

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Application of Fuzzy Fault Tree Analysis in Risk Assessment of Ammonia Tank Explosion Scenario

Sajad Bahrami<sup>1,\*</sup>, Ahad Sotoudeh<sup>1</sup>, Naser Jamshidi<sup>2</sup>, Mohammad Reza Elmi<sup>1</sup>, Mohammad Saeid Poorsoleiman<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>2</sup> Department of HSE, National Petrochemical Company, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of HSE, Kermanshah petrochemical company, Kermanshah, Iran

Received: 2018-07-10

Accepted: 2019-05-04

### ABSTRACT

**Introduction:** Chemical industries often have risks for the environment and communities, due to the use of complex facilities and processes. Also, in the ammonia tanks, the probability of risk of explosion is high, owing to their specific characteristics. The aim of this study is to evaluate the risks of explosion scenario at the ammonia tank in the Kermanshah petrochemical complex

**Material and Methods:** To achieve the purpose of this study, the Fuzzy Fault Tree Analysis (FTA) method was used to estimate the probability of reliability in the basic events. In this study, after drawing Fault Tree for identifying basic events, the probability of basic events was estimated by means of expert's elicitation, and the probability of minimal cut sets was computed through Boolean logic gates.

**Results:** According to the results, the probability of occurrence of the top event was obtained equal to 0/054997. In the minimal cut set prioritizing, the failing of pressure safety valves identified as the most effective factor in the top event occurrence, and afterward failing the control valves and human errors were identified.

**Conclusion:** This study indicates that, based on expert elicitation, a fuzzy error tree method can be used to assess the risk of various scenarios in the industry. Overall, in assessing the risk of the explosion scenario in the ammonia reservoir, it was found that some minor defects, and even human error, could be considered as a major contributor to the explosion.

**Keywords:** Risk assessment, Explosion, Fuzzy Fault Tree Analysis

### 1. INTRODUCTION

Rapid growth and constantly increasing capacity of chemical industries are associated with potential risks to the environment and surrounding communities. In addition to industrial facilities, chemicals also have inherently hazardous properties. They can be flammable, explosive, toxic, or corrosive. Ammonia is used widely in processing industries as feed, coolant, or sustainable source of energy. Consequences of releasing toxic materials

can be measured by criteria such as IDLH<sup>1</sup>, and TLV-TWA<sup>2</sup>. Fault Tree Analysis is a safety and reliability assessment method used widely to evaluate complex systems. Fault tree is a graphic model of showing base even failure in an assumed scenario in a system. This graphic model shows consecutive or parallel faults that can lead to the main event or intended scenario. The fault tree can be used to assess the existing systems or evaluate the designed systems. Fuzzy probability is a membership function of fuzzy numbers, and is

\* Corresponding Author Email: [s.bahrami98@gmail.com](mailto:s.bahrami98@gmail.com)

1 Immediately Dangerous to Life or Health  
2 Threshold Limit Value – Time Weighted Average

used to show uncertainties in reliability assessment of base events in a fault tree. In this approach, quantification of the fault tree, i.e. reliability of base events, intermediate events, and final event is based totally on fuzzy concepts. “AND” and “OR” gates in Boolean logic are also replaced by fuzzy combination rules.

## 2. MATERIAL AND METHODS

Kermanshah Petrochemical Complex, with a total area of 300 hectares, is located in Harsin. The complex daily produces 1200 tons of liquid ammonia and 2000 tons of urea fertilizer. The present study aims to assess the risk of ammonia reserve-tank explosion in Kermanshah Petrochemical Complex. The research method is defined as an eight-stage process based on fuzzy fault tree method.

1. The fault tree shows a systematic and logical record of base events leading to a top event positioned on the top of the fault tree, and provides a framework of qualitative and quantitative study of the top event. Top event is usually assumed an accident or an unwanted event. Real or initial base events are positioned in lower parts of a fault tree.

Each one of the gates is explained by a logical equation of the input events. As the fault tree is developed, needs and selected topics are recognized, the top event is defined, and objective and accuracy of the fault tree is determined. A series of “AND” and “OR” gates can form logical relationships between the base events.

2. The experts’ opinions on base events of the ammonia reserve-tank (TK-5101) explosion scenario are collected in this stage. In the present study, twenty base events are extracted from brainstorm and analysis of managers and experts’ opinions, especially those of Kermanshah Petrochemical Complex staff.

The questionnaires were distributed to different departments in order to reflect the experts’ opinion using Delphi method, as well as the department manager’s opinion. The questionnaires were designed to collect the experts’ viewpoints about

probability of 20 base events based on linguistic terms of probability of occurrence (very low, low, medium, high, very high). Indeed, six experts from different departments of Kermanshah Petrochemical Complex were asked to score the probability of 20 base events related to ammonia reserve-tank explosion scenario in accordance with Table 1.

3. Fuzzification of Opinions: In this stage, three numbers (fuzzy numbers) are attributed to each one of the linguistic terms using triangular fuzzy numbers.

4. Quantification and Expert Consensus: Weight of each expert is measured by age, experience, level of education, and corporate title.

5. Defuzzification: Defuzzification is a method of converting the fuzzy opinions and scores into single numbers using specific algorithms.

6. After defuzzification of the numbers, a single number is produced for each one of the base events; but, considering the fact that these numbers are extracted from direct defuzzification of experts’ opinions, they are referred to as failure possibility of the base events. The failure possibility values shall be converted to failure probability of the base events using the respective equations. The failure probability is indeed the same single number extracted from defuzzification of the numbers.

7. After calculating the failure probability of all base events of the scenario, failure probability of the minimal cuts can be calculated based on gates allocated to the base events to work out failure probability of the top event.

8. In this stage, base events and minimal cut sets extracted from analysis of the base events can be ranked in order to show which one of the minimal cuts are most likely to occur in the top event, and prioritize the events.

In summary, in this method, the fault tree was developed for ammonia reserve-tank explosion scenario and base events were identified. Afterward, a questionnaire was used to collect the experts’ opinions and failure probability of the base

Table 1. Definition of linguistic terms of probability of occurrence

Probability	Fuzzy Numbers ( $a_1, a_2, a_3$ )	Linguistic term	No.
0.0001>	(0.0, 0.1, 0.2)	very low	1
0.0001 – 0.001	(0.1, 0.25, 0.4)	low	2
0.001 – 0.01	(0.3, 0.5, 0.7)	medium	3
0.01 – 0.1	(0.6, 0.75, 0.9)	high	4
0.1<	(0.8, 0.9, 1)	very high	5

Table 2. Probability and Priority of Minimal Cut Sets Leading to the Top Event in Explosion Scenario

Minimal Cut Sets		Description	Failure Probability	Priority	Probability of Top Event (TE)
MCS1	BE1	Failure of Compressor 5051	0.00213	11	0.054997
MCS2	BE2	Malfunction of PSV	0.013	1	
MCS3	BE3	Control Valves Failure	0.0071	2	
MCS4	BE4	Return of Gasses from Feed Tank	0.0031	7	
MCS5	BE5	Mechanical Seal Damages in Compressor 2105	0.0036	4	
MCS6	BE6	False Transmitter Information	0.0035	5	
MCS7	BE7	Compulsory Shut-Down of Compressor 2015	0.0013	14	
MCS8	BE8	Oil Pump Failure	0.0015	12	
MCS9	BE9	Blockage of Oil Filters	0.00225	10	
MCS10	BE10	Power Outage and Failure of GTGs	0.00049	17	
MCS11	BE11	Increased Flow of HPS Vapor	0.00154	13	
MCS12	BE12	Failure of Super Heater	0.0031	8	
MCS13	BE13	Failure of Boiler	0.00338	6	
MCS14	BE14	Primer Failure	0.00124	15	
MCS15	BE15	Lack of Cathode Protection	0.00059	16	
MCS16	BE16	Lack of Routine Thickness Inspection	0.0028	9	
MCS17	BE17	Failure of Earthing During Lightning	0.00017	18	
MCS18	BE18	Natural Circumstances	0.00015	19	
MCS19	BE19	Terrorist Attacks	$4.3 \times 10^{-5}$	20	
MCS20	BE20	Human Mistake	0.005	3	

events was extracted from linguistic terms. After fuzzification of experts' opinions and converting the fuzzy numbers to non-fuzzy numbers, failure probability of each base event was calculated using a series of mathematical equations. After calculating failure probability of the base events, probability of the top event, i.e. explosion of ammonia reserve-tank, was calculated using "AND" and "OR" gates equations and minimal cuts were ranked and prioritized.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In the present study, a fault tree was developed for ammonia reserve-tank explosion scenario. Graphic diagram of this tree consists of 24 base events. All gates in this tree are of "OR" type. After a close study of the fault tree and similar base events in different branches, 20 base events were confirmed and the respective scenario was prepared and distributed among the experts in order to survey the failure probability of the base events. The experts' opinion about failure probability of the base events of the explosion scenario was collected and the basic results were extracted from opinions of six experts.

Afterward, the experts' opinions were

quantified based on four factors including age, experience, education, and expertise. Final weight of the experts' opinion was calculated by normalizing the scores they acquired from the total scores. Accordingly, the six experts' opinions about each one of the 17 base events were fuzzified using triangular fuzzy numbers.

After applying weight of experts to their opinions, the triangular fuzzy numbers had to be defuzzified using center of gravity algorithm. Considering the fact that the fuzzy numbers in this study were triangular, the defuzzification results had to be converted to failure probability.

After defuzzification of the fuzzy numbers and working out failure possibility of the base events, the failure possibilities were converted to failure probability of the base events as shown in Table 2. Finally, failure probability of ammonia reserve-tank explosion scenario was calculated. After working out failure probability of the base events, probability of the top event in tank explosion scenario can be calculated using mathematical equation. It must be noted that in this scenario, considering the fact that "OR" logical relations are used to combine the base events, the minimal cuts are assumed the same base events.

In order to show importance and significance of minimal cut sets in occurrence of the top event, the minimal cuts can be ranked in this scenario.

In risk assessment of scenarios, considering the fact that FTA method is capable of calculating probability of the top event, and that failure probability of the base events must be available in the classical fault tree method, the fuzzy FTA method was used in the present study, because the required information was not available in Kermanshah Petrochemical Complex. Failure probability of the top event in ammonia reserve-tank explosion scenario is estimated 0.054997. FTA method makes it possible to identify the links between a base event and the top event and calculate their probability. Results of the present study and prioritization of the minimal cut Sets show that the first priority in ammonia reserve-tank explosion scenario is the second minimal cut, i.e. malfunction of pressure safety valves (PSV), followed by third minimal cut set (fracture of control valves) and twentieth minimal cut Set (human mistakes). It must be noted that where fault tree of ammonia reserve-tank explosion scenario is developed based on brainstorm, all gates are based on "OR" logic, which means that each one of the base events can lead to

ammonia reserve-tank explosion. Generally, due to remarkable uncertainties in complex industries like petrochemical industries, it is not possible to make certain decisions about priority of explosion risk or any other risks. Therefore, it is critically important to take all priorities into consideration in HSE<sup>3</sup> management.

#### 4. CONCLUSIONS

Assessment of ammonia reserve-tank explosion risk showed that small defects and even unintended human mistakes can be important factors (base events) leading to an explosion (top event). Although risk assessment of different scenarios and their effects on environment and surrounding communities requires collecting detailed information on failure probability of equipment or shortcomings of procedures and activities, results of the present study and similar studies show that it is possible to assess different risk scenarios using experts' opinions in form of a fuzzy fault tree. Therefore, using experts' opinions plays an important role in estimating probability of the top event, even where failure probability of equipment, facilities, or procedures of the industry is recorded.

---

<sup>3</sup> Health, Safety, and Environment

## کاربرد روش آنالیز درخت خطای فازی برای ارزیابی ریسک سناریو انفجار در مخزن آمونیاک

سجاد بهرامی<sup>۱</sup>، احد ستوده<sup>۱</sup>، ناصر جمشیدی<sup>۲</sup>، محمدرضا علمی<sup>۱</sup>، محمد سعید پورسلیمان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

<sup>۲</sup> دپارتمان بهداشت، ایمنی و محیط زیست، شرکت ملی صنایع پتروشیمی، تهران، ایران.

<sup>۳</sup> واحد HSE، شرکت صنایع پتروشیمی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۴

### مکیده

**مقدمه:** صنایع شیمیایی به دلیل استفاده از تأسیسات و فرایندهای پیچیده همواره ریسک‌هایی برای محیط‌زیست و جوامع به همراه دارند. در مخازن آمونیاک نیز ریسک انفجار به دلیل برخی ویژگی‌های آمونیاک می‌تواند بسیار محتمل باشد. هدف از این مطالعه ارزیابی ریسک انفجار در مخزن آمونیاک در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه است.

**روش کار:** به این منظور از روش درخت خطای فازی برای برآورد احتمال قابلیت اطمینان در رویدادهای پایه استفاده شده است. در این مطالعه پس از ترسیم درخت خطا برای شناسایی رویدادهای پایه، با استفاده از نظرات کارشناسان به ارزیابی احتمال وقوع رویدادهای پایه پرداخته شد و احتمال برش‌های حداقل نیز از طریق دروازه‌های منطق بولین محاسبه گردید.

**یافته‌ها:** طبق نتایج به‌دست‌آمده احتمال وقوع رویداد اصلی برابر با ۰/۰۵۴۹۹۷ به‌دست‌آمده و در اولویت‌بندی برش‌های حداقل نیز عمل نکردن شیرهای اطمینان فشار به‌عنوان مؤثرترین عامل در وقوع رویداد اصلی و پس‌از آن عمل نکردن شیرهای کنترلی و خطاهای انسانی شناسایی گردید.

**نتیجه‌گیری:** بر طبق نتایج می‌توان با استفاده از نظرات کارشناسان، در قالب روش درخت خطای فازی به ارزیابی ریسک سناریوهای مختلف در صنایع اقدام نمود. به‌طور کلی در ارزیابی ریسک سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک مشخص شد که برخی نقص‌های کوچک و جزئی و حتی خطاهای سهوی انسانی، می‌توانند به‌عنوان یک عامل مهم در وقوع انفجار مؤثر باشند.

**کلمات کلیدی:** ارزیابی ریسک، انفجار، آنالیز درخت خطا فازی

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [s.bahrami98@gmail.com](mailto:s.bahrami98@gmail.com)

## مقدمه

در یک سناریوی مفروض در یک سیستم است. در این مدل گرافیکی برخی رویدادهای شکست متوالی یا موازی، که می‌توانند به وقوع رویداد اصلی یا سناریوی موردنظر منجر شوند، نمایش داده می‌شود (۶-۸). درخت خطا هم می‌تواند برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های موجود بکار گرفته شود و هم در مرحله طراحی مورد استفاده قرار گیرد (۹). آنالیز درخت خطا (FTA) برای اولین بار در سالهای ۶۲-۱۹۶۱ در آزمایشگاه‌های تلفن بل<sup>۷</sup> توسط واتسون<sup>۸</sup> جهت تعیین و بهبود قابلیت اطمینان سیستم کنترل موشک‌های فاره‌پیما توسعه یافت. این تکنیک در سالهای بعد توسط شرکت هواپیمایی بوئینگ<sup>۹</sup> گسترش یافته و به صورت قانونمند درآمد. پس از آن نیز استفاده از تکنیک FTA به صنایع مختلف نظیر هوافضا، هسته‌ای، شیمیایی و غیره گسترش یافت و از آن به طور گسترده‌ای جهت آنالیز قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و ایمنی سیستم‌ها استفاده شد (۱۰-۱۲) در آنالیز درخت خطای سنتی، احتمال شکست رویدادهای پایه با مقادیر واقعی بیان می‌گردند (۱۳، ۱۴). در این رویکرد احتمال شکست رویدادهای پایه در طول عمر سامانه در نظر گرفته می‌شوند، حال اینکه در کاربردهای واقعی مانند صنایع شیمیایی و هسته‌ای این فرض هنوز مبهم به نظر می‌رسد. در مواقعی که یک سناریو هرگز اتفاق نیفتاده و یا با فرکانس بسیار کمی در طول عمر اتفاق می‌افتد، داده‌های شکست تاریخی کافی به منظور برآورد احتمال قابلیت اطمینان در ایمنی اجزای سیستم وجود ندارد. اگرچه برخی ارزیابان ریسک ایمنی برای انجام آنالیز درخت خطا از داده‌های شکست اجزا در صنایع دیگر استفاده نموده‌اند (۱۵، ۱۶). نظریه مجموعه احتمالات فازی نخست در سال ۱۹۸۹ به عنوان ابزاری مفید برای جایگزینی تئوری قابلیت اطمینان سنتی معرفی شد (۱۷). احتمال فازی، یک تابع عضویتی از اعداد فازی است که برای نشان دادن عدم قطعیت‌ها در ارزیابی قابلیت اطمینان رویدادهای پایه یک درخت خطا به کار برده می‌شود، در این رویکرد، کمی

امروزه اغلب صنایع شیمیایی با رشد و توسعه سریع دائماً در حال افزایش ظرفیت تولید بوده و به تبع آن همواره ریسک‌هایی را برای محیط‌زیست و جوامع پیرامون خود به همراه دارند. به‌غیر از تأسیسات صنعتی، مواد شیمیایی نیز خواصی ذاتاً خطرناک دارند. برخی می‌توانند اشتعال‌پذیر، قابل انفجار، سمی و یا خورنده باشند (۱). آمونیاک به طور گسترده‌ای در صنایع فرآیندی به عنوان خوراک، سردکننده و یا به عنوان منبع نیروی پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیامدهای ناشی از سمیت مواد رهاشده را می‌توان با معیارهای IDLH<sup>۱</sup> و TLV-TWA<sup>۲</sup> سنجید (۲). معیارهای خطر حاد بر سلامت (IDLH) با مقدار ۳۰۰ پیپیام و حد آستانه استاندارد (TLV-TWA) ۲۵ پیپیام برای آمونیاک، طبیعت خطرناک این ماده را به خوبی نشان می‌دهد. حتی در معرض قرارگیری با مقدار اندک آمونیاک می‌تواند سبب صدمات جدی بر روی انسان، همچون سرگیجه و سردرد، آسیب به چشمها و ششها شود (۳). فاجعه‌های بزرگ صنعتی در طول چند دهه-ی گذشته همچون فاجعه فلیکس برو<sup>۳</sup> (۱۹۷۴)، فاجعه گاز بوپال<sup>۴</sup> (۱۹۸۴)، فاجعه LPG مکزیک (۱۹۸۴)، انتشار ابر هیدروکربن و آتش‌سوزی و انفجار در یک پالایشگاه در تگزاس (۲۰۰۵) همگی عواقب نامطلوبی را به ارمغان آورده‌اند (۴). اگرچه حوادث به دلایل مختلف رخ می‌دهند اما قابل پیش‌بینی و پیشگیری هستند. جهت پیشگیری از حوادث ابتدا باید عوامل بالقوه بروز آنها را شناسایی نمود. این عوامل شامل مخاطرات کوچک و بزرگ، پنهان و آشکار می‌باشند (۵). یکی از روشهای ارزیابی ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده، روش آنالیز درخت خطا<sup>۵</sup> است که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. درخت خطا، یک مدل گرافیکی برای نشان دادن امکان شکست رویدادهای پایه<sup>۶</sup>

1 Immediately Dangerous To Life or Health (IDLH)

2 Threshold Limit Value-Time Weighted Average

3 Flixborough

4 Bhopal

5 Fault Tree Analysis

6 Basic Event

7 Bell Laboratories

8 H.A. Watson

9 Boeing

صاحب نظران و همچنین تحلیل درخت خطای فازی برای شناسایی، ارزیابی و رتبه بندی مخاطرات منجر به ارائه تحلیل‌های بهتری شده است (۲۳). رضالی و همکاران در سال ۲۰۱۵ نیز با استفاده از روش درخت رویداد فازی (ETA<sup>12</sup>) به آنالیز ایمنی یک سیستم حفاری ساحلی پرداخته‌اند (۲۴). پوربا در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی ایمنی یک راکتور در یک نیروگاه هسته‌ای با استفاده از رویکرد قابلیت اطمینان فازی برای ارزیابی رویدادهای پایه در روش آنالیز درخت خطا پرداخته است (۱۱). شی و همکاران (۲۰۱۴)، به ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و انفجار در مخزن فولادی ذخیره نفت بر اساس روش FTA فازی در ترکیب با AHP<sup>13</sup> پرداخته‌اند (۲۵). راجا کارونا کران و همکاران (۲۰۱۵) نیز به بررسی کاربرد آنالیز درخت خطای فازی و قضاوت خبرگان برای ارزیابی ریسک‌ها در یک ایستگاه سوخت‌گیری LPG پرداخته‌اند (۱۲). با توجه به اینکه بخش زیادی از آمونیاک تولیدی در پتروشیمی کرمانشاه در یک مخزن بزرگ تا زمان مورد استفاده قرار گرفتن از سوی واحد اوره، ذخیره می‌گردد و نیز با توجه به خواص و قابلیت انفجار و تأثیرگذاری این ماده بر روی محیط زیست، در این مطالعه به ارزیابی ریسک سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک با استفاده از روش FTA فازی پرداخته می‌شود.

### روش کار

مجتمع پتروشیمی کرمانشاه در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و در حوزه شهرستان هرسین قرار دارد و در زمینی به مساحت ۳۰۰ هکتار واقع شده است. محصولات این مجتمع شامل تولید روزانه ۱۲۰۰ تن آمونیاک مایع و ۲۰۰۰ تن کود اوره است که از این مقدار آمونیاک تولیدی، ۱۱۳۲ تن در روز با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به واحد اوره ارسال و مابقی با دمای ۳۵- درجه سانتی‌گراد به

سازی درخت خطا، یعنی قابلیت اطمینان رویدادهای پایه، رویدادهای میانی و رویداد نهایی، کاملاً بر اساس مفهوم فازی صورت می‌گیرد. دروازه‌های<sup>10</sup> AND و OR در منطق بولین<sup>11</sup> نیز با قوانین ترکیب فازی جایگزین می‌شوند (۱۱، ۱۸). به منظور بررسی ابهامات اجتناب‌ناپذیر در مورد نرخ خرابی در کاربردهای واقعی، تحقیقاتی در شرایط نادقیق انجام گرفته است (۱۷، ۱۹). همچنین در زمینه ارزیابی ریسک سناریوهای مختلف با استفاده از درخت خطای فازی در صنایع، تحقیقاتی در ایران و دنیا صورت گرفته است. لواسانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای ارزیابی ریسک سناریوهای نشت مواد سمی، انفجار و آتش‌سوزی در یک مجتمع پتروشیمی از رویکرد FTA فازی استفاده کردند و برای هر کدام از رویدادهای پایه در درخت خطا، احتمال شکست محاسبه و در نهایت اولویت برشهای حداقل را به دست آوردند (۲۰). امیدواری و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ای بر روی ارزیابی احتمال شکست برج تقطیر در یک پالایشگاه نفتی با استفاده از روش FTA فازی یک مدلی را ارائه دادند (۲۱). هراتی و همکاران در سال ۱۳۹۷ مطالعه‌ای به منظور مدل سازی و ارزیابی پیامدهای ایمنی حاصل از نشت پروپیلن اکساید در یکی از پتروشیمی‌های ماه شهر انجام داده‌اند. آنها در این مطالعه با استفاده از نرم افزار FFAST بر اساس داده‌های فرآیندی و همچنین روش ارزیابی ریسک HAZOP بر اساس شناسایی خطرات موجود اقدام به مدل‌سازی سه سناریوی انتشار پروپیلن اکساید و محاسبه میزان مرگ و میر کارکنان کرده‌اند. بر اساس نتایج آنها بسیاری از حوادث ناشی از نشتی و انفجار مخازن به دلیل خروندگی و پوسیدگی اتصالات و تجهیزات است (۲۲). همچنین در مطالعه‌ای که در سال ۱۳۹۷ توسط امیری و همکاران انجام شده است که از یک روش ترکیبی برای ارزیابی مخاطرات شغلی در پروژه‌های راه سازی استفاده شده است. بر اساس نتایج مطالعه آنها استفاده از روش مصاحبه و گردآوری اطلاعات بر اساس نظرات خبرگان و

12 Event Tree Analysis

13 Analytic Hierarchy Process

10 Gates

11 Boolean

مخزن ذخیره آمونیاک فرستاده میشود (۲۶). این مطالعه به منظور ارزیابی ریسک انفجار در مخزن ذخیره آمونیاک در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه انجام گرفته است. روش مورد استفاده در این مطالعه بر طبق روش درخت خطای فازی و به صورت یک فرآیند ۸ مرحله‌ای تعریف میگردد:

۱- درخت خطا یک ثبت سیستماتیک و منطقی از علل پایهای را نشان میدهد که به یک رویداد اصلی<sup>۱۴</sup> که در رأس نمودار درخت خطا قرار دارد، منجر میشوند و یک چارچوبی را برای ارزیابیهای کیفی و کمی رویداد اصلی فراهم میکنند. رویداد اصلی معمولاً به عنوان یک حادثه یا رخداد نامطلوب در نظر گرفته میشود، در پایین یک درخت خطا رویدادهای پایهی واقعی یا رویدادهای ابتدائی قرار می‌گیرند. روابط منطقی رویدادها به وسیله نمادها و دروازه‌هایی نشان داده میشود. هر کدام از دروازه‌ها به وسیله‌ی یک معادله منطقی از رویدادهای ورودی بیان میگردد. در طول ایجاد و بسط درخت خطا، نیازها و موضوعات مورد نظر، شناسایی شده و رویداد اصلی نیز تعریف و همچنین هدف و میزان دقت در درخت خطا مشخص میگردد. مجموعه‌های از دروازه‌های AND و OR میتوانند روابط منطقی بین رویدادهای پایه را تشکیل دهند که نحوه‌ی محاسبه‌ی ترکیب احتمال شکست در رویدادهای پایه در چنین دروازه‌های در روابط (۱ و ۲) نشان داده شده است.

رابطه (۱) ترکیب رویدادهای پایه را بر اساس دروازه AND محاسبه میکند (۱۲).

$$Q(t) = \prod_{j=1}^m Q_j(t) \quad (1)$$

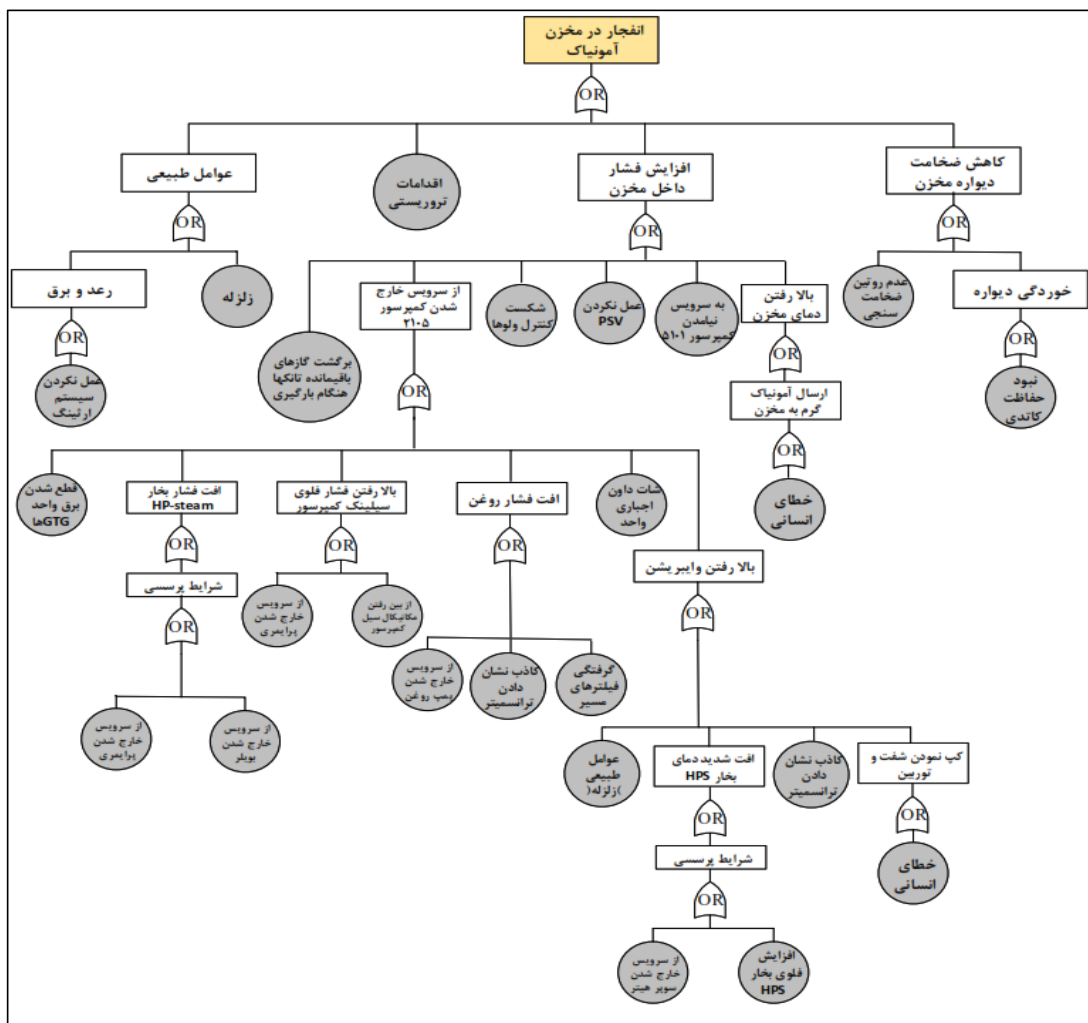
همچنین در رویدادهایی که بر اساس منطقی OR قابل حل باشند باید از معادله‌ی (۲) برای به دست آوردن احتمال آنها استفاده کرد (۱۲).

$$Q(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - Q_j(t)) \quad (2)$$

۲- در این مرحله نظرات کارشناسان در مورد رویدادهای پایه برای سناریوی انفجار در مخزن ذخیره‌سازی آمونیاک (TK-5101) دریافت میگردد. با توجه به بررسیهای صورت گرفته در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه، تعداد ۱۹ واحد در حال فعالیت میباشند که برای بررسی احتمال وقوع هر کدام از رویدادهای پایه در مورد سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک، از بین ۱۹ واحد ۸ واحد مرتبط تشخیص داده شد. در این مطالعه رویداد های پایه بر اساس طوفان فکری و جمع بندی نظرات مدیران و متخصصان به ویژه در پتروشیمی کرمانشاه و همانطور که در شکل ۱ به صورت دایره‌های خاکستری در انتهای هر شاخه درخت خطا قرار گرفته‌اند بدست آمده که تعداد آنها ۲۰ رویداد پایه است. قابل ذکر است که در این مرحله بر اساس جدول (۱) و در قالب پرسشنامه‌هایی نظرخواهی احتمال وقوع هر کدام از رویدادهای پایه را تعیین میکنند. پرسشنامه‌های توزیع شده در هر کدام از واحدها به گونه‌ای تکمیل شده‌اند که حاصل روش دلفی برای چند کارشناس در هر واحد مورد مطالعه و یک نفر به عنوان سرپرست این کارشناسان میباشند. سوالات مطرح شده در این پرسشنامه به صورتی است که نظرات کارشناسان را در مورد میزان احتمال وقوع ۲۰ رویداد پایه شناسایی شده بر اساس اصطلاحات زبانی احتمال (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) جمع آوری می نماید. هر کدام از اصطلاحات زبانی اشاره شده نیز در یک دامنه مشخصی از احتمال تقریبی وقوع با اعداد فازی متناظر آنها تعیین شده اند. در واقع پرسشنامه‌ها در ۶ واحد که امکان دسترسی به کارشناسان و تکنسین های آن‌ها وجود داشت توزیع شد و از آن‌ها خواسته شد که در هر واحد یک کارشناس خبره معرفی و پرسشنامه را بر اساس مطالب توجیهی و آموزشی به دقت تکمیل نماید. در واقع از ۶ کارشناس از واحدهای مختلف در پتروشیمی کرمانشاه خواسته شده تا به ۲۰ رویداد پایه مربوط به سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک، امتیازاتی را بر طبق جدول ۱ اختصاص دهند.

۳- مرحله‌ی فازی سازی نظرات: در این مرحله با





شکل ۱. ترسیم و بسط درخت خطا برای سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک

جدول ۱. تعریف اصطلاحات زبانی (۲۱)

ردیف	اصطلاحات زبانی	اعداد فازی ( $a_1, a_2, a_3$ )	احتمال تقریبی
۱	خیلی کم	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	$0.0001 >$
۲	کم	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	$0.0001 - 0.001$
۳	متوسط	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	$0.001 - 0.01$
۴	زیاد	(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	$0.01 - 0.1$
۵	خیلی زیاد	(۰.۸, ۰.۹, ۱)	$0.1 <$

۴- وزن دهی و اجماع نظر کارشناسان: سپس وزن هرکدام از کارشناسان نیز بر اساس چهار فاکتور سن،

استفاده از اعداد فازی مثلثی، به هرکدام از اصطلاحات زبانی سه عدد به عنوان اعداد فازی اختصاص داده میشود.

جدول ۲. فاکتورهای تعیین وزن برای کارشناسان

رتبه	سن (سال)	تحصیلات	تجربه (سال)	تخصص
۶	-	-	-	بهره‌بردار
۵	-	-	-	ابزار دقیق
۴	-	دکتری	بالای ۱۵	فرآیند
۳	بالای ۴۰	فوق لیسانس	۱۰ - ۱۵	ماشینری
۲	۳۰ - ۴۰	لیسانس	۵ - ۱۰	بازرسی فنی
۱	کمتر از ۳۰	فوق دیپلم	کمتر از ۵	HSE

امکان شکست<sup>۱۶</sup> رویدادهای پایه نامیده میشوند. که باید با استفاده از معادله‌ی (۵) این امکان را تبدیل به احتمال شکست<sup>۱۷</sup> در رویدادهای پایه کرد (۱۱، ۱۲).

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} \quad k = \left[ \left( \frac{1 - CFP}{CFP} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (5)$$

که در این رابطه  $CFP^{18}$  همان اعداد قطعی به‌دست‌آمده از غیر فازی سازی اعداد میباشد.

۷- پس‌ازاینکه احتمال شکست برای رویدادهای پایه در تمام سناریوها محاسبه گردید. سپس میتوان با به‌دست آوردن احتمال شکست برشهای حداقل، با توجه دروازه‌هایی که برای ترکیب رویدادهای پایه در نظر گرفته‌شده، احتمال شکست برای رویداد اصلی در سناریو موردنظر محاسبه کرد، که پس از انجام محاسبات موردنظر با توجه به دروازه‌های ترکیب منطبق بولین، از معادلات (۱) و (۲) میتوان استفاده کرد.

۸- در این مرحله میتوان اقدام به رتبه‌بندی رویدادهای پایه و نیز حداقل برشهای حاصل از محاسبات بر روی رویدادهای پایه نمود که مشخص میشود، کدام‌یک از برش‌های حداقل بیشترین احتمال را در رویداد اصلی دارند و اولویت‌بندی می‌گردند. برای این کار در این مطالعه از معیار اهمیت Fussell- Vesely استفاده شده است. این معیار بر طبق رابطه (۶) به دست می‌آید (۱۲).

16 Possibility of Failure  
17 Probability of Failure  
18 Crisp Failure Possibility

تجربه کاری، تحصیلات و عنوان سازمانی سنجیده میشود که وزن هر کارشناس بر طبق جدول (۲) محاسبه میشود. میزان امتیازاتی که برای هرکدام از این فاکتورها در نظر گرفته‌شده از منابع علمی و مشورت با خبرگان به‌دست‌آمده است (۱۱، ۱۲).

۵- مرحله غیر فازی سازی: غیر فازی سازی به روش گفته میشود که نظرات و امتیازات فازی شده را با الگوریتم‌های خاص به یک عدد قطعی برگردانده شود. در این مطالعه از الگوریتم مرکز ثقل<sup>۱۵</sup> و معادله‌ی (۳) برای اعداد فازی مثلثی استفاده شده است (۵، ۱۱، ۱۲).

$$X = \frac{1}{3} (a_1 + a_2 + a_3) \quad (3)$$

همچنین در صورتی که از اعداد فازی ذوزنق‌های، برای فازی سازی نظرات استفاده گردد، باید از معادله‌ی (۴) برای غیر فازی کردن این اعداد استفاده کرد که در این مطالعه از معادله‌ی (۳) به دلیل مثلثی بودن اعداد فازی استفاده شده است (۱۱، ۱۲).

$$X = \frac{1}{3} \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4 + a_3 - a_2 - a_1)} \quad (4)$$

۶- پس از غیر فازی کردن اعداد، یک عدد قطعی برای هرکدام از رویدادهای پایه به دست می‌آید. اما به دلیل اینکه این اعداد به‌طور مستقیم از غیر فازی سازی نظرات کارشناسان به‌دست‌آمده‌اند، بنابراین اصطلاحاً

15 Center of Gravity

جدول ۳. محاسبه وزن نهایی هرکدام از کارشناسان

کارشناسان	تخصص	تجربه	تحصیلات	سن	وزن نهایی
کارشناس ۱	۶	۲	۳	۲	۰/۲۱۳
کارشناس ۲	۴	۲	۲	۲	۰/۱۶۹
کارشناس ۳	۳	۲	۲	۲	۰/۱۵۸
کارشناس ۴	۲	۲	۱	۱	۰/۱۰۴
کارشناس ۵	۱	۲	۳	۲	۰/۱۵۳
کارشناس ۶	۵	۳	۲	۲	۰/۲۰۱

در این درخت تمام دروازه‌ها از نوع OR میباشد. پس از بررسی دقیق این درخت و حذف رویدادهای پایهای که در شاخه‌های مختلف یکسان هستند، در نهایت تعداد ۲۰ رویداد پایه مورد تأیید قرار گرفت و سپس پرسشنامه‌ی این سناریو به منظور نظرسنجی برای احتمال شکست در رویداد پایه آماده گردید و بین کارشناسان توزیع گردید. پس از تشکیل درخت خطا و مشخص کردن رویدادهای پایه سپس از طریق پرسشنامه‌هایی اقدام به جمع‌آوری نظرات کارشناسان برای احتمال شکست در هرکدام از رویدادهای پایه برای سناریوی انفجار گردید و نتایج اولیه از جمع‌آوری نظرات ۶ کارشناس ثبت گردید.

سپس برای هرکدام از کارشناسان با توجه به ۴ فاکتور، سن، تجربه، تحصیلات و تخصص، وزن نهایی محاسبه گردید که به صورت جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد. در محاسبه وزن هرکدام از کارشناسان با توجه به اینکه هرکدام از آنها چه امتیازاتی را از مجموع امتیازات کسب میکنند و با استفاده از روش نرمال‌سازی امتیازات، وزن نهایی برای هرکدام محاسبه میگردد. ۶ کارشناس انتخاب‌شده به صورت منظم در ۶ تخصص مختلف می‌باشند اما در دیگر فاکتورها نامنظم و چند کارشناس میتوانند یک امتیاز مشابه کسب کنند. در مرحله‌ی بعدی اقدام به فازی‌سازی نظرات ۶ کارشناس برای هرکدام از ۱۷ رویداد پایه با استفاده از اعداد فازی مثلثی شد که نتایج به صورت جدول (۴) قابل مشاهده می‌باشد. در این مرحله اعداد فازی مثلثی متناظر با هرکدام

$$I_i^{FV} = \frac{FP_i}{FP_s} \quad (۶)$$

که در این رابطه  $I_i^{FV}$  معیار اهمیت Fussell-Vesely برای برش حداقل  $i$ ،  $FP_i$  احتمال شکست برش حداقل  $i$  و  $FP_s$  احتمال شکست برای رویداد اصلی میباشد.

به طور خلاصه بر اساس این روش ابتدا درخت خطا برای سناریو انفجار مخزن آمونیاک تشکیل و رویدادهای پایه مشخص گردید. سپس برای به دست آوردن احتمال شکست رویدادهای پایه از اصطلاحات زبانی برای نظرخواهی از کارشناسان در قالب پرسشنامه‌هایی استفاده شد و پس از فازی‌سازی نظرات کارشناسان و تبدیل این اعداد فازی به اعداد غیر فازی سپس با استفاده از یکسری معادلات ریاضی، احتمال شکست برای هرکدام از رویدادهای پایه محاسبه گردید. پس از به دست آوردن احتمال شکست برای رویدادهای پایه، از طریق روابط مربوط به دروازه‌های AND و OR احتمال وقوع رویداد اصلی یعنی انفجار در مخزن آمونیاک محاسبه و در نهایت رتبه بندی و درجه اولویت برش‌های حداقل مشخص شد.

### == یافته‌ها

در این مطالعه برای سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک یک درخت خطا تشکیل شده که در نمودار گرافیکی این درخت ۲۴ رویداد پایه تشخیص داده شد،

جدول ۴. اعداد فازی برای نظرات هرکدام از کارشناسان

EX6	EX5	EX4	EX3	EX2	EX1	رویدادهای پایه
(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE1
(۰.۸, ۰.۹, ۱)	(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	BE2
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	BE3
(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE4
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	BE5
(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE6
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE7
(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	BE8
(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE9
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	BE10
(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE11
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	BE12
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE13
(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE14
(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	BE15
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۶, ۰.۷۵, ۰.۹)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	BE16
(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	BE17
(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	BE18
(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	(۰.۱, ۰.۲۵, ۰.۴)	(۰.۰, ۰.۱, ۰.۲)	BE19
(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	(۰.۳, ۰.۵, ۰.۷)	BE20

به اینکه اعداد فازی در این مطالعه از نوع مثلثی می- باشند، از رابطه (۳)، استفاده شده است. نتیجه این غیر فازی سازی نیز در جدول (۵) در ستون مربوط به امکان خرابی آورده شده است، که این اعداد نیز باید به احتمال خرابی تبدیل شوند.

پس از مرحله غیر فازی سازی و به دست آوردن امکان خرابی برای رویدادهای پایه سپس باید این امکان خرابیها را با استفاده از معادله (۵) که پیش تر ذکر آن رفته است، تبدیل به احتمال خرابی رویدادهای پایه کرد. در این مرحله مقدار  $K$  را نیز باید محاسبه کرد که در جدول ۶ در ستون مربوطه آورده شده و همچنین در جدول (۶)، نهایتاً احتمال خرابی برای سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک محاسبه شده است. حال پس از اینکه احتمال خرابی و شکست برای رویدادهای پایه به دست

از اصطلاحات زبانی به نظرات هرکدام از کارشناسان اختصاص داده شد.

پس از این مرحله سپس وزن هرکدام از کارشناسان را در نظرات آن‌ها برای رویدادهای پایه ضرب شد که برای این کار با توجه به حجم زیاد داده‌ها و نیز نیاز به دقت در انجام این کار، با استفاده از کد نویسی در محیط نرم‌افزار متلب این محاسبه انجام گرفت و خروجی آن در جدول (۵) آورده شده است، به گونه‌ای که ستونهای  $a_1$  و  $a_2$  و  $a_3$  اعداد فازی مثلثی را برای هرکدام از رویدادهای پایه نشان میدهد.

پس از تأثیر دادن وزن هر کارشناس در نظرات آن‌ها هنوز نظرات کارشناسان به صورت اعداد فازی مثلثی می‌باشد که در این مرحله باید با استفاده از الگوریتم مرکز ثقل آن‌ها را غیر فازی کنیم. برای این کار، با توجه

جدول ۵. برآورد یک عدد فازی واحد برای هر رویداد پایه از طریق اجماع نظر کارشناسان

رویدادهای پایه	$a_1$	$a_2$	$a_3$	امکان خرابی	مقدار K	احتمال رویداد
BE <sub>1</sub>	۰/۲۳۲	۰/۳۹	۰/۵۴۷	۰/۳۹	۲/۶۷۰۶	۰/۰۰۲۱
BE <sub>2</sub>	۰/۴۷۷	۰/۶۴۴	۰/۸۱۱	۰/۶۴۴۸	۱/۸۸۶۰	۰/۰۱۳۰
BE <sub>3</sub>	۰/۳۶۳	۰/۵۵۳	۰/۷۴۲	۰/۵۵۳۲	۲/۱۴۲۶	۰/۰۰۷۱
BE <sub>4</sub>	۰/۲۸۵	۰/۴۳۵	۰/۵۸۵	۰/۴۲۵۵	۲/۵۰۸۶	۰/۰۰۳۱
BE <sub>5</sub>	۰/۲۶۶	۰/۴۵۷	۰/۶۴۹	۰/۴۵۷۵	۲/۴۳۵۴	۰/۰۰۳۶
BE <sub>6</sub>	۰/۲۸۳	۰/۴۵۴	۰/۶۲۵	۰/۴۵۴۵	۲/۴۴۵۲	۰/۰۰۳۵
BE <sub>7</sub>	۰/۱۷۱	۰/۳۳۹	۰/۵۰۷	۰/۳۳۹۸	۲/۸۷۱۲	۰/۰۰۱۳
BE <sub>8</sub>	۰/۱۹۴	۰/۳۵۵	۰/۵۱۶	۰/۳۵۵۳	۲/۸۰۶۲	۰/۰۰۱۵
BE <sub>9</sub>	۰/۲۱۷	۰/۳۹۶	۰/۵۷۵	۰/۳۹۶۴	۲/۶۴۶۹	۰/۰۰۲۲
BE <sub>10</sub>	۰/۱۰۸	۰/۲۵۲	۰/۳۹۶	۰/۲۵۲۶	۳/۳۰۲۸	۰/۰۰۰۴
BE <sub>11</sub>	۰/۱۸۳	۰/۳۵۳	۰/۵۲۴	۰/۳۵۳۹	۲/۸۱۲۰	۰/۰۰۱۵
BE <sub>12</sub>	۰/۲۴۸	۰/۴۳۵	۰/۶۲۲	۰/۴۳۵۵	۲/۵۰۸۶	۰/۰۰۳۱
BE <sub>13</sub>	۰/۲۵۷	۰/۴۴۶	۰/۶۳۶	۰/۴۴۶۷	۲/۴۷۱۰	۰/۰۰۳۳
BE <sub>14</sub>	۰/۱۶۵	۰/۳۳۲	۰/۴۹۸	۰/۳۳۲۰	۲/۹۰۴۷	۰/۰۰۱۲
BE <sub>15</sub>	۰/۱۲	۰/۲۶۵	۰/۴۱	۰/۲۶۵۷	۳/۲۲۸۶	۰/۰۰۰۵
BE <sub>16</sub>	۰/۲۵۵	۰/۴۲۳	۰/۵۹۱	۰/۴۲۳۶	۲/۵۴۹۵	۰/۰۰۲۸
BE <sub>17</sub>	۰/۰۵۸	۰/۱۸۷	۰/۳۱۷	۰/۱۸۷۸	۳/۷۴۸۳	۰/۰۰۰۱۷
BE <sub>18</sub>	۰/۰۵۲	۰/۱۷۹	۰/۳۰۵	۰/۱۷۹۳	۳/۸۱۷۹	۰/۰۰۰۱۵
BE <sub>19</sub>	۰/۰۱۷	۰/۱۲۵	۰/۲۳۳	۰/۱۲۵۵	۴/۳۹۴۹	۴/۰۲۷*۱۰ <sup>-۵</sup>
BE <sub>20</sub>	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۵	۲/۳۰۱	۰/۰۰۵۰

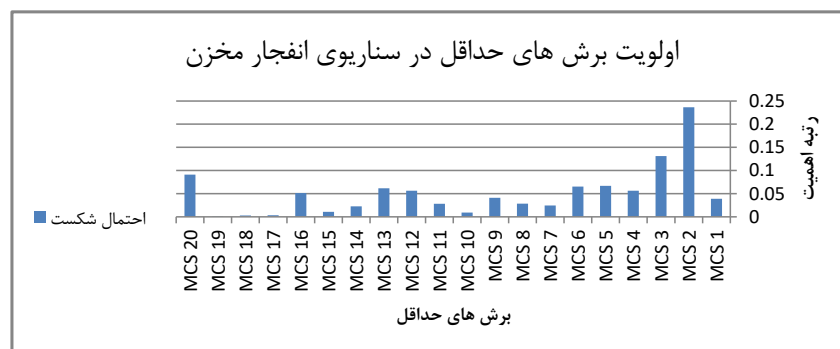
نیز در قسمت معرفی روش مورد مطالعه ذکر شد، برای اولویت‌بندی برشهای حداقل از معیار Fussell-Vesely طبق رابطه (۶) استفاده شده است به این معنی که برای هر کدام از برشهای حداقل کافی است که میزان احتمال به دست آمده برای آن را بر احتمال رویداد اصلی تقسیم کرد و به این صورت امتیازات برای هر کدام از برشهای حداقل محاسبه میشود که در ستون مربوط به اولویت، در جدول (۶) آمده است، همچنین نمودار (۱) مقایسه‌های از سطح احتمال شکست برای برشهای حداقل مختلف در سناریوی انفجار مخزن آمونیاک، را نشان میدهد.

آمد، می‌توان با استفاده از روابط (۱) و (۲) به محاسبه‌ی احتمال وقوع رویداد اصلی سناریوی انفجار در مخزن پرداخت که جدول (۶)، نتایج را نشان میدهد. نکته قابل ذکر اینکه در این سناریو به دلیل اینکه از روابط منطقی OR برای ترکیب رویدادهای پایه استفاده شده است بنابراین برشهای حداقل همان رویدادهای پایه محاسبه شده، در نظر گرفته میشوند.

همچنین به منظور مشخص شدن اهمیت و سطح تأثیرگذاری هر کدام از برشهای حداقل در وقوع رویداد اصلی میتوان اقدام به رتبه‌بندی برشهای حداقل در این سناریوها کرد. در این رابطه همان‌طور که قبلاً

جدول ۶ برآورد احتمال و اولویت‌بندی هر کدام از برش‌های حداقل منجر به رویداد اصلی در سناریو انفجار

احتمال رویداد اصلی (TE)	اولویت	احتمال شکست	تعریف	حداقل برش‌ها
۰/۰۵۴۹۹۷	۱۱	۰/۰۰۲۱۳	به سرویس نیامدن کمپرسور ۵۱۰۵	BE <sub>۱</sub> MCS <sub>۱</sub>
	۱	۰/۰۰۱۳	عملکرد نامناسب psv	BE <sub>۲</sub> MCS <sub>۲</sub>
	۲	۰/۰۰۰۷۱	Fail نمودن کنترل ولوها	BE <sub>۳</sub> MCS <sub>۳</sub>
	۷	۰/۰۰۰۳۱	برگشت خوردن گازهای باقیمانده در تانک- های بارگیری	BE <sub>۴</sub> MCS <sub>۴</sub>
	۴	۰/۰۰۰۳۶	از بین رفتن مکانیکال سیل کمپرسور ۲۱۰۵	BE <sub>۵</sub> MCS <sub>۵</sub>
	۵	۰/۰۰۰۳۵	کاذب نشان دادن ترانسمیتر	BE <sub>۶</sub> MCS <sub>۶</sub>
	۱۴	۰/۰۰۰۱۳	شات داون اجباری کمپرسور ۲۱۰۵	BE <sub>۷</sub> MCS <sub>۷</sub>
	۱۲	۰/۰۰۰۱۵	از سرویس خارج شدن پمپ روغن	BE <sub>۸</sub> MCS <sub>۸</sub>
	۱۰	۰/۰۰۰۲۲۵	مسدود شدن فیلترهای مسیر روغن	BE <sub>۹</sub> MCS <sub>۹</sub>
	۱۷	۰/۰۰۰۰۴۹	قطع شدن برق واحد و عمل نکردن GTG ها	BE <sub>۱۰</sub> MCS <sub>۱۰</sub>
	۱۳	۰/۰۰۰۱۵۴	زیاد شدن فلوی بخار HPS	BE <sub>۱۱</sub> MCS <sub>۱۱</sub>
	۸	۰/۰۰۰۳۱	از سرویس خارج شدن سوپر هیتر	BE <sub>۱۲</sub> MCS <sub>۱۲</sub>
	۶	۰/۰۰۰۳۳۸	از سرویس خارج شدن بویلر چقدر	BE <sub>۱۳</sub> MCS <sub>۱۳</sub>
	۱۵	۰/۰۰۰۱۲۴	از سرویس خارج شدن پرایمری	BE <sub>۱۴</sub> MCS <sub>۱۴</sub>
	۱۶	۰/۰۰۰۰۵۹	عدم وجود حفاظت کاتدی	BE <sub>۱۵</sub> MCS <sub>۱۵</sub>
	۹	۰/۰۰۰۰۲۸	عدم روتین ضخامت سنجی	BE <sub>۱۶</sub> MCS <sub>۱۶</sub>
	۱۸	۰/۰۰۰۰۱۷	عمل نکردن ارثینگ مخزن در هنگام رعدوبرق	BE <sub>۱۷</sub> MCS <sub>۱۷</sub>
	۱۹	۰/۰۰۰۰۱۵	عوامل طبیعی	BE <sub>۱۸</sub> MCS <sub>۱۸</sub>
	۲۰	۴/۰۳*۱۰ <sup>-۵</sup>	اقدامات تروریستی و خرابکارانه	BE <sub>۱۹</sub> MCS <sub>۱۹</sub>
	۳	۰/۰۰۰۰۵	احتمال خطای انسانی	BE <sub>۲۰</sub> MCS <sub>۲۰</sub>



نمودار ۱. مقایسه‌ی سطح احتمال برش‌های حداقل در سناریو انفجار آمونیاک

et al, 2015., Rajakarunakaran et al, 2015., (Purba et al, 2015, Miri lavasani et al, 2014) مشابه اما با نتایج تحقیقات Komal, 2015 (۲۷) متفاوت میباشد. مشابه بودن نتایج این مطالعه با برخی مطالعات به دلیل مشابه بودن محدودیت های مطالعه و رویکرد مشابه برای غلبه این محدودیت می باشد در حالی که متفاوت بودن نتایج با مطالعه دیگر به دلیل استفاده از این روش در محیط با عدم قطعیت خیلی زیاد بوده است. موضوع مورد بحث دیگر در این مطالعه وجود روابط منطقی بین رویدادها است که در روش مورد استفاده باید به درستی تشخیص داده شود. در واقع تشخیص درست روابط منطقی بین رویدادهای پایه، رویدادهای میانی و در نهایت رویداد اصلی در کاهش و کنترل ریسک انفجار بسیار مهم و اساسی است. همچنین به طور کلی به دلیل وجود عدم قطعیت زیاد در صنایع پیچیده ای چون صنایع پتروشیمی نمی توان به صورت مطلق در مورد اولویت ریسک انفجار یا هر ریسک دیگری تصمیم گیری کرد و در واقع در مدیریت ریسک بهداشتی، ایمنی و محیط زیستی باید همه اولویت های را مد نظر قرار داد و به صورت دوره ای و منظم درخت خطا ترسیم و ارزیابی ریسک صورت بگیرد.

### نتیجه گیری

به طور کلی در ارزیابی ریسک سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک مشخص شد که برخی نقصهای کوچک و جزئی و حتی خطاهای سهوی انسانی، میتوانند به عنوان یک عامل اولیه (رویداد پایه) مهم در (رویداد اصلی) وقوع انفجار مؤثر باشد. اگرچه برای ارزیابی ریسکهای سناریوهای مختلف در سیستم و نیز اثرات آنها بر محیط زیست و جوامع پیرامون باید اطلاعات دقیق مربوط به احتمال شکست در تجهیزات و یا نقص در برخی فرآیندها و یا فعالیتهای از قبل تهیه نمود، اما نتایج این مطالعه و مطالعات مشابه نشان می دهد که می توان با استفاده از نظرات کارشناسان، در قالب روش درخت خطای فازی به ارزیابی ریسک سناریوهای مختلف در صنایع اقدام نمود.

در ارزیابی ریسک سناریوها با توجه به قابلیت روش FTA در محاسبه رویداد اصلی و اینکه در روش درخت خطای سنتی باید احتمال خرابی و یا شکست برای رویدادهای پایه در دسترس باشد، در این تحقیق به دلیل موجود نبودن چنین اطلاعاتی در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه از روش آنالیز درخت خطای فازی استفاده شده است. احتمال شکست برای رویداد اصلی در سناریوی انفجار در مخزن آمونیاک، ۰/۰۵۴۹۹۷ به دست آمده است. در ارزیابی ریسک بر اساس روش درخت خطا می توان مسیریابی که از وقوع یک رویداد پایه تا وقوع رویداد اصلی طی می شود را شناسایی و احتمال وقوع آنها را برآورد نمود. در این مطالعه به دقت برش های حداقل در وقوع رویداد اصلی یعنی انفجار مخزن آمونیاک به دست آمده است که در شکل ۱ ترسیم شده است. بر اساس نتایج این مطالعه و اولویت بندی برشهای حداقل، اولویت اول برای سناریوها انفجار مخزن آمونیاک، برش حداقل شماره ۲ یعنی عملکرد نامناسب شیرهای اطمینان فشار (PSV) و پس از آن به ترتیب برش حداقل ۳ (شکستن کنترل ولوها) و برش حداقل ۲۰ (احتمال خطاهای انسانی) به دست آمد. نکته قابل توجه در ترسیم درخت خطا برای سناریو انفجار در مخزن آمونیاک بر اساس طوفان فکری، تمامی دروازه ها بر اساس منطق OR است به این معنی که هر کدام از رویدادهای پایه به صورت مستقیم می توانند منجر به انفجار در مخزن آمونیاک شوند. نکته حائز اهمیت دیگر در ترسیم درخت خطا توجه به نوع دروازه های منطقی بین رویدادها است که باید با استفاده حداکثری از نظرات متخصصان تعیین شود چرا که اشتباه در تشخیص دروازه ها می تواند بر روی اولویت حداقل برش ها و به طور کلی نتایج ارزیابی ریسک بسیار مؤثر باشد.

نتایج این مطالعه در مقایسه با مطالعات مشابه دیگر نشان می دهد که استفاده از رویکرد فازی در آنالیز درخت خطا می تواند دقت بیشتری در شناسایی و ارزیابی ریسک ها به خصوص در صنایعی مانند پتروشیمی داشته باشد. نتایج حاصل از این روش نیز با تحقیقات (Omidvari

واحدها و تکنسین ها اطلاعات کافی در رابطه با روش آنالیز درخت خطا و کاربرد آن ندارند. همچنین می توان اشاره کرد که نرم افزار تخصصی و مورد استفاده برای این روش توسط کشورهای خارجی طراحی شده است و متأسفانه در سال های اخیر با توجه به تحریم های بین المللی از دسترس خارج شده و امکان استفاده از آنها وجود ندارد و پیشنهاد می شود در جهت طراحی و بومی سازی چنین نرم افزار هایی مطالعاتی صورت بگیرد. همچنین پیشنهاد می گردد در مطالعات آینده نتایج محاسبات برای برآورد رویدادهای پایه را با معیار قابلیت اطمینان تجهیزات و نیز محدوددهی مجاز خطا در فعالیتهای فرآیندی مقایسه گردد. در رابطه با سناریوهای دیگر در مجتمع پتروشیمی کرمانشاه در صورت موجود نبودن دادههای قابلیت اطمینان و نرخ شکست رویدادهای پایه پیشنهاد می گردد که از روش درخت خطای فازی استفاده گردد.

بنابراین حتی در مواردی که اطلاعات احتمال شکست یا خرابی ها تجهیزات و تاسیسات در صنایع یا فرآیندها ثبت شده و وجود داشته باشند نیز استفاده از نظرات خبرگان و کارشناسان متخصص در برآورد احتمال نهایی رویداد ها بسیار موثر است.

این مطالعه نیز همچون همه مطالعات دیگر از ابتدا با محدودیت هایی مواجه بوده است که مورد توجه قرار دادن و بر طرف کردن این محدودیت ها می تواند در صحت و دقت نتایج و کاربرد آن در صنعت موثر واقع شود. از جمله محدودیت های این مطالعه فقدان داده های مربوط به خرابی و شکست های تجهیزات و یا به عبارت دیگر ثبت نکردن این اطلاعات است که می تواند در آنالیز های ریسک بر اساس ترسیم درخت خطا کاربرد داشته باشد. محدودیت دیگر در رابطه با به اجرا رساندن این روش و نتایج این مطالعه در صنعت پتروشیمی و صنایع مشابه این است که اغلب کارشناسان و مسئولان

## REFERENCES

- Haghnazarloo H, Parvini M, Lotfollahi MN. Consequence modeling of a real rupture of toluene storage tank. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 37(Supplement C):11-8. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423015300012>. [Persian]
- Golbabaee F, Avar N, Mohammadfam I. Dispersion modeling of propane leakage from an industry. *Journal of Human & Environment*. 2012;10(34):1-13. [Persian]
- Roy A, Srivastava P, Sinha S. Dynamic failure assessment of an ammonia storage unit: A case study. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015; 94(Supplement C):385-401. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582014001487>
- Deshpande A. Fuzzy fault tree analysis: revisited. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2011; 2(1): 3-13. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13198-011-0049-6>
- Alizadeh A, Gholami MH, Derafshi S. Chemical storage tanks risk assessment in a petrochemical company and its effects investigate on neighboring residential and industrial areas. *Safety message*. 2011;8(29):6-15. [Persian]
- Ericson CA. *Fault Tree Analysis*. John Wiley & Sons Inc; 2005. Available at: <http://dx.doi.org/10.1002/0471739421.ch11>
- GoharRakhi M, Torabi M, Akbari F, Golozari F. *Qualitative and Quantitative Risk Analysis in process industry using PHA-Pro 7, PHAST, Fault tree +11*. Tehran: Daneshgaran Sanat Pazhoh; 2009. [Persian]
- Purba JH, Sony Tjahyani DT, Ekariansyah AS, Tjahjono H. Fuzzy probability based fault tree analysis to propagate and quantify epistemic uncertainty. *Annals of Nuclear Energy*. 2015; 85 (Supplement C):1189-99. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454915004065>
- Wang D, Zhang P, Chen L. Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26(6): 1390-98. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423013001770>
- Isfahani SH. *Risk assessment by Fault tree analysis method*. College Bartar; 2010. [Persian]



11. Purba JH. A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Annals of Nuclear Energy*. 2014;70 (Supplement C):21-9. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454914001029>
12. Rajakarunakaran S, Kumar MA, Prabhu AV. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015;33(Supplement C):109-23. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423014002095>
13. Sadiq R, Saint-Martin E, Kleiner Y. Predicting risk of water quality failures in distribution networks under uncertainties using fault-tree analysis. *Urban Water Journal*. 2008;5(4): 287-304. Available at: <https://doi.org/10.1080/15730620802213504>
14. Yuhua D, Datao Y. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2005; 18(2): 83-88. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423005000148>
15. Hsu F, Musicki Z. Issues and Insights of PRA Methodology in Nuclear and Space Applications, in IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2005: 510-517.
16. Mohamed A, Robinson FA. Fuzzy Reliability Analyzer: Quantitative Assessment of Risk Events in the Construction Industry Using Fuzzy Fault-Tree Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2011;137(4):294-302. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000285)
17. Onisawa T. Fuzzy theory in reliability analysis. *Fuzzy Sets and Systems*. 1989;30(3):361-63. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0165011489900316>
18. Liu Y, Fan Z-P, Yuan Y, Li H. A FTA-based Method for Risk Decision-making in Emergency Response. *Computers & Operations Research*. 2014;42: 49-57. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.015>
19. Zadeh LA. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965;8(3): 338-353. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S00199586590241X>
20. Lavasani SM, Zendegani A, Celik M. An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015;93(Supplement C):75-88. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582014000706>.
21. Omidvari M, Lavasani SMR, Mirza S. Presenting of failure probability assessment pattern by FTA in Fuzzy logic (case study: Distillation tower unit of oil refinery process). *Journal of Chemical Health and Safety*. 2014;21(6):14-22. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871553214000656>
22. Harati B, Karimi A, Askari A, Dehghani F, Nasrollahi A. Modeling and evaluation of safety consequences of propylene oxide leakage, a petrochemical company. *Journal of Health and Safety at Work*. 2018;8(2):199-209. Available at: <http://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-5859-fa.html>. [Persian]
23. Amiri M, Ardeshir A, Abbasi A. Hybrid approach for occupational hazard assessment in road construction projects. *Journal of Health and Safety at Work*. 2019;8(4):345-358. Available at: <http://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-5958-fa.html>. [Persian]
24. Ramzali N, Lavasani MRM, Ghodousi J. Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing Fuzzy Event Tree Analysis. *Safety Science*. 2015;78(Supplement C):49-59. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092575351500096X>
25. Shi L, Shuai J, Xu K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. *Journal of Hazardous Materials*. 2014;278(Supplement C):529-38. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389414004919>
26. Kermanshah Petrochemical Industries Company. KPIC. ir. 2014. Available at: <http://www.kpic.ir/?siteid=2>. [Persian]
27. Komal. Fuzzy fault tree analysis for patient safety risk modeling in healthcare under uncertainty. *Applied Soft Computing*. 2015;37(Supplement C):942-51. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494615004998>.