Journal of Occupational Hygiene Engineering Volume 4, Issue 2, Summer 2017, Pages: 41-52

Original Article

doi: 10.18869/acadpub.johe.4.2.41

Probabilistic Risk Assessment Using the Fuzzy Fault Tree Analysis Based on Two Types of Failure Possibility Distributions in Process Industries

Abbas Bekbaki[1], Nader Nebhani[2], Bagher Anvaripour[2,*], Gholam Abbas Shirali[3]

[1] *MS Student of Chemical Engineering (Health, Safety, and Environment), Department of Safety and Technical Protection Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran*
[2] *Associate Professor, Department of Safety and Technical Protection Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran*
[3] *Associate Professor, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Ahwaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahwaz, Iran*

**** Corresponding Author:*** *Bagher Anvaripour, Department of Safety and Technical Protection Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran. Email: anvaripour@put.ac.ir*

Received: 25/04/2017
Accepted: 20/09/2017

How to Cite this Article:
Bekbaki A, Nebhani N, Anvaripour B, Shirali GA. Probabilistic Risk Assessment Using the Fuzzy Fault Tree Analysis Based on Two Types of Failure Possibility Distributions in Process Industries. *J Occup Hyg Eng*. 2017; 4(2): 41-52. DOI: 10.18869/acadpub.johe.4.2.41

Abstract

Background and Objective: Probabilistic risk assessment through fault tree analysis is an effective tool to estimate the probability of hazardous event occurrence in chemical process industries. The probability of failure occurrence for basic events is not often available in process industries. The aim of this study was to calculate the basic event failure occurrence probability when these events have no precise failure data.

Materials and Methods: In this study, the proposed risk assessment framework was based on two fuzzy-based approaches, including five and six scales. Firstly, the fault tree diagram was constructed using the risk identification methods. Subsequently, the failure occurrence probability of the basic events were calculated by applying the two types of failure possibility distributions. Finally, the critical minimal cut sets were ranked using the importance measure analysis.

Results: According to the results, the failure occurrence probabilities calculated by the five-scale and six-scale approaches for the 32 basic events were closed to each other. The occurrence probability of the top event calculated by the five-scale and six-scale approaches were 3.64E-04 and 4.76E-04 per year, respectively. After ranking the minimal cut sets based on their calculated importance measures, the process failures were determined as the critical causes of top event.

Conclusion: As the findings indicated, the fuzzy-based approach seems to be a good alternative for the conventional Fault tree analysis approach for dealing with the basic events, which have no failure rate data for obtaining the failure occurrence probabilities. This study confirmed the consistency of fuzzy-based approach for the assessment of the basic event failure occurrence probabilities.

Keywords: Expert Judgment; Fuzzy Logic; Failure Occurrence Probability; Failure Possibility; Fuzzy Fault Tree Analysis

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

Copyright © 2017 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (*http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/*) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

مقاله پژوهشی

doi: 10.18869/acadpub.johe.4.2.41

ارزیابی ریسک احتمالی به روش آنالیز درخت خطای فازی بر پایه دو نوع توزیع امکان وقوع نقص در صنایع فرآیندی

عباس بک بکی[۱]، نادر نبهانی[۲]، باقر انوری‌پور[۲،*]، غلامعباس شیرالی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی (مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست)، گروه مهندسی ایمنی و حفاظت فنی، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

[۲] دانشیار، گروه مهندسی ایمنی و حفاظت فنی، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

[۳] دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران

* **نویسنده مسئول:** باقر انوری‌پور، گروه مهندسی ایمنی و حفاظت فنی، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران.

ایمیل: anvaripour@put.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۹

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

چکیده

سابقه و هدف: ارزیابی ریسک احتمالی با استفاده از آنالیز درخت خطا (FTA: Fault Tree Analysis) ابزاری مؤثر برای بررسی احتمال وقوع رویدادهای خطرناک در صنایع فرآیندی شیمیایی می‌باشد. متأسفانه بیشتر اوقات احتمال وقوع نقص رویدادهای پایه‌ای در صنایع فرآیندی در دسترس نمی‌باشد؛ بنابراین هدف از مطالعه حاضر، بررسی چگونگی محاسبه احتمال وقوع نقص رویدادهای پایه‌ای در زمانی است که این رویدادها داده‌های نقص دقیق ندارند.

مواد و روش‌ها: در مطالعه حاضر، ارزیابی ریسک پیشنهادشده براساس دو رویکرد فازی پایه پنج و شش مقیاسه بود. در ابتدا دیاگرام درخت خطا با استفاده از روش‌های شناسایی ریسک ترسیم گردید. سپس با استفاده از دو نوع توزیع امکان نقص، احتمال وقوع نقص رویدادهای پایه‌ای محاسبه شد. در پایان نیز با استفاده از آنالیز میزان اهمیت، مجموعه‌های برشی حداقل بحرانی رتبه‌بندی شدند.

یافته‌ها: براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که احتمال‌های وقوع نقص محاسبه‌شده با استفاده از رویکردهای پنج و شش مقیاسه برای ۳۲ رویداد پایه‌ای نزدیک به هم بوده‌اند. گفتنی است احتمال وقوع رویداد اصلی محاسبه‌شده با استفاده از رویکردهای پنج و شش مقیاسه به‌ترتیب ۳/۶۴E-۰۴ و ۴/۷۶E-۰۴ در سال بود. بعد از رتبه‌بندی MCSها بر پایه میزان اهمیت محاسبه‌شده آن‌ها، نقایص فرآیندی به‌عنوان علل بحرانی TE تعیین شد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج این مطالعه به‌نظر می‌رسد رویکرد فازی پایه، جایگزین خوبی برای رویکرد متعارف FTA به‌منظور مقابله با رویدادهای پایه‌ای باشد که داده‌های نرخ نقص برای به‌دست آوردن احتمال وقوع نقص خود ندارد. گفتنی است مطالعه حاضر سازگاری رویکرد فازی پایه برای ارزیابی احتمال‌های وقوع نقص رویدادهای پایه‌ای را تأیید کرده است.

واژگان کلیدی: آنالیز درخت خطای فازی؛ احتمال وقوع نقص؛ امکان نقص؛ قضاوت خبرگان؛ منطق فازی

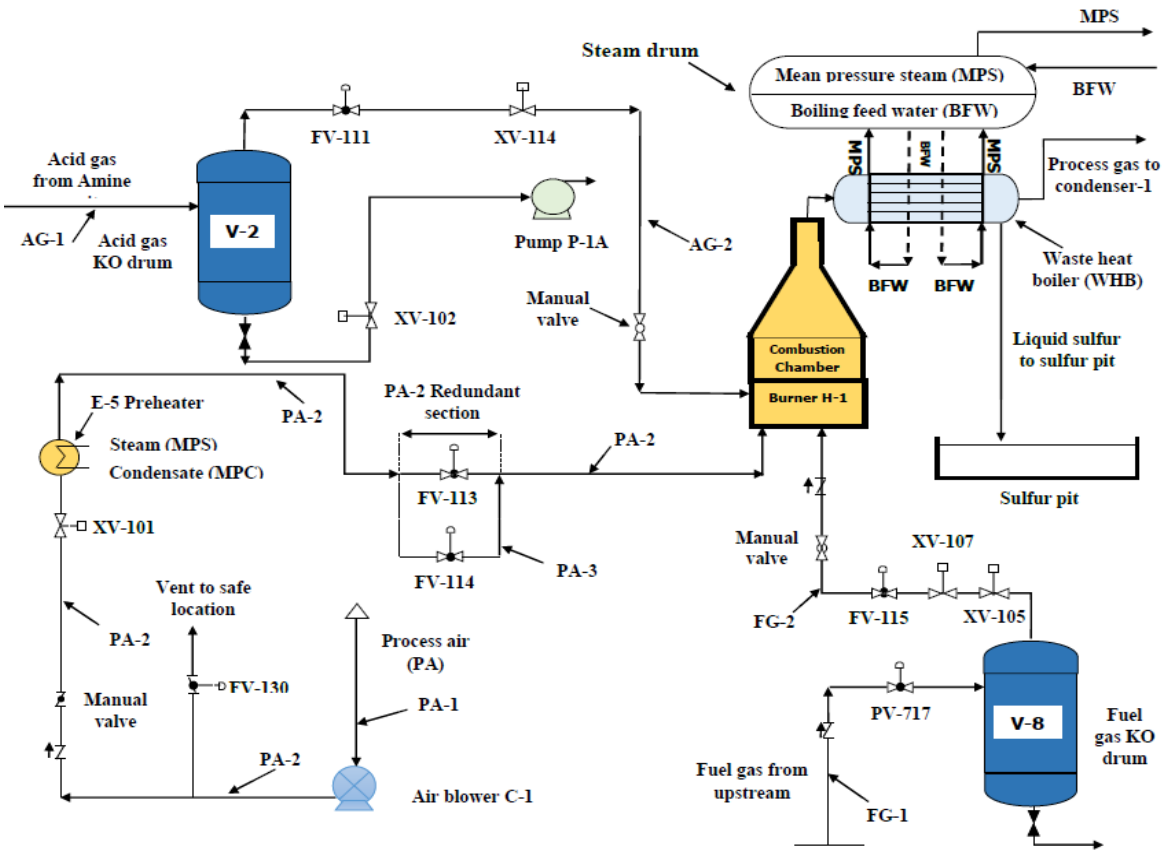
مقدمه

واحدهای مختلف در صنایع فرآیندی به‌خصوص واحد بازیافت گوگرد (SRU: Sulfur Recovery Unit) از خطرناک‌ترین فرآیندها به‌شمار می‌روند. هدف SRU تصفیه و پالایش گازهای تولیدشده از مراحل مختلف پالایش گاز و نفت خام می‌باشد [۱]. با توجه به وجود H_2S و دیگر ترکیبات خطرناک در خوراک واحد SRU، تصفیه‌نشدن این گازها یا بروز حوادث مختلف مانند حریق، انفجار یا انتشار این گازها، می‌تواند تبعات خطرناکی برای محیط زیست و مراکز جمعیتی به‌دنبال داشته باشد [۲]. بخش کلاوس مهم‌ترین بخش SRU از نظر بازدهی تصفیه H_2S می‌باشد. شکل ۱، دیاگرام فرآیندی ساده‌شده بخش کوره H-1 کلاوس و جریان‌های ورودی به آن را در این مطالعه نشان می‌دهد.

براساس مطالعه حاضر، ارزیابی ریسک احتمالی (PRA: Probabilistic Risk Assessment) به روش آنالیز درخت خطا (FTA: Fault Tree Analysis) فرآیند سیستماتیک ارزیابی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]



شکل ۱: دیاگرام فرآیندی بخش کوره واکنش حرارتی کلاوس واحد SRU در مطالعه حاضر

ریسک حوادث و رویدادهای خطرناک از نظر احتمال وقوع می‌باشد که با ارائه راهکارهایی به‌منظور کنترل و کاهش سطح ریسک، نقش مهمی در پیشگیری از وقوع رویدادهای خطرناک ایفا می‌نماید [۳]. گفتنی است FTA روشی دیاگرامی برای ارزیابی یک سناریو یا رویداد خطرناک یعنی همان رویداد اصلی (TE: Top Event) و علل وقوع آن به‌صورت کمی و کیفی می‌باشد. اساسی‌ترین مرحله کمی FTA، محاسبه نرخ و احتمال وقوع رویدادهای پایه‌ای (BE: Basic Event) است [۴،۵].

در مطالعات متعارف FTA در صنایع فرآیندی برای تعیین نرخ نقص BEها می‌توان از داده‌های نرخ نقص مراجع قابلیت اطمینان مانند OREDA (Odisha Renewable Energy Development Agency)، CCPS (Center for Chemical Process Safety) و Lee استفاده کرد [۶-۸]. متأسفانه در این منابع نیز برای برخی از BEها، نرخ نقایص وجود ندارد یا اینکه در صورت وجودداشتن از اطمینان‌پذیری بالایی برخوردار نمی‌باشد. گفتنی است گزارش فنی NOG-070 اطمینان-پذیری داده‌های نرخ نقص یک جزء را برای استفاده در مطالعات ارزیابی ریسک بر حسب تعداد اجزای در معرض نقص که داده‌های نرخ نقص از آن‌ها جمع‌آوری شده‌اند، تعریف می‌نماید. براساس این گزارش اگر تعداد اجزای در معرض نقص کمتر از ۳۰ جزء باشد، نرخ نقص به‌دست آمده در این حالت، اطمینان‌پذیری کافی برای استفاده در مطالعات ارزیابی ریسک نخواهد داشت [۹].

در مطالعه Jozi و همکاران (۲۰۱۴) به‌دلیل کمبود داده‌های نرخ نقص از داده‌های تقریبی استفاده گردید. این داده‌ها از پایش یک ساله واحد مورد نظر به‌دست آمد و اطمینان‌پذیری بالایی نداشت [۱۰]. خسروی راد و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش‌های FTA و FMEA (Failure Mode Effects Analysis) در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز، یکی از محدودیت‌های مطالعه خود را کمبود داده‌های نرخ نقص برای برخی BEها و همچنین نبود قطعیت در این داده‌ها بیان نمودند [۱۱]. در مطالعه دیگری که توسط میرزایی علی‌آبادی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از تلفیق روش‌های FTA و آنالیز درخت رویداد (ETA: Event Tree Analysis) در مدل پاپیونی (Bowtie) انجام شد، برای رفع مشکل قطعی‌نبودن احتمال وقوع برخی رویدادهای درخت خطا و درخت رویداد در مطالعات آینده، استفاده از منطق فازی پیشنهاد گردید [۱۲]. در مطالعه حاضر علاوه بر وجود مشکلات ذکرشده در این مطالعات، واحد SRU در مراحل اولیه عملیات فرآیندی قرار دارد؛ بنابراین اطلاعات کمی در مورد آن در دسترس می‌باشد. درخور ذکر است به‌منظور بهبود و رفع مشکلات ذکرشده، استفاده از نظرات خبرگان بر پایه نظریه‌های امکان و منطق فازی برای کسب اطلاعات کافی در مورد احتمال وقوع BEها پیشنهاد شده است [۱۳،۱۴].

با توجه به محدودیت‌های ذکرشده برای رویکرد متعارف درخت خطا در مطالعات بالا و همچنین توانمندی‌های منطق

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

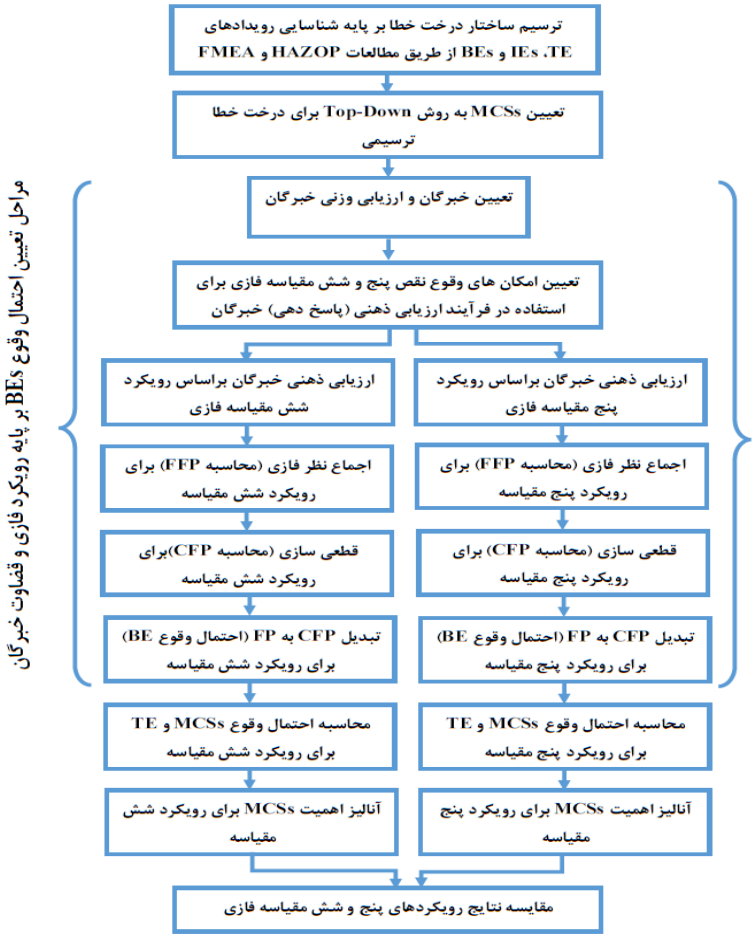
فازی، نظریه امکان و نظرات خبرگان، با استفاده از تلفیق نظریه مجموعه‌های فازی، نظریه امکان و نظرات خبرگان، احتمال وقوع BEها محاسبه می‌شود. همچنین به‌منظور بررسی پایداری و اعتبار رویکرد قضاوت خبرگان بر پایه منطق فازی، از یک رویکرد جدید مبتنی بر دو نوع توزیع امکان وقوع نقص فازی برای تعیین احتمال وقوع نقص رویدادها استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

مطالعه مقطعی حاضر در واحد بازیافت گوگرد یک پالایشگاه نفت انجام شد. در این مطالعه با توجه به بازدهی بالای تصفیه و همچنین حساسیت بالا، بخش کوره H-1 واکنش کلاوس برای بررسی چهارچوب پیشنهادی مطالعه درنظر گرفته شد. چهارچوب کلی مطالعه FTA در این بخش بر پایه رویکرد فازی در شکل ۲ آمده است. مراحل مطالعه به‌صورت زیر می‌باشد:

۱. ترسیم ساختار درخت خطا بر پایه شناسایی رویدادها: برای ترسیم درخت خطا ابتدا باید رویداد نامطلوب TE و علل آن یعنی رویدادهای میانی (IE: Intermediate Event) و BEها تعیین گردد. درواقع، رویدادهای IE علت TE و رویدادهای BE علت BEها می‌باشند. ارتباط میان این رویدادها از طریق دروازه‌های منطقی ایجاد می‌شود. از معمول‌ترین این دروازه‌ها، می‌توان به دروازه‌های "AND" و "OR" اشاره کرد. گفتنی است دروازه "AND" هنگامی استفاده می‌گردد که برای وقوع رویداد خروجی (از نوع TE یا IE) باید رویدادهای ورودی (از نوع IE یا BE) با همدیگر رخ دهند. دروازه "OR" نیز زمانی به‌کار می‌رود که برای وقوع رویداد خروجی (از نوع TE یا IE) حداقل وقوع یکی از رویدادهای ورودی (از نوع IE یا BE) کافی باشد [۴،۱۵].

در این مطالعه براساس مدل ارائه‌شده توسط Guo و Kang (۲۰۱۵) برای ترسیم درخت خطا، تمامی TEهای ممکن برای کوره با استفاده از روش‌های HAZOP و FMEA شناسایی شد. همچنین در این مدل از پیامدهای (Consequences) مطالعات HAZOP، اثرات (Effects) نقایص در مطالعات FMEA و نظرات خبرگان برای شناسایی TE ممکن استفاده شد. علل این پیامدها یا اثرات می‌توانند از نوع رویدادهای IE یا BE باشند. البته ممکن است این علل همان BEها نباشند. درنتیجه، این فرآیند باید تا پیداکردن و رسیدن به سطح BEها ادامه یابد [۵]. بعد از ترسیم درخت خطا با استفاده از این مطالعات و نظرات خبرگان، درخت ترسیم‌شده دوباره توسط خبرگان بررسی شد تا صحت آن ارزیابی گردد.



شکل ۲: چهارچوب کلی مطالعه در بخش کوره واکنش کلاوس SRU

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

۲. تعیین مجموعه‌های برشی حداقل: یک مجموعه برشی (CS: Cut Set) مجموعه‌ای از یک یا چند BE می‌باشد که اگر با همدیگر رخ دهند، رویداد TE اتفاق خواهد افتاد. مجموعه برشی حداقل (MCS: Minimal Cut Set) نوعی CS می‌باشد که توسط قوانین جبر بولین قابلیت ساده‌سازی بیشتر ندارد. شناسایی MCSها و محاسبه احتمال آن‌ها از نظر تعیین مسیرهای مختلف وقوع TE و همچنین محاسبه احتمال وقوع آن اهمیت دارد. در این مطالعه به‌منظور تعیین MCSها از روش بالا به پایین (Top-Down) استفاده شد [۴،۱۶].

۳. تعیین احتمال وقوع BEها بر پایه رویکرد فازی: مراحل پنجگانه محاسبه احتمال وقوع نقص برای هریک از BEها براساس دو رویکرد فازی پایه پنج و شش مقیاسه در گام‌های زیر آورده شده است:

گام ۱: تعیین خبرگان و ارزیابی وزنی خبرگان: براساس توصیه Cooke و همکاران (۲۰۰۸) برای انتخاب خبرگان سه شاخص کلی یعنی میزان مقالات علمی منتشرشده، تجربه انجام مطالعات مشابه در گذشته و تأیید صلاحیت فرد خبره توسط افراد مختلف دیگر مدنظر قرار گرفت [۱۷]. همچنین با توجه به اینکه خبرگان دارای معیارهای مختلفی همچون: تجربه، تحصیلات، سن، سمت سازمانی و غیره می‌باشند، یک فاکتور وزنی نسبی براساس این معیارها و مقیاس امتیازدهی لیکرت به‌منظور اعمال در امکان وقوع BEها تعریف گردید که در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: معیارهای چهارگانه وزنی خبرگان

ردیف	معیار وزن خبرگان	رتبه‌بندی معیار	امتیاز
۱	عنوان سازمانی	مدیر، مهندس ارشد	۵
		سرپرست واحد	۴
		مهندس	۳
		تکنسین	۲
		اپراتور	۱
۲	میزان تجربه کاری (برحسب سال)	بیش از ۳۰	۵
		۲۰-۳۰	۴
		۱۰-۱۹	۳
		۶-۹	۲
		کمتر از ۶	۱
۳	میزان تحصیلات	دکترا	۵
		کارشناسی ارشد	۴
		کارشناسی	۳
		کاردانی	۲
		کمتر از دیپلم	۱
۴	سن (برحسب سال)	بیش از ۵۰	۴
		۴۰-۵۰	۳
		۳۰-۳۹	۲
		کمتر از ۳۰	۱

براساس معیارهای جدول ۱، فاکتور وزنی نسبی برای هریک از خبرگان شامل مجموع امتیازات لیکرت کسب‌شده توسط هر خبره تقسیم بر مجموع امتیازات کسب‌شده توسط همه خبرگان است [۱۵،۱۶].

گام ۲: تعیین توزیع امکان‌های وقوع نقص فازی (فازی‌سازی) و ارزیابی ذهنی خبرگان: در این مرحله برای محاسبه احتمال وقوع BEها، متغیرهای زبانی بیانگر نظرات خبرگان در قالب توزیع امکان وقوع نقص (FPD: Failure Possibility Distribution) تعریف می‌گردند. از این FPDها به‌عنوان پاسخ پرسشنامه امکان وقوع BEها توسط خبرگان استفاده می‌شود. گفتنی است توابع عضویت مثلثی به‌دلیل کاربرد فراوان در مطالعات ریسک و سادگی کاربرد، برای کمی‌سازی FPDها مدنظر قرار گرفت. یک عدد فازی مثلثی با سه مؤلفه a،b و c به‌صورت $\mu_{\tilde{A}}(a,b,c)$ نشان داده می‌شود [۱۳،۱۸]. بنا بر توصیه Miller (۱۹۵۶) و براساس ظرفیت ذهنی انسان، تعداد متغیرهای زبانی این FPDها باید بین ۵ تا ۹ باشد [۱۹]؛ بنابراین دو نوع FPD پنج و شش متغیره در جدول ۲ که توسط توابع عضویت مثلثی فازی کمی‌سازی شده‌اند برای فرآیند ارزیابی ذهنی (پاسخ‌دهی) خبرگان به‌عنوان پاسخ‌های پرسشنامه‌های امکان وقوع نقص BEها انتخاب شدند [۲۰،۲۱].

گام ۳: اجماع نظر بین امکان‌های وقوع نقص فازی متناظر با نظرات جمع‌آوری‌شده خبرگان: برای اجماع نظر بین نظرات مختلف خبرگان در مورد امکان وقوع نقص BEها با توجه به در دسترس بودن وزن نسبی خبرگان، امکان وقوع

جدول ۲: امکان‌های وقوع نقص و توابع عضویت فازی

متغیرهای زبانی پنج مقیاسه	
امکان وقوع نقص	**تابع عضویت فازی**
خیلی کم (VL)	μ_{VL} (۰/۰۰ ،۰/۰۰ ،۰/۲۵)
کم (L)	μ_{L} (۰/۰۰ ،۰/۲۵ ،۰/۵۰)
متوسط (M)	μ_{M} (۰/۲۵ ،۰/۵۰ ،۰/۷۵)
زیاد (H)	μ_{H} (۰/۵۰ ،۰/۷۵ ،۱/۰۰)
خیلی زیاد (VH)	μ_{VH} (۰/۷۵ ،۱/۰۰ ،۱/۰۰)
متغیرهای زبانی شش مقیاسه	
امکان وقوع نقص	**تابع عضویت فازی**
خیلی کم (VL)	μ_{VL} (۰/۰۰ ،۰/۰۰ ،۰/۲۰)
کم (L)	μ_{L} (۰/۰۰ ،۰/۲۰ ،۰/۴۰)
نسبتاً کم (FL)	μ_{FL} (۰/۲۰ ،۰/۴۰ ،۰/۶۰)
نسبتاً زیاد (FH)	μ_{FH} (۰/۴۰ ،۰/۶۰ ،۰/۸۰)
زیاد (H)	μ_{H} (۰/۶۰ ،۰/۸۰ ،۱/۰۰)
خیلی زیاد (VH)	μ_{VH} (۰/۸۰ ،۱/۰۰ ،۱/۰۰)

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

نقص فازی اجماع‌یافته (AFFP: Aggregated Fuzzy Failure Possibility) با استفاده از رابطه ۱ به‌دست آمد [۱۳،۱۵].

$$AFFP = \mu_{Agg}(x) = \sum_{j=1}^{n} w_j \mu_{ij}$$ رابطه ۱

در رابطه ۱، $\mu_{Agg}(x)$ نشان‌دهنده AFFP، W_j وزن نسبی خبره j و μij امکان وقوع نقص فازی BE_i بیان‌شده توسط خبره j می‌باشد. همچنین n تعداد کل خبرگان می‌باشد.

گام ۴: قطعی‌سازی امکان وقوع نقص فازی اجماع‌یافته: مقادیر AFFP حاصل از مرحله اجماع نظر باید تبدیل به یک عدد قطعی گردد. برای یک عدد فازی مثلثی $\widetilde{A}$ با تابع عضویت فازی $\mu_{\widetilde{A}}(a,b,c)$، رابطه قطعی‌ساز در امکان وقوع نقص قطعی (CFP: Crisp Failure Possibility) به‌صورت زیر است [۱۳].

$$CFP = \frac{1}{18}(4a + b + c)$$ رابطه ۲

گام ۵: تبدیل CFP به احتمال وقوع نقص BEها: مقادیر به‌دست آمده برای هر BE در مرحله قطعی‌سازی، CFP می‌باشد. به‌منظور محاسبه احتمال وقوع نقص (FP: Failure Probability) BEها از مقادیر CFP، تابع زیر پیشنهاد شده است [۲۲].

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases} ; K = \left[\frac{1-CFP}{CFP}\right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301$$ رابطه ۳

در رابطه بالا، K یک متغیر حد واسط است که فقط تابع CFP می‌باشد.

۴. تعیین احتمال وقوع MCSها و TE: بعد از تعیین احتمال وقوع تمامی BEها می‌توان احتمال وقوع هریک از MCSهای منجر به TE را با استفاده از رابطه ۴ محاسبه نمود. احتمال وقوع TE نیز از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد [۱۶].

$$P(MCS_j) = \prod_{i=1}^{n} FP(BE_i)$$ رابطه ۴

$$P(TE) = 1 - \prod_{j=1}^{k} \left(1 - P(MCS_j)\right)$$ رابطه ۵

در رابطه ۴، $FP\ (BE_i)$ نشان‌دهنده احتمال وقوع رویداد پایه‌ای i، $P\ (MCS_j)$ بیانگر احتمال وقوع مجموعه برشی حداقل j و $P\ (TE)$ احتمال وقوع TE می‌باشد.

۵. تعیین میزان اهمیت MCSها: به‌منظور تعیین میزان اهمیت (IM: Importance Measure) هرکدام از MCSها شامل BEها در ساختار درخت خطا می‌توان از رابطه ۶ استفاده نمود [۴].

$$IM(MCS_j) = \frac{P(MCS_j)}{P(TE)}$$ رابطه ۶

در رابطه بالا، IM (MCSj) بیانگر میزان اهمیت مجموعه برشی حداقل j می‌باشد.

یافته‌ها

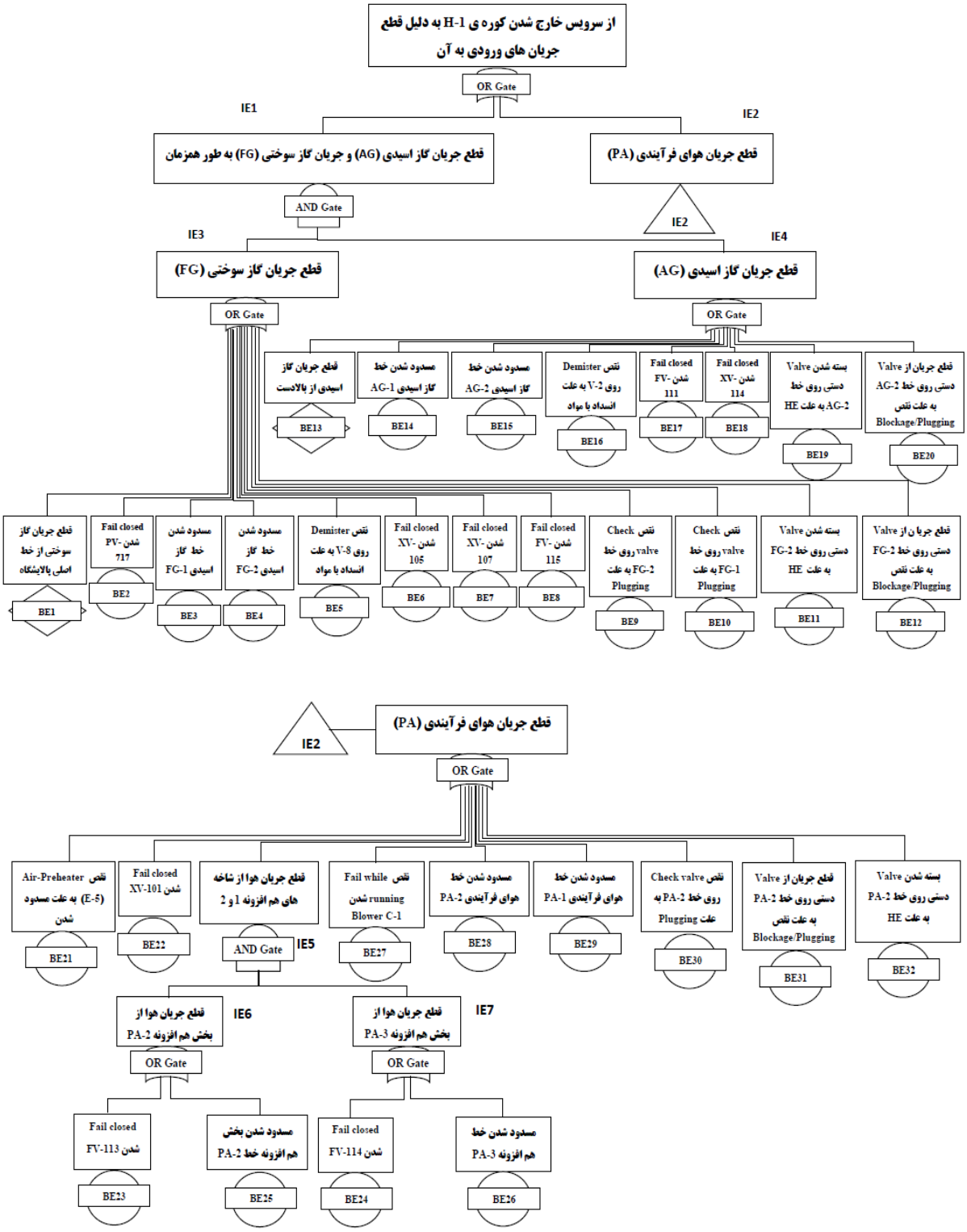
با انجام مطالعات HAZOP و FMEA و همچنین مصاحبه با خبرگان فرآیندی واحد SRU، ریسک‌های بخش کوره H-1 شناسایی گردید. در این بخش مشکلات مختلفی همچون: نشت و رهاسازی، حریق و انفجار و نقایص کارکردی مانند از سرویس خارج‌شدن (Shutdown) بیشترین فراوانی وقوع را در بین پیامدها و اثرات موجود در مطالعات HAZOP و FMEA داشتند. با توجه به نظرات خبرگان و نتایج مطالعات HAZOP و FMEA، نقص Shutdown به‌تنهایی می‌تواند پیامدهایی مانند رهاسازی، حریق و انفجار به‌دنبال داشته باشد؛ بنابراین نقص Shutdown کوره H-1 به‌علت قطع جریان‌های هوای فرآیندی (PA: Process Air)، گاز اسیدی (AG: Acid Gas) و گاز سوختی (FG: Fuel Gas) به کوره به‌عنوان TE درخت خطا درنظر گرفته شد.

گفتنی است در هنگام ترسیم درخت خطا به‌دلیل آنکه قطع جریان گاز اسیدی یا گاز سوختی به‌تنهایی نمی‌تواند باعث Shutdown کوره شود، این دو رویداد برای Shutdown کوره باید وارد یک دروازه "AND" شوند. گفتنی است قطع PA به‌تنهایی برای Shutdown کوره کافی می‌باشد. سه رویداد میانی یعنی قطع PA، AG و FG به‌عنوان علل بدون واسطه وقوع Shutdown کوره در یک سطح پایین‌تر از TE در ساختار درخت قرار می‌گیرند. فرآیند ترسیم درخت خطا با پیداکردن علل این IEها تا رسیدن به سطح BEها ادامه می‌یابد. با رسیدن به سطح BEها، برای درخت خطای حاصل از این سناریو تعداد ۳۲ BE و ۷ IE به‌دست آمد (شکل ۳). همچنین با استفاده از روش Top-Down، ۱۰۸ MCS برای سناریوی انتخابی حاصل شد.

در این مطالعه برای تعیین احتمال وقوع BEها از دو رویکرد پنج و شش مقیاسه فازی استفاده شد. همچنین در این رویکردها از پنج گام ذکرشده برای تعیین احتمال وقوع BEها استفاده شد. در ابتدا براساس شاخص‌های مطالعه Cooke، چهار خبره واجد شرایط شامل: مهندس ارشد واحد، سرپرست، مهندس فرآیند و تکنسین عملیاتی به‌منظور ارزیابی احتمال وقوع BEها انتخاب شدند. همچنین وزن نسبی محاسبه‌شده براساس جدول ۱ برای چهار خبره در جدول ۳ آمده است. در مرحله بعد یعنی فرآیند ارزیابی ذهنی خبرگان، با استفاده از دو نوع FPD پنج و شش مقیاسه تعریف‌شده در جدول ۲، امکان وقوع نقص ۳۲ رویداد پایه‌ای در قالب مصاحبه حضوری با چهار خبره مورد نظر مشخص گردید. درخور ذکر است در این مطالعه برای

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]



شکل ۳: ساختار درخت خطا برای سناریوی از سرویس خارج‌شدن کوره ۱ واکنش کلاوس

جدول ۳: فاکتور وزنی نسبی محاسبه‌شده برای خبرگان براساس معیارهای چهارگانه

خبرگان	عنوان	تحصیلات	تجربه	سن	امتیاز وزنی	فاکتور وزنی
خبره ۱	۴	۳	۴	۳	۱۴	۰/۲۹۱۶۶۷
خبره ۲	۵	۴	۳	۲	۱۴	۰/۲۹۱۶۶۷
خبره ۳	۲	۴	۲	۲	۱۰	۰/۲۰۸۳۳۳
خبره ۴	۳	۴	۱	۲	۱۰	۰/۲۰۸۳۳۳
					۴۸	۱

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

دوری از افزایش حجم فقط نتایج مراحل مختلف محاسبه احتمال وقوع برخی از BEها در رویکرد پنج مقیاسه گزارش شده است.

نتایج حاصل از توزیع پرسشنامه رویکرد پنج مقیاسه در ستون دوم جدول ۴ آمده است. بر پایه وزن خبرگان در جدول ۳ و با استفاده از رابطه ۱ بین امکان‌های وقوع نقص به‌دست آمده از خبرگان یک اجماع نظر فازی صورت گرفت که نتایج آن در ستون سوم جدول ۴ مشاهده می‌شود. نظرات اجماع‌یافته خبرگان که AFFP نامیده می‌شوند، با استفاده از رابطه ۲ به عدد قطعی CFP تبدیل شدند. نتایج این مرحله در ستون چهارم جدول ۴ آمده است. درپایان، با استفاده از رابطه ۳ اعداد CFP به FP برای BEها تبدیل شدند و نتایج آن برای رویکرد پنج مقیاسه فازی در ستون پنجم جدول ۴ آمده است.

احتمال وقوع برای هر ۱۰۸ MCS با استفاده از رابطه ۴، تعیین گردید. سپس با استفاده از رابطه ۵ احتمال وقوع TE اثبات شد. گفتنی است احتمال وقوع TE برای رویکرد پنج مقیاسه فازی، ۳/۶۴E-۰۴ در سال و برای رویکرد شش مقیاسه فازی، ۴/۷۶E-۰۴ در سال تعیین شد. همچنین میزان اهمیت هریک از MCSها با استفاده از رابطه ۶ مشخص گردید. برای هر دو رویکرد پنج و شش مقیاسه، نتایج حاصل از این مرحله فقط برای مهم‌ترین MCSها در جدول ۵ آمده است. درنهایت، جدول ۶

جدول ۴: فرآیند ارزیابی ذهنی خبرگان، اجماع نظر و احتمال وقوع برخی از BEها برای رویکرد پنج مقیاسه فازی

BE	فرآیند ارزیابی ذهنی خبرگان				مقادیر FFP	مقادیر CFP	تبدیل CFP به FP
	خبره ۱	خبره ۲	خبره ۳	خبره ۴			
۱	VL	L	L	VL	(۰ ،۰/۱۲۵ ،۰/۳۷۵)	۰/۰۲۸	۲/۹۸E-۰۸
۲	M	M	H	L	(۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰ ،۰/۷۵۰)	۰/۱۲۵	۳/۹۷E-۰۵
۳	L	L	L	L	(۰ ،۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰)	۰/۰۴۲	۲/۸۶E-۰۷
۴	L	M	M	L	(۰/۱۲۵ ،۰/۳۷۵ ،۰/۶۲۵)	۰/۰۸۳	۷/۶۴E-۰۶
۶	M	M	H	L	(۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰ ،۰/۷۵۰)	۰/۱۲۵	۳/۹۷E-۰۵
۹	L	L	L	L	(۰ ،۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰)	۰/۰۴۲	۲/۸۶E-۰۷
۱۱	VL	L	M	M	(۰/۱۰۴ ،۰/۲۸۱ ،۰/۵۳۱)	۰/۰۶۸	۳/۱۸E-۰۶
۱۳	M	H	VH	M	(۰/۴۲۷ ،۰/۶۷۷ ،۰/۸۷۵)	۰/۱۸۱	۱/۵۷E-۰۴
۱۴	L	L	M	VL	(۰/۰۵۲ ،۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰)	۰/۰۵۳	۹/۸۸E-۰۷
۱۶	M	M	M	M	(۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰ ،۰/۷۵۰)	۰/۱۲۵	۳/۹۷E-۰۵
۱۷	M	M	H	L	(۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰ ،۰/۷۵۰)	۰/۱۲۵	۳/۹۷E-۰۵
۱۹	VL	L	L	L	(۰ ،۰/۱۷۷ ،۰/۴۲۷)	۰/۰۳۴	۸/۸۸E-۰۸
۲۰	L	L	L	VL	(۰ ،۰/۱۹۸ ،۰/۴۴۸)	۰/۰۳۶	۱/۲۸E-۰۷
۲۱	VL	L	M	VL	(۰/۰۵۲ ،۰/۱۷۷ ،۰/۴۲۷)	۰/۰۴۵	۴/۳۳E-۰۷
۲۲	M	M	H	L	(۰/۲۵۰ ،۰/۵۰۰ ،۰/۷۵۰)	۰/۱۲۵	۳/۹۷E-۰۵
۲۵	VL	L	VL	VL	(۰ ،۰/۰۷۳ ،۰/۳۲۳)	۰/۰۲۲	۷/۰۶E-۰۹
۲۶	L	M	L	L	(۰/۰۷۳ ،۰/۳۲۳ ،۰/۵۷۳)	۰/۰۶۶	۲/۷۲E-۰۶
۲۷	H	H	VH	H	(۰/۵۵۲ ،۰/۸۰۲ ،۱)	۰/۲۲۳	۳/۲۴E-۰۴
۳۱	VL	VL	VL	VL	(۰ ،۰ ،۰/۲۵۰)	۰/۰۱۴	۲/۹۷E-۱۰
۳۲	VL	L	VL	VL	(۰ ،۰/۰۷۳ ،۰/۳۲۳)	۰/۰۲۲	۷/۰۶E-۰۹

جدول ۵: آنالیز اهمیت MCSها برای دو رویکرد پنج و شش مقیاسه فازی

رویکرد متغیرهای زبانی پنج مقیاسه فازی پایه				
شماره MCS	رویدادهای موجود در MCS	احتمال وقوع	میزان اهمیت	رتبه
MCS103	BE27	۳/۲۴E-۰۴	۸/۹۰E-۰۱	۱
MCS98	BE22	۳/۹۷E-۰۵	۱/۰۹E-۰۱	۲
MCS97	BE21	۴/۳۳E-۰۷	۱/۱۹E-۰۳	۳
MCS104	BE28	۷/۰۶E-۰۹	۱/۹۴E-۰۵	۴
MCS105	BE29	۷/۰۶E-۰۹	۱/۹۴ E-۰۵	۴
MCS106	BE30	۷/۰۶E-۰۹	۱/۹۴E-۰۵	۴
MCS108	BE32	۷/۰۶E-۰۹	۱/۹۴E-۰۵	۴
MCS9	BE2 و BE13	۶/۲۲E-۰۹	۱/۷۱E-۰۵	۵
MCS41	BE6 و BE13	۶/۲۲E-۰۹	۱/۷۱E-۰۵	۵

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

ادامه جدول ۵.

رویکرد متغیرهای زبانی شش مقیاسه فازی پایه

شماره MCS	رویدادهای موجود در MCS	احتمال وقوع	میزان اهمیت	رتبه
MCS103	BE27	۴/۴۸E-۰۴	۹/۴۲E-۰۱	۱
MCS98	BE22	۲/۷۶E-۰۵	۵/۸۰E-۰۲	۲
MCS97	BE21	۱/۳۳E-۰۷	۲/۸۰E-۰۴	۳
MCS9	BE2 و BE13	۷/۴۷E-۰۹	۱/۵۷E-۰۵	۴
MCS41	BE6 و BE13	۷/۴۷E-۰۹	۱/۵۷E-۰۵	۴
MCS49	BE7 و BE13	۷/۴۷E-۰۹	۱/۵۷E-۰۵	۴
MCS57	BE8 و BE13	۷/۴۷E-۰۹	۱/۵۷E-۰۵	۴
MCS25	BE4 و BE13	۲/۳۸E-۰۹	۲/۳۸E-۰۶	۵

جدول ۶: نتایج حاصل از رویکردهای پنج و شش مقیاسه

شماره BE	احتمال وقوع (FP)	
	رویکرد پنج مقیاسه	رویکرد شش مقیاسه
۱	۲/۹۸E-۰۸	۷/۵۴E-۰۹
۲	۳/۹۷E-۰۵	۲/۷۶E-۰۵
۳	۲/۸۶E-۰۷	۸/۵۴E-۰۸
۴	۷/۶۴E-۰۶	۸/۷۸E-۰۶
۵	۷/۶۴E-۰۶	۲/۸۵E-۰۶
۶	۳/۹۷E-۰۵	۲/۷۶E-۰۵
۷	۳/۹۷E-۰۵	۲/۷۶E-۰۵
۸	۳/۹۷E-۰۵	۲/۷۶E-۰۵
۹	۲/۸۶E-۰۷	۸/۵۴E-۰۸
۱۰	۲/۸۶E-۰۷	۸/۵۴E-۰۸
۱۱	۳/۱۸E-۰۶	۱/۱۲E-۰۶
۱۲	۲/۸۶E-۰۷	۸/۵۴E-۰۸
۱۳	۱/۵۷E-۰۴	۲/۷۱E-۰۴
۱۴	۹/۸۸E-۰۷	۳/۲۱E-۰۷
۱۵	۹/۸۸E-۰۷	۳/۲۱E-۰۷
۱۶	۳/۹۷E-۰۵	۵/۹۳E-۰۵
۱۷	۳/۹۷E-۰۵	۸/۴۶E-۰۵
۱۸	۳/۹۷E-۰۵	۸/۴۶E-۰۵
۱۹	۸/۸۸E-۰۸	۲/۴۳E-۰۸
۲۰	۱/۲۸E-۰۷	۳/۶۲E-۰۸
۲۱	۴/۳۳E-۰۷	۱/۳۳E-۰۷
۲۲	۳/۹۷E-۰۵	۲/۷۶E-۰۵
۲۳	۳/۹۷E-۰۵	۲/۷۶E-۰۵
۲۴	۳/۹۷E-۰۵	۲/۷۶E-۰۵
۲۵	۷/۰۶E-۰۹	۱/۶۱E-۰۹
۲۶	۲/۷۲E-۰۶	۹/۴۶E-۰۷
۲۷	۳/۲۴E-۰۴	۴/۴۸E-۰۴
۲۸	۷/۰۶E-۰۹	۱/۶۱E-۰۹
۲۹	۷/۰۶E-۰۹	۱/۶۱E-۰۹
۳۰	۷/۰۶E-۰۹	۱/۶۱E-۰۹
۳۱	۲/۹۷E-۱۰	۵/۳۵E-۱۱
۳۲	۷/۰۶E-۰۹	۱/۶۱E-۰۹

نتایج به‌دست آمده درباره احتمال وقوع تمامی BEها براساس رویکرد فازی پایه متغیرهای زبانی پنج و شش مقیاسه را با یکدیگر مقایسه نموده است.

بحث

هدف اصلی از انجام این مطالعه، رفع مشکل کمبود داده‌های معتبر و دقیق برای استفاده در مطالعات FTA می‌باشد. در مطالعه حاضر یک چهارچوب کاربردی بر پایه رویکرد جدید منطق فازی به‌منظور حل این مشکلات ارائه گردید. برای حالت نقص انسداد خطوط لوله (Blockage)، ۸ رویداد پایه‌ای BE3، BE4، BE14، BE15، BE25، BE26، BE28، BE29 نرخ نقص در کتاب مرجع Lee در دسترس بود؛ اما با توجه به نظر نویسنده این مرجع، داده‌های ارائه‌شده برای نرخ نقص قطعیت ندارند و استفاده از آن‌ها توصیه نمی‌شود. همچنین رویدادهای BE1 و BE13 از نوعی می‌باشند که در کتاب‌های قابلیت اطمینان نرخ نقصی برای آن‌ها وجود ندارد. در این میان، در مورد حالت نقص Plugging برای Check valve یعنی رویدادهای BE9، BE10 و BE30 نیز داده‌های نرخ به‌صورت تفکیک‌شده حتی در مرجع معتبر OREDA ارائه نشده و فقط به ارائه یک نرخ نقص کلی اکتفا شده است. در مطالعات Jozi و همکاران (۲۰۱۴)، خسروی راد و همکاران (۲۰۱۶) و میرزایی علی‌آبادی (۲۰۱۶) وجود مشکل کمبود داده‌های نرخ نقص و نبود قطعیت در صنایع فرآیندی گزارش گردید؛ بنابراین وجود این مشکلات استفاده از رویکرد نوین منطق فازی را توجیه می‌نماید [۱۰-۱۲].

در این مطالعه ارزیابی ریسک به روش FTA با دو رویکرد فازی در داخل انجام نشده است؛ بنابراین نتایج دو رویکرد فازی برای احتمال وقوع BEها در این مطالعه با مطالعات انجام‌شده توسط Rajakarunkaran و همکاران (۲۰۱۵) و Renjith و همکاران (۲۰۱۰) مقایسه گردید. در مطالعه Renjith و همکاران از دو رویکرد فازی استفاده شد. با این تفاوت که در یکی از این رویکردها، اعداد فازی دو بعدی به‌کار رفت. گفتنی است در مطالعه Rajakarunakaran و همکاران از دو رویکرد

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

فازی با دو گروه ناهمگون مختلف از خبرگان استفاده شد [۱۵،۱۶].

در این مطالعه دلیل اصلی استفاده از دو رویکرد فازی، بررسی تأثیر تغییر FPDها روی پایداری نتایج رویکرد فازی در مطالعات PRA به روش FTA در مقدورنبودن استفاده از داده‌های نرخ نقص حقیقی بود. براساس نتایج مطالعه Renjith و همکاران برای دو رویکرد فازی مشاهده شد که بیشترین اختلاف مقادیر احتمال وقوع بین تمامی BEها در دو رویکرد فازی معمول و فازی دو بعدی برای رویداد BE11 اتفاق افتاده است. در این رویداد مقادیر به‌دست آمده برای رویکرد فازی دو بعدی، ۱/۴۸ برابر رویکرد فازی معمول است. نتایج مطالعه Rajakarunakaran و همکاران نیز نشان داد که در بین تمامی BEها بیشترین اختلاف مقادیر بین یک رویکرد فازی و رویکرد فازی دیگر حدود ۵۰۰ برابر بوده که برای رویداد BE7 رخ داده است [۱۵،۱۶]؛ اما در مطالعه حاضر براساس جدول ۶ از بین ۳۲ رویداد پایه‌ای، بیشترین اختلاف بین مقادیر احتمال وقوع تمامی BEها با استفاده از رویکردهای فازی پنج و شش مقیاسه برای رویدادهای BE25، BE28، BE29، BE30 و BE32 رخ داده است. برای این رویدادها احتمال وقوع به‌دست آمده با استفاده از رویکرد پنج مقیاسه، ۴/۳۸ برابر مقادیر به‌دست آمده از طریق رویکرد شش مقیاسه می‌باشد. از مقایسه این نسبت‌ها در این سه مطالعه می‌توان فهمید که اختلاف مقادیر به‌دست آمده بین رویکردهای فازی پنج و شش مقیاسه این مطالعه در بدترین و بیشترین مقدار خود (یعنی برای رویدادهای BE25، BE28، BE29، BE30 و BE32) از مقادیر به‌دست آمده برای دو رویکرد فازی مطالعه Renjith و همکاران بیشتر ولی از مقادیر دو رویکرد فازی مطالعه Rajakarunakaran و همکاران بسیار کمتر می‌باشد. همچنین این تفسیر نشان می‌دهد اطمینان‌پذیری و پایداری رویکرد فازی پیشنهادی در مقایسه با مطالعات ذکرشده مناسب می‌باشد.

در مطالعه حاضر، نتایج احتمال وقوع به‌دست آمده از رویکرد پنج مقیاسه برای ۲۶ مورد از BEها بیشتر از نتایج رویکرد شش مقیاسه بود؛ درحالی که فقط ۶ مورد از BEهای رویکرد شش مقیاسه احتمال وقوعی بیشتر از مقادیر رویکرد پنج مقیاسه داشتند؛ بنابراین می‌توان این طور تفسیر کرد که به‌طور کلی در شرایط عملیاتی واحد SRU مقادیر به‌دست آمده از رویکرد پنج مقیاسه از رویکرد شش مقیاسه بیشتر می‌باشند.

در مطالعات Omidvari و همکاران (۲۰۱۴) و همچنین Guo و Kang (۲۰۱۵) از روش HAZOP برای شناسایی رویدادهای درخت خطا استفاده شد. این مطالعات نشان دادند روش HAZOP فرآیندی که برای ترسیم درخت خطا استفاده شده است، فقط توانایی شناسایی رویدادهای با ماهیت فرآیندی و به میزان کمتر نقایص مکانیکی را دارد [۵،۲۳]. در مطالعه حاضر از میان ۳۲ BE درخت خطا، ۲۳ رویداد با استفاده از روش HAZOP فرآیندی، ۶ رویداد با استفاده از روش FMEA و ۳ رویداد دیگر که از نوع خطای انسانی بودند از طریق مصاحبه با خبرگان شناسایی گردید. نتایج این مطالعات نشان داد که با استفاده از روش‌های شناسایی خطرات و ریسک‌ها به همراه نظرات خبرگان، می‌توان از صحت درخت خطای ترسیمی براساس این روش‌ها اطمینان بیشتری حاصل کرد.

در این مطالعه با کم‌کردن احتمال وقوع TE از عدد یک، میزان قابلیت اطمینان با استفاده از رویکرد پنج و شش مقیاسه فازی به‌ترتیب برابر ۰/۹۹۹۶۳۶ و ۰/۹۹۹۵۲۴ به‌دست آمد. همچنین میزان قابلیت اطمینان به‌دست آمده برای کوره H-1 با استفاده از رویکرد شش مقیاسه کمتر از مقدار به‌دست آمده برای رویکرد پنج مقیاسه بود.

نتایج حاصل از آنالیز اهمیت MCSها (جدول ۵) نشان داد MCS103 که فقط شامل BE27 (از کار افتادن Blower C-1) بود، در هر دو رویکرد پنج و شش مقیاسه فازی به‌عنوان بحرانی‌ترین MCS تعیین شده است؛ بنابراین باید بیشتر تمرکز تصمیم‌گیرندگان روی حذف یا کاهش احتمال وقوع آن باشد. با حذف این MCS میزان قابلیت اطمینان در رویکردهای پنج و شش مقیاسه فازی به‌ترتیب به مقادیر ۰/۹۹۹۹۵۹۸ و ۰/۹۹۹۹۷۲۲ افزایش یافت.

در مطالعه Omidvari و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از FTA فازی، نقایص فرآیندی مانند: گرفتگی کاتالیست، نقص کنترل‌کننده دما و جریان نامناسب سیال به‌عنوان بحرانی‌ترین BEها (یا MCSها) درخت شناخته شدند [۲۳]. همچنین در مطالعه خسروی راد و همکاران (۲۰۱۶) به‌ترتیب علل وقوع TE از مهم‌ترین به کم اهمیت‌ترین شامل علل فرآیندی، علل انسانی و اعمال ناایمن و علل مکانیکی می‌باشند [۱۱]. همانند مطالعات بالا در مطالعه حاضر نیز سه نقص فرآیندی مانند از کار افتادن دمنده (Blower) هوا (BE27)، بسته‌شدن شیر قطع‌کن اضطراری XV-101 (BE22) و بسته‌شدن مسیر پیش گرمکن (BE21) به‌عنوان بحرانی‌ترین علل وقوع TE شناخته شدند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با توجه به اینکه نرخ نقص کافی برای برخی از BEها وجود نداشت، استفاده از رویکرد جدید منطق فازی پیشنهاد گردید. در مطالعه حاضر برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین، نه‌تنها احتمال وقوع BEهای فاقد نرخ نقص؛ بلکه تمامی BEهای درخت خطا با استفاده از منطق فازی محاسبه شد. همچنین نتایج رویکرد پیشنهادی جدید مبتنی بر دو نوع FPD فازی از سازگاری بسیار خوبی برخوردار بود. گفتنی است مزیت

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

اصلی استفاده از رویکرد فازی این است که نظرات کیفی خبرگان در قالب امکان‌های وقوع نقص می‌تواند به‌طور مستقیم در محاسبه احتمال وقوع رویدادها مورد استفاده قرار گیرد.

بعد از مصاحبه با خبرگان و از نظر عملی، به‌منظور کاهش احتمال وقوع MCS بحرانی (Blower C-1)، هم‌افزونگی (Redundancy) نوع آماده به کار (Standby) پیشنهاد گردید. نکته اساسی در مورد استفاده از اصل هم‌افزونگی توجه به مسائلی همچون وقوع نقایص علل مشترک (CCFs)، آنالیز هزینه- سود و نحوه تغییر وضعیت بین جزء فعال و آماده به‌کار می‌باشد. همچنین براساس نتایج مطالعه حاضر، یک برنامه بازرسی- تعمیر دقیق برای اجزای بحرانی شناخته‌شده همچون دمنده هوا، کمپرسور، ابزار دقیق و پمپ‌ها به‌منظور دوری از وقوع نقایص آشکارنشده پیشنهاد گردید.

یکی از مهم‌ترین نکات به‌دست آمده از این مطالعه و بسیاری از مطالعات گذشته FTA بر پایه فازی این است که احتمال وقوع رویدادها با اعطای امکان‌های وقوع نقص توسط خبرگان به رویدادها به‌دست می‌آمد؛ درحالی که می‌دانیم احتمال وقوع یک جزء می‌تواند تابعی از متغیرهایی همچون نرخ نقص، میانگین زمان تعمیر، زمان ماموریت و فواصل بازرسی باشد. متأسفانه این عوامل در مطالعات گذشته و نیز مطالعه حاضر درنظر گرفته نشده‌اند و احتمال وقوع جز به‌طور مستقیم توسط خبره با استفاده از امکان‌های وقوع نقص محاسبه می‌گردد؛ بنابراین اعمال این متغیرها در رویکرد فازی می‌تواند دقت مطالعه را افزایش دهد.

یکی از مشکلات مطالعه حاضر، محدودشدن به استفاده از یک گروه خبره همگون فرآیندی می‌باشد که می‌تواند منجر به نتایج خوش‌بینانه گردد. براساس نتایج این مطالعه و مطالعات پیشین می‌توان گفت که نتایج استفاده از یک گروه ناهمگون از خبرگان ارزشمندتر از یک گروه خبره همگون است. امکان‌پذیرنبودن مقایسه نتایج دو رویکرد فازی پنج و شش مقیاسه با داده‌های حقیقی احتمال وقوع رویدادها از محدودیت‌های دیگر مطالعه بود. روش FTA به‌طور ذاتی برای مدل‌سازی برخی از نقایص قابل تعمیر با زمان تعمیر وابسته، دچارضعف می‌باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد که برای این نقایص از آنالیز زنجیره‌ای Markov (MCMC: Markov Chain Monte Carlo) استفاده شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مطالعه از همکاری مسئولان محترم دانشکده نفت آبادان دانشگاه صنعت نفت و دانشکده بهداشت حرفه‌ای دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز تشکر و قدردانی ویژه می‌نمایند.

REFERENCES

1. Alaei R, Mansoori SA, Moghaddam AH, Mansoori SM, Mansoori N. Safety assessment approach of hazard and operability (HAZOP) for sulfur recovery unit Claus reaction furnace package; blower; heat exchanger equipment in South Pars gas processing plant. *J Natl Gas Sci Eng*. 2014;**20**:271-84. DOI: 10.1016/j.jngse.2014.07.007
2. Mokhatab S, Poe WA. Handbook of natural gas transmission and processing. Burlington: Gulf Professional Publishing; 2006.
3. Bedford T, Cooke R. Probabilistic risk analysis: foundations and methods. Cambridge: Cambridge University Press; 2001.
4. Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2005.
5. Guo L, Kang J. An extended HAZOP analysis approach with dynamic fault tree. *J Loss Prev Proc Indust*. 2015;**38**:224-32. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.10.003
6. SINTEF. OREDA: Offshore reliability data handbook. 4th ed. Trondheim: OREDA Participants; 2002.
7. Less FP. Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control. 3rd ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2005.
8. Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for process equipment reliability data with data tables. New York: American Institute of Chemical Engineers (AIChE); 1989.
9. Norwegian Oil Industry Association. Application of IEC 61508 and IEC 61511 in the Norwegian Petroleum Industry. Norway: The Norwegian Oil Industry Association; 2004.
10. Jozi SA, Esmat Saatloo SJ, Javan Z. Environmental risk assessment of the olefin plant in Arya Sasol petrochemical complex using fault tree analysis method. *Iran J Health Environ*. 2014;**7**(3):385-98. [Persian]
11. Khosravirad F, Zarei E, Mohammadfam I, Shoja E, Majidi Daryani M. Explosion risk analysis on Town Border Stations (TBS) of natural gas using Failure Mode & Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analyses (FTA) methods. *Iran Occup Health*. 2016;**12**(6):16-27. [Persian]
12. Mohammad Fam I, Kalatpour O. Risk assessment of liquefied petroleum gas (LPG) storage tanks in the process industries using the Bowtie technique. *J Occup Hygiene Eng*. 2016;**3**(2):1-11. [Persian]
13. Purba JH, Tjahyani DS, Ekariansyah AS, Tjahjono H. Fuzzy probability based fault tree analysis to propagate and quantify epistemic uncertainty. *Ann Nucl Energy*. 2015; **85**:1189-99. DOI: 10.1016/j.anucene.2015.08.002
14. Zadeh LA. Fuzzy sets. *Inform control*. 1965;**8**(3):338-53. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
15. Renjith VR, Madhu G, Nayagam VL, Bhasi AB. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. *J Hazard Mater*. 2010;**183**(1):103-10. DOI:org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.116
16. Rajakarunakaran S, Kumar AM, Prabhu VA. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. *J Loss Prev Proc Indust*. 2015;**33**:109-23. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.016
17. Cooke RM, ElSaadany S, Huang X. On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes. *Reliabil Eng Sys Saf*. 2008;**93**(5):745-56. DOI: 10.1016/j.ress.2007.03.017
18. Sa'idi E, Anvaripour B, Jaderi F, Nabhani N. Fuzzy risk modeling of process operations in the oil and gas refineries. *J Loss Prev Proc Indust*. 2014;**30**:63-73. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.04.002
19. 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.
20. Mokhtari K, Ren J, Roberts C, Wang J. Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals. *J Hazard Materials*. 2011;**192**(2):465-75. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.035
21. Chen SJ, Hwang CL. Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications. Berlin: Springer-Verlag; 1992.
22. Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]

systems using error possibility. *Fuzzy Sets Sys*. 1988;**27**(2):87-103. DOI:10.1016/0165-0114(88)90140-6

23. Omidvari M, Lavasani SM, Mirza S. Presenting of failure probability assessment pattern by FTA in Fuzzy logic (case study: distillation tower unit of oil refinery process). *J Chem Health Saf*. 2014;**21**(6):14-22. DOI: 10.1016/j.jchas.2014.06.003

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.21859/johe.4.2.41]