The most involved failures in our investigation were related to the cable path and detection system (or RTD failures) (22.4%), incorrect adjustment of the set the activation switch (multi-position) (13.5%), and foam maker not continuously running (13.3%).

4. CONCLUSIONS

We used fuzzy FTA methods to evaluate the reliability of fixed foam systems. The results show that FFTA is an alternative solution to overcome the limitation of quantitative FT and provide a reliability assessment based on expert experiences. This analysis method can estimate the reliability of this fixed foam system effectively. We found that the system's reliability ($R(X) = e^{-\lambda t}$) is about 85%. The failure probability of this system has a high risk with a low probability and could significantly prevent cascading fires. The RTD failures, set the activation switch (multi-position) wrongly, and foam makers not continuously running are the three most important factors influencing the reliability of fixed foam systems on demand. Although our work was designed to assess the reliability of fixed foam systems, it can also be used to evaluate the reliability of other safety system. Thus, it is suggested that the introduced approach should be used to analyze the reliability of other safety barriers of storage tanks.

5. ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the Hamedan University of Medical Sciences and was taken from the master's thesis on Occupational Health Engineering (No. 140002281487). The authors would like to thank the experts for enabling collaborative work.

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فوم مخازن ذخیره‌سازی به روش تحلیل درخت خطای فازی

احسان رضانی فر^۱، کامران غلامی زاده^۱، ایرج محمدفام^۲، مصطفی میرزایی علی‌آبادی^{۲*}

^۱ گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات ایمنی و بهداشت شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران
^۲ گروه مدیریت سلامت، ایمنی و محیط‌زیست، مرکز تحقیقات ایمنی و بهداشت شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

چکیده

مقدمه: ارزیابی ریسک مقیاسی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان است و می‌تواند تعاملات بین اجزا و متغیرهای فرآیند را مدیریت کند. از طرفی قابلیت اطمینان یک جزء یا یک مانع ایمنی می‌تواند بر ریسک کلی سیستم تأثیرگذار باشد. به عنوان یکی از مهم‌ترین موانع ایمنی مخازن ذخیره‌سازی، خرابی سیستم‌های فوم می‌تواند عواقب شدیدی را به همراه داشته باشد؛ بنابراین سیستم‌های فوم برای کاهش خطرات ناشی از آتش‌سوزی و خسارات ناشی از آن دارای اهمیت بالایی هستند.

روش کار: این مطالعه با هدف تعیین علل ریشه‌ای دخیل در شکست سیستم‌های فوم ثابت مخازن ذخیره‌سازی از طریق آنالیز درخت خطای فازی و برآورد قابلیت اطمینان آن صورت گرفت. در محاسبات درخت خطای متعارف معمولاً از داده‌های دقیق برای ارزیابی احتمال وقوع رویدادهای پایه استفاده می‌شود؛ بنابراین در رویکرد معرفی شده، مجموعه‌های فازی در جهت کمی‌سازی احتمالات رویدادهای پایه و مدیریت عدم قطعیت استفاده گردید. در نهایت، با توجه به احتمال رویداد نهایی، قابلیت اطمینان سیستم برآورد شد.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد که ۱۳ رویداد پایه در عملکرد سیستم‌های فوم ثابت مخازن ذخیره‌سازی نقش دارند. علاوه بر این، خرابی مسیر کابل و سیستم تشخیص (حسگرهای دما مقاومتی)، تنظیم اشتباه کلید فعال‌سازی و ممتد عمل نکردن سیستم‌های تولیدکننده کف، سه عامل تأثیرگذار بر قابلیت اطمینان سیستم‌های فوم ثابت بودند. با استفاده از روش پیشنهادی، قابلیت اطمینان سیستم ۰/۸۴۷۰ برآورد گردید.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که می‌توان از روش درخت خطای فازی به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تخمین قابلیت اطمینان با استفاده از قضاوت کارشناسان استفاده کرد. همچنین، مطالعه حاضر سازگاری منطق فازی را برای ارزیابی احتمال نقص رویدادهای پایه درخت خطا نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سیستم فوم مخازن ذخیره‌سازی، قابلیت اطمینان، آنالیز درخت خطای فازی، مخازن ذخیره‌سازی، موانع ایمنی

مقدمه

برای محافظت از مخازن ذخیره‌سازی شامل رینگ‌های آب آتش‌نشانی (دستی و خودکار)، سیستم‌های سیلابی (حوضچه‌های آبگیر)، سیستم‌های تزریق فوم، صاعقه‌گیر و دیگر تمهیدات پیش‌بینی شده است (۱۳، ۱۴). در این میان، سیستم‌های فوم مکانیسمی دفاعی و راه‌حلی عملیاتی برای جلوگیری از آتش‌سوزی در مخازن ذخیره‌سازی به‌ویژه برای مایعات قابل اشتعال بشمار می‌روند. در صورتی که این سیستم‌ها به‌درستی مهندسی، راه‌اندازی و نگهداری شوند، می‌توانند چندین سال خدمات قابل‌اعتمادی را ارائه دهند (۱۵، ۱۶). لذا قابلیت اطمینان این سیستم‌ها و تجزیه و تحلیل عملکرد آن‌ها به‌منظور جلوگیری و انتشار آتش‌سوزی در مخازن ذخیره‌سازی امری کاملاً توصیه‌شده و در راستای حفظ منابع سازمان است.

برآورد قابلیت اطمینان سیستم‌ها توسط بسیاری از محققین از طریق روش‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این میان، علاقه گسترده‌ای به استفاده از آنالیز درخت خطا^۴ (FTA) به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تجزیه و تحلیل خطرات مرتبط با ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌ها وجود دارد (۱۷-۲۰). به‌طور کلی، روش FTA اطلاعات مرتبط با عوامل بالقوه بروز حادثه و ریسک‌های سیستم را در اختیار استفاده‌کننده قرار می‌دهد؛ با این حال این روش مستقیماً میزان اولیه خرابی‌ها را ارائه نمی‌دهد (۲۰). با این وجود، خروجی FTA به‌آسانی می‌تواند برای اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی با هدف به حداقل رساندن احتمال شکست سیستم‌ها بکار گرفته شود (۲۱، ۲۲). این روش یک ابزار تحلیلی-گرافیکی است که بر رفتار خرابی سیستم‌ها با تعیین حالت‌های خطرناک بالقوه تمرکز دارد (۲۳). علاوه بر این، با توجه به نرخ خرابی اجزای سیستم، می‌توان احتمال وقوع رویداد نهایی^۵ (ناخواسته) و همچنین میزان قابلیت اطمینان سیستم را به‌راحتی برآورد نمود (۲۴). از این رو به‌کارگیری این روش با رویکرد کمی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها نیازمند شناخت کامل رویدادهای پایه^۶ است (۲۵).

محل‌های ذخیره‌سازی سوخت معمولاً حاوی تراکم بالایی از محصولات با ارزش اقتصادی هستند و می‌توانند پیامدهای مخربی را از طریق آتش‌سوزی یا انفجار ایجاد کنند (۱). وقوع آتش‌سوزی در مخازن ذخیره‌سازی می‌تواند به‌راحتی انتشار پیدا کند، دومینویی از حوادث را به دنبال داشته باشد و به‌سختی اطفاء گردد (۲). در بررسی ۴۰ ساله حوادث تأسیسات صنعتی، نشان داده شد که ۸۵ درصد از ۲۴۲ حادثه مرتبط با مخازن ذخیره‌سازی سرانجام به آتش‌سوزی و انفجار منتهی شده است (۳). علاوه بر این، مطالعات و بررسی‌های دیگر نشان می‌دهد بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۸ در سراسر دنیا ۴۸۰ حادثه آتش‌سوزی در مخازن ذخیره‌سازی به وقوع پیوسته است (۴). اثرات تخریب این‌گونه حوادث تهدیدی برای جان کارکنان، افکار عمومی و محیط‌زیست است که می‌تواند ضررهای اقتصادی هنگفتی را بر صنعت تحمیل نماید (۵). برای مثال، در حوادثی همچون حادثه نیگاتا، بونسفیلد، پالایشگاه تهران و پتروشیمی خارک مخازن دچار آتش‌سوزی شده و عواقب ناگواری را نیز به همراه داشته است (۶، ۷).

با وجود اینکه سازمان‌های بین‌المللی نظیر انجمن ملی حفاظت از آتش‌سوزی^۱ (NFPA) و مؤسسه پتروشیمی آمریکا^۲ (API) دستورالعمل‌های سخت‌گیرانه‌ای جهت مدیریت ایمن مخازن (کد API ۶۵۰ (۸)) و محافظت در برابر آتش‌سوزی (کد NFPA ۳۰ (۹)) را ارائه می‌دهند، اما همچنان حوادث آتش‌سوزی مرتبط با مخازن در سراسر دنیا رخ می‌دهد (۸-۱۰). گفتنی است که برای جلوگیری، به تأخیر انداختن و یا کاهش پیامدهای چنین حوادثی از رویه‌های ایمنی و راه‌حل‌های فنی مهندسی تحت عنوان موانع ایمنی^۳ استفاده می‌شود (۱۱). موانع ایمنی به‌عنوان اقدامات فیزیکی و غیر فیزیکی با هدف جلوگیری، کاهش و یا کنترل انحرافات خطرناک سیستم‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۲). مجموعه موانع ایمنی

4. Fault Tree Analysis (FTA)

5. Top Event (TE)

6. Basic Events (BEs)

1. National Fire Protection Association (NFPA)

2. American Petroleum Institute (API)

3. Safety Barriers

روزبهرانی (۳۳) و یزدی (۲۷) منطق فازی را در تکنیک FTA به صورت FFTA برای ارزیابی ایمنی سیستم‌ها پیاده‌سازی کردند که نشان‌دهنده عملیاتی بودن این رویکرد می‌باشد. این مطالعات کاربرد FFTA را برای رسیدگی به محدودیت‌های درخت خطای متعارف (مرسوم) و همچنین کاربرد آن برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌ها نشان می‌دهد. بر همین اساس با توجه به محدودیت‌های درخت خطای متعارف، رویکرد مطالعات پیشین و همچنین اهمیت بالای مخازن ذخیره‌سازی، در این مطالعه به برآورد قابلیت اطمینان سیستم فوم ثابت مخازن ذخیره‌سازی با استفاده از توانمندی‌های روش FFTA پرداخته شده است.

روش کار

این مطالعه مقطعی در واحد مخازن متانول یک صنعت پتروشیمی انجام گرفت. در این مطالعه با توجه به نقش پراهمیت موانع ایمنی در کشف، جلوگیری و اطفاء حریق در واحد مخازن مایعات قابل اشتعال به بررسی قابلیت اطمینان از عملکرد سیستم فوم به‌عنوان یک مانع ایمنی مؤثر پرداخته شد. علاوه بر این، جهت برآورد احتمال رویدادهای پایه از منطق فازی استفاده گردید. در این مطالعه چارچوبی بر اساس FFTA پیشنهاد شده است که می‌تواند برای تحلیل عدم کارایی سیستم فوم مخازن ذخیره‌سازی در صنایع فرآیندی استفاده شود. این چارچوب در چهار بخش خلاصه و تنظیم شده است. بخش اول متشکل از گراف درخت خطا^۳ (FTD) می‌باشد. در بخش دوم، به برآورد احتمال رویدادهای پایه با استفاده از قضاوت متخصصین پرداخته می‌شود. بخش سوم نیز شامل تخمین و رتبه‌بندی برش‌های حداقل^۴ (MCSs) و همچنین برآورد رویداد نهایی با استفاده از FFTA است. در نهایت با توجه به احتمال رویداد نهایی، میزان قابلیت اطمینان سیستم برآورد گردید. مراحل اجرای مطالعه حاضر در شکل (۱) ارائه شده است.

FTA عمدتاً روشی برای تحلیل ایمنی سیستم‌های موجود و برآوردی از احتمال شکست سیستم‌ها در مرحله طراحی است (۲۶). همچنین این روش می‌تواند برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فوم در مخازن ذخیره‌سازی نیز مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود، روش FTA با محدودیت‌هایی همچون کمبود غیرمنطقی اطلاعات و اختصاصی نبودن داده‌ها همراه است (۲۷). در همین راستا نیز استراتژی‌های زیادی جهت مقابله با این محدودیت‌ها ارائه شده است. یکی از این استراتژی‌ها به‌کارگیری منطق فازی^۱ با استفاده از نظر متخصصین در حوزه مورد بررسی است. منطق فازی راهکاری مناسب در جهت مقابله با اطلاعات ناقص و مبهم است (۲۸). امکانی که منطق فازی در مواجهه با موقعیت‌های مبهم و نادقیق ایجاد می‌کند نتیجه استفاده از قدرت درک و قضاوت انسان است. به‌کارگیری این قابلیت از منطق فازی می‌تواند محدودیت‌های روش درخت خطا را تحت عنوان درخت خطای فازی^۲ (FFTA) به نحوی قابل قبول پوشش دهد (۲۸، ۲۹)؛ بنابراین مطالعه حاضر نیز جهت برآورد احتمال رویدادهای پایه، یک مدل بررسی مبتنی بر FFTA را پیشنهاد می‌کند. شایان ذکر است که از این رویکرد در زمینه‌های مختلف ارزیابی ریسک و قابلیت اطمینان در سراسر دنیا و ایران استفاده شده است.

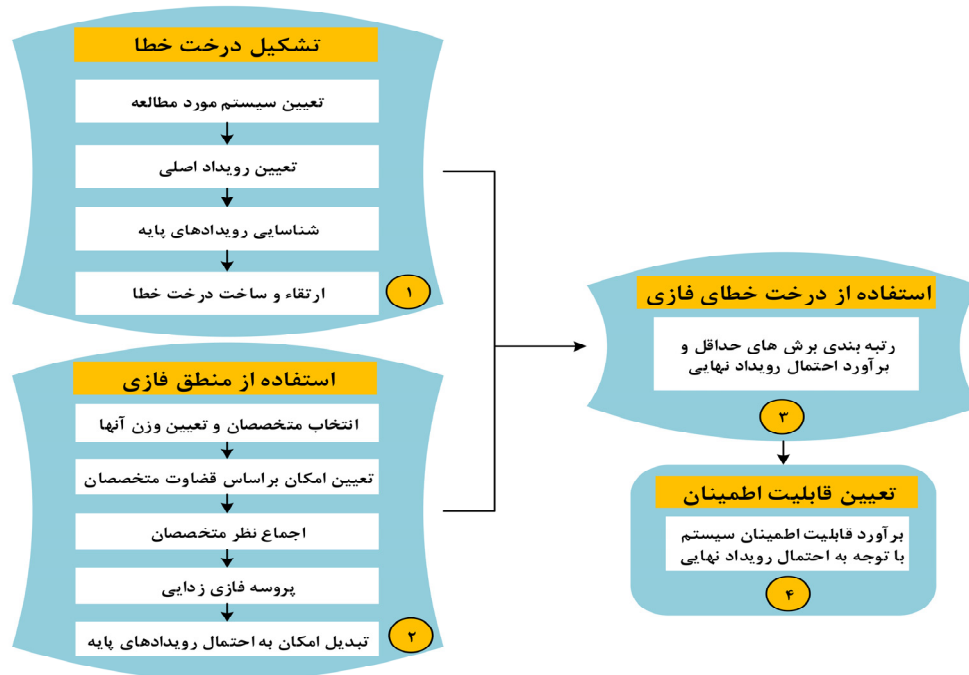
در مطالعات پیشین، Tyagi و همکاران (۲۰۱۱) از رویکرد FFTA برای ارزیابی ایمنی و قابلیت اطمینان ترانسفورماتور قدرت الکتریکی استفاده کردند (۳۰). در مطالعه دیگری Wang و همکاران (۲۰۱۳) به دلیل مبهم و غیردقیق بودن نرخ نقص رویدادهای پایه، آن‌ها را با اعداد فازی جایگزین کردند و سپس از رویکرد FFTA جهت برآورد احتمال آتش‌سوزی و انفجار مخازن نفتی بهره گرفتند (۳۱). Salunkhe و Deshpande (۲۰۱۸) با استفاده از FFTA به بررسی و تخمین قابلیت اطمینان فلاش تانک در یک مخزن ذخیره آمونیاک پرداختند (۳۲). در همین رابطه هر یک از آقایان لواسانی (۲۵)،

3. Fault Tree Diagram (FTD)

4. Minimal Cut Sets (MCSs)

1. Fuzzy logic

2. Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)



شکل ۱: مراحل اجرای مطالعه

۱) تشکیل درخت خطا

ماهیت درخت خطا نوعی نمودار درختی منطقی است که از نمادهای منطق بولی برای نشان دادن رویدادهای پایه و روابط منطقی بین آنها استفاده می‌کند. این امر می‌تواند عوامل خطر بالقوه ذاتی سیستم را با جزئیات بیشتری آشکار کند. در این مطالعه با استفاده از بررسی اسناد، نقشه‌های عملیاتی و مصاحبه با کارشناسان ذیصلاح درخت خطا ترسیم گردید. همچنین به منظور انتخاب رویدادهای پایه از رویکرد طوفان فکری و نظرات هیئت متخصصین استفاده شد. پروسه ترسیم FTD نیز با پیدا کردن علل هر یک از رویدادهای میانی تا رسیدن به رویدادهای پایه ادامه پیدا کرد. ساختار درخت خطا به وسیله دو گره (رویداد و دروازه منطقی) تشکیل شد و در نهایت به دنبال ترکیب رویدادهای پایه و رویدادهای میانی^۱ با استفاده از نمادهای منطقی (AND و OR)، رویداد نهایی توسط درخت خطا معرفی شد. در نهایت صحت درخت خطا توسط متخصصین مورد ارزیابی قرار گرفت.

1. Intermediate Events (IEs)

۲) ارزیابی FFTA

تعیین احتمال وقوع رویدادهای پایه توسط منطق فازی: دلیل استفاده از مجموعه‌های فازی کاهش سطح عدم قطعیت با در نظر گرفتن روابط بین فاکتورهای تأثیرگذار است (۳۴-۳۶). در این مرحله نحوه استفاده از منطق فازی در جهت تعیین احتمال وقوع هر یک از رویدادهای پایه به صورت گام به گام توضیح داده شد. در گام نخست، متخصصین با توجه به معیارهای موجود انتخاب و به هر کدام از آنها وزن مشخصی اختصاص داده شد. در گام بعد، با استفاده از پرسشنامه نظرات متخصصین جمع‌آوری و برای فازی‌سازی و اجماع نظرات ایشان با استفاده از روابط ریاضی امکان وقوع هر یک از رویدادهای پایه محاسبه گردید. در گام آخر نیز امکان وقوع رویدادهای پایه به احتمال وقوع آنها تبدیل گردید. انتخاب متخصصین گروه ارزیابی و تعیین وزن آنها: جامعه آماری این مطالعه شامل متخصصین شاغل در صنایع فرآیندی و حوزه مورد بررسی است. از آنجاکه دانش تخصصی افراد می‌تواند تحت تأثیر دیدگاه‌ها و اهداف

جدول ۱: نحوه امتیازدهی به متخصصین (۳۴)

امتیاز	رتبه‌بندی مقیاس	مقیاس وزن متخصصین	امتیاز	رتبه‌بندی مقیاس	مقیاس وزن متخصصین
۵	دکتر	سطح تحصیلات (مدرک تحصیلی)	۵	مدیرعامل	عنوان سازمانی (موقعیت کاری)
۴	فوق لیسانس		۴	مدیر	
۳	لیسانس		۳	مهندس	
۲	فوق دیپلم		۲	تکنسین	
۱	دیپلم		۱	کارگر	
۴	$50 \leq$	سن (سال)	۵	$30 \leq$	تجربه کاری (سال)
۳	۴۹-۴۰		۴	۲۹-۲۰	
۲	۳۹-۳۰		۳	۱۹-۱۰	
۱	≥ 30		۲	۹-۶	
			۱	$5 \geq$	

جدول ۲: امکان وقوع نقص و دامنه فازی دوزنقه‌ای (۴۳)

ترم‌های زبانی	امکان وقوع
خیلی کم (VL)	تابع عضویت فازی (۰/۱۰۰، ۰/۱۰۰، ۰/۱، ۰/۲)
کم (L)	(۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۲۵، ۰/۴)
متوسط (M)	(۰/۳، ۰/۱۵، ۰/۱۶، ۰/۱۷)
زیاد (H)	(۰/۱۶، ۰/۱۷۵، ۰/۱۸۵، ۰/۱۹)
خیلی زیاد (VH)	(۰/۱۸، ۰/۱۹، ۱، ۱)

بین ۵ تا ۹ متغیر باشند (۴۳). در این تحقیق از تابع عضویت دوزنقه‌ای با ترم‌های زبانی پنج متغیره همچون خیلی زیاد^۴، زیاد^۵، متوسط^۶، کم^۷ و خیلی کم^۸ استفاده شد؛ بنابراین در جدول (۲) توابع عضویت دوزنقه‌ای فازی و ترم‌های زبانی آن‌ها برای ارزیابی متخصصین به‌عنوان امکان وقوع رویدادهای پایه انتخاب شدند.

اجماع نظر متخصصین: روش‌های مختلفی برای اجماع اعداد فازی بدون دستورالعمل خاصی انتخاب می‌شود، مانند روش دلفی حداقل و حداکثر، روش دلفی فازی، رأی‌گیری فازی و غیره (۲۶). در واقع برای هم‌راستا

شخصی قرار بگیرد (۳۷)، لذا پروسه انتخاب متخصصین در این مطالعه با توجه به معیارهای سه‌گانه‌ای که توسط کوک و همکاران (۳۸) توصیه نموده‌اند صورت گرفت. متخصصین بر اساس مقیاس‌های همچون سطح تحصیلات، سن، میزان تجربه کاری مرتبط و عنوان سازمانی می‌توانند نظرات و پیشنهادهای متفاوتی نیز داشته باشند. به این منظور جهت تعیین وزن آن‌ها از روش توصیه‌شده توسط لوسانی و همکاران (۲۵) استفاده گردید؛ بنابراین، با مدنظر قرار دادن این‌چنین معیارها و مقیاس‌هایی یک فاکتور وزنی نسبی با امتیازدهی لیکرتی جهت برآورد امکان وقوع رویدادهای پایه مطابق با جدول (۱) به دست آمد.

فازی‌سازی و ارزیابی ذهنی متخصصین: هدف از این مرحله فازی‌سازی قضاوت متخصصین و استفاده از نظرات ایشان است. در همین راستا، قضاوت متخصصین به‌وسیله ترم‌های زبانی تعریف‌شده در قالب تابع عضویت^۱ اعداد فازی نمایان می‌شود (۳۹، ۴۰). به این منظور نمونه‌های پرکاربردی از توابع عضویت، تابع عضویت مثلثی^۲ و تابع عضویت دوزنقه‌ای^۳ قابل‌استفاده هستند (۴۱، ۴۲). با توجه به ظرفیت ذهنی انسان ترم‌های زبانی می‌تواند

4. Very High (VH)
5. High (H)
6. Median (M)
7. Low (L)
8. Very Low (VL)

1. Membership Functions
2. Triangular Membership Functions
3. Trapezoidal Membership Functions

استناد به مطالعات پیشین برای تبدیل امکان به احتمال از روابط (۳) و (۴) استفاده شد.

$$K = 2.301 \times \sqrt[3]{\frac{1}{FPS} - 1} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$FP = \begin{cases} 0 & FPS = 0 \\ \frac{1}{10^K} & FPS \neq 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۴}$$

۳) محاسبه MCSs و احتمال کلی

ارزیابی درخت خطا: همان طور که پیش تر اشاره شد، FTA با دو رویکرد کمی و کیفی انجام می شود. به طور کلی رویکرد کیفی مختص به شناسایی مخاطرات سیستم است و در صورت اتخاذ این روش با رویکرد کمی، می تواند جهت ارزیابی خطر سیستم استفاده شود (۲۴، ۴۷). در رویکرد کیفی، بررسی و تعیین MCSs کفایت می کند. گفتنی است که هر یک از این برش ها ترکیبی از رویدادهای پایه در جهت به وقوع پیوستن رویداد نهایی است. در رویکرد کمی، هم احتمالات رویداد نهایی و هم MCSs آنالیز و محاسبه می شود (۵). در این بخش برای محاسبه رویداد نهایی با استفاده از جبر بولین، از روابط پایین استفاده شد.

$$P_{AND}(E) = \prod_{i=1}^n P(E_i) = AND(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$P_{OR}(E) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(E_i)) = OR(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad \text{رابطه ۶}$$

در روابط (۵) و (۶)، $P_{AND}(E)$ معرف احتمال رویداد نهایی با استفاده از دروازه منطقی AND است. از طرفی $P_{OR}(E)$ نیز معرف احتمال رویداد نهایی با استفاده از دروازه منطقی OR است. Π نشان دهنده تمام رویدادهای ورودی و $P(E_i)$ نشان دهنده احتمال وقوع رویداد پایه است.

$$I_i = (P(TE) - P(TE)^{x_i=0}) / P(TE) \quad \text{رابطه ۷}$$

$$IM_i = P(M_i) / P(TE) \quad \text{رابطه ۸}$$

شدن قضاوت متخصصین در مورد امکان وقوع رویدادهای پایه، اجماع نظرات ایشان در نظر گرفته می شود. به این منظور متناسب با وزنی که متخصصین گرفتند، قضاوت آن ها وزن دهی شد. سپس وزن و قضاوت آن ها برای امکان وقوع هر یک از رویدادهای پایه اعمال گردید. این پروسه مطابق با معادله زیر بیان می گردد (۴۴).

$$\mu_{Agg}(BE_i) = \sum_{j=1}^m W_j \mu_{ij} \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,m \end{matrix} \quad \text{رابطه ۱}$$

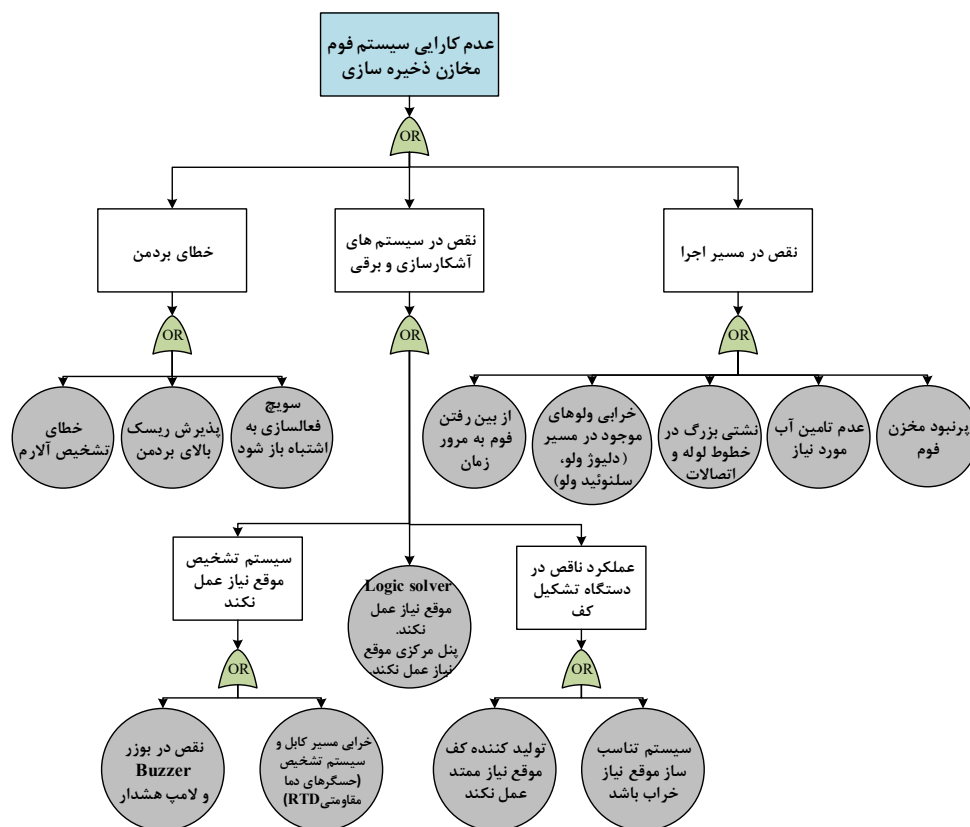
در این معادله، $\mu_{Agg}(BE_i)$ معرف اجماع نظر متخصصین، m تعداد کل متخصصین و W_j وزن نسبی متخصص j است. μ_{ij} نیز امکان وقوع BE_i می باشد که بر پایه ارزیابی متخصص j بیان شده است.

فازی زدایی و تبدیل امکان به احتمال وقوع رویدادهای پایه: تا این مرحله مقادیر اجماع نظر متخصصین بر پایه منطق فازی محاسبه شده است، لذا باید نظرات ایشان که به صورت اعداد فازی به دست آمده را طی پروسه فازی زدایی به اعداد قطعی^۱ و مشخص تبدیل کرد (۳۹). از این رو برای یک عدد فازی دوزنقه ای \tilde{H} با تابع عضویت $\mu_{\tilde{H}}(a_1, a_2, a_3, a_4)$ پروسه فازی زدایی و قطعی سازی تحت عنوان امتیاز امکان فازی^۲ به صورت معادله زیر پیشنهاد شده است (۴۵). در مطالعه حاضر نیز از اعداد فازی دوزنقه ای برای فازی سازی نظرات استفاده گردید.

$$FPS = \frac{1}{3} \left(\frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{a_4 + a_3 - a_1 + a_2} \right) \quad \text{رابطه ۲}$$

به این ترتیب امکان وقوع رویدادهای پایه به دست می آید. از آنجایی که محاسبات درخت خطا به صورت احتمال هر یک از رویدادهای پایه انجام می شود، آقایان لواسانی (۲۵) و یزدی (۲۶) تکنیک پیشنهادی توسط اُنیساوا^۳ (۴۶) را برای تبدیل امتیاز امکان فازی (FPS) به احتمال فازی (FP) بکار گرفتند؛ بنابراین، در این مطالعه با

1. Crisp Value
2. Fuzzy Possibility Score (FPS)
3. Onisawa



شکل ۲: درخت خطای ترسیم شده با رویداد نهایی «عدم کارایی سیستم فوم مخازن ذخیره‌سازی»

اطمینان (۴۸) سیستم از رابطه (۱۰) استفاده شد.

$$R(X) = e^{-\lambda t} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در رابطه بالا $R(X)$ معرف قابلیت اطمینان، e معرف عدد نپر، λ معرف نرخ شکست سالانه و t معرف بازه زمانی (سال) است.

یافته‌ها

کارایی سیستم‌های فوم در واحد مخازن قابل اشتعال ممکن است بر اثر مکانیسم‌های مختلفی به چالش کشیده شود. این امکان می‌تواند بر اثر عواملی همچون روش‌های تعمیر و نگهداری، عوامل طراحی سیستم، عوامل محیطی و خارجی به وجود بیاید. بر اساس بررسی‌های صورت

$$P(M_i) = \prod_{i \in M} P(BE_i) \quad \text{رابطه ۹}$$

به‌وسیله روابط (۷)، (۸) و (۹) می‌توان میزان اهمیت رویدادهای پایه، میانی و همچنین MCSs منتج به رویداد نهایی را محاسبه نمود. در روابط بالا IM_i بیانگر میزان اهمیت MCSs، $P(M_i)$ نیز احتمال MCSs، $P(BE_i)$ احتمال وقوع رویداد پایه و I_i معیاری برای میزان اهمیت فاسل-وسلی^۱ برای MCS_i است.

۴) تعیین قابلیت اطمینان^۲ (R)

در این بخش، بعد از برآورد احتمال شکست رویدادهای پایه و نهایی با استفاده از FFTA، به‌منظور برآورد قابلیت

1. Fussell-Vesely
2. Reliability

جدول ۳: ضرایب وزنی ارزیابی‌های هیئت متخصصین

متخصص	عنوان سازمانی	سطح تحصیلات	تجربه کاری	سن	امتیاز وزنی	مشخصات وزنی
۱	۴	۳	۴	۳	۱۴	۰/۲۲۹۵۱
۲	۲	۴	۲	۲	۱۰	۰/۱۶۳۹۳
۳	۳	۴	۴	۳	۱۴	۰/۲۲۹۵۱
۴	۳	۳	۴	۴	۱۴	۰/۲۲۹۵۱
۵	۲	۳	۲	۲	۹	۰/۱۴۷۵۴
جمع: ۶۱						جمع: ۱

جدول ۴: نحوه برآورد احتمال رویدادهای پایه و نهایی در یک سال از طریق نظر متخصصین

کد	قضاوت متخصصین					امکان وقوع	K	احتمال FP	احتمال TE
	۱	۲	۳	۴	۵				
BE01	L	M	VL	H	M	۰/۴۱۴	۲/۵۸۳۵	۰/۰۰۲۶۱	۰/۱۶۶۰۸
BE02	VL	M	VL	M	L	۰/۲۷۸	۳/۱۶۲۹	۰/۰۰۶۸۸	
BE03	M	L	M	H	M	۰/۳۶۸	۲/۸۰۳۷	۰/۰۰۱۵۸	
BE04	M	H	L	M	H	۰/۵۳۲	۲/۲۰۴۸	۰/۰۰۶۲۸	
BE05	M	M	M	M	H	۰/۵۳۵	۲/۱۹۵۹	۰/۰۰۶۳۹	
BE06	M	M	L	M	L	۰/۴۱۷	۲/۵۷۲۹	۰/۰۰۲۶۸	
BE07	H	H	M	M	H	۰/۶۵۵	۱/۸۵۸۳	۰/۰۱۳۹	
BE08	M	H	M	M	VH	۰/۶۲۰	۱/۹۵۴۶	۰/۰۱۱۱	
BE09	M	M	VH	L	H	۰/۵۸۰	۲/۰۶۶۳	۰/۰۰۶۸۳	
BE10	H	M	H	M	M	۰/۶۲۰	۱/۹۵۴۶	۰/۰۱۲۲	
BE11	M	M	H	M	VH	۰/۶۵۳	۱/۸۶۳۸	۰/۰۱۳۷	
BE12	VL	VL	VL	L	L	۰/۱۸۳	۳/۷۸۸۸	۰/۰۰۱۶۴	
BE13	H	H	H	M	VH	۰/۷۳۵	۱/۶۳۷۷	۰/۰۲۳۲	

منطقی OR و با رنگ خاکستری در انتهای هر شاخه درخت خطا مشخص شده‌اند. در مرحله بعد پرسشنامه ای جهت نظرسنجی در رابطه با رویدادهای پایه، آماده و بین متخصصین توزیع گردید.

در ادامه روند اجرایی این پژوهش، به منظور استفاده از منطق فازی جهت برآورد احتمال وقوع رویدادهای پایه، بر اساس معیارهای سه‌گانه مطالعه کوک و همکاران، ۵ نفر از متخصصین در قالب یک هیئت متخصص انتخاب شدند. سپس امتیاز و مشخصات وزنی هیئت متخصصین با

گرفته، برخی از عوامل شکست و عدم کارایی سیستم‌های فوم شامل نقص در سیستم‌های آشکارسازی و برقی (نقص در Buzzer و لامپ هشدار و ...)، نقص در مسیر اجرا (خرابی ولوها و نشستی بزرگ در مسیر و ...) و خطای بردمن (ریسک‌پذیری بالای بردمن و ...) است. در نهایت، برای عدم کارایی سیستم فوم مخازن یک درخت خطا تشکیل شده که در نمودار گرافیکی این درخت ۵ رویداد میانی و ۱۳ رویداد پایه تشخیص داده شد (شکل ۲). در درخت ارائه‌شده، تمامی رویدادهای پایه به وسیله دروازه

رویداد نهایی و با استفاده از معادله (۱۰) میزان قابلیت اطمینان سیستم ۰/۸۴۷۰ برآورد گردید. در ادامه نتایج حاصل از رویکردهای کمی و کیفی درخت خطا جهت محاسبه احتمال وقوع همه MCSs و رتبه‌بندی آن‌ها با استفاده از روابط (۷)، (۸) و (۹) به دست آمد. این نتایج و رتبه‌بندی‌ها در جدول (۵) قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۲) تمامی رویدادهای پایه می‌توانند به‌تنهایی به رویداد نهایی منتهی شوند، لذا هر کدام از آن‌ها یک برش حداقل را تشکیل می‌دهند و در نتیجه احتمال وقوع و احتمال برش حداقل آن‌ها با هم برابر است. شایان‌ذکر است که هدف کاربردی این رتبه‌بندی جهت شفاف‌سازی و اولویت‌بندی برای اقدامات پیشگیرانه است.

بحث

در این مطالعه از روشی مبتنی بر FFTA برای تحلیل علل خطا و تعیین احتمال عدم کارایی سیستم فوم مخازن ذخیره‌سازی و پیش‌بینی قابلیت اطمینان آن استفاده شده است. در ارزیابی خطر آتش‌سوزی، تعیین و برآورد قابلیت اطمینان سیستم‌های فوم به‌منظور جلوگیری از انتشار حریق امری ضروری است. بعد از ترسیم درخت خطا،

توجه به امتیاز کسب‌شده و با استفاده از روش نرمال‌سازی امتیازات محاسبه گردید. وزن‌های نهایی برای هر کدام از هیئت متخصصین (۰/۲۲۹۵۱، ۰/۱۶۳۹۳، ۰/۲۲۹۵۱) برآورد شد که نحوه امتیازدهی به ایشان در جدول (۳) قابل مشاهده است. پس از تشکیل و ارتقاء درخت خطا، از طریق توزیع پرسشنامه‌هایی اقدام به جمع‌آوری نظرات متخصصین به‌منظور بررسی امکان شکست هر یک از رویدادهای پایه دخیل در عدم کارایی سیستم فوم گردید و از این طریق نظرات هر یک از اعضای هیئت متخصصین ثبت شد. لازم به ذکر است که امکان شکست ۱۳ رویداد پایه با توجه به نظرات متخصصین و با استفاده از اعداد فازی ذوزنقه‌ای محاسبه گردید. نتایج ارزیابی متخصصین به‌وسیله ترم‌های زبانی برای محاسبه امکان و احتمال وقوع رویدادهای پایه و همچنین مقدار احتمال سالانه رویداد نهایی به‌صورت خلاصه در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به برآورد کمی درخت خطا، با استفاده از دروازه‌های منطقی و روابط (۵) و (۶) احتمال شکست برای رویداد اصلی یعنی عدم کارایی سیستم فوم مخازن، ۰/۱۶۶۰۸۶ به دست آمد. درنهایت، پس از مشخص شدن احتمال شکست

جدول ۵: آنالیز میزان اهمیت MCSs منجر به رویداد اصلی

شماره MCS	رویدادهای موجود در MCS	تعریف	میزان اهمیت IM_i	رتبه
MCS01	BE01	پر نبودن مخزن فوم	۰/۰۱۵۷	۱۰
MCS02	BE02	عدم تأمین آب موردنیاز	۰/۰۰۴۱	۱۲
MCS03	BE03	خرابی ولوهای موجود در مسیر (سلونوئید ولو، دلیوژ ولو و غیره)	۰/۰۰۹۵	۱۱
MCS04	BE04	نشستی بزرگ در خطوط لوله و اتصالات	۰/۰۳۷۸	۸
MCS05	BE05	از بین رفتن فوم به‌مرورزمان	۰/۰۳۸۴	۷
MCS06	BE06	عمل نکردن پنل مرکزی موقع نیاز (نقص در عملکرد Logic solver)	۰/۰۱۶۱	۹
MCS07	BE07	تنظیم اشتباه کلید فعال‌سازی	۰/۰۸۳۶	۲
MCS08	BE08	پذیرش ریسک بالای بردمن	۰/۰۶۶۸	۵
MCS09	BE09	خطای تشخیص آلام	۰/۰۵۱۹	۶
MCS10	BE10	خرابی سیستم تناسب‌ساز موقع نیاز	۰/۰۷۳۴	۴
MCS11	BE11	عمل نکردن تولیدکننده کف به صورت ممتد	۰/۰۸۲۴	۳
MCS12	BE12	نقص در Buzzer و لامپ هشدار	۰/۰۰۰۹	۱۳
MCS13	BE13	خرابی مسیر کابل‌ها و سیستم تشخیص (حسگرهای دما مقاوم ^۱ RTD)	۰/۱۳۹۰	۱

^۱ Resistance Temperature Detectors (RTD)

همانند مطالعه حاضر به بیان وجود محدودیت‌هایی در محاسبه احتمال رویدادهای پایه پرداخته‌اند و همچنین غالباً کمبود داده‌های نرخ نقص و عدم قطعیت در صنایع فرآیندی را گزارش کرده‌اند.

نکته قابل توجه در ترسیم درخت خطا در مطالعه حاضر بررسی مداخله انسان و تأثیر آن بر قابلیت اطمینان سیستم است، در صورتی که چنین تأثیری در درخت خطای جهانی شکست سیستم فوم (۴۹) مدنظر قرار نگرفته است. نتایج درخت خطا این مطالعه در مقایسه با درخت خطای جهانی نشان می‌دهد که در بررسی درخت جهانی، بیشترین احتمال نقص به ترتیب مربوط به سیستم کف‌ساز (۵۶/۶ درصد)، سیستم تناسب‌ساز (۲۲/۹ درصد) و در دسترس نبودن منبع آب (۱۲/۵۶ درصد) بوده است (۴۹) و این در حالی است که در مطالعه حاضر خرابی مسیر کابل و سیستم تشخیص (۲۴/۲ درصد)، تنظیم اشتباه کلید فعال‌سازی (۱۳/۵ درصد) و ممتد عمل نکردن تولیدکننده کف (۱۳/۳ درصد) از جمله رویدادهای مهم برای عدم کارایی و کاهش قابلیت اطمینان سیستم بشمار رفته‌اند.

در این مطالعه بر اساس نتایج به دست آمده با فرمول فاسل-وسلی، خرابی مسیر کابل‌ها و سیستم تشخیص (حسگرهای دما مقاومتی RTD) و تنظیم اشتباه کلید فعال‌سازی بیشترین اهمیت و سهم را در عدم کارایی سیستم فوم به خود اختصاص دادند. حسگرهای دما مقاومتی RTD به منظور پایش مداوم دما در مسیرهای عبور سیال تعبیه می‌شوند. از آنجایی که این حسگرها با عبور جریان از یک مقاومت، دما را پایش می‌کنند، ممکن است گرمایش خود به خودی در این حسگرها با توجه به میزان جریان عبوری اتفاق بیافتد و در نتیجه باعث خطا در اندازه‌گیری دما شود. بزرگی این خطا بسته به جرم حسگر، ساختار داخلی آن و میزان جریان اندازه‌گیری شده متغیر است (۵۰).

علاوه بر خرابی‌هایی که ممکن است با نقص در سیستم به وجود آیند، به دلیل تمام خودکار نبودن این نوع از سیستم‌ها و تعامل با انسان، جنبه‌های انسانی نیز

درستی و اعتبار آن یکی از مهم‌ترین مراحل است که باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. علیرغم اینکه پژوهشگران در صنایع از طیف وسیعی بوده و معمولاً دارای تجارب خوبی هستند، اما با تمام جوانب سیستم‌ها آشنا نیستند و از سوی دیگر صنعت‌گران هم اطلاعات کافی در خصوص روش‌های جدید تحقیق را ندارند، از این رو تعامل بین صنعت و دانشگاه به خوبی می‌تواند امکان تبادل اطلاعات را فراهم آورد؛ بنابراین، پس از ترسیم درخت خطای سیستم فوم و انتخاب دروازه‌های منطقی بین رویدادهای پایه، امکان و درستی آن‌ها بین هیئت متخصصین در صنعت بر اساس طوفان فکری مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

در گام بعد، به منظور برآورد قابلیت اطمینان یک سیستم ابتدا می‌بایست میزان احتمال شکست آن محاسبه گردد. در این مطالعه احتمال شکست سیستم با استفاده از روش پرکاربرد درخت خطا صورت گرفت. در FTA متعارف، باید احتمالات شکست رویدادهای پایه به صورت دقیق و معتبر قابلیت دسترسی را داشته باشند؛ بنابراین، با توجه به موارد مذکور، در این تحقیق نیز به دلیل موجود نبودن چنین اطلاعاتی از رویکرد فازی استفاده شده است. رویکرد مطالعه حاضر با تحقیقات کبیر و همکاران (۲۰۲۰) (۲۳)، یزدی و همکاران (۲۰۱۷) (۲۷)، بهرامی و همکاران (۲۰۲۱) (۲۴)، بک بکی و همکاران (۲۰۱۷) (۲۲) از لحاظ نحوه کمی‌سازی و برآورد احتمال شکست با استفاده از منطق فازی هم‌خوانی دارد. در مطالعه اختر و کیرمانی (۲۰۲۰) برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم انرژی بادی ۴۱ رویداد پایه شناسایی و احتمالات رخداد آن‌ها به روش FFTA محاسبه شده است (۲۰). همچنین حیرانی و بقایی (۲۰۱۶) برای غلبه بر نبود اطلاعات جهت برآورد احتمالات شکست رویدادهای پایه و همچنین ارزیابی ریسک خطوط نفت و گاز از منطق فازی و ترم‌های زبانی استفاده کردند (۲۱). در مطالعه دیگر، لواسانی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از FFTA و به کارگیری ترم‌های زبانی به کمی‌سازی ریسک نشستی در چاه‌های نفت و گاز طبیعی پرداختند (۲۵). مطالعات فوق

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به‌کارگیری منطق فازی و استفاده از نظرات کارشناسان می‌تواند تا حد قابل قبولی باعث افزایش دقت در محاسبات و تسهیل در ارزیابی درخت خطا شود. بر این اساس چارچوبی کاربردی معرفی و در نهایت احتمال وقوع رویداد نهایی و شکست MCSs محاسبه شد. در نهایت با به دست آوردن احتمال شکست رویداد نهایی، میزان قابلیت اطمینان سیستم محاسبه گردید.

به‌طور کلی، در ارزیابی شکست سیستم فوم مشخص شد که عوامل مختلفی همچون جنبه‌های انسانی و فنی می‌تواند مستقیماً به‌عنوان یک عامل اولیه مهم در شکست سیستم فوم مؤثر باشد. با توجه به میزان به‌دست‌آمده قابلیت اطمینان در این مطالعه (۸۵ درصد) و همچنین اهمیت عملکرد این نوع از موانع ایمنی در اطفاء حریق مخازن، توصیه می‌شود تا سیستم‌های فوم ثابت به‌طور سالانه در برنامه‌های اورهال صنایع مشابه به‌صورت کاملاً کنترل‌شده مورد آزمون قرار گیرد و نحوه عملکرد آن بررسی شود.

در این مطالعه ایده کلی این است که متخصصین، مهندسان و تحلیلگران مرتبط با چنین موانع ایمنی، با تکنیک‌های اطلاعاتی و علم داده همکاری بیشتری داشته باشند و به چالش‌های همراه با توسعه فنی رسیدگی کنند. لذا پیشنهاد می‌گردد از رویکرد معرفی‌شده برای بررسی قابلیت اطمینان سایر موانع ایمنی مخازن ذخیره‌سازی نیز استفاده شود.

تشریح و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای به شماره ۱۴۰۰۲۲۸۱۴۸۷ انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از کارکنان و متخصصین محترم پتروشیمی شیراز و دانشگاه علوم پزشکی همدان به دلیل همکاری ارزشمندشان در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

می‌تواند در عدم کارایی سیستم سهیم باشد. از این رو یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در عدم کارایی سیستم فوم تنظیم اشتباه کلید فعال‌سازی به‌وسیله انسان است که این رویداد پایه زیرمجموعه‌ای از خطای انسانی بشمار می‌آید. در به وجود آمدن این رویداد پایه که از خطای انسانی نشئت می‌گیرد، عمدتاً عواملی همچون استرس، بارکاری زیاد، خستگی و غیره دخیل هستند (۳۹)؛ بنابراین می‌بایست علاوه بر تقویت نگهداری و مدیریت جنبه‌های فنی سیستم، به جنبه‌های انسانی نیز توجه بیشتری شود.

در این مطالعه میزان قابلیت اطمینان سیستم در $R(X) = e^{-\lambda t}$ تقریباً ۸۵ درصد محاسبه گردید. این میزان از قابلیت اطمینان، برای چنین سیستم‌هایی که از اهمیت بالایی برخوردار هستند، پایین به حساب می‌آید. بنابراین باید با کنترل و حذف رویدادهای پایه دارای اهمیت بالا، قابلیت اطمینان سیستم را بهبود و میزان خسارات احتمالی واردشده در زمان وقوع آتش‌سوزی مخازن را کاهش داد. از جمله محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به محدود بودن تعداد متخصصان حوزه موردبررسی اشاره داشت.

نتیجه‌گیری

سیستم‌ها و ادوات اطفاء حریق همچون سیستم‌های فوم پیچیدگی خاصی ندارند. باین‌حال، نادیده گرفتن برخی از ویژگی‌های ساده این تجهیزات در هنگام نصب و راه‌اندازی آن‌ها می‌تواند کارایی چنین سیستم‌هایی را به خطر بیندازد. در این تحقیق، عدم کارایی سیستم‌های فوم ثابت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ادوات مؤثر برای اطفاء حریق مخازن ذخیره‌سازی موردبررسی و مطالعه قرار گرفت. مشکلات مطالعه حاضر همچون مطالعات دیگر، کمبود نرخ نقص برای محاسبه احتمال وقوع رویدادهای پایه بود که پس از تشکیل درخت خطا، برای محاسبه این احتمالات از منطق فازی به‌عنوان یک پایگاه داده مؤثر استفاده گردید.

REFERENCES

- Ding L, Khan F, Ji J. Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. *Process Saf Environ Prot.* 2020;135:282-93.
- Limin W. Fault tree analysis for oil tank fire and explosion. In: 2010 IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences. IEEE; 2010. p. 488-91.
- Chang JI, Lin CC. A study of storage tank accidents. *J Loss Prev Process Ind.* 2006;19(1):51-9.
- Jamadar A, Adam RA, Shabbir SA, Danish I, Saahil M. Design of Automated Fire and Safety System in Tanks and Vessels. *Int Res J Eng Technol.* 2018;05(04):3139-42.
- Zarei E, Mohammadfam I, Azadeh A, Khakzad N, Mirzai M. Dynamic risk assessment of chemical process systems using Bayesian Network. *Iran Occupational Health.* 2018;15(3):103-17. [Persian]
- Li L, Dai L. Review on fire explosion research of crude oil storage tank. Anpo M, Song F, editors. *E3S Web Conf.* 2021 Feb 9;236:01022.
- Aliabadi MM, Ramezani H, Kalatpour O. Application of the bow-tie analysis technique in quantitative risk assessment of gas condensate storage considering domino effects. *Int J Environ Sci Technol.* 2021;1-14.
- American Petroleum Institute. *API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage. Policy.* 2007;552(3).
- Association NFPA. *Flammable and Combustible Liquids Code Handbook.* National Fire Protection Association; 2012.
- Pantousa D. Numerical study on thermal buckling of empty thin-walled steel tanks under multiple pool-fire scenarios. *Thin-Walled Structures.* 2018;131(January):577-94.
- Misuri A, Landucci G, Cozzani V. Assessment of safety barrier performance in Natech scenarios. *Reliability Engineering and System Safety.* 2020;193:106597.
- Misuri A, Landucci G, Cozzani V. Assessment of safety barrier performance in the mitigation of domino scenarios caused by Natech events. *Reliability Engineering and System Safety.* 2021;205:107278.
- RP A. Interim Study—Prevention and suppression of fires in large aboveground atmospheric storage tanks. 1998. American Petroleum Institute. 2021.
- Mehr BY, Bornatan T, Emdadi M. Evaluation of oil tank fire extinguishing system in warehouses. *Journal of New Research Approaches in Management and Accounting.* 2021;151-9. [Persian]
- Chutelkar P, Mishra MK. Safety in petroleum industry. *Int Res J Eng Technol.* 2019;6(06).
- Yusoff YF, Mohd-Lair NA, Tsen M, Harman M. Case study on Designing a Comprehensive Fire Protection System for KY Power Station. In: *Journal of Physics: Conference Series 2020 (Vol. 1529, No. 3, p. 032098).* IOP Publishing.
- Ciani L, Guidi G, Galar D. Reliability evaluation of an HVAC ventilation system with FTA and RBD analysis. In: 2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE; 2020. p. 1-5.
- Aliabadi MM, Gholamizadeh K. Locating urban CNG stations using quantitative risk assessment: using the Bayesian network. *Safety and Reliability.* 2021; 40(1):48-64.
- Zarei E, Gholamizadeh K, Khan F, Khakzad N. A dynamic domino effect risk analysis model for rail transport of hazardous material. *J Loss Prev Process Ind.* 2022;74:104666.
- Akhtar I, Kirmani S. An application of fuzzy fault tree analysis for reliability evaluation of wind energy system. *IETE Journal of Research.* 2022;68(6):4265-78.
- Heyrani P, Baghaei A. Risk assessment in gas and oil pipelines based on the fuzzy Bow-tie technique. *Journal of Health and Safety at Work.* 2016;6(1):59-71. [Persian]
- Bakbaki A, Nabhani N, Anvaripour B, Shirali G. Probabilistic risk assessment using fuzzy fault tree analysis based on two types of failure possibility distributions in process industries. *Journal of Occupational Hygiene Engineering.* 2017;4(2):41-52. [Persian]
- Kabir S, Geok TK, Kumar M, Yazdi M, Hossain F. A Method for Temporal Fault Tree Analysis Using Intuitionistic Fuzzy Set and Expert Elicitation. *IEEE Access.* 2020;8:980-96.
- Bahrami S, Sotoudeh A, Jamshidi N, Elmi MR, Poorsoleiman MS. Application of Fuzzy Fault Tree Analysis in Risk Assessment of Ammonia Tank Explosion Scenario. *Journal of Health and Safety at Work.* 2021;11(4):577-80. [Persian]
- 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.
- Yazdi M. Hybrid probabilistic risk assessment using fuzzy FTA and fuzzy AHP in a process industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention.* 2017;17:756-64.
- Yazdi M, Nikfar F, Nasrabadi M. Failure probability analysis by employing fuzzy fault tree analysis. *Int J Syst Assur Eng Manag.* 2017;8:1177-93.

28. Mirza S, MJ J, M O, SMR ML. The application of Fuzzy logic to determine the failure probability in Fault Tree Risk Analysis. *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention*. 2014;2(2):113-24. [Persian]
29. Ramzali N, Lavasani MRM, Ghodousi J. Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing Fuzzy Event Tree Analysis. *Safety Science*. 2015 Oct;78:49-59.
30. Tyagi SK, Pandey D, Kumar V. Fuzzy fault tree analysis for fault diagnosis of cannula fault in power transformer. *Applied Mathematics*. 2011. 30;2(11):1346.
31. Wang D, Zhang P, Chen L. Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks. *J Loss Prev Process Ind*. 2013;26(6):1390-8.
32. Salunkhe S, Deshpande A. Estimation of fuzzy reliability: A case study for flash vessel in ammonia storage tank. In: *Data Science and Knowledge Engineering for Sensing Decision Support*. World Scientific; 2018. p. 1400-6.
33. Abedzadeh S, Roozbahani A, Heidari A. Risk Assessment of Water Resources Development Plans Using Fuzzy Fault Tree Analysis. *Water Resour Manag*. 2020 2;34(8):2549-69.
34. Aghaei H, Aliabadi MM, Mollabahrami F, Najafi K. Human reliability analysis in de-energization of power line using HEART in the context of Z-numbers. *PLoS One*. 2021;16.
35. Mohammadfam I, Gholamizadeh K. Assessment of Security Risks by FEMA and Fuzzy FEMA Methods, A Case Study: Combined Cycle Power Plant. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*. 2021;8(2):15-23. [Persian]
36. Gholamizadeh K, Kalatpour O, Mohammadfam I. Evaluation of Health Consequences in Chemicals Road Transport Accidents Using a Fuzzy Approach. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*. 2019;6(3):1-8. [Persian]
37. Serman JD, Ford D V. Expert knowledge elicitation to improve mental and formal models. *Syst Approach to Learn Educ into 21st Century*. 1997;1:19-22.
38. Cooke RM, ElSaadany S, Huang X. On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes. *Reliability Engineering and System Safety*. 2008;93(5):745-56.
39. Mirzaei Aliabadi M, Mohammadfam I, Salimi K. Identification and evaluation of maintenance error in catalyst replacement using the HEART technique under a fuzzy environment. *Int J Occup Saf Ergon*. 2021;0(0):1-13.
40. Aliabadi MM. Human error analysis in furnace start-up operation using HEART under intuitionistic fuzzy environment. *J Loss Prev Process Ind*. 2021;69:104372.
41. Wang J. A subjective methodology for safety analysis of safety requirements specifications. *IEEE Trans Fuzzy Syst*. 1997;5(3):418-30.
42. Mahdinia M, Aliabadi MM, Soltanzadeh A, Soltanian AR, Mohammadfam I. Identifying, Evaluating and Determining of The Most Important Predictive Variables of Safety Situation Awareness Using Fuzzy Logic Approach. *Journal of Health and Safety at Work*. 2021;11(2):176-95. [Persian]
43. Miller GA. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychol Rev*. 1956;63(2):81-97.
44. Clemen RT, Winkler RL. Combining probability distributions from experts in risk analysis. *Risk Analysis*. 1999;19(2):187-203.
45. Nguyen HT, Prasad NR. *Fuzzy modeling and control: selected works of sugeno*. CRC press; 1999.
46. Onisawa T. An application of fuzzy concepts to modelling of reliability analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 1990;37(3):267-86.
47. Halloul Y, Chiban S, Awad A. Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019. 18;41(8):948-58.
48. Cai Y, Wang Y, Chen W, Gao J. Reliability assessment of monitoring device for mechanical failure of high voltage circuit breaker based on FTA. In: *2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. IEEE; 2014. p. 1-4.
49. Necci A, Argenti F, Landucci G, Cozzani V. Accident scenarios triggered by lightning strike on atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*. 2014;127:30-46.
50. Chauhan J, Neelakantan U. An experimental approach for precise temperature measurement using platinum RTD PT1000. In: *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. IEEE; 2016. p. 3213-5.