



## Risk Assessment in Production Process of Benzoic Acid Using HAZOP Technique and Fuzzy Mathematics

J. Gheidar-Kheljani<sup>1\*</sup>, M. H. Karimi Gavareshki<sup>1</sup>, M. Babae<sup>2</sup>, Sh. Masjedi<sup>2</sup>

1- Associate Professor of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology

2- Ph. D. Candidate of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology

Email: kheljani@mut.ac.ir

### Abstract

*Safe and cost-effective production of benzoic acid as an important material in the production of industries such as food, pharmaceutical, plastic, iron and steel, military, etc. especially under sanctions conditions, has particular importance, especially that a high percentage of the risks of chemical industry factories are risks that lead to explosions and human irreparable, material and environmental damages. The aim was to present an approach to identify, investigate and control operational and environmental risks and the cause of these risks. For this purpose, HAZOP technique as one of the most widely used techniques in chemical industry and calculation of risk number was used by fuzzy mathematics to provide a numerical value for different risk types. A total of 32 risks were identified by process analysis, of which 25 (78.12%) have the risks of explosions, fires and serious environmental damages that we can avoid extensive material and human damages by prevention and control.*

Received: 18 January 2021

Accepted: 4 May 2021

Page Number: 50-65

### Keywords:

Risk,  
HAZOP Technique,  
Benzoic Acid,  
Fuzzy Numbers

### Please Cite this Article Using:

Gheidar-Kheljani, J., Karimi Gavareshki, M. H., Babae, M., Masjedi, Sh., "Risk Assessment in Production Process of Benzoic Acid Using HAZOP Technique and Fuzzy Mathematics", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. 118, pp. 50-65, In Persian, (2022).



## ارزیابی ریسک در کارخانه تولید اسید بنزوئیک با استفاده از ترکیب روش HAZOP و ریاضیات فازی

جعفر قیدرخلجانی<sup>۱\*</sup>، محمدحسین کریمی گوارشکی<sup>۱</sup>، مهسا بابایی<sup>۲</sup>، شهره مسجدی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

پیام نگار: kheljani@mut.ac.ir

### چکیده

تولید امن و مقرون به صرفه اسید بنزوئیک به عنوان یک ماده شیمیایی بسیار مهم و پرکاربرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به ویژه این که درصد بالایی از خطرات کارخانه‌های صنایع شیمیایی، ریسک‌هایی هستند که در صورت بروز به انفجار و صدمات جبران‌ناپذیر انسانی، مادی و زیست محیطی منجر می‌شوند. هدف این مقاله، ارائه رویکردی برای شناسایی، بررسی و کنترل ریسک‌های عملیاتی و زیست محیطی و علت رخداد آن‌هاست. بدین منظور از روش تجزیه خطر و قابلیت عملیات (HAZOP) به عنوان یکی از روش‌های کیفی پرکاربرد در صنایع شیمیایی و محاسبه عدد ریسک به کمک ریاضیات فازی، به منظور ارائه یک مقدار کمی برای انواع ریسک استفاده شد. با تحلیل فرایند مجموعاً ۳۲ ریسک شناسایی شد که ۲۵ ریسک (۷۸/۱۲٪)، ریسک انفجار، آتش‌سوزی و آسیب‌های زیست محیطی جدی را به دنبال دارد که می‌توان با پیشگیری و کنترل، از صدمات مادی و انسانی وسیعی جلوگیری کرد. نتایج نشان داد که در دسته‌بندی ریسک‌ها بر مبنای احتمال وقوع، حدود ۶ درصد از ریسک‌های این فرایند دارای احتمال زیاد، حدود ۱۲/۵ درصد دارای احتمال متوسط و حدود ۸۱ درصد دارای احتمال پایین هستند. از منظر شدت اثر ریسک، ۷۸ درصد از خطرات اثر تخریبی خطرناک، ۱۵/۶۲ درصد اثر تخریبی متوسط و ۶/۲۵ درصد اثر تخریبی پایین دارند؛ این یعنی بیشتر خطرهای کارخانه‌های صنایع شیمیایی، اگرچه احتمال وقوع بالایی ندارند ولی در صورت بروز، فاجعه آفرین خواهند بود و تأثیر جبران‌ناپذیری خواهند گذاشت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

شماره صفحات: ۵۰ تا ۶۵

### کلیدواژه‌ها:

ریسک،

تکنیک HAZOP،

اسید بنزوئیک،

اعداد فازی

\* تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع

استناد به مقاله:

قیدرخلجانی، ج.، کریمی گوارشکی، م. ح.، بابایی، م.، مسجدی، ش.، "ارزیابی ریسک در کارخانه تولید اسید بنزوئیک با استفاده از ترکیب روش HAZOP و ریاضیات فازی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۸، صص. ۵۰-۶۵، (۱۴۰۰).

## ۱. مقدمه

اسید بنزوئیک به عنوان یک ماده اولیه مهم و پرکاربرد، نقش پررنگی در بیشتر صنایع کشور نظیر صنایع غذایی، دارویی، تولید رزین های آلکیدی، پاک کننده ها، پلاستی ساینرها به ویژه در پلی وینیل استات، چسب های مختلف، طیف گسترده ای از مواد غذایی از جمله سس ها و نوشابه ها، دهان شویه، خمیر دندان، ژل، شامپو، ضد یخ اتومبیل، ضد زنگ در صنایع آهن و فولاد، ترکیبات پلاستیک ها، صنایع نظامی، تولید عطرها و رنگ ها و داروهای موضعی ایفا می کند. مطالعه حاضر در کارخانه تولید اسید بنزوئیک واقع در شهرک صنعتی شکوهیه قم انجام شد که تنها تولیدکننده اسید بنزوئیک در کل کشور است. تولید امن و اقتصادی این ماده اساسی در صنعت به خصوص در شرایط تحریم، از اهمیت ویژه ای برخوردار است، مخصوصاً این که درصد بالایی از خطرات در کارخانه های صنایع شیمیایی، به ریسک هایی مربوط می شود که در صورت بروز، منجر به انفجار می شود و آسیب های جبران ناپذیر انسانی، مادی و زیست محیطی را در پی دارد؛ لذا تحلیل دقیق و کمی ریسک های فرایند در بالابردن سطح ایمنی تولید بسیار تأثیرگذار و مورد نیاز به نظر می رسد؛ به ویژه با توجه به این که کارخانه مذکور تنها تولیدکننده این ماده در کشور است، مطالعه ای که خطرهای تولید این ماده شیمیایی حساس را به صورت کمی تحلیل و بررسی کرده باشد، یافت نشد. در کشورهای مختلف اعم از توسعه یافته و در حال توسعه عواملی مانند مشکلات در طراحی، خطاهای انسانی، اعتماد بیش از حد به ایمن بودن تأسیسات و نداشتن آمادگی در شرایط بحرانی از علت های مهم بروز فجایع انسانی و زیست محیطی بوده اند [۱]. تخریب جبران ناپذیر محیط زیست، گرم شدن زمین، آلودگی آب ها، از بین رفتن لایه ازن و غیره در صنایع شیمیایی و پتروشیمیایی که با حجم بالایی از مواد آلاینده در ارتباط هستند، از جدی ترین نگرانی های زیست محیطی - حتی مهم تر از تروریسم - به شمار می رود [۲]. به عنوان نمونه، حادثه چرنوبیل هزینه ای بالغ بر ۴۰۰ میلیارد دلار بر جای گذاشت، به علاوه ۲۰۰ سال برای پاکسازی مناطق پرتوگرفته زمان لازم است و یا حادثه پوپال که انفجار ۲۵ تن مواد شیمیایی به کشته و زخمی شدن ده ها هزار نفر منجر شد [۲].

یکی از موضوعات مورد توجه در سال های اخیر، مدیریت ریسک در

صنایع مختلف است و نیاز به یک سامانه مدیریت مبتنی بر تحلیل ریسک و ایمنی که تحمل پذیری ریسک را در صنایع و سازمان ها بالا ببرد، وجود دارد. در سامانه مدیریت ریسک، پنج مؤلفه مهم شناسایی، تحلیل، برنامه ریزی، پیگیری و کنترل ریسک وجود دارد که مهم ترین آن ها شناسایی عوامل خطر ساز است؛ زیرا تا زمانی که ریسک ها شناخته نشوند نمی توان برای مقابله با آن ها برنامه ریزی کرد [۳]. روش های مختلفی وجود دارد که با ویژگی ها و توانایی های خود به شناسایی ریسک ها و بررسی آثار آن ها می پردازد؛ از آن جمله می توان به تحلیل مقدماتی خطر<sup>۱</sup>، حالات شکست و تحلیل اثرات آن ها<sup>۲</sup>، تحلیل درخت خطا<sup>۳</sup>، مطالعه عملیات و خطر ها<sup>۴</sup> و موارد دیگر اشاره کرد [۴]. یکی از متداول ترین روش های شناسایی خطر ها در صنایع شیمیایی، روش HAZOP است که روشی تیمی برای حل خطر ها و مشکلات ایمنی و عملیاتی است. این روش با بررسی تأثیر های هرگونه انحراف از شرایط طراحی، برای بررسی نه تنها خطر ها، بلکه مشکلات عمل کردی سامانه نیز به کار گرفته می شود [۵]. هدف یک مطالعه HAZOP شناسایی خطر های بالقوه در سامانه است که گاه منجر به بروز انواع رخداد های جبران ناپذیری هم چون انفجار، آتش سوزی، تولید گاز های سمی و خطر های زیست محیطی می شود و توانمندی دیگر، کشف مشکلات عملیاتی است. این روش حتی در سامانه های پزشکی [۶] و ایجاد امینت ترافیکی جاده ها [۷] نیز به کار رفته است. یک مقاله مروری که با ۱۶۶ مقاله از ژورنال ها و کنفرانس های مختلف، به کاربرد HAZOP در صنایع شیمیایی پرداخته است، مقالات این حوزه را در شش موضوع دسته بندی کرده که کنترل و هدایت دستگاهی خودکار به وسیله ایجاد سامانه های خیره با ۳۱/۵٪ بالاترین فراوانی را در میان مقالات در حوزه HAZOP، داشته است [۸]. با وجود صرفه اقتصادی این روش و کارایی بالای آن؛ اما در مطالعه ای که مرکز طراحی فرایند، ایمنی و کاهش ضایعات دانشگاه صنعتی شریف انجام داد مشخص شد که شوربختانه در ایران، هنوز واحدهای فرایندی با بیش از ۲۰ سال سابقه وجود دارند که مطالعات ریسک در آن ها انجام نشده است [۳]. نتایج HAZOP به شکل کمی نیست؛ اما پس از شناسایی ریسک ها لازم است که ریسک ها درجه بندی شوند؛ برای

1. Primary Hazard Analysis (PHA)
2. Failure Mode and Effects Analysis (FM&EA)
3. Fault Tree Analysis (FTA)
4. Hazard and Operability Analysis (HAZOP)

فازی با روش‌های شناخته شده‌ای که به تجزیه صنایع مختلف می‌پردازند، نمونه‌ای از استفاده کاربردی علوم روز مهندسی در بهبود فرایندهای تولیدی است که قطعاً در مدل‌سازی واقعی‌تر فرایندها مفید و تأثیرگذار است.

## ۲. روش HAZOP

انجمن شیمیایی سلطنتی انگلستان، در دهه هفتاد میلادی این روش را برای صنایع فرایندی اختراع کرد [۱۴]. مبنای شناسایی ریسک به این صورت است که وقتی مؤلفه‌های عملیاتی نظیر فشار، درجه حرارت، میزان جریان و غیره از شرایط طراحی شده و طبیعی انحراف پیدا کنند ریسک‌های بالقوه یا ریسک‌های جدید در سامانه بروز پیدا می‌کند [۱۵]؛ بنا بر این زمانی سامانه ایمن است که تمامی مؤلفه‌های عملیاتی در حالت نرمال و طراحی شده باشد. یک تیم کارشناسی به کمک مجموعه‌ای از کلمات کلیدی، خطرهای انحرافات فرایند و اثرات احتمالی آن‌ها را بررسی و با شرایط طبیعی مقایسه می‌کند [۱۶]. پرکاربردترین عبارات کلیدی در جدول (۱) آورده شده است [۱۷].

این هدف می‌تواند HAZOP را با سایر روش‌ها نظیر درخت خطا، درخت رخداد و یا تکنیک فازی ترکیب کرد. در این مطالعه از متغیرهای کلامی و منطق فازی در ارزیابی و بیان ریسک‌ها استفاده شد، نمونه‌هایی از این نوع مطالعات در صنایع نفت و گاز وجود دارد [۹]. در طی طراحی مدل و تجزیه ریسک، همواره شرایط عدم اطمینان ذاتی وجود دارد که مهندسان را در پذیرفتن نتایج دچار تردید می‌کند و شرایط را برای نتیجه‌گیری قطعی سخت می‌کند. ارزیابی دقیق مقادیر خطر، برای حوادثی که فراوانی وقوع بالایی ندارند و گاهی به ندرت اتفاق می‌افتند و الگوهای متنوعی برای وقوع دارند اغلب دشوار است؛ لذا منطق فازی یکی از پرکاربردترین ابزارها در زمینه مطالعات ریسک است [۱۰-۱۳]. با استفاده از قوانین اگر-آنگاه فازی می‌توان کلیه خطرهای محتمل را ارزیابی کرد. هدف این مطالعه شناسایی و تحلیل خطرهای کارخانه مذکور، بر مبنای ترکیب روش HAZOP و اعداد فازی و متغیرهای کلامی است. ترکیب منطق فازی و تکنیک HAZOP به تحلیل مسائلی که داده‌ها و اطلاعات در شرایط عدم اطمینان، نادقیق و احتمالی گرفته شده‌اند، کمک می‌کند. تلفیق ریاضیات

جدول ۱. پرکاربردترین عبارات کلیدی در تکنیک HAZOP.

Table 1. The most widely used key phrases in the HAZOP technique.

Key words	Concept
No/Not	The intended parameter is not performed at all or does not exist
Less than	The intended parameter is less or lower than normal- Quantitative reduction
More than	The parameter is higher and more than the standard - Quantitative increase
As Well As	There are other things besides the defined parameter – Qualitative increase
Part of	Instead of the intended parameter, there is only a part of it - Qualitative reduction
Reverse	The parameter, occurs the reverse of the defined state.
Other than	The type of parameter is shifted and changed.

مقاله در این زمینه پرداختند. جدول (۲) به بررسی این منابع تا سال ۲۰۰۴ می‌پردازد [۸]. مقاله حاضر به جستجوی ادامه این منابع از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰ برآمده و آن‌ها را در جدول (۳) دسته‌بندی کرده است.

کلمات راهنما متناسب با متغیرهای فرایند به کار می‌روند، به این معنی که هرکلمه برای یک متغیر متناسب است؛ به عنوان مثال برای دما، متغیرهای «کمتر از یا بیشتر از» معنی دارد. اطلاعات کلیدی مرتبط با HAZOP در منابع بسیاری تشریح شده است [۲۴-۱۸]. در سال‌های گذشته افراد بسیاری به نگارش کتاب و

جدول ۲. منابع HAZOP از سال ۱۹۷۴ تا سال ۲۰۰۴.

Table 2. Sources HAZOP from 1974 to 2004.

Year	Author / Institute	Topic	Article	Gguideline	Book	Standard
1974	Lawley	Operability Studies and Hazard Analysis	✓			
1977	CIA	A Guide to Hazard and Operability Studies		✓		
1981	Knowlton	Hazards and Operability Studies, The Guideword Approach			✓	
1983	Kletz	"HAZOP & HAZAN". Identifying and Assessing Process Industry Hazards (first edition)			✓	
1986	Kletz	"HAZOP & HAZAN". Identifying and Assessing Process Industry Hazards (second edition)			✓	
1991	HSE	Guidance on HAZOP Procedures for Computer-controlled Plants	✓			
1992	CCPS	Guidelines for Hazard Evaluation Procedures			✓	
1994	Nolan	Application of HAZOP and What-if Safety Reviews to the Petroleum, Petrochemical and Chemical Industries			✓	
1996	Wells	Hazard Identification and Risk Assessment			✓	
1999	Redmill	System Safety: HAZOP and Software HAZOP			✓	
2000	EPSC	HAZOP: Guide to Best Practice. Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries			✓	
2001	BS IEC 61882	Hazard and Operability studies (HAZOP Studies)—Application Guide				✓
2004	McDonald	Practical HAZOPs, Trips and Alarms			✓	

جدول ۳. منابع HAZOP از سال ۲۰۰۴ تا سال ۲۰۲۰ جمع‌آوری شده توسط نویسندگان.

Table 3. HAZOP resources from 2001 to 2020 collected by the authors.

Year	Author / Institute	Topic
2005	Rolf K. Eckhoff	Explosion Hazards in the Process Industries 1st Edition
2008	Dennis Nolan	Safety and Security Review for the Process Industries 2nd Edition
2011	Dennis Nolan	Safety and Security Review for the Process Industries 3rd Edition
2011	David Smith	Reliability, Maintainability and Risk 8th Edition
2013	Irene Lotero-Herranz and Santos Galán	23 European Symposium on Computer Aided Process Engineering: Automated HAZOP using hybrid discrete/continuous process models
2014	Dennis Nolan	Safety and Security Review for the Process Industries 4th Edition
2015	Frank Crawley, Brian Tyler	HAZOP: Guide to Best Practice
2016	Swapan Basu	Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems 1st Edition
2019	<u>Fernando Jorge Bozzetto</u>	Hazop na prática
2020	Frank Crawley	A Guide to Hazard Identification Methods Second Edition

$$A = \{x, \mu_A(x)\} \quad (1)$$

توابع عضویت دوزنفه‌ای، مثلثی، سیگموئیدال، گوسین، زنگوله‌ای نمونه‌هایی از این توابع به شمار می‌روند. در این مطالعه اعداد فازی با استفاده از تابع مثلثی، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین و رایج‌ترین انواع توابع عضویت که محاسبات آن به سادگی قابل انجام است، تعریف شدند [۲۸-۲۹]. عملیات ضرب فازی دو عدد فازی مثلثی از رابطه (۲) پیروی می‌کند:

$$A_1 \otimes A_2 \approx (a_1.a_2, b_1.b_2, c_1.c_2) \quad (2)$$

#### ۴. فرایند تولید اسید بنزوئیک

اسید بنزوئیک، یک ترکیب بلوری بی‌رنگ و یکی از تجاری‌ترین اسیدهای کربوکسیلیک آروماتیک است. برای تولید این ماده روش‌های مختلفی وجود دارد؛ مثل استفاده از تولوئن، استفاده از انیدرید فتالیک که به کمک کربوکسیله کردن انیدرید فتالیک مذاب با بخار آب، در حضور کاتالیزور کرم و سدیم انجام می‌گیرد که یک روش تولید مطلوب است. یکی از روش‌های تجاری ساخت بنزوئیک

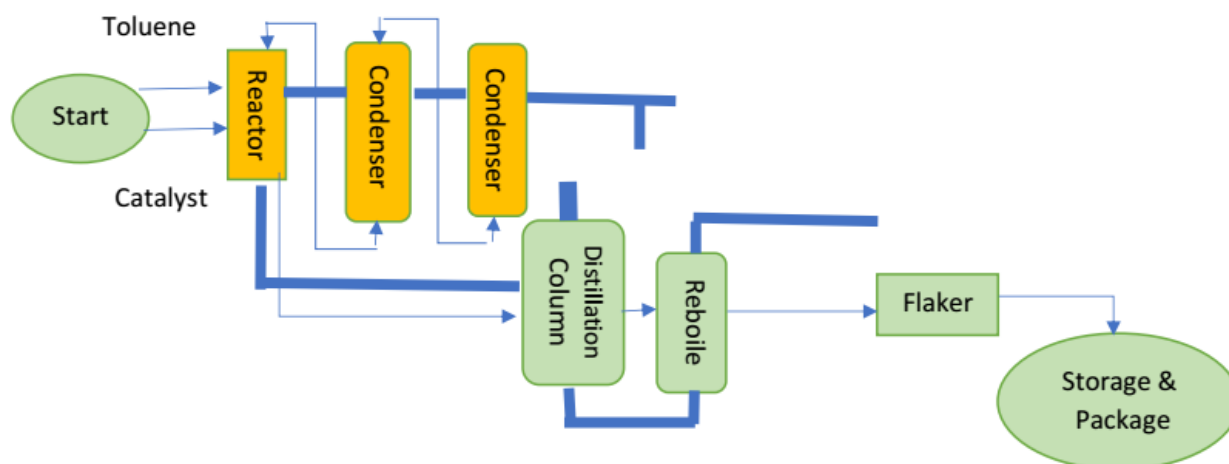
### ۳. ریاضیات فازی

تئوری فازی را نخستین بار در سال ۱۹۶۵ ازاده، برای توضیح عدم قطعیت مطرح کرد [۲۶-۲۵]. فرایندهای دنیای واقعی کاملاً دقیق نیستند و ابهام دارند، اگر مدل‌سازی‌هایی که از دنیای واقعی انجام می‌شود دربرگیرنده این عدم قطعیت نباشند، مدل‌ها نمای کاملی از فرایندهای واقعی نشان نمی‌دهند و در نتیجه مدل‌ها کارایی کافی برای حل مسائل واقعی را ندارند. تئوری فازی ناتوانی ریاضیات کلاسیک را برای پوشش عدم قطعیت‌های فرایندهای واقعی ندارد و با استفاده از متغیرهای کلامی واقعیت‌ها را آن‌گونه که هست نشان می‌دهد. در مجموعه‌های فازی هرچقدر درجه عضویت به صفر نزدیک‌تر باشد، میزان عضویت ضعیف‌تر و هرچقدر به یک نزدیک‌تر باشد بر عضویت قوی‌تر دلالت می‌کند. درجه عضویت صفر به معنی خارج از مجموعه بودن و درجه عضویت یک به معنی کاملاً عضو مجموعه بودن است [۲۷]. درجه عضویت ( $\mu$ ) در مجموعه فازی  $A$ ، به وسیله تابع عضویت  $\mu_A(x)$  تعیین می‌شود. اعداد فازی از مهم‌ترین انواع مجموعه‌های فازی به شمار می‌روند، هر عدد فازی یک مجموعه فازی تک‌عضوی است که مطابق با رابطه (۱) تعریف می‌شوند:

واسطه دما و فشار، مواد سبک‌تر که نقطه جوش آن‌ها از اسید بنزوئیک کم‌تر است از فرایند خارج و باقی‌مانده مواد به برج بعدی هدایت می‌شود. در برج ریبویلر<sup>۳</sup> تحت دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس از نو مواد، تصفیه و در پایان به برج فلاکر<sup>۴</sup> هدایت می‌شود. دمای بخارهای هدایت‌شده به فلاکر در حدود ۱۲۰ درجه سلسیوس است که به وسیله سامانه خنک‌کننده با آب، در دمای ۱۵ درجه سلسیوس تبرید می‌شود و محصول نهایی با دمایی در حدود ۳۵ درجه سلسیوس خارج می‌شود. مراحل تولید مرحله به مرحله اسید بنزوئیک در قالب یک نمای گرافیکی در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است.

خطوط انتقال تولوئن، به دلیل پتانسیل بالای انفجار و اشتعال‌زایی دارای ریسک بالای زیست‌محیطی است؛ زیرا بخارهای حاصل از آن که به دلیل دما و فشار بالا ایجاد می‌شود، می‌تواند باعث انفجار در کل مجموعه و منطقه جغرافیایی و محیط زیست اطراف شود (که به لحاظ اقتصادی زبان‌بار و توجیه‌ناپذیر است).

اسید، اکسایش جزئی تولوئن با گاز اکسیژن در مجاورت کاتالیزور مربوطه است. در این مطالعه پژوهش در کارخانه‌ای انجام گرفت که ماده اولیه تولوئن و کاتالیزر کبالت را استفاده می‌کنند. در ابتدا مواد اولیه با تزریق به راکتور در مجاورت اکسیژن فرایند اکسایش را در دمای ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس و فشاری در حدود ۵ تا ۷ بار آغاز می‌کند. جنس راکتورها و کلیه دستگاه‌ها استیل ۳۱۶ است تا از خوردگی آن‌ها جلوگیری به عمل آید. با توجه به دما و فشار بالا و خطرهای بالقوه در این مرحله به‌منظور حفظ ایمنی از سامانه خنک‌کننده استفاده می‌شود. بخارهای خارج‌شده از راکتور به وسیله سامانه پایپینگ<sup>۱</sup> به کندانسورها منتقل می‌شود و تحت فشار و دمای منطبق با راکتور سامانه اکسیداسیون ادامه می‌یابد. مواد باقی‌مانده در راکتور و کندانسورها، فرایند راکتور به کندانسور و برعکس را از نو طی می‌کنند تا همه مواد به بخارهای اکسیدشده تبدیل شوند، این مرحله چندین بار تکرار می‌شود تا چرخه، کامل و از هدر رفتن ماده اولیه و محصول نهایی کاسته شود. بعد از آن که بخارها از نو وارد راکتور شدند به برج تقطیر<sup>۲</sup> منتقل می‌شوند. در این مرحله به



شکل ۱. نمای گرافیکی فرایند تولید اسید بنزوئیک.

Figure 1. Graphic view of Benzoic Acid production process.

### ۵. روش مطالعه

مراحل فرایند به سامانه‌ها، سپس به زیرسامانه‌ها و در پایان به گره‌های عملیاتی شکسته شد که نتایج آن در جدول (۴) دیده می‌شود. در مرحله بعد، متناظر با هر یک از گره‌های عملیاتی کلمات راهنما و مؤلفه‌های متناسب با همان گره تعیین شد که یک نمونه از آن برای سامانه ۱ در قالب جدول (۵) نشان داده شده است.

در این مطالعه، پس از بررسی دقیق فرایند و مصاحبه با مهندسان و کارشناسان فرایند، کلیه مراحل تولید اسید بنزوئیک و محصولات مشتق از آن، از ابتدا تا خروج محصول نهایی بررسی و کلیه خطرهای بالقوه قدم به قدم استخراج شد. برای این منظور ابتدا کلیه

جدول ۴. سامانه‌ها، زیرسامانه‌ها و گره‌ها برای مطالعه HAZOP.

Table 4. Systems, subsystems and nodes for HAZOP study.

	Systems		Sub Systems		Nodes
1	Storage and maintenance of toluene as a raw material	1,1	Transfer of toluene to underground warehouses equipped with movable roofs	1,1,1	Temperature control by thermometer
				1,1,2	Liquid pressure control by barometer
				1,1,3	Check the liquid level with a level gauge
		1,2	Installation of spare tank with pressure gauge, level gauge and thermometer next to the main tanks	1,2,1	Temperature control by thermometer
				1,2,2	Liquid pressure control by barometer
				1,2,3	Check the liquid level with a level gauge
				1,2,4	Transfer of toluene to the spare tank in case of leakage of the main tank
		1,3	Installation of firefighting equipment for the chemical industry	1,3,1	Annual control of equipment
		2	Placement of liquid toluene in the reactor	2,1	Entrance toluene into reactor through a piping system
2,1,2	Apply pressure 5 to 7 bar				
2,1,3	Performing chemical interactions with catalysts and oxidation and conversion of liquid to vapors at this pressure and temperature				
2,2	Cooling system			2,2,1	Use water for cooling to prevent increase the temperature to more than 180 °C
3	Placement of toluene vapor in the condenser	3,1	Transfer of vapors from the reactor to the condenser via piping above the reactor	3,1,1	Vapors enter the condenser from the reactor
				3,1,2	Conversion of steam to liquid in the condenser
		3,2	Return to reactor	3,2,1	Liquid return from condenser to reactor



	Systems		Sub Systems		Nodes
				3,2,2	Conversion of liquid to steam in the reactor
		3,3	Repeat the movement of materials between the reactor and the condenser until the end of the oxidation process	3,3,1	
		3,4	Temperature and pressure drop due to the end of the oxidation process	3,4,1	Reach temperature below 150 °C and pressure reach less than 5 bar
		3,5	Pressure breaker after condensers	3,5,1	Control the pressure in an acceptable range below 7 bar
		3,6	Auxiliary pressure breaker	3,6,1	Activation of spare barometer if the first barometer does not work
		3,7	Gas measuring and gas purifiers devices	3,7,1	Combining different gases with each other and with water, to produce other chemical compounds
4	Placement in the distillation column	4,1	Transfer of vapors from the reactor to the distillation column	4,1,1	As soon as the temperature and pressure drop of the system, the oxidation cycle ends. In this case, the distillation column valve is controlled.
				4,1,2	Gases enter the distillation column
		4,2	Spiral heating system containing oil	4,2,1	Raising the temperature between 120 and 130 °C
		4,3	Exit of lightweight gases	4,3,1	Lighter gases with less boiling point than benzoic acid are released out of the system
		4,4	Gas measuring and gas purifiers devices	4,4,1	Combining different gases with each other and with water to produce other chemical compounds
5	Placement of vapors in the reboiler	5,1	the inlet valve Opening	5,1,1	Checking the inlet valve
				5,1,2	Opening the inlet valve
		5,2	Material purification by heat of oil coil heating system	5,2,1	Apply temperature of 250 ° C
		5,3	Transfer of vapors to the reboiler	5,3,1	Transfer from reboiler to flaker by piping system
6	Placement of vapors in flacker	6,1	Vapor refrigeration process	6,1,1	Reduction of vapor temperature to 120 degrees by 15 degree water cooling system
		6,2	In Flacker	6,2,2	Control the temperature of the final product at about 35 by a thermometer

جدول ۵. کلمات راهنما و مؤلفه‌های استفاده‌شده برای مطالعه HAZOP.

Table 5. Keywords and components used to study HAZOP.

System	Number of subsystems	Number of nodes	Key word	Corresponding parameter
1	1,1	1,1,1	Less than/More than	Temperature
		1,1,2	Less than/More than	pressure
		1,1,3	Less than	Level

### ۶. تعریف متغیرهای کلامی و اعداد فازی

تحلیل تیم HAZOP در مورد کلیه ریسک‌های یک مجموعه، نمی‌تواند کاملاً دقیق باشد؛ بنابراین تعریف و شناسایی ریسک‌ها می‌تواند به صورت متغیرهای کلامی و اعداد فازی باشد. در این مطالعه، مطابق نظر کارشناسان و مهندسان فرایند، ارزیابی شدت ریسک<sup>۱</sup> با پنج متغیر کلامی ریسک بحرانی<sup>۲</sup>، جدی<sup>۳</sup>، متوسط<sup>۴</sup>، کم<sup>۵</sup> و ناچیز<sup>۶</sup> تعریف شد و احتمال وقوع<sup>۷</sup> ریسک به صورت احتمال وقوع بالا<sup>۸</sup>، متوسط و پایین، تعیین شد. در جدول (۶) عدد فازی متناظر با هر متغیر کلامی، تعیین شده است. در جدول (۷)، نمره شدت و نمره احتمال وقوع برای هر ریسک بر مبنای متغیرهای کلامی و به شکل اعداد فازی تعریف شدند. هم‌چنین از آنجایی که اعداد شدت و

احتمال وقوع به صورت فازی بودند، ضرب این دو عدد فازی، به عنوان فاکتور ریسک<sup>۹</sup>، بر مبنای رابطه<sup>۳</sup> در جدول (۷) حساب شد [۳۱-۳۰]. در شکل (۲) که خروجی نرم‌افزار متلب است، برای هر یک از متغیرهای کلامی جدول (۶)، تابع عضویت مثلثی نشان داده شده است که برای هر متغیر، کم‌ترین تا بیشترین دامنه قابل قبول برای تابع عضویت را نمایش می‌دهد؛ به‌عنوان مثال برای متغیر کلامی شدت ریسک متوسط، درجه عضویت (که مقداری بین ۰ و ۱ است)، از مقدار ۰/۴ تا ۰/۶ با یک تابع مثلثی قابل مشاهده است.

شده ریسک x احتمال وقوع = فاکتور ریسک (۳)

جدول ۶. توصیف متغیرهای کلامی و عدد متناظر فازی آن‌ها.

Table 6. Linguistic terms and corresponding fuzzy numbers.

	Verbal variable states	The general meaning of the variable	Triangular fuzzy number
Intensity of risk effect	Critical	Very high effect	(0,8,1,1)
	Seriously	High effect	(0,5,0,7,0,9)
	Moderate	Medium effect	(0,4,0,5,0,6)
	Minor	Low effect	(0,1,0,3,0,45)
	Negligible	Negligible effect	(0,0,0,15)
Probability of occurrence	High	High probability of occurrence	(0,7,1,1)
	Medium	Medium probability of occurrence	(0,2,0,5,0,8)
	Low	Low probability of occurrence	(0,0,0,3)

1. Risk Impact (RI)  
4. Moderate  
7. Risk Probability (RP)

2. Critical  
5. Minor  
8. High

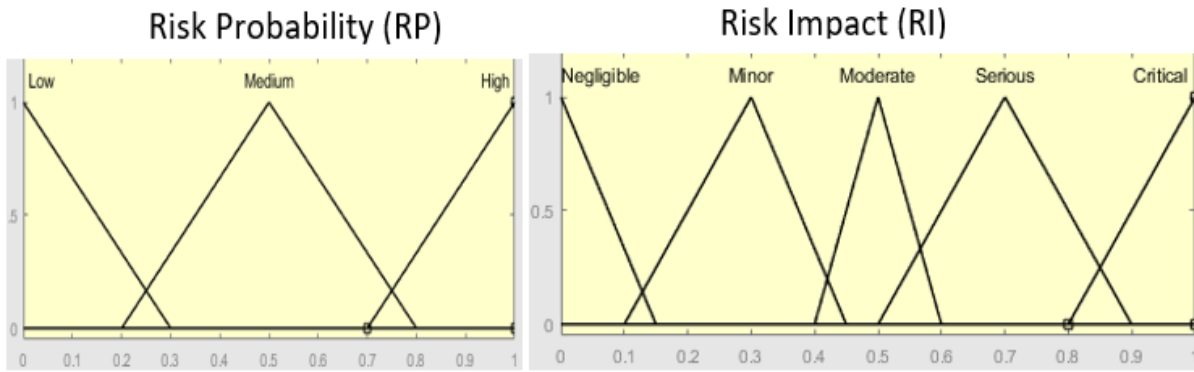
3. Serious  
6. Negligible  
9. Risk Factor (RF)

جدول ۷. دسته‌بندی ریسک‌های فرایند بر مبنای متغیر کلامی و عدد فازی اولویت ریسک.

Table 7. Classification of process risks based on verbal variables and fuzzy number of risk priority.

Risk ID	Name of node	Verbal variable of intensity	Fuzzy number of intensity	Verbal variable of probability	Fuzzy number of probability	Fuzzy number of Risk Factor
1,1,1	Temperature control by thermometer	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
1,1,2	Liquid pressure control by barometer	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
1,1,3	Check the liquid level with a level gauge	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
1,2,1	Temperature control by thermometer	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
1,2,2	Liquid pressure control by barometer	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
1,2,3	Check the liquid level with a level gauge	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
1,2,4	Transfer of toluene to the spare tank in case of leakage of the main tank	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
1,3,1	Annual control of equipment	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
2,1,1	Apply temperature of 150 to 180 degrees Celsius	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
2,1,2	Apply pressure 5 to 7 bar	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
2,1,3	Performing chemical interactions with catalysts and oxidation and conversion of liquid to vapors at this pressure and temperature	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
2,2,1	Use water for cooling to prevent increase the temperature to more than 180 ° C	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,1,1	Vapors enter the condenser from the reactor	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,1,2	Conversion of steam to liquid in the condenser	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,2,1	Liquid return from condenser to reactor	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,2,2	Conversion of liquid to steam in the reactor	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,3,1		Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,4,1	Reach temperatures below 150 ° C and pressures reach less than 5 bar	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)

Risk ID	Name of node	Verbal variable of intensity	Fuzzy number of intensity	Verbal variable of probability	Fuzzy number of probability	Fuzzy number of Risk Factor
3,5,1	Control the pressure in an acceptable range below 7 bar	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,6,1	Activation of spare barometer if the first barometer does not work	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
3,7,1	Combining different gases with each other and with water, to produce other chemical compounds	Critical	(0,8,1,1)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,3)
4,1,1	As soon as the temperature and pressure drop of the system, the oxidation cycle ends. In this case, the distillation column valve is controlled.	Moderate	(0,4,0,5,0,6)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,18)
4,1,2	Gases enter the distillation column	Moderate	(0,4,0,5,0,6)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,18)
4,2,1	Raising the temperature between 120 and 130 ° C	Moderate	(0,4,0,5,0,6)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,18)
4,3,1	Lighter gases with less boiling point than benzoic acid are released out of the system	Moderate	(0,4,0,5,0,6)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,18)
4,4,1	Combining different gases with each other and with water to produce other chemical compounds	Moderate	(0,4,0,5,0,6)	Low	(0,0,0,3)	(0,0,0,18)
5,1,1	Checking the inlet valve	Seriously	(0,5,0,7,0,9)	Medium	(0,2,0,5,0,8)	(0,1,0,0,35,0,72)
5,1,2	Opening the inlet valve	Seriously	(0,5,0,7,0,9)	Medium	(0,2,0,5,0,8)	(0,1,0,0,35,0,72)
5,2,1	Apply temperature of 250 ° C	Seriously	(0,5,0,7,0,9)	Medium	(0,2,0,5,0,8)	(0,1,0,0,35,0,72)
5,3,1	Transfer from reboiler to flocker by piping system	Seriously	(0,5,0,7,0,9)	Medium	(0,2,0,5,0,8)	(0,1,0,0,35,0,72)
6,1,1	Reduction of vapor temperature 120 degrees by 15 degree water cooling system	Minor	(0,10,0,3,0,45)	High	(0,7,1,1)	(0,07,0,3,0,45)
6,2,2	Control the temperature of the final product at about 35 by a thermometer	Minor	(0,10,0,3,0,45)	High	(0,7,1,1)	(0,07,0,3,0,45)



شکل ۲. تابع عضویت شدت ریسک و احتمال وقوع.

Figure 2. Membership function of risk intensity and probability of occurrence.

تبدیل شد. جدول (۹) ریسک‌های دسته‌بندی شده فرایند را بر مبنای فاکتور ریسک تبدیل شده از فازی به قطعی نشان می‌دهد. این حاشیه‌بندی احتیاط بیشتری را در مورد حوادث احتمالی تضمین می‌کند. به این ترتیب هر یک از ریسک‌ها با توجه به عدد ریسک در یکی از چهار گروه مذکور، دسته‌بندی شدند.

جدول ۸. نوع دسته‌بندی ریسک‌ها.

Table 8. Risk classification.

Risk classification	Range of risk factor
Insignificant	$0 \leq RF \leq 0,05$
Acceptable	$0,05 < RF \leq 0,2$
Unacceptable	$0,2 < RF \leq 0,7$
Unbearable	$0,7 < RF \leq 1$

#### ۷. تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی

تبدیل کردن اعداد فازی به اعداد قطعی را دیفازی کردن می‌گویند. به چندین روش می‌توان اعداد فازی را به اعداد قطعی تبدیل کرد؛ روش نقطه مرکزی یا مرکز ثقل<sup>۱</sup>، روش بالاترین درجه عضویت<sup>۲</sup>، روش میانگین وزنی<sup>۳</sup>، روش میانگین بیشترین درجه‌های عضویت<sup>۴</sup> و روش مرکز بزرگ‌ترین ناحیه<sup>۵</sup> برخی از این روش‌ها هستند. روش نقطه مرکزی یا مرکز ثقل از جمله رایج‌ترین روش‌های تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی است [۳۲]. در این مقاله مطابق با رابطه (۴)، از این روش برای تبدیل اعداد فازی به قطعی استفاده شده است [۳۳].

$$RF_D = \frac{\int_0^1 x \cdot RF(x) \, dx}{\int_0^1 RF(x) \, dx} \quad (4)$$

#### ۸. دسته‌بندی ریسک‌ها

پس از مرحله تبدیل اعداد فازی به اعداد واقعی، ریسک‌ها بر مبنای عدد فاکتور ریسک دسته‌بندی شدند. جدول (۸) نوع این دسته‌بندی را در چهار گروه ناچیز، قابل قبول، غیر قابل قبول و غیر قابل تحمل نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه (۳) عدد ریسک که حاصل ضرب دو عدد فازی احتمال ریسک و شدت ریسک بود به شکل قطعی

1. Centroid Method
2. Max-Membership Principal
3. Weighted Average Method
4. Mean-Max Membership Middle of Maxima
5. Center of Largest Area

جدول ۹. دسته‌بندی ریسک‌های فرایند تولید اسید بنزوئیک.

Table 9. Risk classification of Benzoic Acid production process.

Risk ID	Diffused risk number (RF)	Classification	Risk ID	Diffused risk number (RF)	Classification	Risk ID	Diffused risk number (RF)	Classification
1,1,1	0,1	Acceptable	2,2,1	0,1	Acceptable	4,1,2	0,06	Acceptable
1,1,2	0,1	Acceptable	3,1,1	0,1	Acceptable	4,2,1	0,06	Acceptable
1,1,3	0,1	Acceptable	3,1,2	0,1	Acceptable	4,3,1	0,06	Acceptable
1,2,1	0,1	Acceptable	3,2,1	0,1	Acceptable	4,4,1	0,06	Acceptable
1,2,2	0,1	Acceptable	3,2,2	0,1	Acceptable	5,1,1	0,39	Unacceptable
1,2,3	0,1	Acceptable	3,3,1	0,1	Acceptable	5,1,2	0,39	Unacceptable
1,2,4	0,1	Acceptable	3,4,1	0,1	Acceptable	5,2,1	0,39	Unacceptable
1,3,1	0,1	Acceptable	3,5,1	0,1	Acceptable	5,3,1	0,39	Unacceptable
2,1,1	0,1	Acceptable	3,6,1	0,1	Acceptable	6,1,1	0,273	Unacceptable
2,1,2	0,1	Acceptable	3,7,1	0,1	Acceptable	6,2,2	0,273	Unacceptable
2,1,3	0,1	Acceptable	4,1,1	0,06	Acceptable			

## ۹. بحث

در این مقاله از روشی که ترکیب HAZOP، محاسبه عدد ریسک، متغیرهای کلامی و ریاضیات فازی است استفاده شده است. این تجزیه و تحلیل خطر در کارخانه اسید بنزوئیک واقع در شهرک صنعتی شکوهیه قم، که تنها تولیدکننده بنزوئیک اسید و مشتقات آن است انجام گرفت. روش HAZOP روشی کیفی برای شناسایی و تحلیل خطر محسوب می‌شود. اعداد فازی در شرایطی به کار می‌روند که نمی‌توان یک عدد مشخص و قطعی به هر یک از ریسک‌ها اختصاص داد. به این ترتیب با ترکیب تکنیک کیفی HAZOP و روش کمی عدد ریسک و ریاضیات فازی، می‌توان به یک دید و تحلیل عددی در مورد ریسک‌های فرایند مذکور رسید. با تحلیل و بررسی کلیه ریسک‌های ممکن و مشورت با مهندسان

فرایند مشخص شد که کلیه ریسک‌های محتمل، با وجود یک سامانه کنترلی دقیق قابل کشف است. این بدان معنی است که با وجود یک سامانه نظارتی قوی می‌توان از بروز تقریباً تمام خطرهای جلوگیری کرد که این، ضرورت وجود یک سامانه نظارتی و کنترلی به‌روز و دقیق را نشان می‌دهد. با تحلیل کلیه ریسک‌ها مشخص شد که کلیه خطرهای بالقوه هم به بخش نیروی انسانی و هم به نقص تجهیزات مربوط می‌شود. خطرهای مربوط به نیروی انسانی که متأثر از خصوصیات فردی و شناختی، مثل رفتار فرد، ادراک و آموزش است [۳۴] را می‌توان عضو ثابت کلیه خطرهای شناسایی شده برشمرد که وجود برنامه‌های منظم آموزش کارکنان را قطعاً می‌توان بخش مهمی از سامانه کنترلی کارخانه برشمرد که سهم مؤثری در کاهش این نوع خطرهای ایفا می‌کند. خطرهای مربوط به رآکتور و

مواجه هستند که اگرچه احتمال وقوع بالایی ندارند ولی در صورت بروز، فاجعه آفرین خواهند بود و تأثیرهای جبران ناپذیری خواهند داشت.

### مراجع

- [1] Mearns, K., Whitaker, S., Flin, R., " Benchmarking safety climate in hazardous environments: a longitudinal, inter-organisational approach", Risk Analysis, Vol. 21, No. 4, pp. 771-786, (2001).
- [2] Pidgeon, N., O'Leary, M., "Manmade disasters: why technology and organizations (sometimes) fail", Safety Science, Vol. 34, pp.15-30, (2000).
- [3] Hashemi, V., Abdolhamidzadeh, B., Rashtchian, D., "HAZOP studies conducted in 19 process units in Iran; comparing results and investigation of problems", 1st National Conference on Safety Engineering, Loss Prevention and HSE Management, Sharif university, 28 February to 2 March, In Persian, 2006.
- [4] Bartolozzi, L. Castiglione, A. Picciotto, M., "Qualitative models of equipment units and their use in automatic HAZOP analysis", Reliability Engineering & System Safety, Vol.70, No.1, pp.49-57, (2000).
- [5] Dunja, J., Fthenakis, V. M., Darbra, R. M., Vílchez, J. A., Arnaldos, J., "Conducting HAZOPs in continuous chemical processes: Part I. Criteria, tools and guidelines for selecting nodes", Process Safety and Environmental Protection, Vol. 89, No.4, pp. 214-223, (2011).
- [6] Chudleigh, M. F., "Hazard analysis of a computer based medical diagnostic system", Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 44, No. 1, pp. 45-54, (1994).
- [7] Jagtman, H. M., Hale, A. R., Heijer, T., "A support tool for identifying evaluation issues of road safety measures", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 90 (2-3), pp. 206-216, (2005). (selected papers from ESREL 2003).
- [8] Dunj6, J., Fthenakis, V., Vílchez, J. A., Arnaldos, J., "Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review", Journal of Hazardous Materials, Vol. 173, pp. 19-32, (2010).
- [9] Sa'idi, E., Anvaripour, B., Jaderi, F., Nabhani, N., "Fuzzy risk modeling of process operations in the oil and gas refineries. J. Loss Prev", Process Industries, Vol. 30, p. 63e73, (2014).
- [10] Knezevic, J., Odoom, E. R., "Reliability modelling of repairable systems using Petri nets and fuzzy Lambda-Tau methodology, Reliab. Eng. Syst. Saf", Vol. 73, pp. 1-17, (2001). doi:10.1016/S0951-8320(01)00017-5.

کندانسور که دارای بالاترین شدت است، بیشتر از بعد انسانی و تجهیزاتی به بعد کنترلی کارخانه مرتبط بود. بررسی‌ها نشان داد که بالاترین احتمال وقوع ریسک‌ها، به بخش فلاکر (جایی که گازهای خارج شده از ریویولر در آن به مایع تبدیل می‌شوند و در اثر اعمال دمای پایین‌تر، به شکل جامد درمی‌آیند و در پایان به وسیله تیغه‌های موجود در آن به شکل پرک از سامانه خارج می‌شوند)، مربوط می‌شد که نظر مهندسان فرایند نیز مؤید همین مطلب بود و نتایج محاسبات را تأیید می‌کرد.

در این مطالعه، خطرهای در چهار گروه شامل خطرهای ناچیز، قابل قبول، غیرقابل قبول و غیر قابل تحمل طبقه‌بندی شدند. در صورتی که خطر در گروه غیرقابل قبول و غیرقابل تحمل قرار گیرد بلافاصله اقدامات اصلاحی باید برنامه‌ریزی شود. تحلیل خطرهای در این مطالعه نشان داد که مهم‌ترین خطرهای در فرایند تولید اسید بنزوئیک، مربوط به برج ریویولر و فلاکر است. انتشار بخارهای با دمای بالا در این مرحله برای نیروی انسانی خطرهای تنفسی و اشتعال دارد و همچنین انباشت گازها در برج تقطیر اشتعال‌زاست. با دسته‌بندی تک‌تک ریسک‌های شناخته شده این فرایند در چهار گروه مذکور، ریسک‌های مربوط به برج ریویولر فلاکر در گروه ریسک‌های غیرقابل قبول قرار گرفتند که این موضوع مستلزم اقدامات اصلاحی و تمرکز جدی، برای جلوگیری از انفجارهای احتمالی در این دو قسمت است.

### ۱۰ نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل ریسک‌ها و بررسی انجام گرفته در مطالعه حاضر، نویسندگان و مهندسان فرایند را به یک دید کمی در مورد دو مشخصه ریسک‌ها یعنی «احتمال وقوع ریسک» و «شدت اثر ریسک» رهنمون ساخت. نتایج نشان داد که در دسته‌بندی ریسک‌ها بر مبنای احتمال وقوع، حدود ۶٪ از ریسک‌های این فرایند دارای احتمال زیاد، حدود ۱۲/۵٪ دارای احتمال متوسط و حدود ۸۱٪ دارای احتمال پایین و احتمال بعید هستند. به لحاظ شدت اثر خطرهای، ۷۸٪ از خطرهای دارای اثر تخریبی خطرناک، ۱۵/۶۲٪ اثر تخریبی متوسط و ۶/۲۵٪ دارای اثر تخریب پایین بودند. این نتیجه مؤید آن است که کارخانه‌های صنایع شیمیایی و در اینجا به شکل خاص - کارخانه تولید اسید بنزوئیک - که تولوئن به‌عنوان ماده اولیه آن، ماده‌ای به سرعت اشتعال‌زا و خطر آفرین است، با خطرهایی

- [11] Markowski, A. S., Mannan, M. S., "Fuzzy risk matrix", *J. Hazard. Mater.*, Vol. 159, pp. 152-157, (2008).
- [12] Nait-Said, R., Zidani, F., Ouzraoui, N., "Modified risk graph method using fuzzy rule-based approach", *J. Hazard. Mater.*, Vol. 164, pp. 651-658, (2009).
- [13] Sallak, M., Simon, C., Aubry, J. F., "A fuzzy probabilistic approach for determining safety integrity Level", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol. 16, pp. 239-248, (2008). doi:10.1109/TFUZZ.2007.903328.
- [14] Choi, J. Y., Byeon, S. H., "HAZOP Methodology Based on the Health, Safety, and Environment Engineering", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17, p. 3236, (2020). Doi:10.3390/ijerph17093236
- [15] Cheraghi, M., Eslami Baladeh, A., Khakzad, N., "A fuzzy multi-attribute HAZOP technique (FMA-HAZOP): Application to gas wellhead facilities", *Safety Science*, Vol. 114, pp. 12-22, (2019).
- [16] Ramzan, N., Compant, F., Witt, W., "Methodology for generation and evaluation of safety system alternatives based on extended Hazop and event tree analysis", *Process Safety Progress*, Vol. 26, pp. 35-42, (2007).
- [17] Fuentes-Bargues, J. L., González-Cruz, M. C., González-Gaya, C., Baixauli-Pérez, M.P., "Risk Analysis of a Fuel Storage Terminal Using HAZOP and FTA", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol.14, No. 7, p. 705, (2017). doi:10.3390/ijerph14070705Kldfvjklfdjk
- [18] Wang, R., Wang, J., "Risk Analysis of Out-drum Mixing Cement Solidification by HAZOP and Risk Matrix", *Annals of Nuclear Energy*, 147:107679, DOI: 10.1016/j.anucene. 2020.107679.
- [19] Kościelny, J., M., Syfert, M., Fajdek, B., Kozak, A., "The application of a graph of a process in HAZOP analysis in accident prevention system", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 55, Part A, pp. 55-66, (2017).
- [20] Baybutt, P., "A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) study", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 33, pp. 52-58, (2015).
- [21] Tyler, B. J., "HAZOP study training from the 1970s to today", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 90, Issue. 5, pp. 419-423, (2012).
- [22] Crawley, F., Tyler, B., "HAZOP: Guide to Best Practice", Elsevier, 3rd Edition, p. 168, (2015).
- [23] Crawley, F., "A Guide to Hazard Identification Methods", 2nd Edition, Elsevier, p. 256, (2020).
- [24] Basu, S., "Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems" , 1st Edition, Academic Press, p.1062, (2016).
- [25] Ahn, J., Chang, D., "Fuzzy-based HAZOP Study for Process Industry", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.194, No.5, pp. 303-311, (2016).
- [26] Ross, T., J., " Fuzzy Logic with Engineering Applications", third ed., Wiley, New York, (2010).
- [27] Kaufmann, A., Gupta, M. M., "Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Application. Van Nostrand Reinhold", New York, (1991).
- [28] Boostan, A., Mirzaee, N., Eskandari, M., Shafiee, A., "Seismic zoning of Tehran and adjacent areas using fuzzy sets", *Journal of Earth and Space Physics*, Vol. 38 - No. 2, pp.21-44, In Persian, (2012).
- [29] Vojoodi, M., Zare, M., "Fuzzy inference model for estimation of earthquake risk", *The 2nd International Conference on Integrated Natural Disaster Management*, Tehran, In Persian, (2006).
- [30] Subriadi, A. P., Najwa, N. F., "The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment", *Heliyon*, Vol. 6, No.1, e03161, Published online 2020 Jan 29, (2020). doi: 10.1016/j.heliyon.2020. e 03161
- [31] DHILLON, B. S., "Engineering Maintainability: How to Design for Reliability and Easy Maintenance", pp. 54, (1999).
- [32] Gurukumaresan, D., Duraisamy, C., Srinivasan, R., Vijayan, V., "Optimal solution of fuzzy assignment problem with centroid methods", *materials today: proceedings*, Vol. 37, Part. 2, pp. 553-555, (2021).
- [33] Fuentes-Bargues, J. L., Gonzalez-Gaya, C., Gonzalez-Gaya, M. C., Cabrelles-Ramírez, V., "Risk assessment of a compound feed process based on HAZOP analysis and linguistic terms", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 44, pp. 44-52, (2016).
- [34] Sujan, M. A., Embrey, D., Huang, H., "On the Application of Human Reliability Analysis in Healthcare: Opportunities and Challenges", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 194, p. 106189, (2020). DOI: 10.1016/j.res.2018.06.017.