

Dynamic Process Accident Analysis: Comparison of Bow tie and Bayesian Network Models

Zarei E¹, Mohammadfam I^{2*}, Azadeh A³, Mirzaei-Aliabadi M²

1. Department of Occupational Health and Safety Engineering, Social Determinants of Health Research Center, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.

2. Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

3. School of Industrial and Systems Engineering, Center of Excellence for Intelligent-Based Experimental Mechanics, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

* **Corresponding Author:** Mohammadfam@umsha.ac.ir

Abstract

Background and Objectives: Accidents of the industrial processes have caused irreparable economic, social, environmental and even political losses in the country. To prevent such accidents, identifying, evaluating and analyzing the causes of these incidents with new approaches are required for designing preventive strategies is a necessity. Therefore, the objective of the present study was directed toward the identifying and dynamic analyzing of the root causes of the process accidents. The Bowtie (BT) model and Bayesian Network (BN) were implemented for analyzing the accidents.

Materials and Methods: First, the accidents' scenarios were modelled quantitatively and quantitatively using the BT model, and then, the cause-consequence model of the accident scenarios was modelled in the BN using the proposed algorithm. Capabilities of the BN including, deductive, abductive reasoning and updated probability was used for dynamic analysis of the accident scenarios.

Results: The results showed that deductive reasoning for estimating the occurrence probabilities of a scenario and its consequences is more accurate by BN than BT. BN model is capable of doing probability updating of root events using the precursor accident data through abductive reasoning, taking into account conditional dependency among root events, safety barriers and modelling of common cause's failures. However, BT model does not have such capabilities.

Conclusion: In the present study, a novel, dynamic and quantitative model was introduced that allows the continuous identification and monitoring of the safety risks in the process industries. Implementing the proposed model in the process industries can significantly reduce the risk of the industrial accidents and improve the level of safety.

Keywords: Dynamic, Accident, Analysis; Process Industry, Modeling; Bayesian network; Bow tie; Process.

How to cite this article:

Zarei E, Mohammadfam I, Azadeh A, Mirzaei-Aliabadi M. Dynamic Process Accident Analysis: Comparison of Bow tie and Bayesian Network Models. *J Saf Promot Inj Prev.* 2017; 5(4):201-12 .

تحلیل پویا حوادث صنایع فرآیندی: مقایسه مدل پاپیونی و شبکه بیزین

اسماعیل زارعی^۱، ایرج محمدفام^{۲*}، محمد علی آزاده^۳، مصطفی میرزایی^۲

۱. گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.
 ۲. قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.
 ۳. گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

سابقه و هدف: حوادث صنایع فرآیندی سالیانه خسارات جبران‌ناپذیری از ابعاد انسانی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حتی سیاسی بر کشور تحمیل می‌کند. برای پیشگیری از بروز این‌گونه حادثه شناسایی، ارزیابی و تحلیل علل به وجود آورنده آن‌ها با رویکردهای نوین جهت طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه یک ضرورت محسوب می‌شود. این مطالعه باهدف تحلیل پویا حوادث فرآیندی با مقایسه مدل سنتی پاپیونی و روش نوین شبکه بیزین طراحی و اجرا گردید.

روش بررسی: سناریو حوادث موردنظر ابتدا با مدل پاپیونی به‌طور کیفی و کمی مورد مدل‌سازی قرار گرفت و سپس با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده، مدل علت - پیامد سناریو حادثه در شبکه بیزین مدل‌سازی شد. از توانایی‌های شبکه بیزین: استدلال قیاسی، استدلال استقرایی و به‌روزرسانی احتمال جهت تحلیل پویا سناریو حادثه استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج استدلال استقرایی جهت تخمین احتمال وقوع سناریو و پیامدهای نهایی آن در شبکه بیزین نسبت به مدل پاپیونی دقیق‌تر است. شبکه بیزین قادر به انجام استدلال قیاسی جهت به‌روزرسانی احتمال وقوع رویدادهای ریشه‌ای از طریق بهره‌گیری از داده‌های پیش‌درآمد حوادث، در نظر گرفتن وابستگی شرطی بین رویدادهای ریشه‌ای، بین موانع ایمنی و مدل‌سازی نقص‌های شرطی با علل مشترک بود، درحالی‌که مدل پاپیونی قادر به انجام آن‌ها نبود.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه برای اولین بار روشی جهت ساخت مدلی پویا و کمی معرفی شد که این امکان را فراهم می‌سازد که خطرات ایمنی این‌گونه صنایع به‌طور مداوم و پویا شناسایی، ارزیابی و پایش گردد. پیاده‌سازی این مدل در صنایع فرآیندی می‌تواند ریسک بروز حوادث صنعتی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بکاهد و سطح ایمنی را ارتقاء دهد.

واژگان کلیدی: تحلیل پویا حوادث، مدل‌سازی حوادث فرآیندی، شبکه بیزین، مدل پاپیونی، صنایع فرآیندی.

مقدمه

بسیار فاجعه‌آمیز و متفاوت‌تر از سایر صنایع باشد (۱). از آن جمله می‌توان به حوادث متعدد مانند: (۱) انفجار مخازن یک شرکت تولید کنند حلال‌های صنعتی و مواد شیمیایی شازند اراک (سال ۱۳۸۷، ۳۵ نفر کشته و ۵۴ نفر مصدوم)، (۲) انفجار خط لوله انتقال گاز سرخس (سال ۱۳۸۹، ۱۹ نفر کشته و مجروح)، (۳) انفجار پتروشیمی بندر امام ماهشهر (سال ۱۳۹۱، مرگ ۸ نفر و مصدومیت ۲ نفر)، (۴) وقوع ۱۲ حادثه در بازه زمانی ۱۵۶ روزه در صنایع پتروشیمی (هر ۱۳ روز یک حادثه) (سال ۱۳۹۵، مرگ ۳ نفر و مصدومیت ۱۲ نفر)، (۵) آتش‌سوزی مهیب مخزن پتروشیمی بوعلی سینا (حداقل خسارت مستقیم ۶۰ میلیون یور) (۶) انفجار خط لوله انتقال گاز منطقه شهران

حوادث فرآیندی شامل حوادثی است که اغلب در صنایع فرآیندی یعنی صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و برخی واحدهای تولیدی که در آن‌ها مواد شیمیایی قابل اشتعال و سمی مورد استفاده قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد که در یک دهه اخیر در کشور ما بخصوص در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی روند صعودی قابل توجهی داشته است. حوادث این صنایع به خاطر شرایط حاد فرآیندی، مقدار زیاد مواد قابل اشتعال و انفجار، تراکم بالای تجهیزات و افراد از منظر خسارت‌های جانی، مالی، زیست‌محیطی و آسیب به شهرت و آوازه شرکت‌ها می‌تواند

عمده (۱) وجود ساختار و ماهیت کاملاً استاتیک (۲) وجود عدم قطعیت و ناتوانی در کاهش آن که امروزه در ایمنی صنایع فرآیندی بسیار حائز اهمیت است رنج می‌برد. این دو نقص تأثیر قابل توجهی در عدم کارآمدی استراتژی‌های طراحی شده بر اساس نتایج مطالعات استاتیک و دارای عدم قطعیت ریسک می‌باشد (۱۲،۹،۱۳).

جهت رفع این دو مشکل اصلی فوق‌الذکر در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی شده صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به کارگیری روش‌های نوین و پویا از جمله تئوری فازی، شبکه‌های بیزین، تئوری شواهد، مدل‌های مونت کارلو^۴ و مارکو اشاره کرد (۱۴). در این بین شبکه‌های بیزین به دلیل برخورداری از ویژگی‌های منحصر به فرد ارزشمند در مطالعات ریسک/تحلیل حوادث به خصوص در کاهش عدم قطعیت و به روزرسانی احتمال وقوع رویدادها و پیامدهای نهایی ناشی از سناریو حوادث و همچنین داشتن ماهیت ذاتاً پویا، نسبت به سایر روش‌های فوق برتری ذاتی داشته و مورد اقبال گسترده متخصصین در ایمنی فرآیندی قرار گرفته است (۸،۱۵). در سال‌های اخیر در مطالعات مختلف از شبکه‌های بیزین جهت تحلیل ریسک (۱۶،۱۷)، ارزیابی ایمنی (۱۲،۱۵) و تحلیل خطای انسانی (۱۸) صنایع فرآیندی استفاده شده است ولی به ندرت از این روش در تحلیل حوادث و مقایسه آن نسبت به روش‌های سنتی پرکاربرد که همچنان کاربرد خود را دارند، پرداخته شده است.

امروزه به خاطر ماهیت پویا متغیرهای تأثیرگذار بر ریسک حوادث فرآیندی و حساسیت بالای ایمنی در صنایع فرآیندی، توانایی روش به کاررفته شد در تحلیل ریسک حوادث از منظر در نظر گرفتن تعاملات وابسته و شرطی بین این متغیرها، انجام استدلال قیاسی و توانایی در به روزرسانی ریسک پیامدهای ناشی از حوادث و احتمال وقوع علل ریشه‌ای دخیل در وقوع آن‌ها در طراحی استراتژی‌های کارآمد پیشگیرانه ارزش زیادی پیدا کرده است. لذا در همین راستا مطالعه حاضر به عنوان نخستین پژوهش در کشور باهدف به کارگیری یک رویکرد سنتی یعنی مدل پاپیونی و یک رویکرد نوین پویا یعنی شبکه‌های بیزین که دارای بیشترین کاربرد در تحلیل حوادث فرآیندی می‌باشند، جهت تحلیل دو حادثه فرآیندی با تمرکز بر مقایسه توانمندی‌های این روش‌ها در موضوعات مهم تحلیل پویا حوادث فرآیندی مانند: (۱) استدلال استقرایی، (۲) استدلال قیاسی و (۳) به کارگیری متغیرهای چندحالتی و مدل‌سازی شکست‌های وابسته شرطی، طراحی و انجام شد.

مواد و روش‌ها

مدل پاپیونی یکی از بهترین روش‌های گرافیکی برای نمایش کامل سناریو حوادث فرآیندی می‌باشد، به طوری که این روش با نمایش

تهران (سال ۱۳۹۵، مرگ ۲ نفر و آسیب قابل توجه به ساختمان‌های مسکونی اطراف)، (۷) آتش‌سوزی ایستگاه تقلیل فشار گاز در منطقه کوریجان همدان (نشت گاز در حین تست عملیات تعویض فیلتر) (مرگ ۲ نفر) و آتش‌سوزی چاه (دکل) شماره ۹۵ میدان نفتی رگ سفید (زمان آتش‌سوزی ۵۸ روز، مرگ ۲ نفر، سوختن روزانه ۸۰۰۰ تا ۹۰۰۰ بشکه نفت که این مقدار نفت با نرخ ۶۲ دلاری قیمت هر بشکه نفت اوپک، حداقل حدود ۲۹ میلیون دلار قیمت دارد) در سال ۱۳۹۶، تنها اندک آمار مربوط به حوادث فرآیندی کشورمان است. آمار دیگری حاکی از وقوع ۶۱ حادثه در صنعت نفت ایران از اواسط ۱۳۹۲ تا پایان ۱۳۹۵ که رقم قابل توجهی می‌باشد (۲،۳).

این حوادث اغلب منجر به پیامدهای فاجعه‌بار و خسارت‌های غیرقابل جبران مالی، جانی و زیست‌محیطی می‌گردد. تجزیه و تحلیل علمی و به موقع این حوادث با رویکردهای نوین می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی در اختیار تیم ارزیاب، تصمیم‌گیران و مدیران قرار دهد تا مبنای طراحی استراتژی‌های کارآمد ایمنی جهت پیشگیری و کاهش ریسک این حوادث قرار گیرد (۴). مدل‌ها و روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی حوادث توسط محققین مختلف ارائه شده است که هر کدام از آن‌ها با توجه به دامنه کاربردشان دارای نقاط قوت و ضعف خاصی هستند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های ۳E (آموزش، مهندسی، اعمال قوانین ایمنی و بهداشتی) و ۴M (انسان، ماشین‌آلات، مدیریت و مواد)، TMEPM (وظایف، مواد و وسایل، محیط کار، عوامل فردی و مدیریتی) و دومینو هاینریش و پنیر سوئیسی اشاره داشت. همچنین تکنیک‌های تحلیل حوادث متعددی نیز توسط محققین و سازمان‌های مختلف ارائه شده است که برخی از آن‌ها شامل: پتری نت^۱، شبکه‌های بیزین^۲، مدل پاپیونی^۳، نظام طبقه‌بندی و واکاوی فاکتور انسانی^۴، درخت ریسک و نظارت مدیریت^۵، Tripod Beta و AcciMap می‌باشند (۳). در بین روش‌های سنتی، مدل پاپیونی یک روش گرافیکی قوی است که قادر است سناریو حادثه را به طور کامل به صورت کیفی و کمی مدل‌سازی نماید و اطلاعات ارزشمندی در اختیار تیم ارزیاب قرار دهد. این روش در مطالعات متعدد در زمینه‌های مختلف ایمنی و ریسک از جمله، تحلیل ایمنی فرآیندی و ارزیابی ریسک حادثه (۵-۷)، مدیریت ریسک (۸-۱۰)، اجرای موانع ایمنی (۱۱) به کار گرفته شده است. تأثیر این روش در ارتقای ایمنی فرآیندی و برتری آن نسبت به اغلب روش‌های سنتی به خوبی طی سال‌های گذشته اثبات شده است (۸،۹)، اما مانند سایر روش‌های سنتی از دو مشکل

۱. Petri net
۲. Bayesian networks
۳. Bow tie
۴. The Human Factors Analysis and Classification System
۵. Management Oversight and Risk Tree

داد هر کدام پیامدهای درخت رویداد با حاصل ضرب احتمال رویداد اصلی و تمام مقادیر احتمال شاخه (احتمال شکست یا موفقیت موانع ایمنی) منتهی به پیامد مورد نظر طبق رابطه ۳ محاسبه می‌گردد. به عنوان مثال نحوه محاسبه احتمال وقوع پیامد (C6) شکل ۱ طبق رابطه ۳ می‌باشد (۹).

$$P(C_8) = P(TE) \times P(SB_1) \times P(SB_2) \times P(SB_3) \quad (3)$$

$P(TE)$ نشان‌دهنده احتمال وقوع رویداد اصلی، $P(SB_1)$ ، $P(SB_2)$ و $P(SB_3)$ نشان‌دهنده احتمال شکست هر کدام از سه مانع ایمنی است.

شبکه های بیزین

شبکه‌های بیزین یک روش گرافیکی است که در مطالعات تحلیل ریسک و ایمنی بر پایه دانش احتمال و عدم قطعیت امروزه کاربرد زیادی پیدا کرده است.

شبکه بیزین یک گراف جهت‌دار غیرمدور است که هر نود (گره) نشان‌دهنده یک متغیر و کمان‌ها^{۱۵} روابط علی مستقیم بین نودهای به هم متصل شده را نشان می‌دهند و جداول احتمالی شرطی^{۱۶} به نودهای که وابستگی شرطی دارند، اختصاص داده می‌شود. بر اساس استقلال شرطی منتج شده از مفهوم d-separation و قاعده زنجیره‌ای^{۱۷}، شبکه بیزین توزیع احتمال مشترک $P(X)$ از متغیرهای $X = \{U_1, \dots, U_n\}$ را طبق رابطه ۴ نشان می‌دهد (۱۹،۲۰).

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(U_i | P_a(U_i)) \quad (4)$$

$P_a(U_i)$ نشان‌دهنده احتمال والد متغیر U_i می‌باشد. بر این اساس احتمال متغیر U_i به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌گردد.

$$P(U_i) = \sum_{X \setminus U_i} P(X) P(U_i) = \sum_{X \setminus U_i} P(X) \quad (5)$$

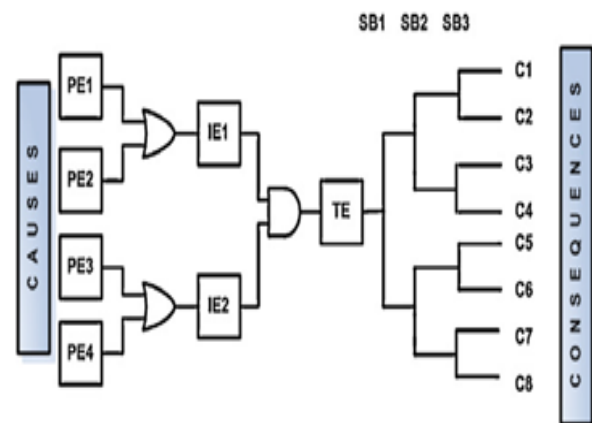
یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه بیزین نسبت به سایر روش‌ها، توانایی بهره‌گیری از تئوری بیز برای به‌روزرسانی احتمال وقوع رویدادهای اولیه به محض دریافت شواهد جدید مانند آمار وقوع حوادث، شبه حوادث، داده‌های فرآیندی لحظه‌ای، برای محاسبه مقادیر احتمالات به‌روز شده می‌باشد (رابطه ۶) (۱۹،۲۰).

۱۵. Arcs

۱۶. Conditional probability tables (CPTs)

۱۷. Chain rule

علل وقوع سناریو یک حادثه (رویداد اصلی) از سمت چپ که در وسط به یک رویداد اصلی ختم می‌شوند شروع می‌شود و در سمت راست، پیامدهای نهایی ناشی از وقوع رویداد اصلی به دنبال عمل کردن موانع ایمنی یا شکست آن‌ها در پیشگیری از رویداد اصلی را نشان می‌دهد. در واقع در سمت چپ مدل مدل پاپیونی، درخت خطا و در سمت راست آن‌ها درخت رویداد و در وسط آن رویداد اصلی قرار دارد. شکل ۱ یک مدل مدل پاپیونی ساده را نشان می‌دهد که از اجرای مختلفی از جمله، رویدادهای اولیه^۷، رویدادهای میانی^۸، رویداد اصلی^۹، موانع ایمنی



شکل ۱. یک مدل ساده از مدل پاپیونی (۹)

برای تعیین احتمال رویدادهای اولیه درخت خطا روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از نظرات خبرگان و بانک‌های اطلاعاتی حوادث گذشته مانند OREDA، OGP، DNV دو روش پرکاربرد می‌باشد. برای محاسبه احتمال رخداد رویداد اصلی سه روش وجود دارد: (۱) مجموعه حداقل برش‌ها^{۱۲}، (۲) دروازه به دروازه^{۱۳}، (۳) شبیه‌سازی مونت کارلو^{۱۴}. در روش دروازه به دروازه برای محاسبه احتمال رویداد میانی بسته به نوع دروازه از روابط ۱ و ۲ استفاده می‌گردد:

(۱)

$$P(A) = P(B) \times P(C) \quad (\text{for AND gate})$$

(۲)

$$P(A) = P(B) + P(C) - P(B) \times P(C) \quad (\text{for OR gate})$$

بعد از تعیین رویدادهای اولیه درخت خطا، با بهره‌گیری از هر کدام از روش‌های فوق، احتمال رویداد اصلی تعیین می‌گردد. احتمال رخ

۷. Primary Events (PEi)

۸. Intermediate events (IEi)

۹. Top event (TE)

۱۰. Safety barriers (SBi)

۱۱. Accident consequences (Ci)

۱۲. Minimum cut sets

۱۳. Gate-by-gate method

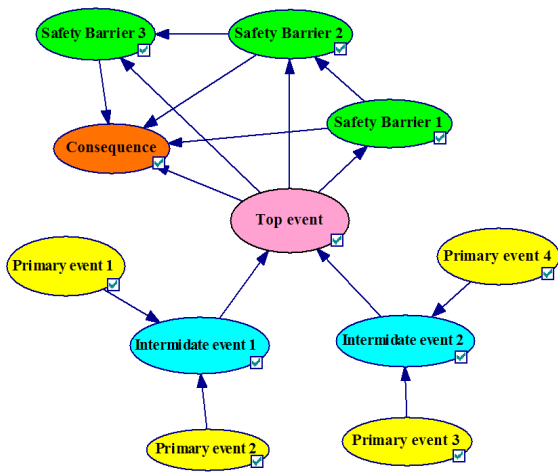
۱۴. Monte Carlo simulation

دروازه و به این مفهوم است که وقوع (بالفعل) شدن تمام رویدادهای شناسایی شده جهت وقوع رویداد میانی لازم است و در دروازه یا وقوع تنها یکی از رویدادهای ریشه‌ای شناسایی شده جهت وقوع رویداد میانی کافی می‌باشد. درنهایت با محاسبه احتمال وقوع رویدادهای میانی منجر به رویداد اصلی، احتمال وقوع رویداد اصلی طبق روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید. اما در شبکه بیزین نحوه احتمال رویداد میانی اندکی متفاوت است. در این مدل از جداول توزیع احتمالات شرطی استفاده می‌شود. در این حالت احتمال گره میانی برحسب وابستگی شرطی که با گره‌های ریشه‌ای وابسته به آن دارد طبق روابط ۴ و ۵ تعیین می‌شود و در آخر احتمال گره مرکزی نیز به همین صورت تعیین می‌گردد.

به‌عنوان مثال احتمال A به شرط D طبق رابطه ۷ قابل محاسبه می‌باشد.

$$P(A|D) = \frac{P(A)P(D|A)}{P(D)} \quad (7)$$

بعد از ساخت مدل کیفی و کمی علت - پیامد سناریو موردنظر، با استفاده از قابلیت‌های شبکه بیزین می‌توان نتایج مختلفی که در تحلیل حوادث صنایع فرآیندی اهمیت قابل توجهی دارند، از جمله: شناسایی بحرانی‌ترین رویدادهای ریشه‌ای، بحرانی‌ترین مجموع برش‌های حداقل^{۲۲}، به‌روزرسانی احتمالی^{۲۳}، آنالیز حساسیت^{۲۴}، تأثیر شکست موانع ایمنی بر احتمال وقوع پیامدهای نهایی و سایر ویژگی‌های منحصربه‌فرد این شبکه‌ها را برحسب اهداف مطالعه استفاده کرد.



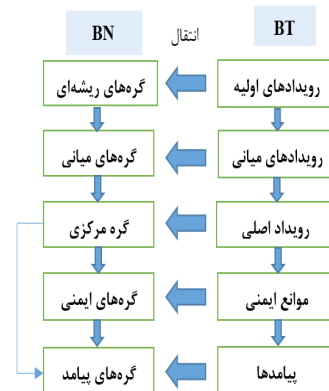
شکل ۳. مدل شبکه بیزین معادل مدل پایبونی نشان داده شده در شکل ۱

$$P((X|E) = \frac{P(X,E)}{P(E)} = \frac{P(X,E)}{\sum_X P(X,E)} \quad (6)$$

X نشان‌دهنده متغیر موردنظر و E شواهد دریافتی می‌باشد.

الگوریتم انتقال مدل پایبونی به شبکه بیزین

بعد از اینکه مدل علت - پیامد سناریو حادثه مورد مطالعه با مدل پایبونی ساخته شد، جهت برطرف کردن نواقص آن، بایستی این مدل به داخل شبکه بیزین انتقال داده شود، یعنی این مدل دوباره با قواعد و اصول این شبکه‌ها که در مطالب قبلی ذکر شد، در داخل آن ساخته شود. الگوریتم انتقال (نقشه‌برداری)^{۱۸} از مدل پایبونی به شبکه بیزین در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طوری که قابل مشاهده است، رویدادهای اولیه، میانی، اصلی، موانع ایمنی و پیامدها در مدل پایبونی به ترتیب به‌عنوان گره‌های ریشه‌ای، میانی، اصلی، ایمنی و پیامدها در مدل شبکه بیزین در نظر گرفته می‌شود. با این الگوریتم مدل کیفی علت-پیامد سناریو مورد مطالعه در شبکه بیزین ساخته می‌شود (۳، ۹).



شکل ۲. الگوریتم انتقال مدل پایبونی به شبکه بیزین

بعد از این نوبت به کمی سازی مدل می‌رسد، برای این منظور، ابتدا مقادیر احتمال رویدادهای اولیه به دست آمد در مدل پایبونی به‌عنوان مقادیر احتمال حاشیه‌ای^{۱۹} رویدادهای ریشه‌ای متناظر در نظر گرفته می‌شود که این مرحله در هر دو روش کاملاً مشابه و از نظر کمیت نیز مقادیر احتمال رویدادهای متناظر کاملاً برابر می‌باشند. برای محاسبه احتمال رویدادهای میانی در مدل پایبونی برحسب نوع دروازه‌ای که رویدادهای اولیه منجر به وقوع رویداد میانی را تشکیل می‌دهد از روابط ریاضی (به‌عنوان مثال روابط ۱ و ۲) مربوطه استفاده می‌شود. در این مطالعه از دروازه‌های " و " و " یا " استفاده شد.

۱۸. Mapping algorithm

۱۹. Marginal probability

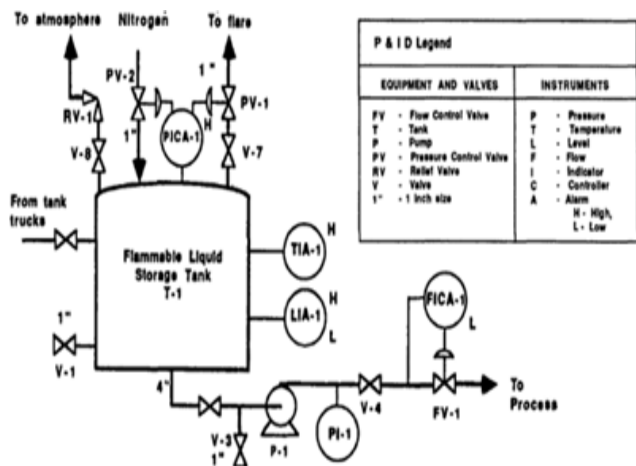
۲۰. And

۲۱. Or

۲۲. Critical minimal cut sets

۲۳. Probability updating

۲۴. Sensitivity analysis



شکل ۴. سیستم ذخیره مایعات قابل اشتعال (P&ID)

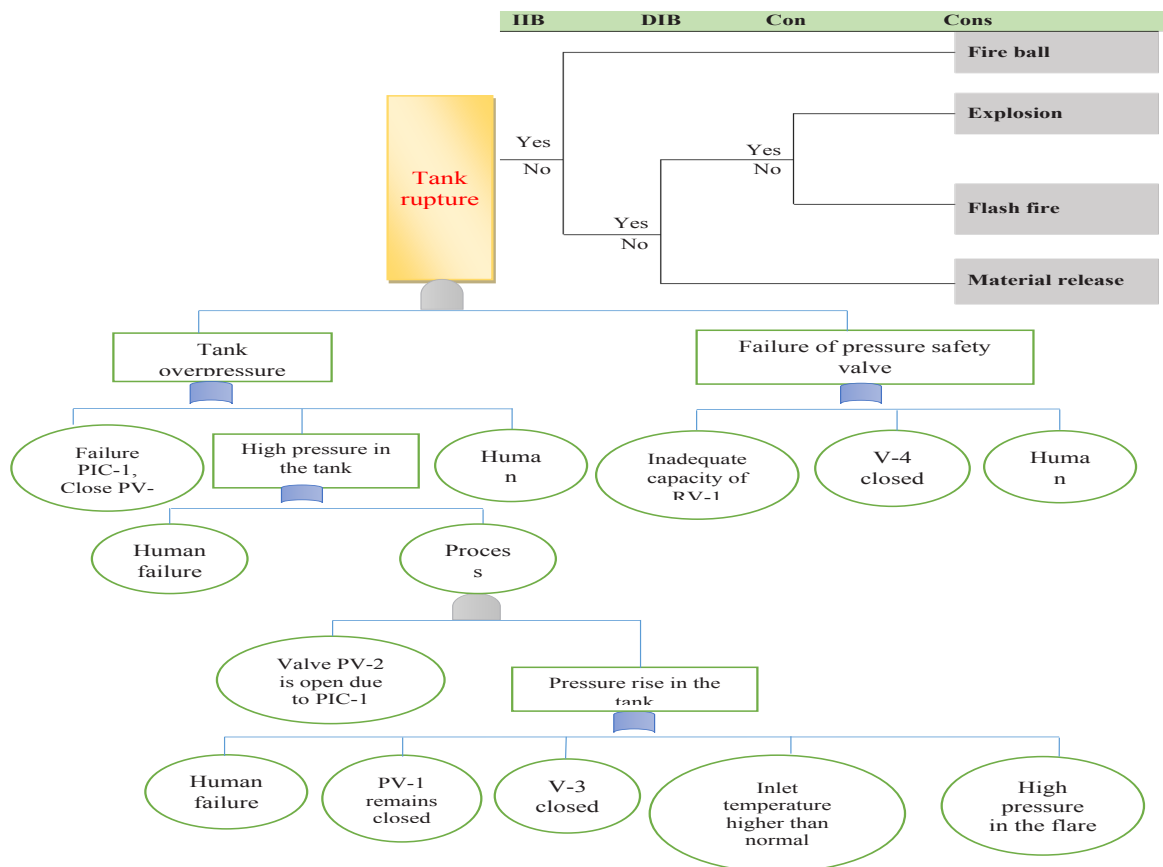
مطالعه نمونه:

یک سیستم ذخیره مایعات قابل اشتعال در شکل ۴ نشان داده شده است. این سیستم برای حفظ مایعات قابل اشتعال با استفاده از فشار مثبت نیتروژن طراحی شده است. فشار داخل مخزن به وسیله PICA-1، از طریق ارسال سیگنال به اتاق کنترل به محض افزایش فشار بیشتر از حد طراحی، کنترل می‌گردد. بنابراین یک شیر تخلیه (RV²⁵-1) در شرایط اضطراری به اتمسفر جهت تخلیه باز می‌شود. خوراک مایع مخزن از طریق ایستگاه کامیون‌های تانکر دار فراهم می‌شود. پمپ (P-1) در زمان لازم مایع را برای استفاده در خط تولید پمپاژ می‌کند. این سیستم ذخیره‌سازی در طیف گسترده‌ای از صنایع از جمله پتروشیمی، پالایشگاه‌های نفت، گاز، صنایع غذایی، دارویی کاربرد زیادی دارد. علاوه بر این، سناریو حادثه مربوط به یک ایستگاه تقلیل فشار گاز CGS نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

یافته‌ها

کشته و ۳ نفر مجروح) در یک پالایشگاه گاز، به‌طور کامل و یک فرآیند وقوع حادثه از ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز CGS جهت درک بهتر موارد مقایسه‌ای، مورد تحلیل و مدل‌سازی قرار گرفت.

در این مطالعه برای مقایسه دو روش مدل پایپونی و شبکه بیزین در تحلیل حوادث فرآیندی یک حادثه سیستم ذخیره مایعات قابل اشتعال که پارگی مخزن به دلیل افزایش فشار بیش از حد بود (۱ نفر



شکل ۵. مدل‌سازی سناریو حادثه پارگی مخزن سیستم ذخیره مایعات به دلیل افزایش فشار بیش از حد با مدل پایپونی

بعدی، کمی سازی مدل ساخته شده می باشد. جدول ۱ احتمال وقوع رویدادهای میانی و نهایتاً رویداد سناریو حادثه اصلی را نشان می دهد. سناریو حادثه اصلی که پارگی مخزن می باشد در اثر عملکرد صحیح یا شکست موانع ایمنی (جرقه آبی، جرقه تأخیری و محصور بودن محیط) منجر به چهار پیامد نهایی می گردد. مرحله

شکل ۵ یک مدل سازی کامل از ۱۱ رویداد ریشه ای منجر به وقوع رویدادهای میانی و نهایتاً رویداد سناریو حادثه اصلی را نشان می دهد. سناریو حادثه اصلی که پارگی مخزن می باشد در اثر عملکرد صحیح یا شکست موانع ایمنی (جرقه آبی، جرقه تأخیری و محصور بودن محیط) منجر به چهار پیامد نهایی می گردد. مرحله

جدول ۱. احتمال رویدادها، موانع ایمنی و پیامدهای نهایی با رویکردهای مدل پاپیونی و شبکه بیزین

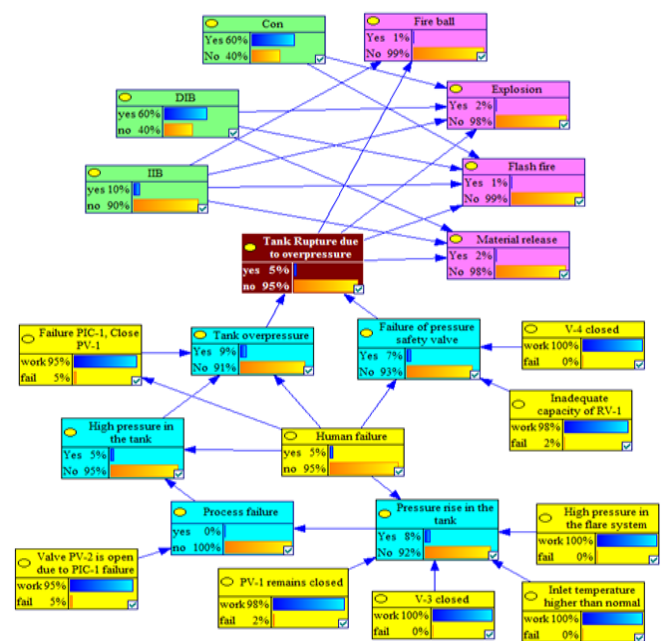
پسین (BN)	پیشین (BN)	پیشین (BT)	توصیف	نماد
رویداد اصلی				
۱	$5/10 \times 10^{-2}$	$1/11 \times 10^{-2}$	FLSS Rupture due to overpressure	TE
رویدادهای میانی				
$9/80 \times 10^{-1}$	$7/79 \times 10^{-2}$	$7/95 \times 10^{-2}$	Pressure rise in the tank	IE ₁
$4/61 \times 10^{-2}$	$3/62 \times 10^{-2}$	$3/70 \times 10^{-2}$	Process failure	IE ₂
$9/80 \times 10^{-1}$	$5/13 \times 10^{-2}$	$5/37 \times 10^{-2}$	High pressure in the tank	IE ₃
۱	$9/44 \times 10^{-2}$	$1/49 \times 10^{-1}$	Tank overpressure	IE ₄
۱	$7/30 \times 10^{-2}$	$7/43 \times 10^{-2}$	Failure of pressure safety valve	IE ₅
رویدادهای ریشه ای				
$2/04 \times 10^{-2}$	$2/00 \times 10^{-2}$	$2/00 \times 10^{-2}$	High pressure in the flare system	X ₁
$1/02 \times 10^{-2}$	$1/00 \times 10^{-2}$	$1/00 \times 10^{-2}$	Inlet temperature higher than normal	X ₂
$3/06 \times 10^{-2}$	$3/00 \times 10^{-2}$	$3/00 \times 10^{-2}$	V-3 closed	X ₃
$2/40 \times 10^{-2}$	$2/35 \times 10^{-2}$	$2/35 \times 10^{-2}$	PV-1 remains closed	X ₄
$9/79 \times 10^{-1}$	$5/00 \times 10^{-2}$	$5/00 \times 10^{-2}$	Human failure	X ₅
$4/71 \times 10^{-2}$	$4/65 \times 10^{-2}$	$4/65 \times 10^{-2}$	Valve PV-2 is open due to PIC-1 failure	X ₆
$5/54 \times 10^{-2}$	$3/00 \times 10^{-2}$	$3/00 \times 10^{-2}$	V-4 closed	X ₇
$3/94 \times 10^{-2}$	$2/13 \times 10^{-2}$	$2/13 \times 10^{-2}$	Inadequate capacity of RV-1	X ₈
$6/49 \times 10^{-2}$	$4/54 \times 10^{-2}$	$4/54 \times 10^{-2}$	Failure PIC-1, Close PV-1	X ₉
موانع ایمنی				
$1/00 \times 10^{-1}$	$1/00 \times 10^{-1}$	$1/00 \times 10^{-1}$	Immediate ignition barrier	IIB
$6/00 \times 10^{-1}$	$6/00 \times 10^{-1}$	$6/00 \times 10^{-1}$	Delay ignition barrier	DIB
$6/00 \times 10^{-1}$	$6/00 \times 10^{-1}$	$6/00 \times 10^{-1}$	Confinement	Con
پیامدهای نهایی				
$1/00 \times 10^{-1}$	$5/11 \times 10^{-2}$	$1/11 \times 10^{-2}$	Fire ball	C1
$3/24 \times 10^{-1}$	$1/65 \times 10^{-2}$	$3/60 \times 10^{-2}$	Explosion	C2
$1/44 \times 10^{-1}$	$7/35 \times 10^{-2}$	$2/40 \times 10^{-2}$	Flash fire	C3
$3/60 \times 10^{-1}$	$1/84 \times 10^{-2}$	$4/00 \times 10^{-2}$	Safe or Toxic release	C4

شرطی^{۲۸} بین رویدادهای از نوع نقص با علل مشترک^{۲۹} (مانند خطای انسانی) در مدل شبکه بیزین است که مدل پایبونی توانایی این کار را ندارد. متعاقباً این امر سبب افزایش مقدار احتمال پیامدهای نهایی در شبکه بیزین نسبت به مقدار به دست آمده با مدل پایبونی می شود. رهایش مواد و انفجار به ترتیب محتمل ترین پیامد نهایی ناشی وقوع سناریو در هر دو روش می باشد (جدول ۱).

ب) استدلال قیاسی^{۳۰}

یکی از ویژگی های منحصر به فرد و قابل توجه مدل شبکه بیزین توانایی آن در استدلال قیاسی است که این امر اهمیت زیادی در تحلیل پویا ریسک صنایع فرآیندی دارد. این امتیاز باعث می شود که ساختار شبکه پویا باشد و امکان به روز رسانی احتمال رخداد رویدادهای ریشه ای را با دریافت داده های پیش درآمدهای حوادث^{۳۱} (مانند شبه حوادث، رویدادهای نامطلوب، شکست های تجهیزات، فرآیندی و انسانی) صنعت مورد مطالعه فراهم گردد. در صورتی که به مرور زمان از تازه ترین داده های پیش درآمدهای حوادث صنعت مورد مطالعه استفاده شود، این امر سبب می شود داده های مدل ساخته شده (داده های به روز شده یا پسین) به واقعیت نزدیک تر گردد و یک مدل بومی پویا تحلیل ریسک ساخته شود. این امر به منزله کاهش عدم قطعیت در مدل و نتایج به دست آمده نسبت به زمانی که از بانک داده های حوادث (داده های پیشین) غیر بومی استفاده می گردد، می باشد. لذا به روز رسانی احتمال و کاهش عدم قطعیت دو ویژگی منحصر به فرد ذاتی شبکه بیزین می باشد که امروز در تحلیل پویا ریسک واحدهای فرآیندی اهمیت زیادی پیدا کرده است که مدل پایبونی قادر به انجام آن نمی باشد (۱۰، ۱۲). در این مطالعه، به عنوان مثال، احتمال به روز شده (پسین) هر رویداد پایه X_i با فرض بر احتمال رخداد رویداد پایه X_j به شرط وقوع انفجار (شکل ۷). شکل ۷ نتایج به روز رسانی مدل ساخته شده را بر اساس گزارش وقوع انفجار نشان می دهد.

امکان نگارش زبان فارسی Genie دلیل اینکه در محیط نرم افزار وجود ندارد، نوشته های شکل ۵ به زبان انگلیسی می باشد، از طرفی هم به دلیل لزوم یکسان بودن متغیرهای شکل ۵ و جدول ۱ با شکل در جدول ۱، ۶، متغیرهای این ها نیز به زبان انگلیسی نوشته شد. رویدادهای پایه IE_i ، رویدادهای میانی با TE_i رویداد اصلی با نماد X_i ، موانع ایمنی با نمادهای اختصاصی و پیامدهای X_i (ریشه ای) با نشان داده شده است. جدول ۱ احتمال پیشین موارد C_i نهایی با فوق را با دو رویکرد مدل پایبونی و شبکه بیزین و احتمال به روز شبکه بیزین به عنوان یکی از شده^{۳۲} (پسین) با استفاده از مدل در این مطالعه، توانایی های منحصر به فرد این مدل، نشان می دهد. (۲۱-۲۳) احتمال رویدادهای اولیه، موانع ایمنی و خطای انسانی از استخراج گردید.



شکل ۶. مدل سازی پویا سناریو حادثه پارگی مخزن سیستم ذخیره مایعات به دلیل افزایش فشار بیش از حد با مدل شبکه بیزین

الف) استدلال استقرایی^{۳۲}

یکی از ویژگی های مشترک دو مدل پایبونی و شبکه بیزین استدلال استقرایی است که نتایج آن در ستون سوم و چهارم (از سمت چپ) جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج استدلال استقرایی مدل پایبونی نشان داد که احتمال رخداد رویداد اصلی برابر $10^{-2} \times 1/11$ است اما نتایج مدل شبکه بیزین احتمال رخداد آن را $10^{-2} \times 5/10$ نشان داد که این مقدار بزرگتر از مقدار به دست آمد در مدل پایبونی (است. $10^{-2} \times 1/11$) است. مقدار به دست آمده با شبکه بیزین تقریباً $4/59$ برابر مدل پایبونی است، دلیل این اختلاف در نظر گرفتن وابستگی

۲۸. Conditional dependency

۲۹. Common cause failure

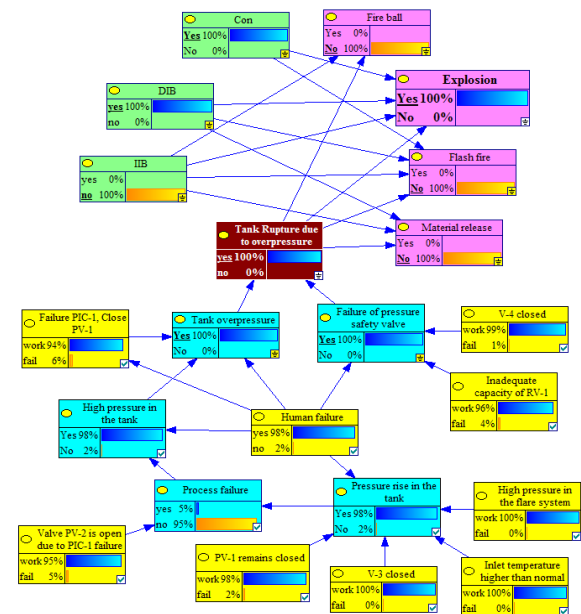
۳۰. Abductive reasoning

۳۱. Accident precursors

۲۶. Updated probability

۲۷. Deductive reasoning

شکست^{۳۸} یا موانع ایمنی به صورت بله و خیر در نظر گرفته شده است. درحالی که در شرایط واقعی رخداد حادثه در صنعت ممکن است شرایط کاملاً متفاوت باشد. شکل ۸ بخشی از یک مدل ساخته شده در شبکه بیزین (بخش درخت رویداد: رویداد اصلی، موانع ایمنی و پیامدهای نهایی) یک حادثه در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز را نشان می‌دهد. همان طوری که قابل مشاهده است در این شکل وضعیت چهارحالتی وجود جرعه تأخیری^{۳۹} در یک سناریو حادثه مورد بررسی نشان داده شده است که در شبکه بیزین به راحتی قابل مدل سازی می‌باشد. محصور بودن منطقه‌ای که گاز در آن پخش شده است یک فاکتور بسیار مهم در تعیین نوع پیامد نهایی یعنی انفجار ابر بخار یا آتش ناگهانی (شکل ۸) و همچنین به عنوان یکی از مؤثرترین فاکتور در افزایش قدرت موج انفجار است. در مدل پاپیونی (به عنوان مثال شکل ۵) این فاکتور به صورت محصور (بلی) و عدم محصور (خیر) (فضای باز) در نظر گرفته می‌شود، درحالی که در واقعیت این طور نیست و ممکن است محصور بودن و وجود موانع و تراکم تجهیزات فرآیندی و ساختمان‌ها در مسیر و منطقه رهائش مواد به صورت کاملاً محصور، خیلی محصور، محصور، متوسط، باز و کاملاً باز باشد. شکل ۸ شرایط چندحالتی محصور بودن فضای که گاز در آن رهائش یافته است در یک شبکه بیزین نشان می‌دهد.

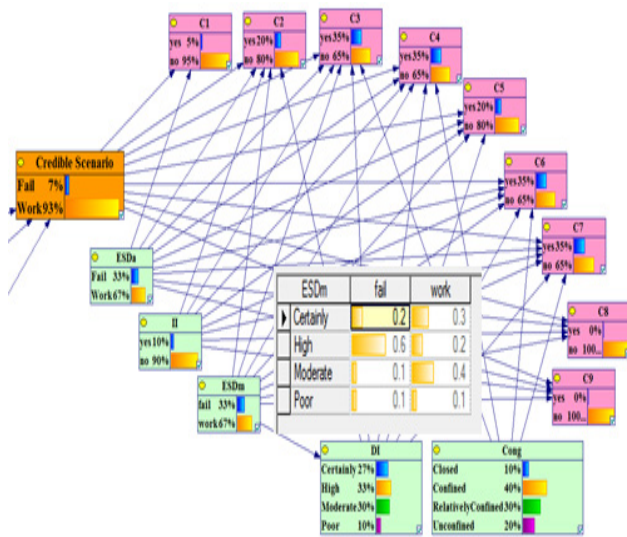


شکل ۷. مدل به روز شده سناریو حادثه پارگی مخزن در اثر افزایش فشار با در نظر گرفتن وقوع انفجار

با به روزرسانی احتمال رخداد رویدادهای ریشه‌ای و پیامدهای نهایی، امکان انتخاب بحرانی‌ترین (تأثیرگذارترین) رویدادهای پایه که بیشترین سهم در وقوع سناریو حادثه دارند وجود خواهد داشت. مقادیر احتمال به روز شده وقوع رویدادهای ریشه‌ای سناریو حادثه مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است، همان طوری که قابل مشاهده است، شکست انسانی^{۳۲} (۹/۷۹×۱۰^{-۱}) دارای بیشترین افزایش در زمان به روزرسانی احتمال وقوع رویداد اصلی (مقادیر پیشین احتمال وقوع رویداد در شکل ۶ و جدول ۱ نمایش داده شده است) داشته است، لذا به عنوان بحرانی‌ترین (بیشترین سهم) رویداد ریشه‌ای در وقوع سناریو مورد مطالعه می‌باشد. بعداً این متغیر، نقص کنترل کنند نشانگر فشار ۱ و بسته شدن شیر فشار ۱^{۳۳} و سپس نقص در شیر فشار ۲ به علت نقص کنترل کنند نشانگر فشار ۱^{۳۴} بیشترین سهم در وقوع سناریو حادثه مورد مطالعه را دارند (شکل ۷).

ج) متغیرهای چندحالتی و شکست‌های وابسته^{۳۵}

تمام متغیرهای مورد بررسی اعم از رویدادهای ریشه‌ای، رویدادهای میانی، رویداد اصلی و موانع ایمنی در مدل پاپیونی به صورت دوحالتی^{۳۶} می‌باشند، به عبارتی دیگر امکان در نظر گرفتن متغیرهای چندحالتی در این مدل وجود ندارد. به عنوان مثال در مدل نشان داده شده در شکل ۵ تمام رویدادهای ریشه‌ای به دو حالت کارکرد صحیح^{۳۷} و



شکل ۸. متغیرهای چندحالتی و شکست‌های وابسته شرطی در شبکه بیزین

در سناریو حادثه مورد بررسی زمان رسیدن ابر بخار مواد رهائش یافته به یک منبع جرعه تأخیری بستگی به مدت زمان بسته شدن شیر توقف اضطراری دستی (ESD_m) دارد که این امر نشان دهنده وابستگی شرطی جرعه تأخیری به عملکرد شیر توقف اضطراری (فلش کماندار و جدول احتمالات شرطی) است (شکل ۸). در برخی مواد

۳۸. Fail

۳۹. Delay ignition (DI)

۳۲. Human failure

۳۳. Failure PIC-1, Close PV-1

۳۴. Valve PV-2 is open due to PIC-1 failure

۳۵. Multi-state variables and dependent failures

۳۶. Binary state

۳۷. Work

منجر به وقوع سناریو حوادث، رویدادهای ریشه‌ای وجود دارند که رابطه بین آن‌ها از نوع وابستگی شرطی^{۴۲} می‌باشد. به‌عنوان مثال در مدل پویا ساخته‌شده در شکل ۶ (مدل‌سازی پویا سناریو پارگی سیستم ذخیره مایعات قابل اشتعال) بین رویداد ریشه‌ای، شکست کنترل‌کننده نشانگر فشار^{۴۳} و بسته ماندن شیر تخلیه فشار (۱-PV) و شکست (خطای) انسانی در اتاق کنترل وابستگی شرطی وجود دارد که این موضوع با یک کمان جهت‌دار از شکست انسانی به سمت کنترل‌کننده نشانگر فشار کشیده شده است. یعنی ممکن است فشار سیستم ذخیره بالاتر از حد طراحی قرار بگیرد و این آلام که از طریق کنترل‌کننده نشانگر فشار به اتاق کنترل ارسال گردد، اما توسط اپراتور اتاق کنترل مورد توجه قرار نگیرد (یا اشتباه تنظیم گردد) و یا از حالت خودکار خارج شود، لذا در این حالت شیر تخلیه به سمت فلر (مشعل) جهت کاهش فشار سیستم بازخواهد شد. در این صورت همان‌طوری که در شکل ۶ مشخص است (دروازه و) در صورت شکست شیر اطمینان (ایمنی) فشار^{۴۴}، افزایش فشار سیستم، منجر به پارگی کامل مخزن ذخیره مایعات قابل اشتعال خواهد شد. خطای انسانی به‌عنوان یک رویداد پایه‌ای مشترک همزمان/ غیر همزمان می‌تواند سبب افزایش فشار مخزن، فشار بیش‌ازحد مخزن و شکست شیر اطمینان (ایمنی) فشار شود که این امر یک وابستگی شرطی با علت‌های ریشه‌ای مشترک است و در مدل‌سازی با مدل پایبونی امکان‌پذیر نمی‌باشد. این موضوع در سایر مطالعات نیز مورد تأیید قرار گرفته است (۱۲، ۱۳).

(۳) نوع دیگر وابستگی شرطی در تحلیل متغیرهای سناریو حوادث، وابستگی شرطی بین موانع ایمنی می‌باشد. به‌عنوان مثال در مدل علت-پیامد سناریو حادثه نشان داده‌شده در شکل ۸ با رویکرد شبکه بیزین، بین وجود جرعه تأخیری با عملکرد صحیح یا شکست شیر توقف کنند دستی (ESD_m) رهایش مواد، وابستگی شرطی وجود دارد. به‌عبارت‌دیگر، زمان رسیدن گاز تخلیه‌شده در اثر وقوع سناریو نشستی به منابع جرعه تأخیر بستگی به زمان بسته شدن (عملکرد صحیح) شیر توقف کنند دستی دارد. در حالت‌های معمول عملیات، برای اینکه به‌صورت دستی از سناریو رهایش گاز طبیعی جلوگیری شود، باید گزارشات مردمی یا شاهدین سناریو، توسط شرکت گاز دریافت شود و بعد از حضور تکنسین مربوطه شرکت، با بسته شدن شیر توقف کنند دستی، رهایش مواد متوقف می‌شود. همچنین ممکن است بین عملکرد موانع ایمنی و رویداد اصلی نیز وابستگی شرطی وجود داشته باشد. به‌عنوان مثال در همین سناریو حادثه می‌تواند تصور کرد که عملکرد صحیح (زمان فعال شدن) شیر توقف کننده اضطراری اتوماتیک بستگی به میزان نشستی

ممکن است بین رویدادهای ریشه‌ای منجر به وقوع رویدادهای میانی نیز وابستگی شرطی وجود داشته باشد، به عبارتی وابستگی شرطی بین رویدادهای ریشه‌ای X_6 و X_9 در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد که در نظر گرفتن وابستگی شرطی بین موانع ایمنی، رویدادهای ریشه‌ای و میانی و گاهی بین پیامدهای نهایی و رویداد اصلی در مدل پایبونی امکان‌پذیر نمی‌باشد، درحالی‌که در شبکه بیزین به‌راحتی می‌توان وابستگی شرطی بین متغیرها را به‌صورت کیفی و کمی مدل‌سازی کرد.

بحث

در بین روش‌های تحلیل سناریو حوادث، مدل پایبونی به‌خوبی به‌عنوان یک روش کارآمد و قابل اعتبار به‌خصوص به خاطر توانایی آن در ترکیب هر دو علل و پیامد یک حادثه را در یک مدل گرافیکی ثابت‌شده است (۸، ۹). با این وجود تحقیقات جدید نشان می‌دهد که این مدل از محدودیت‌ها و نواقص بسیار تأثیرگذار در تحلیل پویا ایمنی رنج می‌برد. این نواقص تأثیر زیادی بر نتایج تحلیل پویا ریسک در صنایع فرآیندی دارد. مهم‌ترین محدودیت‌ها و نواقص مدل پایبونی در تحلیل پویا حوادث شامل موارد زیر می‌باشد:

(۱) داشتن ساختار و ماهیت ذاتاً استاتیک: این امر مانع از امکان استفاده از داده‌های پیش‌درآمد حوادث^{۴۰} صنعت مورد مطالعه (مانند آمار شبه حوادث، رویدادهای نامطلوب، خطاهای انسانی، رفتارهای ناپایمن) به‌منظور به‌روزرسانی احتمالات استفاده‌شده در مدل علت - پیامد سناریو مورد مطالعه می‌گردد. همچنین ریسک سناریو حادثه مورد مطالعه، پیامدهای نهایی، احتمال شکست موانع ایمنی نیز قابلیت به‌روزرسانی نخواهد داشت. به‌عبارتی‌دیگر، داشتن ساختار استاتیک یعنی عدم امکان استدلال قیاسی که شبکه بیزین (به‌عنوان مثال شکل ۷) به‌راحتی قادر به انجام آن می‌باشد. این امر در شناسایی بحرانی‌ترین رویدادهای ریشه‌ای منجر به وقوع حادثه و طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه و کنترلی نقش قابل توجهی می‌تواند داشته باشد (شکل ۷) (۱۲)، به‌روزرسانی مدل ساخته‌شده در شبکه بیزین (شکل ۷) نشان داد که در بین رویدادهای ریشه‌ای شناسایی‌شده شکست انسانی بیشترین تأثیر در وقوع سناریو حادثه مورد مطالعه را دارد که این یافته در راستای نقش داشتن بیش از ۷۰ تا ۹۰ درصد شکست‌های (خطای) انسانی در وقوع حوادث صنایع مختلف می‌باشد (۲۴).

(۲) وابستگی شرطی بین رویدادهای ریشه‌ای و رویدادهای با علل شکست مشترک وابسته شرطی^{۴۱}: در اغلب تحلیل‌های علل

۴۲. Conditional dependency

۴۳. Failure PIC-۱

۴۴. Pressure safety valve (PSV)

۴۰. Accidental Precursors

۴۱. Conditional dependency in the form of common cause failure

پویا طیف گسترده‌ای از سناریوهای حوادث مورد استفاده قرار گیرند. مدل سناریو حادثه ساخته شده با این شبکه‌ها نسبت به روش‌های سنتی، شفاف‌تر، دقیق‌تر و دارای عدم قطعیت کمتر در نتایج می‌باشد. این امر سبب طراحی برنامه دقیق و واقعی‌تر پیشگیری و کنترل حوادث و متعاقباً کارآمدی بیشتر استراتژی‌های کنترلی در جلوگیری از تکرار حوادث مشابه خواهد بود. در این مطالعه برای اولین بار مدلی پویا و کمی معرفی شده است که این امکان را فراهم می‌سازد که خطرات این‌گونه صنایع به‌طور مداوم شناسایی، ارزیابی و پایش گردند. پیاده‌سازی این مدل در صنایع فرآیندی می‌تواند از ریسک بروز حوادث صنعتی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بکاهد. عدم به‌کارگیری شبکه بیزین برای مدل‌سازی حوادث زنجیره‌ای محتمل و تعیین میزان آسیب‌پذیری واحدهای فرآیندی از محدودیت‌های مطالعه حاضر است که می‌تواند در مطالعات بعدی مورد بررسی گیرد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از پرسنل محترم مدیریت بهداشت، ایمنی، محیط‌زیست مجتمع گاز پارس جنوبی به‌خصوص آقای مهندس شریعت مهر به خاطر همکاری ارزشمندشان کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید. نویسنده اول، در پایان به پاس همکاری و حمایت‌های علمی و معنوی استاد ارزشمند مرحوم جناب آقای پرفسور محمدعلی آزاده که به‌تازگی به ملکوت اعلی پیوستند این اثر علمی ناچیز را به روح پرفتوح این دانشمند کشورمان تقدیم می‌کند.

سناریو حادثه دارد. بنابراین هم از نظر مدل کیفی و هم نتایج کمی، عدم در نظر نگرفتن این وابستگی بین متغیرها در مدل پایبونی تأثیر قابل‌توجهی در نتایج به‌دست‌آمده و نهایت تخمین ریسک سناریو و پیامدهای نهایی آن خواهد داشت (۱۵). مطالعه خاکزاد و همکاران نیز نشان داده است که در نظر گرفتن نقص‌های با علل مشترک در دقت نتایج مطالعات پویا ایمنی صنایع فرآیندی تأثیر زیادی خواهد داشت (۱۳).

(۴) عدم قطعیت^{۴۵} و به‌کارگیری داده‌های حوادث نادر^{۴۶}: ساختار ذاتاً استاتیک این مدل، سبب عدم توانایی آن در استفاده از داده‌های حوادثی که اطلاعات مربوط به نرخ شکست رویدادهای پایه‌ای آن‌ها و موانع ایمنی کمیاب است که در این حالت حتی از داده‌های پیش‌درآمد حوادث صنعت مورد مطالعه نیز نمی‌توان در به‌روزرسانی مدل ساخته شده استفاده کرد، لذا مجبور به استفاده از داده‌های صنایع سایر کشورها می‌باشیم. به‌عبارتی دیگر، عدم توانایی در استفاده از داده‌های پیش‌درآمد حوادث صنعت مورد مطالعه و عدم توانایی به‌روزرسانی از طریق این داده‌ها، یعنی عدم امکان ساخت یک مدل علت - پیامد سناریو حادثه بر اساس داده‌های واقعی محل مورد مطالعه می‌باشد که این همان عدم توانایی در کاهش عدم قطعیت داده‌های اولیه بکار گرفته شده در مدل علت - پیامد سناریو ساخته شده توسط مدل پایبونی می‌باشد (۱۲، ۱۰).

(۵) استدلال استقرایی: این نوع استدلال برای پیشگویی و تخمین احتمال وقوع سناریو حادثه و پیامدهای نهایی آن است. هرچند مدل پایبونی مانند شبکه بیزین قادر به انجام این نوع استدلال است ولی به علت معایب فوق‌الذکر که این مدل دارد ممکن است منجر به تخمین نادرست احتمال وقوع سناریو حادثه و متعاقباً احتمال پیامدهای نهایی شود. نتایج این استدلال در جدول ۱ (ستون چهارم، مدل پایبونی و ستون پنجم شبکه بیزین) نشان داده شده است. نتایج استدلال استقرایی جهت تخمین احتمال وقوع سناریو و پیامدهای نهایی آن در شبکه بیزین نسبت به مدل پایبونی دقیق‌تر است. دلیل این امر به خاطر نواقص فوق‌الذکر مدل پایبونی بخصوص عدم توانایی در نظر گرفتن وابستگی شرطی بین متغیرها، وابستگی بین شکست‌های با علل مشترک (رویدادهای میانی با رویداد ریشه‌ای مشترک)، نوع دروازه بین رویدادها (در شبکه بیزین از جدول احتمالات شرطی بجای این دروازه‌ها استفاده می‌شود) می‌باشد. این امر در سایر مطالعات نیز مورد تأیید قرار گرفته است (۱۲، ۱۹، ۸).

شبکه‌های بیزین قادرند علاوه بر برطرف کردن نواقص موجود در روش‌های سنتی تحلیل حوادث، به خاطر بهره‌گیری از تئوری بیز و داشتن ساختار کاملاً انعطاف‌پذیر و سازگار برای مدل‌سازی و تحلیل

۴۵. Uncertainty handling

۴۶. Rare accidents

References

1. Khan FI, Abbasi SA. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *J Loss Prev Process Ind.* 1998;11(4):261–77[[Scopus](#)].
2. Jahangiri M, Nourozi M sarebanzadeh k. Risk Management, Part 2. Tehran: Fanavaran Press; 2013.
3. Zarei E. Dynamic quantitative risk modeling using fuzzy logic and Bayesian network on process industries. Ph.D Thesis, Hamadan University of Medical Sciences; 2017.
4. Jafari MJ, Zarei E, Dormohammadi A. Presentation of a method for consequence modeling and quantitative risk assessment of fire and explosion in process industry (Case study: Hydrogen Production Process). *J Heal Saf Work.* 2013;3(1):55–68.
5. Gowland R. The accidental risk assessment methodology for industries (ARAMIS)/layer of protection analysis (LOPA) methodology: A step forward towards convergent practices in risk assessment? *J Hazard Mater.* 2006;130(3):307–10[[Pub Med](#)].
6. Delvosalle C, Fievez C, Pipart A, Debray B. ARAMIS project: a comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *J Hazard Mater.* 2006;130(3):200–19[[Pub Med](#)].
7. De Dianous V, Fiévez C. ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. *J Hazard Mater.* 2006;130(3):220–33[[Pub Med](#)].
8. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliab Eng Syst Saf.* 2012;104:36–44.
9. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Saf Environ Prot.* 2–1)91;2013):46–53[[Scopus](#)].
10. Zarei E, Azadeh A, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic Safety Risk Modeling of Process Systems Using Bayesian Network. *Process Saf Prog.* 2017;36(4):399–407[[Scopus](#)].
11. Badreddine A, Ben Amor N, editors. A dynamic barriers implementation in Bayesian-based bow tie diagrams for risk analysis. 2010 ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA; 2010[[Scopus](#)].
12. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Mirzaei Aliabadi M, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *J Hazard Mater.* 2017;321:830–40[[Pub Med](#)].
13. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach. *Saf Sci.* 2013;57:108–17[[Scopus](#)].
14. Ferdous R, Khan F, Sadiq R, Amyotte P, Veitch B. Fault and event tree analyses for process systems risk analysis: uncertainty handling formulations. *Risk Anal.* 2011;31(1):86–107[[Pub Med](#)].
15. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliab Eng Syst Saf.* 2011;96(8):925–32[[Scopus](#)].
16. Kalantarnia M, Khan F, Hawboldt K. Dynamic risk assessment using failure assessment and Bayesian theory. *J Loss Prev Process Ind.* 2009;22(5):600–6[[Scopus](#)].
17. Abimbola M, Khan F, Khakzad N. Dynamic safety risk analysis of offshore drilling. *J Loss Prev Process Ind.* 85–30:74;2014 [[Scopus](#)].
18. Abbassi R, Khan F, Garaniya V, Chai S, Chin C, Hossain KA. An integrated method for

human error probability assessment during the maintenance of offshore facilities. *Process Saf Environ Prot.* 2015;94:172-9[Scopus].

19. Nielsen TD, Jensen FV. *Bayesian networks and decision graphs*. Second. New York, USA: Springer Science & Business Media; 2009.

20. Kjaerulff UB, Madsen AL. *Bayesian networks and influence diagrams*. Springer Sci Bus Media. 2008;200:114.

21. Ozog H. Hazard identification, analysis and control. *Chem. Eng. (NY);(United States)*. 1985; 92(4).

22. OREDA Offshore reliability data handbook. DNV, Trondheim, Norway. 2002.

23. Freeman RA. CCPS guidelines for chemical process quantitative risk analysis. *Process Safety Progress.* 1990; 9(4):231-5.

24. Zarei E, Mohammadfam I, Aliabadi MM, Jamshidi A, Ghasemi F. Efficiency prediction of control room operators based on human reliability analysis and dynamic decision-making style in the process industry. *Process Saf Prog.* 2016;35(2):192-9[Scopus].