Journal of Occupational Hygiene Engineering *Volume 5, Issue 4, Winter 2019, Pages: 57-65*

Original Article

doi: 10.29252/johe.5.4.57

Assessment of Critical Fire Risks in an Industrial Estate Using a Combination of Fuzzy Logic, Expert Elicitation, Bow-tie, and Monte Carlo Methods

***Gholamreza Nabi Bidhendi*[1], *Hajar Mohammadzadeh Bahar*[2,*]**

[1] *Professor of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran*
[2] *PhD Student, Head of the Environment Industrial Estate of Tehran, Tehran, Iran*

**** Corresponding Author:** Hajar Mohammadzadeh Bahar, Head of the Environment Industrial Estate of Tehran, Tehran, Iran. Email: hmbahar@yahoo.com*

***Received:** 12/02/2019*
***Accepted:** 13/03/2019*

How to Cite this Article:
Nabi Bidhendi Gh, Mohammadzadeh Bahar H. Assessment of Critical Fire Risks in an Industrial Estate Using a Combination of Fuzzy Logic, Expert Elicitation, Bow-tie, and Monte Carlo Methods. J Occup Hyg Eng. 2019; 5(4): 57-65. DOI: 10.29252/johe.5.4.57

Abstract

Background and Objective: *Industrial estates have been described as highly prone to fire incidents. According to the baseline studies, more than 85% of the industrial accidents occurring in industrial estates during the 80s and 90s were fire incidents affecting more than one factory in 10% of the cases.*

Materials and Methods: *After the identification of 30 high-risk industries in Abbasabad industrial estate, a fault tree was designed using the hazard and operability analysis (HAZOP). In the next stage, the weak links in the system were pinpointed using quantitative and qualitative analysis and Bayesian network. The failure rate of each area was predicted using the available data and experts' opinions, and then calculated using the fuzzy logic and Monte Carlo methods. The data were analyzed in the Crystalball software. After the analysis of the risks, the critical risks were identified and filtered using the Bowtie method, and then subjected to the management process.*

Results: *The consultation with industrial experts during the HAZOP process and application of filtration resulted in the identification of 15 major incidents, 9 and 6 events of which were probabilistic and fuzzy, respectively. The risks were rated based on the experts' opinions and the given model; in this regard, the foam and paint industries gained the highest modeling score.*

Conclusion: *The sensitivity analysis of failure probability revealed that the industries using or producing materials with a low flammable point have a higher risk; therefore, more attention should be paid to these industries to prevent the fire incidents. The application of the results of this study in the development of the required guidelines and trainings for the industrial managers resulted in a decrease in the number of accidents in Abbasaabad estate.*

Keywords: *Crisis Management; Bow-tie Evaluation Model; Fuzzy Logic*

Copyright *© 2019 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: 10.29252/johe.5.4.57

آنالیز ریسک‌های بحرانی ناشی از حریق یک شهرک صنعتی با تلفیقی از روش‌های منطق فازی، نظرات خبرگان، *Bow-tie* و *Monte Carlo*

غلامرضا نبی بیدهندی[۱]، هاجر محمدزاده بهار[۲،*]

[۱] استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] دانشجوی دکتری، رئیس گروه محیط زیست شرکت شهرک‌های صنعتی استان تهران، تهران، ایران

* **نویسنده مسئول:** هاجر محمدزاده بهار، رئیس گروه محیط زیست شرکت شهرک‌های صنعتی استان تهران، تهران، ایران. ایمیل: *hmbahar@yahoo.com*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۲

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

چکیده

سابقه و هدف: شهرک‌های صنعتی دارای پتانسیل بالایی در رخدادهای آتش‌سوزی هستند. مطابق با بررسی‌های انجام‌شده، بیش از ۸۵ درصد از حوادث صنعتی در شهرک‌های صنعتی در طول دهه ۸۰ و ۹۰، حوادث آتش‌سوزی بوده‌اند که در ۱۰ درصد از موارد، بیش از یک کارخانه درگیر بوده‌اند.

مواد و روش‌ها: ابتدا ۳۰ مورد از صنایع پرخطر شهرک صنعتی عباس‌آباد شناسایی گردید و پس از اعمال *HAZOP* (*Hazard and Operability Analysis*)، درخت خطا رسم شد. سپس با استفاده از شبکه *Bayesian* و آنالیزهای کمی و کیفی، لینک‌های ضعیف سیستم مشخص شدند و نرخ شکست در هر نقطه با استفاده از اطلاعات موجود و نظرات خبرگان پیش‌بینی گردید و با استفاده از روش فازی و *Monte Carlo* محاسبه گشت. در ادامه با ورود داده‌ها به نرم‌افزار کریستال بال، ریسک‌ها تجزیه و تحلیل شدند و با استفاده از روش *Bow-tie*، ریسک‌های پرخطر شناسایی و فیلتر گردیدند و اقدامات مدیریتی جهت کاهش آن‌ها ارائه گردید.

یافته‌ها: با استفاده از نظر خبرگان در طول فرایند *HAZOP* و فیلترهای اعمال‌شده، ۱۵ رویداد پایه‌ای استخراج گردید که شش رویداد احتمالاتی و نه رویداد فازی بودند. با توجه به نتایج حاصل از نظر خبرگان و مدل مورد نظر، ریسک‌ها امتیازبندی شدند که بیشترین امتیاز را صنایع فوم و رنگ به‌دست آوردند.

نتیجه‌گیری: صنایع دارای مواد با نقطه اشتعال پایین، خطر آتش‌سوزی بالایی دارند؛ از این رو لازم است دقت بیشتری به‌منظور کنترل آن‌ها صورت گیرد. با استفاده از نتایج این مطالعه و ارائه دستورالعمل‌ها و آموزش‌های لازم به مدیران صنایع، داده‌های آماری کاهش چشم‌گیری را در تعداد حوادث اتفاق‌افتاده در شهرک صنعتی عباس‌آباد نشان دادند.

واژگان کلیدی: مدل ارزیابی *Bow-tie*؛ مدیریت بحران؛ منطق فازی

مقدمه

براساس گزارش‌های به‌دست‌آمده، در سال‌های اخیر ۵۰۰ فرم گزارش‌دهی از حوادث صنعتی در کل کشور که به تبع آن‌ها خسارات بسیاری به تجهیزات و محیط زیست وارد می‌شود، تهیه شده است. با هدف پیشگیری از بروز جراحات و حوادث شغلی لازم است ریسک‌فاکتورهای محیط کاری به میزان قابل قبولی کاهش یابد. با علم به اینکه بروز حوادث، هزینه‌های سنگینی (مستقیم و غیرمستقیم) را بر سیستم تحمیل می‌نماید، ضروری است تا حد امکان در بررسی حوادث، دلایل بیشتری شناسایی گردد [۱]. تکنیک *Bow-tie* یکی از مؤثرترین روش‌های کمی و کیفی برای مدیریت ریسک است که طی آن ارتباط بین تمام عوامل مرتبط با فرایند خطر نشان داده می‌شود. همچنین ارتباط تمامی مؤلفه‌ها در تحلیل عوامل بالقوه آسیب‌رسان با اقدامات کنترلی، فعالیت‌ها و وظایف بحرانی به‌طور کامل بررسی می‌گردند [۲]. امروزه تکنیک آنالیز درخت خطا به‌عنوان یکی از قوی‌ترین ابزارهای آنالیز فرایند ایمنی سیستم به‌ویژه هنگام ارزیابی سیستم‌های بسیار پیچیده و دقیق محسوب می‌شود. به دلیل استفاده از رویکرد قیاسی (رسیدن از کل به جزء) در این روش، بسیاری از تجزیه و تحلیل‌گران ایمنی سیستم، به‌کارگیری روش *FTA* (*Fault Tree Analysis*) را در بررسی حالات احتمالی مختلف که می‌توانند منجر به بروز رویدادهای مطلوب یا نامطلوب در سطح سیستم شوند، بسیار مفید می‌دانند. در برخی از موارد به دلیل عدم اطلاعات کافی،

دستورالعمل و یا عدم مهارت کافی در ثبت اطلاعات، برآورد دقیق میزان شکست اجزا که منجر به وقوع رویداد ناخواسته می‌شود، بسیار دشوار است؛ به همین دلیل و نیز کسب اطلاعات کافی از خبرگان، رویکرد فازی همزمان با روش تحلیل درخت خطا به کار می‌رود تا پیش‌بینی‌ها و روش‌های کنترلی رخدادها به‌صورت دقیق وجود داشته باشد. روش‌های مرسوم *FTA* برای کمی‌کردن احتمال شکست سیستم، به یک پایگاه داده از صدها رویداد پایه نیاز دارد. پایگاه داده‌های حوادث معمولاً در صنایع وجود ندارند. برای رفع این مشکل، رویکرد فازی *FTA* توسط *Clemen* و *Winkler* پیشنهاد گردید [۳]. آن‌ها در مطالعه خود از روش فازی برای کمی‌کردن درخت خطا در سیستم‌های صنعت نفت از روش فازی استفاده نمودند. منطق فازی در مواجهه و ارزیابی موفقیت‌های نادقیق و مبهم، امکانی را فراهم می‌کند که دربرگیرنده قدرت خلاقیت و درک انسان از این مفاهیم می‌باشد. منطق فازی می‌تواند یکی از عناصر اساسی در ارزیابی ریسک باشد [۴،۵]. در این راستا، *Vose* در مقاله‌ای نرخ شکست را به پنج گروه فرایندهای بر پایه دانش (دانش‌بنیان)، فرایندهای بر پایه تجربه، فرایندهای بر پایه کیفیت سیستم کنترلی، فرایندهای بر پایه منطق و فرایندهای بر پایه بانک اطلاعات تقسیم نموده است [۶]. هنگامی که بانک اطلاعات برای رویدادهای پایه‌ای وجود نداشته باشد، با استفاده از نظر خبرگان و تبدیل سیستم فازی به دیفازی این مشکل برطرف می‌شود. در سال ۲۰۱۰، *Renjith* و همکاران در مقاله خود روشی را ارائه نمودند که به وسیله آن اعداد فازی، دیفازی شدند و به روش چپ و راست معروف گردیدند [۷]. علاوه‌براین، برای تبدیل اعداد فازی به اعداد قطعی می‌توان از روش مرکز گرانیگاه استفاده نمود. به دلیل اینکه این روش تمام نقاط حوزه تعریف و درجه عضویت را دربرمی‌گیرد، روش دقیق‌تری برای دیفازی به شمار می‌رود [۸-۱۰]. در این ارتباط برای تعیین تعداد خبرگان و انتخاب کارشناسان، *Miller* استفاده از اعداد جادویی ۹-۵ را جهت تعیین اعداد فازی توصیه نموده است [۱۱].

مواد و روش‌ها

در این مطالعه با استفاده از تلفیقی از روش *Bow-tie*، منطق فازی، نظرات خبرگان و *Monte Carlo* اقدام به ارزیابی ریسک‌های بحرانی ناشی از حریق در برخی از صنایع شهرک صنعتی عباس‌آباد واقع در استان تهران گردید. ابتدا ۳۰ مورد از صنایع پرخطر شهرک صنعتی عباس‌آباد در زمینه حریق شناسایی شدند (مخاطرات فرایند مورد بررسی با اعمال *HAZOP* تهیه شدند و درخت خطای مربوطه رسم گردید) و در ادامه با استفاده از شبکه *Bayesian* و آنالیزهای کمی و کیفی، لینک‌های ضعیف سیستم مشخص شدند و نرخ شکست در هر نقطه با استفاده از اطلاعات موجود و نظرات خبرگان پیش‌بینی گردید. در ادامه با استفاده از روش فازی و *Monte Carlo*، نرخ شکست محاسبه گردید. در مرحله بعد با ورود داده‌ها به نرم‌افزار کریستال بال، ریسک‌ها تجزیه و تحلیل شدند و در نهایت با استفاده از روش *Bow-tie*، ریسک‌های پرخطر شناسایی و فیلتر شدند و اقدامات مدیریتی لازم جهت کاهش آن‌ها ارائه گردید. با توجه به اینکه تاکنون این روش ارزیابی ریسک جهت کاهش بحران در شهرک‌های صنعتی استفاده نشده است، نگرشی نوین جهت مدیریت بحران محسوب می‌شود.

تجزیه و تحلیل درخت خطا

درخت تجزیه و تحلیل شکست یک فرایند که از آن برای مدل‌سازی در این پژوهش استفاده نمودیم، عوامل و مسیرهای شکست یک فرایند را در یک سیستم عملیاتی به خوبی نشان می‌دهد. این رویکرد بر احتمال وقوع رویدادهای نامطلوب با بیان درصد احتمال رخدادن آن‌ها استوار بوده و براساس رویدادهای سطح بالایی می‌باشد که می‌توانند در یک سیستم (شهرک صنعتی) رخ دهند. شایان ذکر است که تلاش برای ردیابی آن‌ها با توجه به علل و عوامل ریشه‌ای رخداد قابل انجام بوده و جهت جلوگیری از رخدادهای احتمالی آینده با ثبت در پایگاه‌های داده‌ای و نیز در تحلیل ریسک نرخ احتمال ورودی به درخت خطا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورت وجود نرخ احتمال ورودی به درخت خطا، مقدار احتمال شکست یک جزء از روابط مربوطه محاسبه می‌گردد. اگر یک جزء قابل بازرسی باشد، احتمال شکست آن از طریق رابطه ۱ و در صورت عدم امکان بازرسی از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است که λ نرخ شکست یک جزء بوده و τ فاصله زمانی بازرسی می‌باشد [۱۲].

$$p(t)=1/2\ \tau\lambda \qquad \text{رابطه ۱}$$

$$p(b)=1-e^{(\tau\lambda)} \qquad \text{رابطه ۲}$$

در تحلیل کمی درخت خطا برای محاسبه احتمال وقوع رویداد اصلی باید احتمال وقوع هریک از رویدادهای پایه مشخص گردد؛ با مشخص‌بودن احتمال وقوع آن‌ها، احتمال رویداد اصلی با استفاده از روش زیر به‌دست می‌آید. در این روش از شبکه بیزین (دروازه‌های *And* و *Or*) استفاده می‌گردد تا رویداد اصلی را به رویدادهای پایه مرتبط کند.

احتمال وقوع رویداد اصلی یا رویدادهای میانی که دروازه‌های آن‌ها مستقل (*And*) هستند از طریق رابطه ۳ و احتمال وقوع رویدادهایی که دروازه‌های آن‌ها وابسته (*Or*) می‌باشد، با استفاده از رابطه ۴ به‌دست می‌آید [۱۳].

$$Q_{and}(t) = \prod_{j=1}^{m} q_{j(t)} \qquad \text{رابطه ۳}$$

$$Q_{0r}(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m}(1 - q_{j(t)}) \qquad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه‌ها m= تعداد کل رویدادهای ورودی به دروازه مورد نظر؛ $Q_{and}(t)$= احتمال وقوع رویداد میانی یا رویداد اصلی با دروازه And؛ $Q_{or}(t)$= احتمال وقوع رویداد میانی یا رویداد اصلی با دروازه Or؛ qj= احتمال رخداد رویدادها در درخت خطا می‌باشد. در صورتی که نرخ احتمال ورودی به درخت خطا وجود نداشته باشد، از منطق فازی استفاده می‌شود.

درخت خطای فازی

معایب درخت خطا وقتی است که داده‌های موهومی (دیجیتال) تمامی رویدادهای درخت شکست که معمولاً به‌صورت عددی شناخته نمی‌شوند، اعتبار تجزیه و تحلیل درخت شکست را کاهش می‌دهند و مانع ارزیابی ریسک با استفاده از این روش می‌شوند. منطق فازی و مجموعه‌های آن به‌عنوان بهترین راه حل برای چنین وضعیتی جهت کمک به تجزیه و تحلیل شکست ظاهر می‌شوند. هنگامی که اطلاعات مورد نیاز کمی در مورد احتمالات موجود باشد، منطق فازی مؤثرترین راه برای آنالیز می‌باشد. این روش مقادیر نامناسب "بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد" را با استفاده از نظر خبرگان صنعتی به مقادیر احتمالی مورد ارزیابی تبدیل می‌کند و در آنالیزهای احتمالی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مرحله ۱. انتخاب خبرگان

هنگامی که اطلاعات کافی در دسترس نباشد، از نظر خبرگان استفاده می‌شود. خبره در این پژوهش به فردی اطلاق می‌گردد که اطلاعات کافی در ارتباط با سیستم مورد ارزیابی را داشته باشد. همچنین، با روش احتمالی هر رویه و نیز میزان بار و ارتباط آن با درصد احتمال آشنا باشد. در مطالعه حاضر خبرگان مطابق با نظر Ishikawa و همکاران تعیین شدند [۱۴].

مرحله ۲. وزن‌دهی خبرگان

افراد مورد مطالعه در این پژوهش از صنایع مختلف و با سابقه کاری متفاوت انتخاب شدند؛ از این رو دارای وزن یکسانی نبودند. در این مطالعه وزن‌دهی با توجه به معیارهای تجربه کاری، تحصیلات، عدم داشتن حوادث غیرمترقبه، سن و اطلاعات بر مبنای اسناد موجود کاری صورت گرفت (جدول ۲).

جدول ۱: معیار امتیازدهی به نظر خبرگان

ردیف	وضعیت	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	عنوان	مهندس	۴
		بازرس کنترل‌کننده	۳
		سرپرست کارگر تکنسین	۲
		کارگر ساده	۱
۲	تجربه	۳۰	۴
		۲۰-۳۰	۳
		۱۰-۲۰	۲
		۱-۱۰	۱
۳	تحصیلات	دکتری	۴
		مهندس و کارشناسی ارشد	۳
		فوق دیپلم و دیپلم	۲
		دیپلم و زیر دیپلم	۱
۴	سن	>۵۰	۴
		۴۰-۵۰	۳
		۳۰-۴۰	۲
		<۳۰	۱

جدول ۲: وزن واژه‌های محاوره‌ای در کمی‌کردن نظر خبرگان

واژه‌های محاوره‌ای	وزن واژه‌های محاوره‌ای			
بسیار کم	۰	۰	۰/۱	۰/۲
کم	۰/۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۴
متوسط	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۷
زیاد	۰/۶	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۹
بسیار زیاد	۰/۸	۰/۹	۱	۱

مرحله ۳. کمی‌سازی نظر خبرگان

برای کمی‌سازی نظر خبرگان در مورد میزان رخدادهای پایه از عبارت‌های محاوره‌ای استفاده گردید و پنج واژه محاوره‌ای "بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد" به کار گرفته شد. دامنه مورد استفاده در این تحقیق که در شکل ۱ نشان داده شده است، با استفاده از روش *Hwang* و *Chen* کمی‌سازی گردید [۱۵].

برای اجماع نظر خبرگان، نمره وزن هر خبره در نمره واژه‌های محاوره‌ای ضرب گردید و مطابق با رابطه ۵ محاسبه شد.

$$M = \sum_j^i W_i A_j \qquad i = 1,2,3,4$$ رابطه ۵

W_i= نمره وزنی هر خبره و A_j= نمره واژه‌های محاوره‌ای هر خبره می‌باشد.

با توجه به تجربیات کسب شده از نظرات خبرگان، جهت افزایش دقت آن‌ها از توزیع‌های آماری یکنواخت، لگاریتمی، مثلثی، نرمال، روش مونت کارلو و نرم‌افزار کریستال بال استفاده شد که این توزیعات در شکل ۲ نشان داده شده است.

دیفازی‌کردن

دیفازی‌کردن یک فرایند تبدیل مقادیر مفهومی به مقادیر عددی می‌باشد. متداول‌ترین روش مورد استفاده، روش مرکز گرانیگاه می‌باشد که به‌عنوان روش مرکزی شناخته می‌شود [۸-۱۰]. در این مرحله با استفاده از روش مثلثی (رابطه ۶) یا ذوزنقه‌ای (رابطه ۷) نظرات خبرگان به‌صورت دیفازی تبدیل گردید.

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} = \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3)$$ رابطه ۶

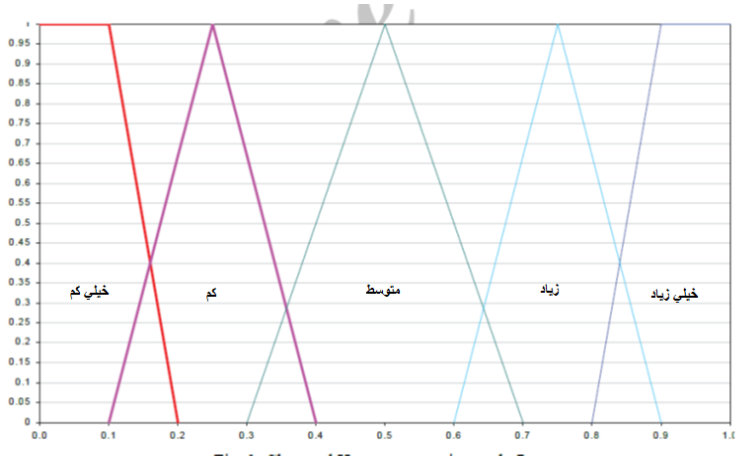
$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} = \frac{1}{3}\frac{(a_4+a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1+a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4+a_3-a_2-a_1)}$$ رابطه ۷

عدد حاصل از مرحله دیفازی‌کردن با استفاده از روش *Onisawa* (انیساوا) جهت یکپارچه‌سازی امکان خطا با میزان احتمالات خطا به شرح روابط ۸ و ۹ به اعداد احتمالی تبدیل گردید [۱۷،۱۸].

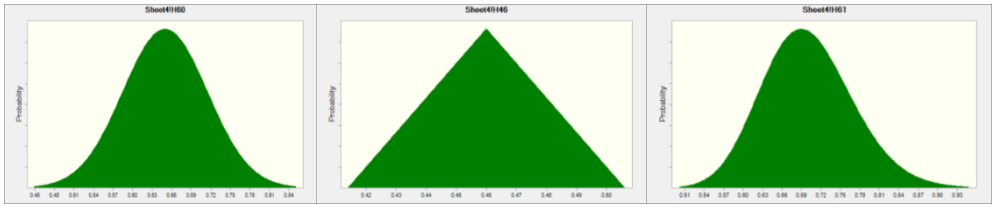
$$FFP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & FPS \neq 0 \\ 0 & FPS = 0 \end{cases}$$ رابطه ۸

$$k = \left[\frac{1 - FPS}{FPS}\right]^{\frac{1}{3}} \times 2/301$$ رابطه ۹

FPS (*Fuzzy Possibility Score*) احتمال فازی یا مقدار دیفازی‌کردن یک رخداد یا واقعه می‌باشد. پس از اینکه نرخ احتمال رویدادهای ریشه‌ای به کمک بانک اطلاعات به‌دست آمد، نرخ رویداد اصلی *TE* (*Top Event*) از طریق رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد.



شکل ۱: واژه‌های محاوره‌ای مورد استفاده خبرگان



شکل ۲: توزیع‌های یکنواخت، لگاریتمی، مثلثی و نرمال

$$E = 1 - [(1 - MCS_1) \times (1 - MCS_2) \times \ldots \times (1 - MCS_N)]$$ رابطه ۱۰

ارزیابی دقیق احتمال رخداد یک واقعه یا بحرانی ترین مجموعه برشی حداقل (*MCS: Minimum Critical State*) از طریق رابطه ۱۱ (رابطه فاسل- وسلی) محاسبه گردید.

$$FV_i = \frac{MCS_i}{TE}$$ رابطه ۱۱

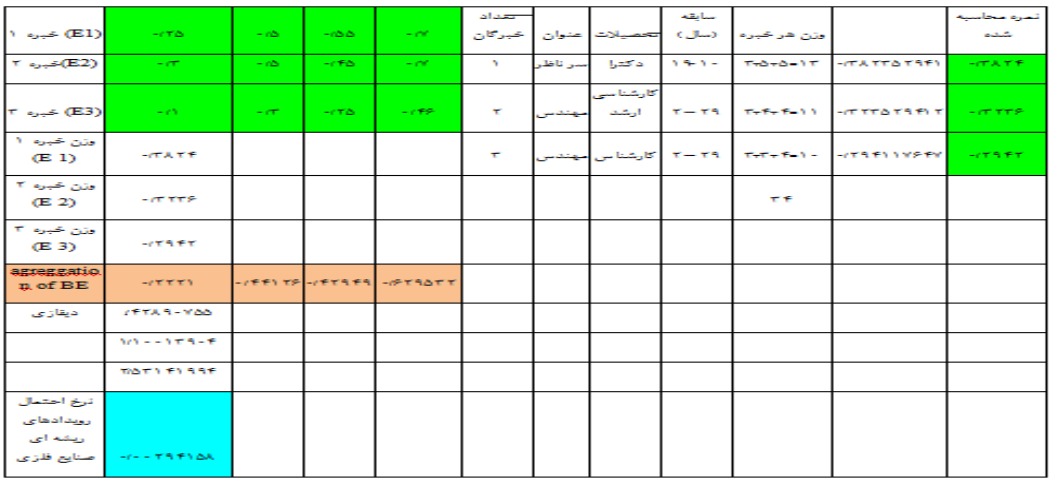
یافته‌ها

در این مطالعه ۳۰ مورد از مهم‌ترین آتش‌سوزی‌های رخداده در شهرک صنعتی عباس‌آباد مورد بررسی قرار گرفت که با استفاده از فیلترهای اعمال‌شده، ۱۵ رویداد پایه‌ای مطابق با جدول ۳ استخراج گردید که شامل: صنایع کارتن‌سازی، یونولیت، فوم، شیرآلات، ماژول، صنایع غذایی، رنگ‌سازی، مبلمان، پلاستیک، نساجی، پلیمر و چسب، قطعات فلزی، تولید سم، ماشین‌سازی و تولید مواد شیمیایی کرومات بود. شایان ذکر است که از این میان، شش رویداد احتمالی و نه رویداد فازی بودند. رویدادهای فازی شامل: صنایع تولید نایلون، کارتن‌سازی، صنایع غذایی، یونولیت، صنایع فلزی و غیره بودند که با استفاده از نظرات خبرگان و روابط مربوطه به اعداد احتمالاتی تبدیل شدند. شکل ۳ تمامی مراحل تبدیل اعداد فازی به اعداد احتمالاتی برای صنایع فلزی را نشان می‌دهد.

رویدادهای احتمالاتی مطابق با روابط ۱ و ۲ و ترکیب دروازه‌های منطقی بر مبنای روابط ۳ و ۴ تعیین شدند. پس از تعیین نرخ احتمال رویدادهای ریشه‌ای، نرخ رویداد اصلی (بالایی) *TE* از طریق رابطه ۱۰ محاسبه گردید و درخت خطا رسم گشت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از نظر خبرگان و مدل

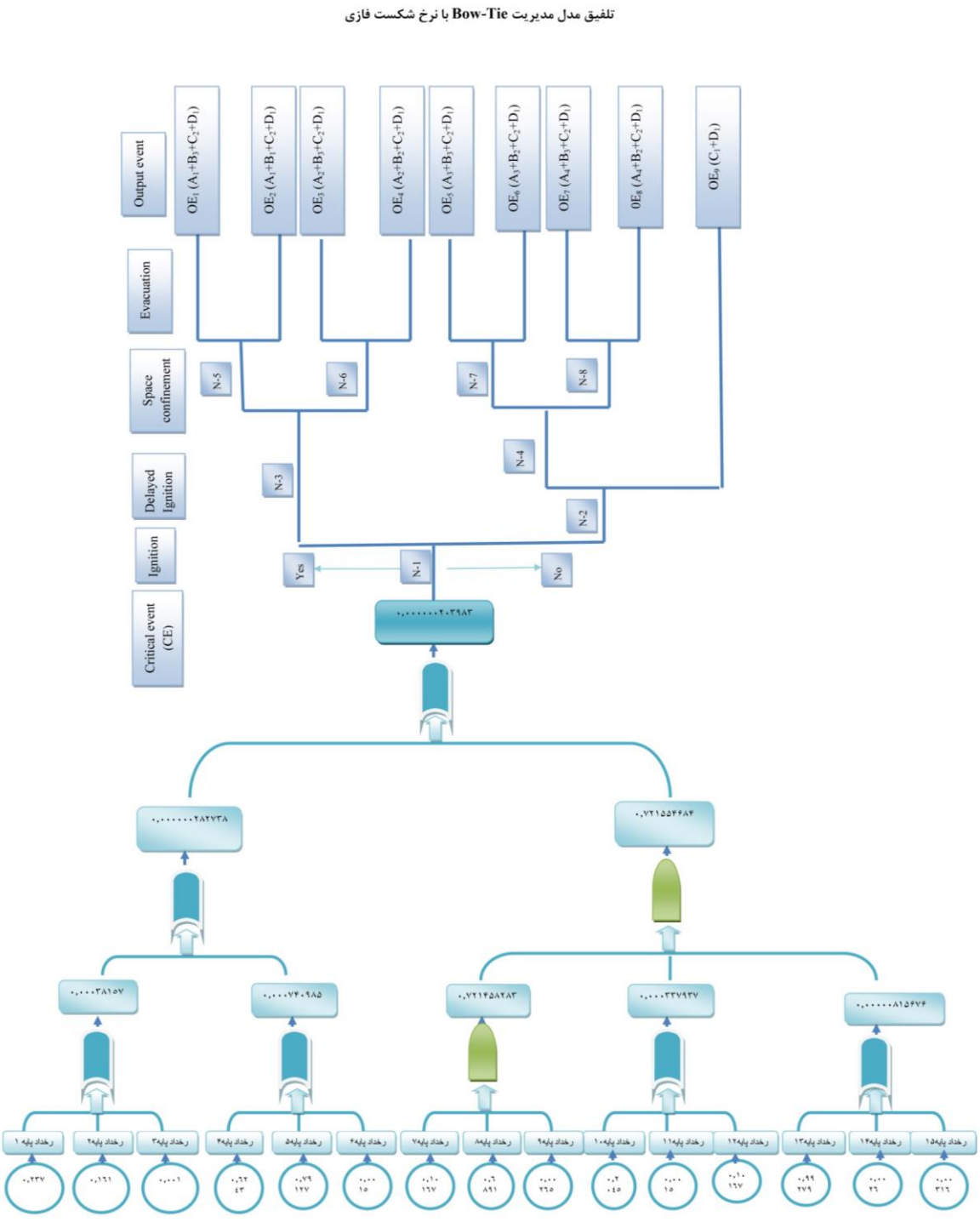
جدول ۳: لیست مهم‌ترین صنایع پرخطر شهرک

ردیف	نام واحد	نوع فعالیت	احتمال نرخ شکست رویداد محاسبه‌شده از نظر خبرگان و نرخ شکست جزء
۱	کارتن‌سازی	سلولزی	۰/۰۰۴۴۴۱۰۴
۲	قطعات فلزی	فلزی	۰/۰۰۴۰۹۸۳۸
۳	رنگ‌سازی	شیمیایی	۰/۰۰۳۱۴۶۲
۴	کاغذسازی	سلولزی	۰/۰۰۳۱۴۰۶۵
۵	نایلون	شیمیایی	۰/۰۰۳۰۹۸۲
۶	ماشین‌سازی	فلزی	۰/۰۰۲۹۴۱۵۸
۷	غذایی	غذایی	۰/۰۰۰۶۳۷۷۸
۸	تولید سم	شیمیایی	۰/۰۰۲۸۵۱۴۶
۹	یونولیت	شیمیایی	۰/۰۰۲۶۳۷۶۹
۱۰	فوم	شیمیایی	۰/۰۰۲۱۹۱۹
۱۱	پلیمر و چسب	شیمیایی	۰/۰۰۱۹۴۰۲۲
۱۲	ماژول	شیمیایی	۰/۰۰۲۹۳۷۴۸
۱۳	کرمات	سلولزی	۰/۰۰۱۶۲۵
۱۴	مبلمان	سلولزی	۰/۰۰۱۵
۱۵	شیرآلات	فلزی	۰/۰۰۱۲۳۰۹۲



شکل ۳: مراحل دیفازی‌کردن صنایع فلزی

مورد نظر، ریسک‌ها امتیازبندی شدند که بیشترین امتیاز را صنایع تولید فوم و رنگ به خود اختصـاص دادند. در این مطالعه دیاگرام *Bow-tie* با اسـتفاده از داده‌ها و اطلاعات مربوط به درخت خطا و درخـت رویـداد رسـم گردیـد که در سـمت چپ آن عوامل به‌وجودآورنده رویداد اصلی همراه با شاخه‌ها و دروازه‌های منطقی و نتایج خروجی نرم‌افزار کریستال بال قرار گرفت و لایه‌های حفاظتی همراه با شـکست یا موفقیت این لایه‌ها درسمت راست آن ترسیم گردید. دیاگرام *Bow-tie* در نمودار ۱ نشان داده شده است.



نمودار ۱: تلفیق مدل مدیریت *Bow-Tie* با نرخ شکست فازی

بحث

با توجه به نتایج *HAZOP* در بین ۳۰ صنعت مختلف مورد مطالعه، ۱۵ صنعت با استفاده از نرم‌افزارهای مورد اشاره و روابط مربوطه به‌عنوان صنایع پرخطر به لحاظ آتش‌سوزی انتخاب شدند و به‌عنوان رویداد پایه در درخت خطا رسم گردیدند. لازم به ذکر است در مواردی که نرخ شکست مشخص نبود، از نظر خبرگان استفاده گردید. با استفاده از تجربه به‌دست‌آمده از مدل رخداد

شکست فازی، با به‌کاربردن توزیع‌ها، نتایج بسیار بهتری از روش *Monte Carlo* جهت طبقه‌بندی بحران‌های ریسک‌ها به‌دست آمد. در ادامه، نحوه توزیع آماری شکست رخدادها توسط خبرگان و بانک اطلاعاتی بررسی و آنالیز گردید و بهترین نوع توزیع از میان توزیع‌های یکنواخت، لگاریتمی، مثلثی و نرمال که تأثیر به‌سزایی در نتیجه نهایی ریسک‌های بحرانی دارد، انتخاب گردید. برای بررسی عواملی که باعث آتش‌سوزی می‌شوند از قبیل اتصال الکتریکی، نشت مواد آتش‌زا مانند گاز، افزایش فشار راکتورها به‌دلیل واکنش‌های شیمیایی که به هم وابسته هستند، همه آن‌ها را در دروازه اجتماع (*OR*) قرار گرفت؛ زیرا هرکدام از این اتفاقات منجر به شکست سیستم ایمنی ایجادشده که همان فیلترهای مورد نظر در نظریه *Bow-tie* هستند، می‌شوند. از سوی دیگر، عوامل فیزیکی دیگری مانند نشت گاز و نبود سنسور فشار در راکتورهای شیمیایی و یا کنترل‌نشدن آن‌ها توسط کارشناسان و غیره را در دروازه اشتراک یا *AND* قرار دادیم. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل درخت خطا و فازی مشخص شد که دو صنعت تولید فوم و رنگ جزء صنایع پرخطری هستند که احتمال رخداد حریق در آن‌ها بسیار بالا است. در این مرحله، دیاگرام *Bow-tie* در سمت راست رسم می‌گردد و با توجه به نظرات کارشناسان و مدیران در راستای به‌حداقل‌رساندن اثر حادثه قابل پیش‌بینی فعالیت‌ها و امکانات در نظر گرفته می‌شود. پس از ترسیم درخت خطا، مشخص‌شدن رویداد اصلی مورد نظر و دلایل به‌وجودآورنده و محاسبه احتمالات آن بخش، درخت رویداد آن ترسیم گردید. در این بررسی با استفاده از روش مدیریت *Bow-tie*، رخدادهای احتمالی توسط روش‌های امکان پیشگیری در چهار مرحله با درنظرگرفتن چهار لایه حفاظتی به‌عنوان سیستم‌های ایمنی شامل: آتش‌سوزی، ایجاد تأخیر در آتش‌سوزی، محاصره محل آتش‌سوزی و تخلیه بررسی شدند تا اثرات رویدادها کاهش پیدا کند. در این ارتباط، دستورالعمل‌های اجرایی در جهت کاهش آن‌ها صادر شده است؛ به‌عنوان مثال در صنعت تولید فوم با توجه به استفاده از مواد شیمیایی و آتش‌زا مانند متیلن کلراید، *TDI* (*Toluene Diisocyanate*) (تولوئن دی‌ایزوسیانات) و *HDI* (*Heexamethylene diisocyanate*) (هگزامتیلن دی‌ایزوسیانات) و نیز در تولید رنگ مواد شیمیایی مانند تولوئن، زایلن و استون، احتمال آتش‌سوزی بالایی وجود دارد. در این راستا، دستورالعمل‌های مربوطه نظیر استفاده از سیستم ارتینگ، سیستم اطفا و اعلان حریق، دستورالعمل نحوه نگهداری و استفاده از مواد شیمیایی، آموزش کارکنان و غیره ارائه گردید.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با توجه به عدم دستورالعمل‌های لازم، فرم‌های استانداردی تهیه شد و برای استفاده در شهرک‌های دیگر ارسال گردید. در ادامه، ویژگی‌های متخصصان امر جهت ارزیابی ریسک‌ها مشخص شدند و در نهایت روش‌های قابل کنترل و برنامه‌ریزی‌هایی به‌منظور کاهش خسارت و مدیریت بحران به صاحبان صنعت ارائه گشت. تاکنون مدیران صنایع با به‌کاربردن این روش توانسته‌اند پیشاپیش از احتمال خطرات آگاهی یافته و جهت پیشگیری از خطرات جدی، اقدامات لازم را انجام دهند که این امر در نهایت منجر به کاهش صدمات جانی و حفظ منابع مالی شهرک‌های صنعتی و صنایع شده است. در این مطالعه مشاهده گردید صنایعی که دارای مواد با نقطه اشتعال پایین هستند، در معرض خطر آتش‌سوزی بالایی قرار دارند که لازم است دقت بیشتری جهت کنترل آن‌ها صورت گیرد. با استفاده از نتایج این مطالعه و ارائه دستورالعمل‌ها و آموزش‌های لازم، مدیران صنایع توانسته‌اند پیشاپیش از احتمال خطرات آگاهی یافته و اقدامات لازم جهت پیشگیری از خطرات جدی را انجام دهند. شایان ذکر است که داده‌های آماری، کاهش چشمگیری را در تعداد حوادث اتفاق‌افتاده در شهرک صنعتی عباس‌آباد نشان دادند.

تشکر و قدردانی

در پایان از کارکنان محترم واحدهای فنی و محیط زیست شهرک صنعتی عباس‌آباد به سبب همکاری‌های مفیدی که با نویسندگان این مقاله داشتند نهایت تقدیر و تشکر را داریم.

REFERENCES

1. *Iran Small Industries and Industrial Parks Organization (ISIPO). Available at: URL: www.Isipo.ir; 2019.*
2. *Duijm NJ. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. Reliabil Eng Syst Saf. 2009;**94**(2):332-41. DOI: 10.1016/j.ress.2008.03.031*
3. *Clemen RT, Winkler RL. Combining probability distributions from experts in risk analysis. Risk Anal. 1999;**19**(2):187-203. DOI: 10.1023/A:1006917509560*
4. *Zadeh LA. Fuzzy sets. Inform Control. 1965;**8**(3):338-53. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X*
5. *Zimmermann HJ. Fuzzy set theory and its applications. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publisher; 1991. P. 36-43.*
6. *Vose D. Risk analysis: a quantitative guide. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2000.*
7. *Renjith VR, Madhu G, Nayagam VL, Bhasi AB. Two-dimensional fuzzy fault tree analy-sis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. J Hazard Mater. 2010;**183**(1):103-10. PMID: 20674168 DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.116*
8. *Onisawa T. An application of fuzzy concepts to modelling of reliability analysis. Fuzzy Sets Syst. 1990;**37**(3):267-86. DOI: 10.1016/0165-0114(90)90026-3*
9. *Onisawa T. Subjective analysis of system reliability and its analyzer. Fuzzy Sets Syst. 1996;**83**(2):249-69. DOI: 10.1016/0165-0114(95)00381-9*
10. *Zhao R, Govind R. Defuzzification of fuzzy intervals. Fuzzy Sets Syst. 991;**43**(1):45-55. DOI: 10.1016/0165-0114(91)90020-Q*
11. *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. PMID: 13310704*
12. *Miri Lavasani MR, Wang J, Yang Z, Finlay J. Application of fuzzy fault tree analysis on oil and gas offshore pipelines. Int J Marine Sci Eng. 2011;**1**(1):29-42.*

13. *Vesely DL, Straub KD, Nolan CM, Rolfe RD, Finegold SM, Monson TP. Purified clostridium difficile cytotoxin stimulates guanylate cyclase activity and inhibits adenylate cyclase activity. Infect Immun. 1981;**33**(1):285-91. PMID: 6114928*
14. *Ishikawa A, Amagasa M, Shiga T, Tomizawa G, Tatsuta R, Mieno H. The max-min Delphi method and fuzzy Delphi method via fuzzy integration. Fuzzy Sets Syst. 1993; **55**(3):241-53. DOI: 10.1016/0165-0114(93)90251-C*
15. *Chen SJ, Hwang CL, Hwang FP. Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications. 1st ed. New York: Springer; 1992.*
16. *Zhang X, Liue P. Method for aggregating triangular fuzzy intuitionist fuzzy information and its application to decision making. Technol Econ Dev Econ. 2010;**16**(2):280-90.*
17. *Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. Fuzzy Sets Syst. 1988; **27**(2):87-103. DOI: 10.1016/0165-0114(88)90140-6*
18. *Hauge S, Onshus T. Reliability data for safety instrumented systems-PDS data handbook. 1st ed. New York: SINTEF Technology and Society; 2010.*