



## ارزیابی پویا ریسک در سیستم‌های فرآیندی شیمیایی با شبکه بیزین

اسماعیل زارعی<sup>۱</sup>، ایرج محمدفام<sup>۲\*</sup>، علی آزاده<sup>۳</sup>، نیماخاکزاد<sup>۴</sup>، مصطفی میرزایی<sup>۵</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۳

تاریخ ویرایش: ۹۶/۱۰/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۱۱

### چکیده

**زمینه و هدف:** سیستم‌های فرآیندی بخاطر شرایط حاد عملیاتی و حجم بسیار زیاد مواد قابل اشتعال و انفجار همواره بستر حوادث فاجعه آمیز متعددی بوده‌اند. ارزیابی ریسک ابزاری سودمند جهت طراحی استراتژیهای کارآمد جهت پیشگیری و کنترل این حوادث می‌باشد. روشهای کلاسیک ارزیابی ریسک دارای نواقص عمده از جمله عدم قطعیت در نتایج و ماهیت کاملاً استاتیک می‌باشند، لذا در این مطالعه از یک رویکرد پویا و کمی جهت ارزیابی ریسک ایمنی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری استفاده شده است.

**روش بررسی:** ابتدا براساس استاندارد شرکت توتال (GS EP SAF 253) سناریو رویداد مرجع (CE) تعیین گردید، سپس مدل‌سازی کیفی و کمی پویا مدل علت - پیامد سناریو با استفاده از شبکه بیزین (BN) انجام گرفت، در ادامه از توانایی استدلال استقرایی و قیاسی این شبکه‌ها استفاده گردید. پیامدهای مختلف سناریو با استفاده از نرم افزار PHAST 7.11 مورد مدل‌سازی و ارزیابی قرار گرفت. در پایان ریسک پیامدهای سناریو محاسبه و به‌روز رسانی و ارزشیابی شد.

**یافته‌ها:** ۴۳ رویداد ریشه‌ای در وقوع سناریو رویداد مرجع ایستگاه‌های مورد مطالعه شناسایی گردید. از مجموع علل شناسایی شده به ترتیب بیشترین سهم را شکست‌های انسانی (۸۵٪)، شکست‌های فرآیندی (۱۰٪) و شکست‌های مکانیکی (۵٪) در وقوع سناریو حادثه داشتند. احتمال وقوع سناریو  $10^{-2} \times 7/11$  محاسبه گردید و موانع ایمنی بخصوص شیرهای توقف اضطراری نقش قابل توجه‌ای در کاهش شدت پیامدهای نهایی داشتند. ریسک هر سه پیامد نهایی سناریو رویداد مرجع یعنی آتش فورانی، آتش ناگهانی و انفجار ابربخار در ناحیه غیر قابل قبول قرار گرفت.

**نتیجه‌گیری:** استفاده از شبکه‌های بیزین یک مدل سازی گرافیکی کیفی و کمی جامع و پویا از فرآیند وقوع سناریو حادثه فراهم می‌آورد. قابلیت استدلال قیاسی این شبکه‌ها قادر به کاهش عدم قطعیت و به‌روز رسانی احتمال وقوع رویدادهای ریشه‌ای و پیامدهای نهایی می‌باشد. استفاده از آن به همراه مدل‌سازی پیامد، منجر به یک ارزیابی ریسک کمی پویا و دقیق‌تر و کاربردی‌تر در واحدهای فرآیندی می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** ارزیابی پویا ریسک، سیستم‌های فرآیندی، شبکه‌های بیزین، مدل‌سازی پیامد، ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری.

### مقدمه

هیدروکربنی در پالایشگاه تگزاس شرکت نفت بریتانیا (BP) در سال ۲۰۰۵ (مرگ و میر ۱۵ نفر) [۳]، نشت نفت و سپس انفجار و آتش سوزی‌های مهیب در سکوی نفتی Deepwater Horizon در سال ۲۰۱۰ (مرگ و میر ۱۱ نفر) و آتش ناگهانی گردوغبار فلز آهن و انفجار هیدروژن در شرکت Hoeganaes آمریکا در سال ۲۰۱۱ (مرگ و میر ۵ نفر) اشاره کرد. این در حالی است که خسارات مالی و زیست محیطی این حوادث رقمی بسیار بالاتر از حد تصور می‌باشد برای مثال نشت نفت در حادثه سکوی Horizon به تنهای سبب تحمیل خسارت مالی و زیست محیطی بیش از ۳۶/۹ میلیارد دلار و حادثه پالایشگاه تگزاس حدود ۱/۵

سیستم‌های فرآیندی که در صنایع و واحدهای نفت، گاز و پتروشیمی و انرژی و اغلب واحدهای تولیدی کاربرد دارند، نقش بسیار مهمی در اقتصاد و اشتغال اغلب کشورها ایفا می‌کند. این سیستم‌ها به دلیل شرایط خاص عملیاتی خود همواره بستر حوادث فاجعه‌آمیزی در طول تاریخ بوده است و امروزه بعنوان سیستم‌های پیچیده در نظر گرفت می‌شود [۱، ۲]. حتی کشورهای پیشرفته و دارای سطح ایمنی بسیار بالا نیز در یک دهه اخیر شاهد وقوع حوادث مهیب از قبل انفجار و آتش سوزی در سیستم‌های فرآیندی خود بوده‌اند که از آن جمله می‌توان به انفجار مواد

۱- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

۲- (نویسنده مسئول) قطب علمی آموزشی مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات ایمنی و بهداشت شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. Mohammadfam@umsha.ac.ir

۳- گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- گروه مدیریت علوم ایمنی و امنیت، دانشگاه صنعتی دلف، دلف، هلند.

۵- قطب علمی آموزشی مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات ایمنی و بهداشت شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

بیلیون دلار شده است [۴،۵].

سیستم‌های فرآیندی بخاطر شرایط حاد فرآیندی و پیچیدگی روزافزون در آنها از نخستین زمانهای ظهور این سیستم‌ها همواره بستر حوادث فاجعه آمیزی بوده است. این حوادث هر ساله خسارت‌های بسیار زیاد مالی، جانی و زیست محیطی به جوامع وارد می‌کند.

کشور ما نیز از این مقوله مستثنا نیست و آمار حوادث حاکی از تکرر بالای حوادث در سیستم‌های فرآیندی کشور ما است که از آن جمله می‌توان به حوادث: (۱) آتش سوزی و انفجار قطای نیشابور (سال ۱۳۸۲، ۳۰۰ نفر کشته، ۷۰۰ نفر مجروح، تخریب کامل دو روستا)، (۲) انفجار مخازن یک شرکت تولید کنند حلالهای صنعتی و مواد شیمیایی شازند اراک (سال ۱۳۸۷، ۳۵ نفر کشته و ۵۴ نفر مصدوم)، (۳) انفجار پتروشیمی بندرامام ماهشهر (سال ۱۳۹۱، مرگ ۸ نفر و مصدومیت ۲ نفر)، (۴) وقوع ۱۲ حادثه در بازه زمانی ۱۵۶ روز در صنایع پتروشیمی (هر ۱۳ روز یک حادثه) (سال ۱۳۹۵، مرگ ۳ نفر و مصدومیت ۱۲ نفر)، (۵) آتش سوزی مهیب مخزن پتروشیمی بوعلی (حداقل خسارت مستقیم ۶۰ میلیون یور) (۶) انفجار خط لوله انتقال گاز منطقه شهران تهران (سال ۱۳۹۵، مرگ ۲ نفر و آسیب قابل توجه ای به ساختمانهای مسکونی اطراف)، (۷) آتش سوزی ایستگاه تقلیل فشار گاز در نیروگاه علی آباد کتول (نشت گاز پس از سرویس کار) (مصدومیت ۹ نفر) و همچنین در منطقه کوریجان همدان (نشت گاز در حین تست عملیات تعویض فیلتر) (مرگ ۲ نفر) در سال ۱۳۹۶، اشاره داشت. آمار دیگری حاکی از وقوع ۶۱ حادثه در صنعت نفت کشورمان از اواسط ۱۳۹۲ تا پایان ۱۳۹۵ که رقم قابل توجه‌ای می‌باشد [۶،۷].

پیشگیری موفق چنین حوادث مستلزم انجام به موقع مطالعات ارزیابی و مدل‌سازی کمی ریسک است تا بتوان استراتژی‌های پیشگیرانه و کنترلی مبتنی بر ریسک طراحی و اجرا کرد [۸]. روشهای مختلفی تاکنون برای ارزیابی/تحلیل و مدل‌سازی ریسک ایمنی سیستم‌های فرآیندی ارائه شده است. هر کدام از این روشها دارای دامنه کاربرد خاص و نقاط قوت و ضعف می‌باشند. اما

اغلب این روشها از دو مشکل عمده که امروزه در ایمنی سیستم‌های فرآیندی بسیار حائز اهمیت هستند می‌باشند که شامل: (۱) وجود ساختار و ماهیت کاملاً استاتیک (۲) وجود عدم قطعیت در نتایج. این دو نقص تاثیر قابل توجه‌ای در عدم کارآمدی استراتژی‌های طراحی شده براساس نتایج مطالعات استاتیک و دارای عدم قطعیت می‌باشد [۲،۳،۹].

جهت رفع این دو مشکل اصلی فوق الذکر مطالعات ارزیابی ریسک در سالهای اخیر تلاشهای زیادی شده صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان بکارگیری علم هوش مصنوعی مانند تئوری فازی<sup>۱</sup> و شبکه‌های بیزین، تئوری شواهد، مدل‌های منت کارلو<sup>۲</sup> و مارکو را ذکر کرد. در این بین شبکه‌های بیزین به دلیل برخورداری از ویژگی‌های منحصر به فرد ارزشمند در مطالعات ریسک بخصوص در کاهش عدم قطعیت و به روز رسانی احتمال وقوع رویدادهای ریشه‌ای و پیامدهای نهایی ناشی از سناریو حوادث مختلف و همچنین داشتن ماهیت ذاتاً پویا<sup>۳</sup>، نسب به سایر روشهای فوق برتری ذاتی داشته و به همین خاطر در مطالعه حاضر این روش استفاده شد (۱۰، ۱۱). در همین راستا مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پویا ریسک (DRA<sup>۴</sup>) در یک سیستم فرآیندی (ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز<sup>۵</sup> (CGS)) با استفاده از شبکه‌های بیزین طراحی و اجرا گردید.

### روش بررسی

شکل ۱ رویکرد مورد استفاده جهت ارزیابی پویا ریسک مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

ریسک از حاصلزرب دو مولفه احتمال وقوع و پیامد وقوع تشکیل شده است لذا روش مورد استفاده در این مطالعه تمرکز بر این دو پارامتر ریسک دارد. این رویکرد در سه مرحله که شامل (۱) مدل‌سازی پویا مدل

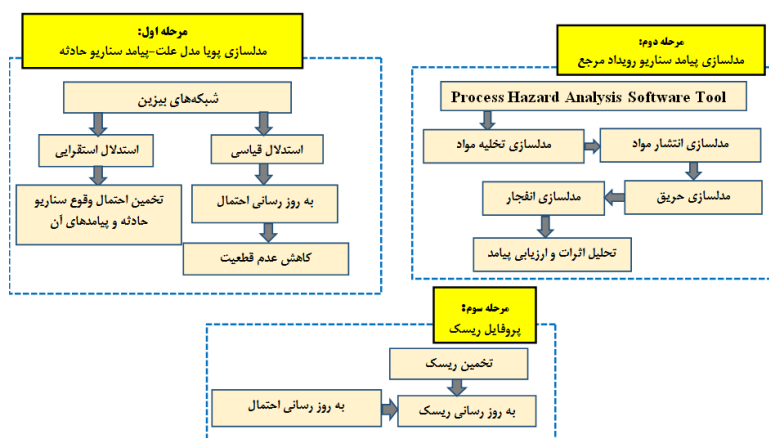
<sup>1</sup> Fuzzy Theorem

<sup>2</sup> Monte Carlo

<sup>3</sup> Dynamic Nature

<sup>4</sup> Dynamic Risk Assessment

<sup>5</sup> City Gate Natural Gas Station



شکل ۱- رویکرد پویا مورد استفاده در مطالعه حاضر

می‌شوند): برای نمایش متغیرهای تصادفی  
 • کمان‌ها (یال‌های جهت دار) برای نمایش روابط

احتمالی ما بین متغیرها  
 به طور خاص هر گره (نود) در گراف نشان دهنده  
 یک متغیر تصادفی است و شاخه‌ها (کمان)  
 وابستگی‌های احتمالاتی بین متغیرها را نشان می‌دهند.  
 این وابستگی‌های شرطی غالباً به وسیله روش‌های  
 آماری و احتمالاتی مشخص ارزیابی می‌شوند.

در قدم بعدی کمی سازی مدل ساخته شده صورت  
 گرفت، برای این منظور جهت تعیین احتمال وقوع  
 رویدادهای (شکست‌های) ریشه‌ای فرآیندی و مکانیکی  
 و برخی از شکست‌های انسانی از بانک داده‌های قابلیت  
 اطمینان فراساحلی و ساحلی (OREDA<sup>3</sup>) [۱۴] و  
 داده‌های مطالعه تان (Tan) و همکاران [۱۵] و برای  
 شکست‌های انسانی که در منابع علمی فوق‌الذکر  
 احتمال وقوع آنها موجود نبود از پایگاه داده ارائه شده  
 در تکنیک HEART<sup>4</sup> استفاده شده که برای انجام آن  
 در تعیین نوع و وزن عوامل اثر گذار بر عملکرد از  
 نظرات خبرگان استفاده گردید.

در شبکه بیزین برای محاسبه توزیع احتمال توام<sup>5</sup>

علت- پیامد سناریو حادثه با رویکردهای نوین، (۲)  
 مرحله دوم: مدلسازی و تحلیل پیامد با مناسبترین  
 رویکرد تحلیل شدت حوادث فرآیندی، و مرحله نهایی  
 تخمین و به روزرسانی ریسک می‌باشد، تشکیل شده  
 است.

مرحله اول: مدلسازی پویا مدل علت-پیامد سناریو  
 حادثه

در این مرحله ابتدا یک مدل کیفی گرافیکی از فرآیند  
 وقوع حادثه (سناریو نشستی گاز در ایستگاه مورد مطالعه)  
 که از علل ریشه‌ای<sup>۱</sup> منجر به وقوع سناریو حادثه شروع  
 می‌شود و در نهایت براساس عملکرد صحیح یا شکست  
 موانع ایمنی<sup>۲</sup> منجر به پیامدهای مختلف می‌گردد، با  
 استفاده از شبکه بیزین ساخته شد.

بخش کیفی مدل ساختاری نمایش بصری از فعل و  
 انفعالات در میان متغیرها و بخش کمی (مجموعه‌ای از  
 مشخصات احتمال) را فراهم می‌کند، که مجاز به  
 استنتاج احتمالات و اندازه‌گیری عددی است که متغیرها  
 یا مجموعه‌ای از متغیرها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به  
 عبارت دیگر یک شبکه بیزین گراف جهت‌دار غیر  
 حلقوی است و شامل موارد زیر می‌باشد [۱۲، ۱۳]:

• نودها (گره‌ها که با دوایر کوچک نشان داده

<sup>3</sup> The Offshore and Onshore Reliability Data (OREDA)

<sup>4</sup> Human Error Assessment & Reduction Technique (HEART)

<sup>5</sup> Joint probability distribution

<sup>1</sup> Root Causes

<sup>2</sup> Safety Barrier

محل مورد مطالعه، ابتدا مدل‌سازی تخلیه، مدل‌سازی انتشار و سپس مدل‌سازی انواع حریق و انفجارهای محتمل و نهایتاً تحلیل اثرات و ارزیابی پیامد آنها (احتمال و تعداد مرگ و میر افراد) انجام گرفت (شکل ۱). در این مطالعه از معادلات معبیری بنام معادلات Probit به منظور محاسبه درصد افرادی که تحت تاثیر یک پیامد خاص قرار می‌گیرند استفاده شده است [۱۷]:

معادلات پرابیت را بصورت کلی می‌توان با رابطه ۴ نشان داد:

$$Y = -14.9 + 2.56 \ln(t \cdot q^{4/3}) \quad (۴)$$

Y: متغیر Probit، q: میزان تشعشع ناشی از حریق (کیلووات بر مترمربع)، t: زمان برحسب ثانیه (۲۰ ثانیه در مطالعه حاضر) بعد از محاسبه مقدار متغیر پرابیت (Y)، با استفاده از رابطه ۵ احتمال مرگ و میر (P) بدست می‌آید [۱۷]:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

u: متغیر یکپارچگی (Integration variable)  
در این پژوهش، میزان مرگ و میر ناشی از وقوع هر کدام از پیامدهای نهایی ملاک ارزیابی پیامد سناریو حادثه قرار گرفت. با ترکیب معادله ۵ با توزیع جمعیت (D<sub>p</sub>) در محل وقوع حادثه، تعداد افرادی که کشته خواهند شد (N) از رابطه ۶ بدست می‌آید [۱۷]:

$$N = D_p A P \quad (۶)$$

N: تعداد مرگ و میر (تعداد مرگ و میر/ حادثه)، D<sub>p</sub>: توزیع جمعیت (نفر/مترمربع)، A: مساحت ناحیه تحت تاثیر پیامد (مترمربع)، P: احتمال مرگ و میر (رابطه ۵)  
تمام مراحل مربوط به مدل‌سازی، محاسبه میزان تشعشع انواع آتش‌ها و موج انفجار، محاسبات پرابیت و مرگ و میر افراد توسط نرم افزار PHAST 7.11 انجام می‌گیرد.

مرحله سوم: تخمین ریسک

با حاصل‌ظرب احتمال وقوع و شدت (میزان مرگ و میر) هر کدام از پیامدهای نهایی سناریو حادثه، ریسک

(مشترک) مجموع ای از متغیرها  $U = \{X_1, \dots, X_n\}$  از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۱۲، ۱۳].

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Parents(X_i)) \quad (۱)$$

- والدین یک گره، گره‌های قبلی بلافاصل آن می‌باشند.

- احتمال متغیر  $X_i$  از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد.

$$P(X_i) = \sum_{U \setminus X_i} P(U) \quad (۲)$$

یکی از ویژگیهای برتر و منحصر به فرد BN استفاده از قانون بیز برای به‌روز رسانی احتمالات وقوع پیشین رویدادهای ریشه‌ای پس از دریافت اطلاعات جدید (E<sup>۱</sup>) مانند آمار شبه حوادث، حوادث... است. این شبکه‌ها با استفاده از رابطه ۳ قادر به به‌روز رسانی احتمال پیشین رویدادهای پایه می‌باشد [۱۲، ۱۳].

$$P(U|E) = \frac{P(U,E)}{P(E)} = \frac{P(U,E)}{\sum_U P(U,E)} \quad (۳)$$

مرحله دوم: مدل‌سازی پیامد سناریو رویداد مرجع (CESCM<sup>۲</sup>)

در این مطالعه به منظور تخمین شدت پیامدهای سناریو حادثه از یک روش نوین، معتبر و اختصاصی سیستم‌های فرآیندی شیمیایی بنام مدل‌سازی پیامد (CM<sup>۳</sup>) با استفاده از نرم افزار PHAST 7.11 استفاده شد.

سناریو حادثه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، سناریو رویداد معتبر (CE<sup>۴</sup>) ایستگاه‌های CGS مورد مطالعه براساس استاندارد شرکت توتال (SAF 253 GSEP) [۱۶] می‌باشد که جداول ۱ و ۲ مشخصات و داده‌های این سناریو و داده‌های هواشناسی مورد استفاده در مدل‌سازی سناریو حادثه را به ترتیب نشان می‌دهد.

بعد از تعیین مشخصات فرآیندی و داده‌های محیطی

<sup>1</sup> Evidence

<sup>2</sup> Credible event scenario consequence modeling (CESCM)

<sup>3</sup> Consequence modeling

<sup>4</sup> Credible event

جدول ۱- مشخصات سناریو معتبر (CS) یا رویداد معتبر (CE) مورد مطالعه و داده‌های فرآیندی مدلسازی سناریو حادثه					
فشار (psi)	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	اندازه نشستی (mm)	ارتفاع رهاش (m)	جهت رهاش مواد	مدت نشستی
۱۰۰۰	۴۰	۲۰	۱	افقی	۱۰ دقیقه

جدول ۲- داده های هواشناسی برای مدلسازی سناریو حادثه			
سرعت باد (m/s)	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	رطوبت نسبی (%)	کلاس پایداری جو
۳	۲۷	۱۸	D (خنثی)

تراکم و احتقان<sup>۵</sup> یعنی شکست یا عملکرد صحیح و مورد انتظار، سناریو رویداد منجر به وقوع نه پیامد نهایی (C<sub>1</sub>-C<sub>9</sub>) (جدول ۵) خواهد شد. اجرای مدل شبکه بیزین منجر به شناسایی ۴۳ رویداد ریشه‌ای تاثیرگذار در رخداد سناریو مورد مطالعه شد که مجموعه‌ای از علل مکانیکی، فرآیندی و انسانی می‌باشد. در اغلب مطالعات کمی ریسک (QRA) تمرکز بیشتر بر علل مکانیکی و فرآیندی بوده و کمتر علل انسانی که نقش بسیار زیادی در وقوع حوادث دارند، مورد توجه قرار گرفته است، لذا در این مطالعه به عنوان یک بعد نو آورانه، علل انسانی با جزئیات و دقت بیشتر مورد شناسایی و مدلسازی قرار گرفته است. جدول ۳ اطلاعات برخی رویدادهای ریشه‌ای شناسایی شده در شکل ۲ و احتمال وقوع آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۴ و ۵ به ترتیب لیست و توصیف کیفی رویدادهای میانی و موانع ایمنی و پیامدهای نهایی شکل ۲ را نشان می‌دهد. در مجموع ۴۳ رویداد پایه‌ای شناسایی گردید که منجر به وقوع ۱۸ رویداد میانی می‌شوند و بعد از وقوع سناریو CE، ۶ مانع ایمنی که عملکرد صحیح یا نقص در عملکرد آنها منجر به تغییر نوع پیامد نهایی می‌شوند در ایستگاه‌های مورد مطالعه شناسایی گردید.

جدول ۶ موانع ایمنی و احتمال شکست آنها را نشان می‌دهد.

شکل ۳ مدل یک نمونه به‌روز شده سناریو حادثه را نشان می‌دهد که در احتمال وقوع سناریو CE برابر ۱ در نظر گرفته شده است ( $P(x_i|CE = \text{failed})$ ).

آن پیامد محاسبه می‌گردد. در این مطالعه به عنوان یک نوآوری از شبکه‌های بیزین برای به‌روز رسانی احتمال وقوع رویدادهای ریشه‌ای و پیامدهای نهایی استفاده شده است. به‌روز رسانی از طریق اخذ داده‌های مربوط به شبه حوادث، حوادث، شکست‌های انسانی، تجهیزات و فرآیندی و... بعنوان یک امتیاز ذاتی شبکه‌های بیزین در ارزیابی ریسک، بدست می‌آید و با بهره‌گیری از توانایی استدلال قیاسی شبکه بیزین به‌روز رسانی انجام خواهد شد. با به‌روز رسانی احتمال وقوع رویداد اصلی و نهایتاً پیامدهای نهایی آن متعاقباً ریسک محاسبه شده هر کدام از پیامدها نیز به‌روز رسانی خواهد شد.

### یافته‌ها

شکل ۲ یک مدلسازی جامع و پویا از مدل علت - پیامد سناریو CE (نشستی ۲۰ میلی متر به مدت ۱۰ دقیقه از ارتفاع ۱ متر بصورت افقی، جدول ۱) ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری CGS را با شبکه بیزین نشان می‌دهد. بطوریکه از سمت چپ از علل ریشه‌ای تاثیر گذار در وقوع سناریو شروع می‌شود، سپس علل میانی و در نهایت سه علل میانی اصلی یعنی، انسانی، فرآیندی و مکانیکی ختم می‌شود (جدول ۴)، این سه علل میانی در نهایت منجر به وقوع سناریو رویداد معتبر می‌شود. در سمت راست با توجه به عملکرد موانع ایمنی (جدول ۶) (شامل شیرهای قطع کنند اضطراری اتوماتیک<sup>۱</sup> و دستی<sup>۲</sup>، جرقه آنی<sup>۳</sup> و تاخیری<sup>۴</sup> و وجود

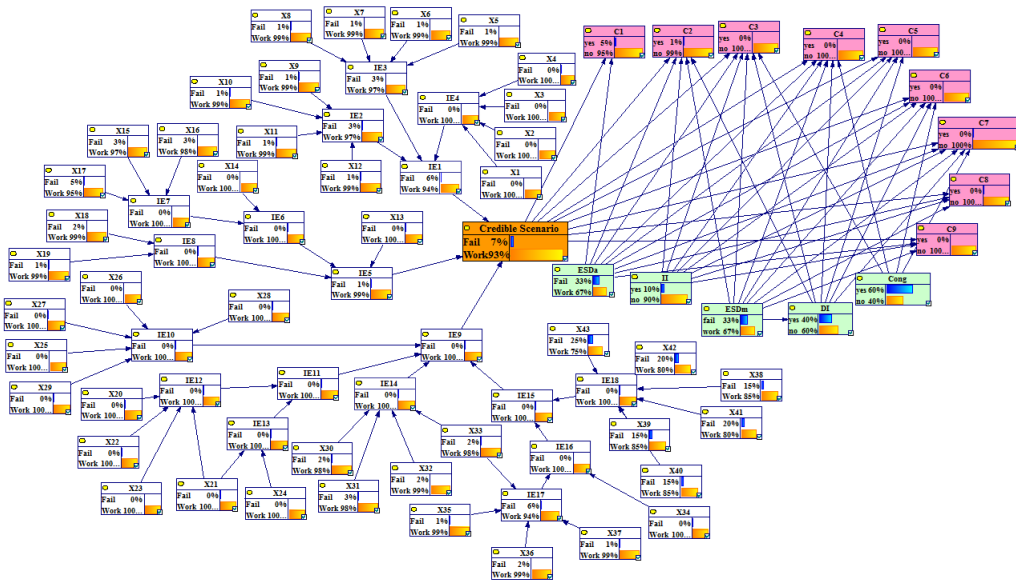
<sup>1</sup> Automatic emergency shutdown

<sup>2</sup> Manual emergency shutdown

<sup>3</sup> Immediate ignition

<sup>4</sup> Delayed ignition

<sup>5</sup> Congestion



شکل ۲- مدل سازی پویا مدل علت-پیامد سناریو رویداد معتبر (CS) ایستگاه های CGS با شبکه بیزین

جدول ۳- لیست رویدادهای ریشه‌ای دخیل در وقوع سناریو CE و احتمال وقوع آنها [۱۴،۱۵]

رویداد	توصیف	احتمار وقوع	رویداد	توصیف	احتمار وقوع
X <sub>1</sub>	ارزیابی اشتباه خطر	$9 \times 10^{-3}$	X <sub>23</sub>	ضعف در برنامه بازرسی	$5 \times 10^{-5}$
X <sub>2</sub>	خطای عمدی در حین عملیات	$1 \times 10^{-3}$	X <sub>24</sub>	نقص در حفاظت کاتادیک	$5 \times 10^{-4}$
X <sub>3</sub>	آموزش ناکافی	$4 \times 10^{-3}$	X <sub>25</sub>	نقص در تست سنسینگ	$4 \times 10^{-5}$
X <sub>4</sub>	تجربه ناکافی	$1 \times 10^{-3}$	X <sub>26</sub>	دنده به دنده بستن لوله ها	$4 \times 10^{-5}$
X <sub>5</sub>	نقص در راه انداز مجدد ایستگاه	$8 \times 10^{-3}$	X <sub>27</sub>	ضعف در ردیابی نشتی	$4 \times 10^{-3}$
X <sub>6</sub>	قطع ناگهانی گاز مشترکین	$8 \times 10^{-3}$	X <sub>28</sub>	مهار نکردن صحیح سنسینگ	$4 \times 10^{-3}$
X <sub>7</sub>	ترس از حریق و انفجار	$8 \times 10^{-3}$	X <sub>29</sub>	چفت و جور کردن نامناسب قطعات	$4 \times 10^{-5}$
X <sub>8</sub>	نقص یا ضعف تجهیزات	$8 \times 10^{-3}$	X <sub>30</sub>	سرعت بالای سیال گاز	$2 \times 10^{-2}$
X <sub>9</sub>	عدم اجرای پرمیت	$7 \times 10^{-3}$	X <sub>31</sub>	افت فشار جریان گاز	$2/5 \times 10^{-2}$
X <sub>10</sub>	نقص در اجرای صحیح پرمیت	$7 \times 10^{-3}$	X <sub>32</sub>	قطر کوچک لوله ها	$1/5 \times 10^{-2}$
X <sub>11</sub>	صدور پرمیت اشتباه	$8 \times 10^{-3}$	X <sub>33</sub>	دبی بالای جریان گاز	$2 \times 10^{-2}$
X <sub>12</sub>	عدم صدور پرمیت	$7 \times 10^{-3}$	X <sub>34</sub>	تغییرات شدید دمای محیط	$4 \times 10^{-3}$
X <sub>13</sub>	عدم آزمون ران‌ها همراه با سنسینگ	$3 \times 10^{-2}$	X <sub>35</sub>	فاصله طولانی ایستگاه تا مشترکین	$1 \times 10^{-2}$
X <sub>14</sub>	پاره شدن اسلبو	$4 \times 10^{-3}$	X <sub>36</sub>	خاموش بودن هیتر	$1/5 \times 10^{-2}$
X <sub>15</sub>	اسمبل ضعیف تجهیزات	$3 \times 10^{-2}$	X <sub>37</sub>	تنظیم نادرست دمای هیتر	$1/5 \times 10^{-2}$
X <sub>16</sub>	بکارگیری تجهیزات یدکی غیر استاندارد	$2/5 \times 10^{-2}$	X <sub>38</sub>	تنش برشی	$1/5 \times 10^{-1}$
X <sub>17</sub>	ضعف در برنامه تعمیرات و نگهداری	$5 \times 10^{-2}$	X <sub>39</sub>	تنش مماسی	$1/5 \times 10^{-1}$
X <sub>18</sub>	شرایط آب و هوایی سرد	$1/5 \times 10^{-2}$	X <sub>40</sub>	تنش محوری	$1/5 \times 10^{-1}$
X <sub>19</sub>	ضعف در فیلتراسیون	$1/3 \times 10^{-2}$	X <sub>41</sub>	بار محوری بیپشتی	$2 \times 10^{-1}$
X <sub>20</sub>	سائیدگی	$5 \times 10^{-3}$	X <sub>42</sub>	بار محوری فشاری	$2 \times 10^{-1}$
X <sub>21</sub>	تخریب لایه ضد خوردگی	$1 \times 10^{-2}$	X <sub>43</sub>	ارتعاش	$2/5 \times 10^{-1}$
X <sub>22</sub>	ضعف در تشخیص خوردگی	$1 \times 10^{-2}$			

براین اساس احتمال وقوع سناریو رویداد مرجع برابر  $10^{-2} \times 7/11$  محاسبه گردید.

شکل ۴ منطقه تحت تاثیر مقادیر مختلف آتش فورانی را نشان می‌دهد. همانطوریکه از این شکل قابل مشاهده است، نقطه شروع شعله حریق بخاطر شرایط

جدول ۷ نتایج تخمین احتمال وقوع سناریو رویداد مرجع، رویدادهای میانی اصلی با شبکه بیزین (پیشین<sup>۱</sup>) و شبکه بیزین به روز شده (پسین<sup>۲</sup>) نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Posterior  
<sup>2</sup> Prior

جدول ۴- لیست رویدادهای میانی و موانع ایمنی دخیل در وقوع سناریو CE (شکل ۲)

رویداد میانی	توصیف	رویداد میانی	توصیف
IE <sub>1</sub>	خطای انسانی (رفتار ناایمن)	IE <sub>14</sub>	لرزش خطوط
IE <sub>2</sub>	نقص در پرمیت کاری	IE <sub>15</sub>	خنسنگی تجهیزات
IE <sub>3</sub>	نقص در اجرای دستورالعمل	IE <sub>16</sub>	خنسنگی حرارتی
IE <sub>4</sub>	استرس و شتابزدگی در حین کار	IE <sub>17</sub>	تغییرات شدید دمای گاز
IE <sub>5</sub>	نقص فرآیندی	IE <sub>18</sub>	خنسنگی مکانیکی
IE <sub>6</sub>	افزایش فشار		توصیف
IE <sub>7</sub>	فیلتراسیون ضعف و بسته شدن اوریفیس	ESD <sub>a</sub>	شیر توقف کنند خودکار
IE <sub>8</sub>	انسداد لوله‌ها	ESD <sub>m</sub>	شیر توقف کنند دستی
IE <sub>9</sub>	نقص مکانیکی	II	جرقه آبی
IE <sub>10</sub>	عدم چفت و بست صحیح	DI	جرقه تاخیری
IE <sub>11</sub>	خوردگی	Cong	تراکم و موانع
IE <sub>12</sub>	خوردگی بیرونی	ESD <sub>a</sub>	شیر توقف کنند خودکار
IE <sub>13</sub>	خوردگی درونی		

جدول ۵- لیست پیامدهای نهایی سناریو CE (شکل ۲)

پیامد نهایی	توصیف
C1	شبه حادثه
C2	رهايش متوسط مواد
C3	آتش ناگهانی، خسارت جزئی دارایی
C4	انفجار ابر بخار، خسارت جزئی دارایی
C5	رهايش زياد مواد
C6	آتش ناگهانی، خسارت زياد دارایی و احتمال مرگ و مير
C7	انفجار ابر بخار، خسارت فاجعه آمیز دارایی و مرگ و مير زياد
C8	آتش فورانی، خسارت متوسط دارایی
C9	آتش فورانی، خسارت فاجعه آمیز دارایی و مرگ و مير زياد

آب و هوایی (سرعت باد) و مهمتر از همه مومنتوم اولیه جریان مواد جلوتر از نقطه نشستی می‌باشد. طبق شکل فضای تحت تاثیر تشعشعات ۳۷/۵، ۱۲/۵ و ۴ کیلووات بر مترمربع به ترتیب برابر ۲۳، ۲۸/۵ و ۳۵ متر از محل حادثه می‌باشد. شکل ۵ بیشترین میزان تشعشع ناشی از آتش فورانی را نشان می‌دهد که برابر ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع در فاصله حدود ۸ متری از محل وقوع سناریو حادثه است.

شکل ۵ نواحی تحت تاثیر آتش ناگهانی را برحسب فاصله از محل حادثه نشان می‌دهد. تا فاصله ۱۸ متری از محل حادثه غلظت مواد در حد کمترین غلظت قابل اشتعال است و افرادی که در این ناحیه قرار دارند در تماس مستقیم با شعله‌های آتش هستند و در نتیجه احتمال مرگ و میر این افراد برابر ۱ می‌باشد [۱۸].

افرادی که در بیرون این کانتور قرار دارند تا فاصله ۴۴ متر تحت تاثیر آثار غیر مستقیم آتش قرار گرفته و ممکن است دچار مشکلات تنفسی، سوختگی و... شوند و احتمال مرگ و میر آنها تقریباً صفر می‌باشد.

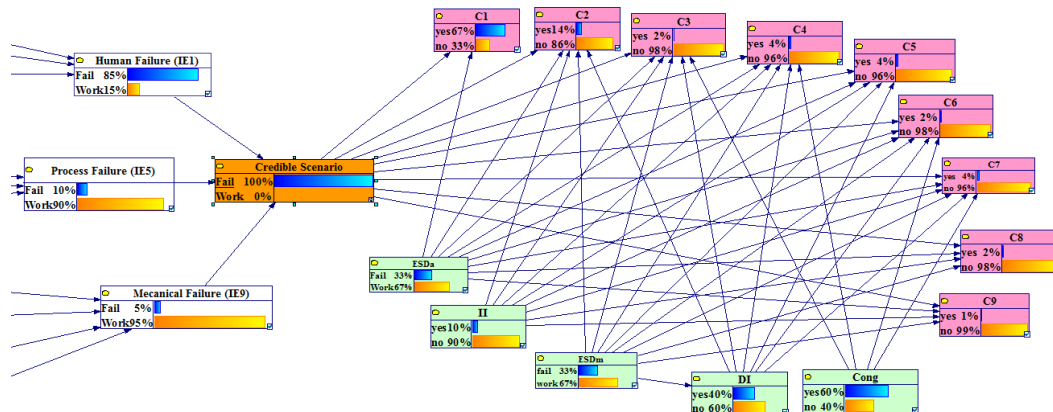
شکل ۶ فضای تحت تاثیر معیارهای مختلف موج انفجار برحسب فاصله از محل حادثه را نشان می‌دهد، تا فواصل ۴۶، ۴۸ و ۸۳ متر از محل حادثه به ترتیب موج انفجار ایجاد شده در اثر وقوع سناریو برابر ۰/۲۰، ۰/۱۳ و ۰/۰۲ بار می‌باشد. شکل ۷ منحنی بیشترین قدرت موج انفجار ایجاد شده برحسب فاصله از محل حادثه را نشان می‌دهد. همانطوریکه قابل مشاهده است، بیشترین قدرت موج انفجار ایجاد شده برابر ۲۰ بار در فاصله بین حدود ۳۸ الی ۴۳ متری از محل حادثه می‌باشد.

جدول ۶- موانع ایمنی و احتمال شکست آنها [۱۴، ۱۵]

احتمال شکست	موانع ایمنی
۰/۱۰	موانع جرعه آبی (IIB)
۰/۳۰	موانع جرعه تاخیری (زمانیکه $ESD_a$ عملکرد صحیح داشته باشد) (DIB)
۰/۶۰	موانع جرعه تاخیری (زمانیکه که $ESD_a$ دچار شکست شود) (DIB)
۰/۶۰	تراکم و احتقان در محیط (Cong)
۰/۳۳	شیر توقف کنند خودکار ( $ESD_a$ )
۰/۳۳	شیر توقف کنند دستی ( $ESD_m$ )

جدول ۷- احتمال پیشین و به روز شده رویداد اصلی و رویدادهای میانی اصلی شکل ۲

رویداد اصلی / میانی اصلی و پیامدهای نهایی	احتمال پیشین (BN)	احتمال به روز شده (BN)
سناریو رویداد مرجع (CE)	$10^{-2} 7/11$	۱
شکست فرآیندی	$10^{-2} 7/20$	$10^{-1} 1/01$
شکست انسانی (خطای انسانی)	$10^{-2} 6/08$	$10^{-1} 8/54$
شکست مکانیکی	$10^{-2} 3/90$	$10^{-2} 5/44$



شکل ۳- به روز رسانی مدل علت-پیامد سناریو به فرض وقوع سناریو CE

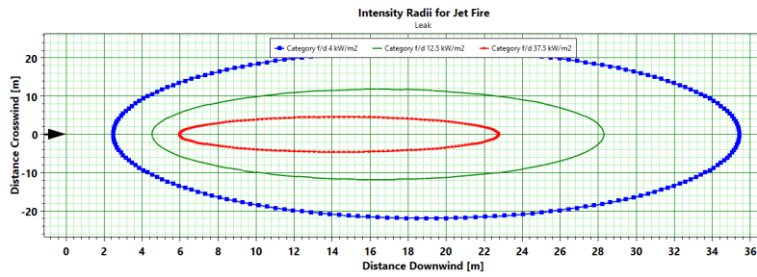
اطراف ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز بطور متوسط ده نفر ممکن است حضور داشته باشند.

جدول ۸ نتایج ارزیابی پیامدهای سناریو مورد مطالعه را نشان می‌دهد، براین اساس انفجار ابر بخار دارای بیشترین ناحیه تحت تاثیر و آتش ناگهانی دارای بیشترین میزان مرگ و میر است.

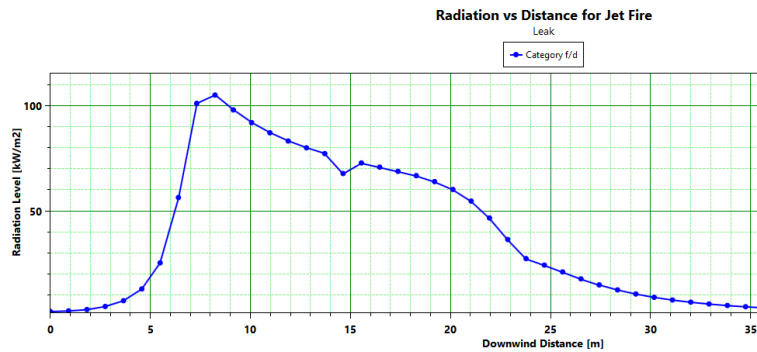
نتایج نشان داد که به به روز رسانی شبکه بی‌زین، احتمال وقوع هر سه پیامد نهایی افزایش خواهد یافت و در نتیجه ریسک آنها نیز افزایش دارد. با توجه به عملکرد موانع ایمنی اگر چه شدت پیامد آتش ناگهانی بیشتر از سایر پیامدها بود ولی ریسک انفجار ابر بخار دارای بیشترین مقدار است.

در این مطالعه سناریو رویداد معتبر (مرجع) براساس استاندارد GS EP SAF 253 شرکت توتال [۱۶]، ملاک مدلسازی و ارزیابی پیامد قرار گرفت. طبق این استاندارد معیار ارزیابی پیامد حریق فورانی میزان تشعشع ۹/۵ کیلووات بر مترمربع (حد آستانه درد در مدت ۸ ثانیه و بعد از ۲۰ ثانیه سبب سوختگی درجه دو می‌شود)، معیار آتش ناگهانی، حد LFL و معیار انفجار ابر بخار، افزایش فشار ۰/۲ بار می‌باشد (۱۶). تراکم جمعیت در محل مورد مطالعه از طریق تقسیم تعداد افراد احتمالی که ممکن است بطور متوسط در ناحیه تحت تاثیر قرار گرفته باشند بر مساحت واحد مورد مطالعه بدست می‌آید. در این مطالعه فرض شد در شعاع خطر حدود ۵۰ متر (دایره‌ای به قطر حدود ۱۰۰ متر)

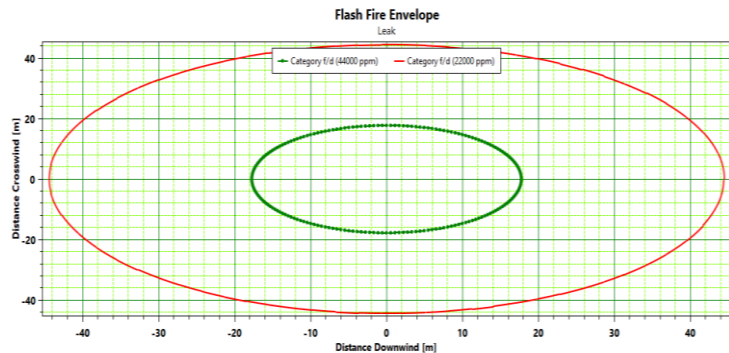




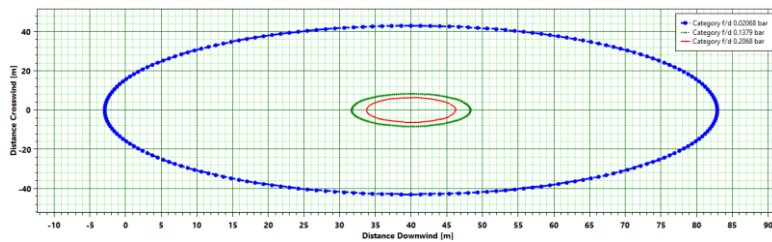
شکل ۴- کانتورهای میزان تشعشع ناشی از آتش فورانی برحسب فاصله از محل حادثه



شکل ۵- تشعشع آتش فورانی برحسب فاصله از محله حادثه



شکل ۶- کانتورهای آتش ناگهانی ایجاد شده برحسب فاصله از محل حادثه

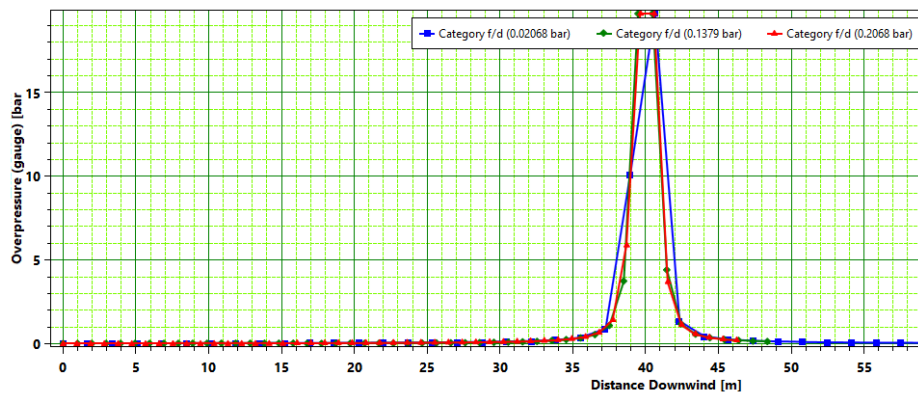


شکل ۷- کانتورهای موج انفجار ایجاد شده برحسب فاصله از محل حادثه

### بحث و نتیجه‌گیری

پيامد (تخمین تکرارپذیری) از فرآیند مدیریت ریسک تمرکز بیشتری دارند. چون جنبه شدت حوادث فرآیندی اغلب فاجعه آمیز و غیر قابل قبول می‌باشد و در صورت وقوع حوادث در این صنایع، سازمان‌ها متحمل

امروزه بیشتر مطالعات نوین ریسک، جهت طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه و کنترلی حوادث در سیستم‌های فرآیندی بر روی مرحله مدل‌سازی علت -



شکل ۸- بیشترین موج انفجار ایجاد شده سناریو مورد مطالعه برحسب فاصله از محل حادثه

جدول ۸- نتایج ارزیابی اثرات پیامدهای سناریو مورد مطالعه

پیامد(معیار)	ناحیه تحت تاثیر (مترمربع)	تراکم جمعیت (نفر/ مترمربع)	احتمال مرگ و میر	تعداد تلفات
حریق فورانی ( $9/5 \text{ kW/m}^2$ )	۲۸۲۶	۰/۰۰۲	۰/۰۸	۰/۳۴
آتش ناگهانی (LFL)	۱۱۳۴	۰/۰۰۲	۱	۲
انفجار ( $0/۲ \text{ bar}$ )	۶۶۴۴	۰/۰۰۲	۰/۱	۱

جدول ۹- نتایج پروفایل ریسک پیامدها با رویکرد پیشین (BN) و پسین (به روز شده با BN)

ریسک جمعی (مرگ و میر/ سال)			تکرارپذیری پیامد (رویداد/سال)		
پسین	پیشین	پیامد (شدت) (مرگ نفرات/رویداد)	پسین (BN)	پیشین (BN)	پیامد
$10^{-3} \times 3/70$	$10^{-4} \times 2/63$	۰/۳۴	$10^{-2} \times 1/09$	$10^{-4} \times 7/75$	آتش فورانی
$10^{-2} \times 4/01$	$10^{-3} \times 1/83$	۱/۷۱	$10^{-2} \times 2/35$	$10^{-2} \times 1/70$	آتش ناگهانی
$10^{-2} \times 3/53$	$10^{-3} \times 2/50$	۱/۰۰	$10^{-2} \times 3/53$	$10^{-2} \times 2/50$	انفجار

کارآمدتر فراهم گردد. به همین خاطر در مطالعه حاضر از یک رویکرد نوین بنام شبکه‌های بی‌زین بجای استفاده از روشهای کلاسیک (مانند استفاده از بانک داده‌ها یا تحلیل درخت خطا) جهت رفع نواقص این مرحله از فرایند تحلیل ریسک استفاده شد.

در دهه‌های اخیر چندین روش برای تحلیل و مدلسازی سناریو حوادث ارائه شده است، هر کدام از آنها نسبت به دیگری مزایا و معایبی دارد. اسکلت (Sklet) و همکاران (۲۰۰۶) [۱۸]، دیاگرام بلوک مانع<sup>۱</sup> برای بررسی حادثه رهاش هیدروکربن در سکوهای نفتی استفاده کرد. دل‌وسال (Delvosalle) و همکاران (۲۰۰۵) [۱۹]، مدل پایپونی BT در پروژه ARAMIS

خسارت‌های جانی، مالی، زیست‌محیطی جبران ناپذیری خواهند شد و همچنین آسیب زیاد به شهرت و آوازه سازمانها وارد می‌گردد. بنابراین رویکردهای مناسب و کارآمد، تمرکز بر کاهش احتمال وقوع چنین حوادث و پیشگیری از وقوع آنها دارد. همچنین مطالعات اخیر نشان داده که روش‌های بکارگرفته شده در این مرحله دارای نواقص و محدودیت‌های تاثیرگذار بر نتایج مطالعات تحلیل کمی ریسک می‌باشند. علاوه‌براین سختگیری استانداردهای ایمنی در این صنایع، افزایش روزافزون پیچیدگی در صنایع فرآیندی و گسترش حساسیت جامعه و... ضرورت بکارگیری روشهای کارآمد جهت حصول نتایج دقیق‌تر با عدم قطعیت کمتر را نشان می‌دهد تا امکان طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه

<sup>۱</sup> Barrier block diagrams

وقوع حوادث نقش دارد- در تحلیل کمی ریسک حوادث فرآیندی پرداخته است [۲۱،۲۲]. یکی از جنبه‌های نسبتاً جدید مطالعه حاضر، پرداخت به عوامل انسانی دخیل در خطای (شکست) انسانی در کنار شکست‌های مکانیکی و فرآیندی در وقوع سناریو حادثه مورد مطالعه می‌باشد. بعنوان مثل در مدل پویا علت-پیامد سناریو رویداد مرجع ایستگاه‌های CGS، ۱۲ رویداد ریشه‌ای با منشاء انسانی، ۷ رویداد با منشاء فرآیندی و ۲۴ رویداد با منشاء مکانیکی شناسایی شد (شکل ۲). هرچند در بعضی از رویدادهای مکانیکی نیز علل انسانی نقش زیادی دارد.

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه بی‌زین، توانایی آن در انجام استدلال قیاسی<sup>۲</sup> است که در تحلیل پویا ریسک ارزش خیلی زیاد دارد. هدف از استدلال قیاسی، به روز رسانی احتمال وقوع رویدادهای ریشه‌ای از طریق اخذ داده‌های پیش درآمد حوادث می‌باشد. به روز رسانی احتمال و کاهش عدم قطعیت دو ویژگی ذاتی شبکه بی‌زین می‌باشد (که در تحلیل پویا ریسک واحدهای فرآیندی بسیار مهم و تاثیر گذار می‌باشد) که در حین استدلال قیاسی انجام می‌گردد [۱۳]. بعلاوه اینکه احتمالات به‌روز شده از طریق آخرین اطلاعات و داده‌های پیش درآمد حوادث صنعت مورد مطالعه حاصل می‌شود، آنها به مراتب ویژگی و ماهیت واقعی سناریو حادثه را بهتر از احتمالات پشیم نشان می‌دهند و در نتیجه سبب کاهش عدم قطعیت می‌شوند (۱۰). در مدلسازی علت-پیامد سناریو حادثه سه عامل تاثیر گذار اصلی یعنی نقص انسانی، نقص فرآیندی و نقص مکانیکی بطور جداگانه مورد مدلسازی و تحلیل کیفی و کمی قرار گرفتند. نتایج استدلال قیاسی (به روز رسانی احتمال) مدلسازی سناریو رویداد مرجع ایستگاه‌های CGS نشان داد که احتمال شکست انسانی افزایش قابل توجه‌ای داشت یعنی از ۰/۰۰۶۰ به ۰/۰۸۵۴ افزایش پیدا کرد (به عبارتی ۸۵٪ در وقوع سناریو حادثه نقش دارند) (جدول

برای شناسایی سناریوهای فاجعه‌آمیز و مرجع در واحدهای فرآیندی استفاده کردند. نیولیانی‌تو (Nivolianitou) و همکاران (۲۰۰۴) [۲۰] یک مقایسه بین روشهای منتخب و برتر مانند درخت خطا، درخت رویداد و شبکه پتری برای تحلیل حوادث انجام دادند و معیارهای مانند: توالی رویداد، وابستگی رویداد، فرضیات مدلسازی در نظر گرفتند. همچنین از روشهای درخت خطا، درخت رویداد و شبکه پتری<sup>۱</sup> برای تحلیل حوادث واحد ذخیره آمونیاک استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتن که روش شبکه بی‌زین قابلیت بکارگیری داده‌های پیش درآمد حوادث جهت تحلیل سناریو حوادث دارد و بنابراین یک روش بسیار مناسب برای تحلیل پویا ریسک می‌باشد. به عبارت دیگر، شبکه بی‌زین نه تنها از تئوری بی‌زین برای به روز رسانی احتمالات بهره‌مند است، بلکه دارای یک ویژگی‌های کاملاً انعطاف‌پذیر و سازگار برای مدلسازی و تحلیل پویا طیف گسترده‌ای از سناریوهای حوادث است. بنابراین جهت تحلیل پویا ریسک در مطالعه حاضر از شبکه‌های بی‌زین استفاده شد.

یکی از ویژگی‌های شبکه بی‌زین توانایی در انجام استدلال استقرایی یا پیشگویانه در تخمین احتمال وقوع رویداد اصلی می‌باشد. براین اساس نتایج احتمال وقوع رویداد اصلی، علل اصلی منجر به وقوع رویداد اصلی (علل انسانی، مکانیکی و فرآیندی) و احتمال پیامدهای نهایی محتمل بدست آمده با استفاده از شبکه بی‌زین محاسبه گردید. براین اساس احتمال وقوع سناریو رویداد مرجع برابر  $7/11 \times 10^{-2}$  محاسبه گردید. احتمال شکست‌های انسانی، فرآیندی و مکانیکی دخیل در وقوع سناریو حادثه به ترتیب برابر  $6/08 \times 10^{-2}$ ،  $10^{-3}$  و  $7/20 \times 10^{-3}$  بود (جدول ۷).

در اغلب مطالعات تحلیل کمی ریسک (QRA) بیشتر به نقص‌های فرآیندی و مکانیکی دخیل در فرآیند وقوع حادثه پرداخته شده است و مطالعات اندکی به نقش عامل انسانی - که بین ۷۵ تا ۹۰ درصد در

<sup>2</sup> Abductive reasoning

<sup>1</sup> Petri nets

ذرات داغ احتراق، دچار مرگ آبی می‌شوند. افرادی که در محدودی نصف غلظت LFL (۴۴ متر از محل حادثه) قرار دارند، ممکن است دچار مشکلات تنفسی یا مشکلات ناشی از کمبود اکسیژن شوند (شکل ۶) [۱۷،۲۳].

شکل ۶ فضای تحت تاثیر معیارهای مختلف موج انفجار برحسب فاصله از محل حادثه را نشان می‌دهد، تا فواصل ۴۶، ۴۸ و ۸۳ متر از محل حادثه به ترتیب موج انفجار ایجاد شده در اثر وقوع سناریو برابر ۰/۲۰، ۰/۱۳ و ۰/۰۲ بار می‌باشد. شکل ۷ منحنی بیشترین قدرت موج انفجار ایجاد شده برحسب فاصله از محل حادثه را نشان می‌دهد. همانطوریکه قابل مشاهده است، بیشترین قدرت موج انفجار ایجاد شده برابر ۲۰ بار در فاصله بین حدود ۳۸ الی ۴۳ متری از محل حادثه می‌باشد.

نتایج مدلسازی و ارزیابی پیامد انفجار ابر بخار ناشی از وقوع سناریو مرجع نشان داد که این سناریو سبب ایجاد موج انفجار ۰/۰۲ بار (۸۳ متر)، ۰/۱۳ بار (۴۸ متر) و ۰/۲۰ بار (۴۶) از محل وقوع سناریو خواهد شد. براساس راهنمایی OGP، موج انفجار ۰/۰۲ الی ۰/۳ بار، سبب مرگ و میر ۱۰۰٪ افراد مستقر در ساختمان‌های موقت خواهد شد [۲۴]. بیشترین موج انفجار ایجاد شده ناشی از پارگی مخزن دی متیل آمین برابر ۲۰ بار می‌باشد که در حدود ۳۸ الی ۴۳ متری ایجاد خواهد شد (شکل ۷)، این در حالی است که موج انفجار ۰/۸۳ بار برای تخریب کامل ساختمانها، تجهیزات، مرگ ۱۰۰ درصد افراد داخل ساختمانها و ۵۰ درصد افراد بیرون کافی می‌باشد [۱۸].

در این پژوهش از معیار ریسک انگلستان که کاربرد بیشتری در مطالعات ریسک داخلی و خارجی دارد جهت ارزشیابی ریسک استفاده شد. براین اساس معیار ریسک قابل قبول برابر  $10^{-6}$ ، قابل تحمل برابر  $10^{-5}$  و ریسک غیر قابل برابر  $10^{-4}$  می‌باشد [۲۳]. ارزشیابی ریسک پیامدهای ناشی از سناریو رویداد مرجع ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز نشان داد که ریسک پیامدهای نهایی (آتش فورانی و ناگهانی و انفجار ابر بخار) در هر دو

۷ و شکل ۲). این یافته دلالت بر نقش شکست انسانی را بعنوان تاثیرگذارترین عامل (MCF<sup>۱</sup>) در وقوع سناریو حادثه نشان می‌دهد. همانطوریکه قبلاً ذکر شد این یافته با نتایج مطالعات متعدد انجام شده که تاکید بر نقش کلیدی عامل انسانی در وقوع حوادث فرآیندی دارند، کاملاً سازگار است [۲۲]. بعد از شکست‌های انسانی به ترتیب شکست‌های فرآیندی (۱۰٪) و شکست‌های مکانیکی (۵٪) سهم بیشتری در وقوع سناریو حادثه داشتند (شکل ۳).

همچنین نتایج نشان داد که پیامد نهایی C<sub>1</sub> و C<sub>2</sub> به ترتیب با احتمال وقوع ۰/۶۷ و ۰/۱۴ محتمل‌ترین پیامدهای سناریو حادثه می‌باشند (شکل ۲). این امر بعلاوه عملیات موفق شیرهای توقف‌کننده خودکار (ESD<sub>a</sub>) و دستی (ESD<sub>m</sub>) (شکل ۲) در کنترل رهاش گاز طبیعی در زمان وقوع سناریو می‌باشد. همانطوریکه از نتایج بدست آمده قابل مشاهده است موانع ایمنی موجود در ایستگاه‌های گاز مورد مطالعه تاثیر قابل توجه‌ای در کاهش شدت پیامدهای نهایی سناریو حادثه دارند.

نتایج مدلسازی آتش فورانی بیشترین میزان تشعشع ناشی از این حریق برابر ۱۰۵ کیلووات بر مترمربع (شکل ۵) است و تا فاصله ۲۳ متری از محل حادثه میزان تشعشع برابر ۳۷/۵ است، این میزان تشعشع برای مرگ آبی افراد، تخریب کامل تجهیزات فرآیندی و ساختمانها و دفاتر مهندسی در مدت زمان ۲۰ ثانیه کافی می‌باشد [۱۷،۲۳].

برای ارزیابی آتش ناگهانی دو محدوده حداقل غلظت قابل اشتعال (LFL) و نصف این مقدار در نظر گرفته می‌شود. نتایج مطالعه نشان داد که غلظت مواد تا فاصله ۱۸ متری از محل حادثه، برابر ۴۴۰۰۰ ppm است. افرادی که در این ناحیه حضور دارند بعلاوه (۱) تماس مستقیم با شعله آتش (۲) مواجهه کوتاه مدت با میزان تشعشع بسیار بالا (حداقل ۱۰۰ کیلووات بر متر مربع) (۳) آتش گرفتن ثانویه لباس و... (۴) استنشاق

<sup>1</sup> The most contribution factor

8. Zarei E, Jafari MJ, Dormohammadi A, Sarsangi V. The role of modeling and consequence evaluation in improving safety level of industrial hazardous installations: a case study: hydrogen production unit. *Iran Occup Heal*. 2014;10(6):29–41.

9. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Saf Environ Prot* [Internet]. Institution of Chemical Engineers; 2013;91(1–2):46–53.

10. 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.

11. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliab Eng Syst Saf*. 2012;104:36–44.

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

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

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

15. Tan Q, Chen G, Zhang L, Fu J, Li Z. Dynamic accident modeling for high-sulfur natural gas gathering station. *Process Saf Environ Prot*. 2014;92(6):565–76.

16. TOTAL. GS EP SAF 253: Impacted area, restricted area and fire zones. Design of Field Facilities. Rev 04. Paris La Défense Cedex.; 2009.

17. Zarei E, Jafari M.J, Badri N. Risk assessment of vapor cloud explosions in a hydrogen production facility with consequence modeling. *J Res Health Sci*. 2013;13 (2):181-187.

18. Sklet S. Comparison of some selected methods for accident investigation. *J Hazard Mater*. 2004;111(1):29–37.

19. 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.

20. Nivolianitou ZS, Leopoulos VN, Konstantinidou M. Comparison of techniques for accident scenario analysis in hazardous systems. *J Loss Prev Process Ind*. 2004;17(6):467–75.

21. Li P, Chen G, Dai L, Li Z. Fuzzy logic-based approach for identifying the risk importance of human error. *Saf Sci*. 2010;48(7):902–13.

22. Zarei E, Mohammadfam I, Aliabadi MM,

رویکردهای پیشین و پسین در ناحیه غیر قابل قبول قرار دارد. بنابراین اقدامات لازم برای طراحی و اجرای استرژیه‌های پیشگیرانه و کاهش ریسک باید در اولویت ایمنی این ایستگاه‌ها قرار گیرد.

## تقدیر و تشکر

بدینوسیله نویسنده اول از پرسنل محترم شرکت گاز استان تهران بخصوص آقای مهندس اسماعیل شجاع، رئیس ایمنی، بخاطر همکاری ارزشمندشان در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی بعمل می‌آید. همچنین در پایان، این نگارش علمی ناچیز را به پاس همکاری و حمایت‌های علمی و معنوی ارزشمند استاد ارجمند مرحوم جناب آقای پرفسور محمدعلی آزاده، که به تازگی به ملکوت اعلی پیوستند، را به روح پرفتوح ایشان تقدیم می‌نماییم.

## منابع

- Zarei E, Azadeh A, Mirzaei Aliabadi M, Mohammadfam I. Dynamic Safety Risk Modeling of Process Systems Using Bayesian Network. *Proces Saf Prog*. 2017;36: 399–07.
- 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.
- Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach. *Saf Sci*. 2013;57:108–17.
- Jr LCS, Smith M, Ashcroft P. Analysis of Environmental and Economic Damages from British Petroleum's Deepwater Horizon Oil Spill. *Albany Law Rev*. 2011;74(1):563–85.
- Paltrinieri N, Tugnoli A, Buston J, Wardman M, Cozzani V. Dynamic procedure for atypical scenarios identification (DyPASI): a new systematic HAZID tool. *J Loss Prev Process Ind*. 2013;26(4):683–95.
- Jahangiri M, Nourozi M, Sarebanzadeh K. Risk Managment, Part 2. Tehran: Fanavaran Press; 2013. [Persian].
- Zarei E. Dynamic Quantitative Risk Modeling Using Fuzzy Logic and Bayesian Network on Process Industries. [Ph.D Thesis], Hamadan University of Medical Sciences; 2017. [Persian].



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). 192-199.

23. Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. New York, USA: CCPS/AIChE; 2000.

24. OGP. Risk Assessment Data Directory, RADD-Vulnerability of humans, Report No. 434-14. 2010.

## Dynamic risk assessment of chemical process systems using bayesian network

Esmaeil Zarei<sup>1</sup>, Iraj Mohammadfam\*<sup>2</sup>, Ali Azadeh<sup>3</sup>, Nima Khakzad<sup>4</sup>, Mostafa Mirzaei Aliabadi<sup>5</sup>

Received: 2017/07/02

Revised: 2018/01/11

Accepted: 2018/02/12

### Abstract

**Background and aims:** Process systems due to processed under severe operational conditions and deal with large amounts of flammable and explosive materials have always led to many catastrophic accidents. Risk assessment is a useful tool for designing effective strategies for preventing and controlling these accidents. Conventional risk assessment methods have major deficiencies, including uncertainty in the obtained results and the completely static nature, therefore, the present study is aimed at applying a dynamic and quantitative approach to assess the safety risks of city natural gas pressure regulating stations.

**Methods:** First, according to the standard of the Total Company (GS EP SAF 253), the reference (credible) event scenario was determined, then a qualitative, quantitative and dynamic modeling of the cause – consequence accident scenario model using Bayesian Network (BN) is provided and next, deductive and abductive probabilistic reasoning are conducted by means of constructed BN model. PHAST 7.11 program is employed to modeled and evaluated of different consequences of the scenario. Finally, the risk of accident scenario consequences was calculated, evaluated and updated.

**Results:** 43 root events in occurrence of the credible event scenario of the gas stations were identified. Among the identified causes, the human failures (85%), process failures (10%) and mechanical failures (5%) had the highest contributing to occurrence in the accident scenario, respectively. Occurrence probability of the scenario is determined  $7.11 \times 10^{-2}$ . Safety barriers, especially emergency shutdown valves (ESD), had a significant role in reducing the consequences severity. The risk of all three of consequences including jet fire, flash fire and vapor cloud explosion is located in unacceptable area.

**Conclusion:** The use of BNs provides a comprehensive qualitative, quantitative and dynamic graphical modeling of the accident scenario. The abductive reasoning ability of these networks is capable to reducing the uncertainty and updating the probability of occurrence of root events and final the consequences. Using BNs along with consequences modeling, leads to a slightly more dynamic, precise and practical risk assessment in process plants.

**Keywords:** Dynamic risk assessment, Process systems, Bayesian networks, Consequences modeling, urban gas pressure reduction stations (CGS).

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

2. (**Corresponding author**) Center of Excellence for Occupational Health Engineering, Occupational Health and Safety Research Center, Faculty of Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. Mohammadfam@umsha.ac.ir

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

4. Safety and Security Science Section, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

5. Center of Excellence for Occupational Health Engineering, Occupational Health and Safety Research Center, Faculty of Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.