

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

Abbas Bekbaki¹, Nader Nebhani², Bagher Anvaripour^{2,*}, Gholam Abbas Shirali³

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

Abstract

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

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

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 انوری پور^{۳*}، 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 انوری پور، گروه مهندسی ایمنی و حفاظت فنی، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران.
ایمیل: anvaripour@put.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: ارزیابی ریسک احتمالی با استفاده از آنالیز درخت خطا (FTA: Fault Tree Analysis) تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۵
ابزاری مؤثر برای بررسی احتمال وقوع رویدادهای خطرناک در صنایع فرآیندی شیمیایی می‌باشد. متأسفانه تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۹
 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 پیشنهاد شده 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 به ترتیب 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

زیست و مراکز جمعیتی به‌دنبال داشته باشد [۲]. بخش کلاوس مهم‌ترین بخش SRU از نظر بازدهی تصفیه H₂S 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

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 H₂S 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

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 به کار 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].

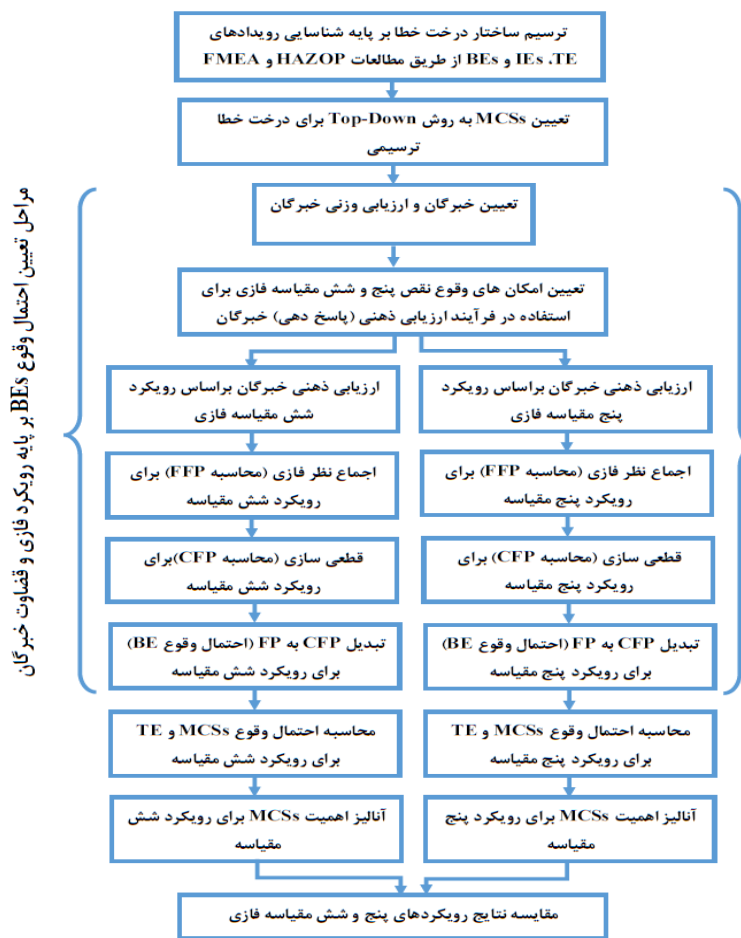
در این مطالعه براساس مدل ارائه‌شده توسط Kang و Guo (۲۰۱۵) برای ترسیم درخت خطا، تمامی TE‌های ممکن برای کوره با استفاده از روش‌های HAZOP و FMEA شناسایی شد. همچنین در این مدل از پیامدهای (Consequences) مطالعات HAZOP، اثرات (Effects) نقایص در مطالعات FMEA و نظرات خبرگان برای شناسایی TE ممکن استفاده شد. علل این پیامدها یا اثرات می‌توانند از نوع رویدادهای IE یا BE باشند. البته ممکن است این علل همان BEها نباشند. در نتیجه، این فرآیند باید تا پیدا کردن 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.

فازی، نظریه امکان و نظرات خبرگان، با استفاده از تلفیق نظریه مجموعه‌های فازی، نظریه امکان و نظرات خبرگان، احتمال وقوع BEها محاسبه می‌شود. همچنین به منظور 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 در نظر گرفته شد. چهارچوب کلی مطالعه FTA در این بخش بر پایه رویکرد فازی در شکل ۲ آمده است. مراحل مطالعه به صورت 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. در واقع، رویدادهای IE علت TE و رویدادهای BE علت BEها می‌باشند. ارتباط میان این رویدادها



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

براساس معیارهای جدول ۱، فاکتور وزنی نسبی برای هر یک 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, c و 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)	$\mu_{VL} (0/00, 0/00, 0/25)$
کم (L)	$\mu_L (0/00, 0/25, 0/50)$
متوسط (M)	$\mu_M (0/25, 0/50, 0/75)$
زیاد (H)	$\mu_H (0/50, 0/75, 1/00)$
خیلی زیاد (VH)	$\mu_{VH} (0/75, 1/00, 1/00)$
متغیرهای زبانی شش مقیاسه	
امکان وقوع نقص	تابع عضویت فازی
خیلی کم (VL)	$\mu_{VL} (0/00, 0/00, 0/20)$
کم (L)	$\mu_L (0/00, 0/20, 0/40)$
نسبتاً کم (FL)	$\mu_{FL} (0/20, 0/40, 0/60)$
نسبتاً زیاد (FH)	$\mu_{FH} (0/40, 0/60, 0/80)$
زیاد (H)	$\mu_H (0/60, 0/80, 1/00)$
خیلی زیاد (VH)	$\mu_{VH} (0/80, 1/00, 1/00)$

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 هر یک 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	دکتر	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

BEها در ساختار درخت خطا می توان از رابطه ۶ استفاده نمود [۴].

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

در رابطه بالا، $IM(MCS_j)$ بیانگر میزان اهمیت مجموعه برشی حداقل Z می باشد.

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 خارج شدن (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 به تنهایی می تواند پیامدهایی مانند رهاسازی، حریق و انفجار به دنبال داشته باشد؛ بنابراین نقص Shutdown کوره H-1 به علت قطع جریان‌های هوای فرآیندی (PA: Process Air)، گاز اسیدی (AG: Acid Gas) و گاز سوختی (FG: Fuel Gas) به کوره به عنوان TE درخت خطا در نظر گرفته شد.

گفتنی است در هنگام ترسیم درخت خطا به دلیل آنکه قطع جریان گاز اسیدی یا گاز سوختی به تنهایی نمی تواند باعث Shutdown کوره شود، این دو رویداد برای Shutdown کوره PA باید وارد یک دروازه "AND" شوند. گفتنی است قطع PA به تنهایی برای Shutdown کوره کافی می باشد. سه رویداد میانی یعنی قطع PA، AG و FG به عنوان علل بدون واسطه وقوع Shutdown کوره در یک سطح پایین تر از TE در ساختار درخت قرار می گیرند. فرآیند ترسیم درخت خطا با پیدا کردن علل این IEها تا رسیدن به سطح BEها ادامه می یابد. با رسیدن به سطح BEها، برای درخت خطای حاصل از این سناریو تعداد ۳۲ BE و ۷ IE به دست 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 ذکر شده 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 به منظور ارزیابی احتمال وقوع BEها انتخاب شدند. همچنین وزن نسبی محاسبه شده 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 تعریف شده 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

نقص فازی اجماع یافته (AFFP: Aggregated Fuzzy Failure Possibility) با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد [۱۳، ۱۵].

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

در رابطه ۱، $\mu_{Agg}(x)$ نشان دهنده AFFP، w_j وزن نسبی خبره Z و μ_{ij} امکان وقوع نقص فازی BE_i بیان شده توسط خبره Z می باشد. همچنین n تعداد کل خبرگان می باشد.

گام ۴: قطعی سازی امکان وقوع نقص فازی اجماع یافته:

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

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

گام ۵: تبدیل CFP به احتمال وقوع نقص BEها: مقادیر

به دست آمده برای هر BE در مرحله قطعی سازی، CFP می باشد. به منظور محاسبه احتمال وقوع نقص (FP: Failure Probability) BEها از مقادیر CFP، تابع زیر پیشنهاد شده است [۲۲].

$$\text{رابطه ۳} \quad FP = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & CFP \neq 0 \\ 0 & CFP = 0 \end{cases}; K = \left[\frac{1-CFP}{CFP} \right]^{\frac{1}{8}} \times 2.301$$

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

۴. تعیین احتمال وقوع MCSها و TE بعد از تعیین

احتمال وقوع تمامی BEها می توان احتمال وقوع هر یک از MCSهای منجر به TE را با استفاده از رابطه ۴ محاسبه نمود. احتمال وقوع TE نیز از رابطه ۵ محاسبه می گردد [۱۶].

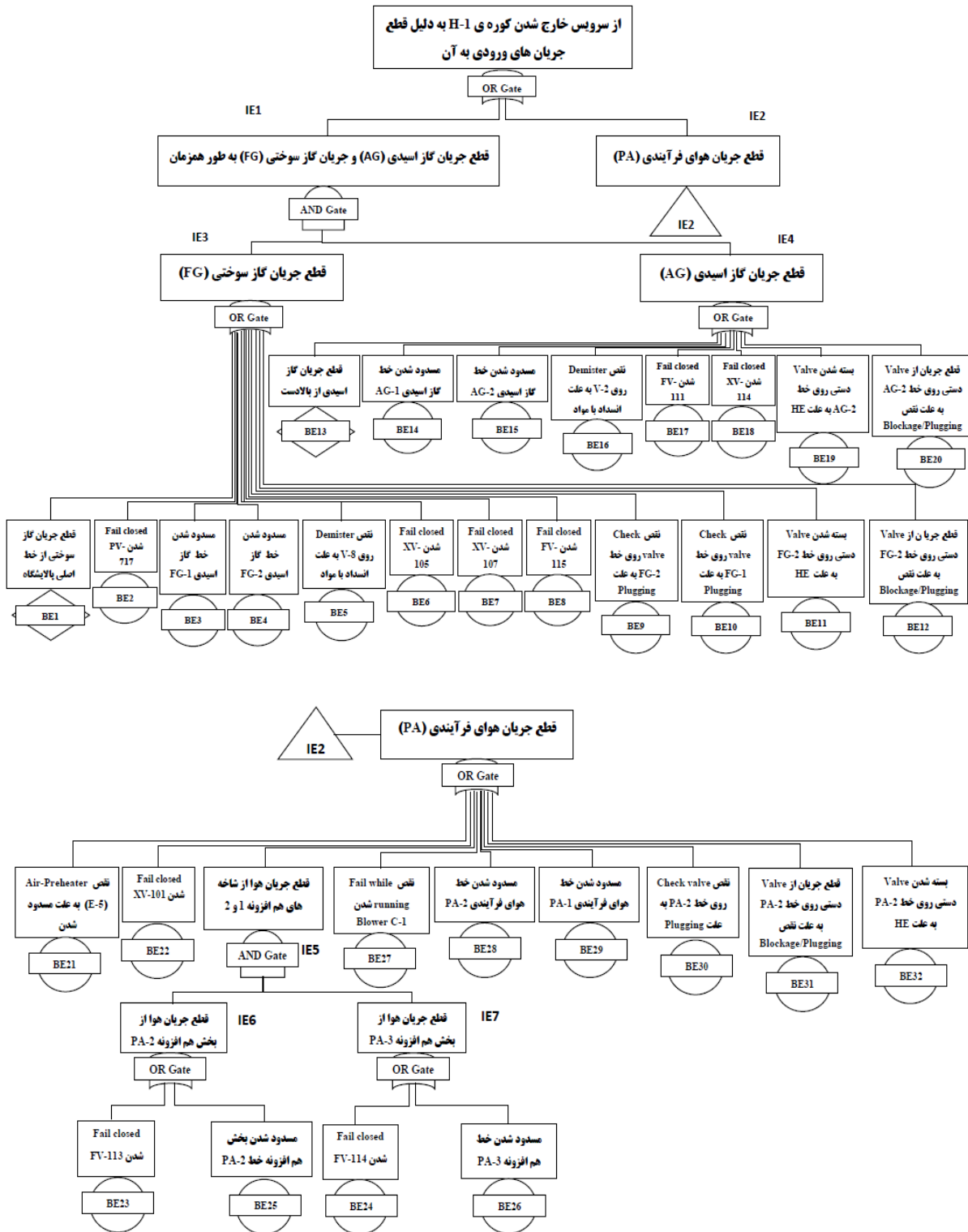
$$P(MCS_j) = \prod_{i=1}^n FP(BE_i) \quad \text{رابطه ۴}$$

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

در رابطه ۴، $FP(BE_i)$ نشان دهنده احتمال وقوع رویداد پایه‌ای i ، $P(MCS_j)$ بیانگر احتمال وقوع مجموعه برشی حداقل Z و $P(TE)$ احتمال وقوع TE می باشد.

۵. تعیین میزان اهمیت MCSها: به منظور تعیین میزان

اهمیت (IM: Importance Measure) هر کدام از MCSها شامل



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

جدول ۳: فاکتور وزنی نسبی محاسبه شده 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

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، ۰۴-۳/۶۴E در سال و برای رویکرد شش مقیاسه فازی، ۰۴-۴/۷۶E در سال تعیین شد. همچنین میزان اهمیت هر یک 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. در نهایت، جدول ۶

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 به دست آمده از خبرگان یک اجماع نظر فازی صورت گرفت که نتایج آن در ستون سوم جدول ۴ مشاهده می‌شود. نظرات اجماع یافته 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. در پایان، با استفاده از رابطه ۳ اعداد CFP به FP برای

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

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

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

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

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 کم کردن احتمال وقوع TE از عدد یک، میزان قابلیت اطمینان با استفاده از رویکرد پنج و شش مقیاسه فازی به ترتیب برابر ۰/۹۹۹۶۳۶ و ۰/۹۹۹۵۲۴ به دست آمد. همچنین میزان قابلیت اطمینان به دست آمده برای کوره H-1 با استفاده از رویکرد شش مقیاسه کمتر از مقدار به دست 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 به عنوان 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 به ترتیب به مقادیر ۰/۹۹۹۵۹۸ و ۰/۹۹۹۷۲۲ 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 به عنوان بحرانی‌ترین BEها (یا MCSها) درخت شناخته شدند [۲۳]. همچنین در مطالعه خسروی راد و همکاران (۲۰۱۶) به ترتیب علل وقوع TE از مهم‌ترین به کم اهمیت‌ترین شامل علل فرآیندی، علل انسانی و اعمال نایمن و علل مکانیکی می‌باشند [۱۱]. همانند مطالعات بالا در مطالعه حاضر نیز سه نقص فرآیندی مانند از کار افتادن دمنده (Blower) هوا (BE27)، بسته شدن شیر قطع‌کن اضطراری XV-101 (BE22) و بسته شدن مسیر پیش گرمکن (BE21) به عنوان 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، نه تنها 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

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 مقذور نبودن 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 به دست 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 به دست آمده با استفاده از رویکرد پنج مقیاسه، ۴/۳۸ برابر مقادیر به دست آمده از طریق رویکرد شش مقیاسه می‌باشد. از مقایسه این نسبت‌ها در این سه مطالعه می‌توان فهمید که اختلاف مقادیر به دست 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 به دست 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 ذکر شده مناسب می‌باشد.

در مطالعه حاضر، نتایج احتمال وقوع به دست آمده از رویکرد پنج مقیاسه برای ۲۶ مورد از BEها بیشتر از نتایج رویکرد شش مقیاسه بود؛ در حالی 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 به طور کلی در شرایط عملیاتی واحد SRU مقادیر به دست 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

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، محدود شدن 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. امکان پذیر نبودن 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، دچار ضعف می‌باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد که برای این نقایص از آنالیز زنجیره‌ای Markov (Markov MCMC: 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

- 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
- Mokhtab S, Poe WA. Handbook of natural gas transmission and processing. Burlington: Gulf Professional Publishing; 2006.
- Bedford T, Cooke R. Probabilistic risk analysis: foundations and methods. Cambridge: Cambridge University Press; 2001.
- Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2005.
- 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
- SINTEF. OREDA: Offshore reliability data handbook. 4th ed. Trondheim: OREDA Participants; 2002.
- Less FP. Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control. 3rd ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2005.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for process equipment reliability data with data tables. New York: American Institute of Chemical Engineers (AIChE); 1989.
- Norwegian Oil Industry Association. Application of IEC 61508 and IEC 61511 in the Norwegian Petroleum Industry. Norway: The Norwegian Oil Industry Association; 2004.
- 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]
- 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]
- Mohammad Fam I, Kalatpour O. Risk assessment of liquefied

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)، هم‌افزونی (Redundancy) نوع آماده به کار (Standby) پیشنهاد گردید. نکته اساسی در مورد استفاده از اصل هم‌افزونی توجه به مسائلی همچون وقوع نقایص علل مشترک (CCFs)، آنالیز هزینه- سود و نحوه تغییر وضعیت بین جزء فعال و آماده به کار می‌باشد. همچنین براساس نتایج مطالعه حاضر، یک برنامه بازرسی- تعمیر دقیق برای اجزای بحرانی شناخته شده همچون دمنده هوا، کمپرسور، ابزار دقیق و پمپ‌ها به‌منظور دوری از وقوع نقایص آشکار نشده 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 می‌آید؛ 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 در نظر گرفته نشده‌اند و احتمال وقوع جز به‌طور

- petroleum gas (LPG) storage tanks in the process industries using the Bowtie technique. *J Occup Hygiene Eng*. 2016;3(2):1-11. [Persian]
- 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
- Zadeh LA. Fuzzy sets. *Inform control*. 1965;8(3):338-53. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- 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:10.1016/j.jhazmat.2010.06.116
- 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
- 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.res.2007.03.017
- 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
- 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.
- 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
- Chen SJ, Hwang CL. Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications. Berlin: Springer-Verlag; 1992.
- Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine

- systems using error possibility. *Fuzzy Sets Sys.* 1988;**27**(2):87-103. DOI:[10.1016/0165-0114\(88\)90140-6](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.jchas.2014.06.003)