

## تحلیل ایمنی پویای ایستگاه های CNG با استفاده از تکنیک درخت خطا و شبکه بیزین

طاهره اسکندری<sup>۱</sup>، ایرج محمدفام<sup>۲\*</sup>، مصطفی میرزایی علی آبادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، مرکز تحقیقات ایمنی و بهداشت شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

<sup>۲</sup> گروه مدیریت سلامت، ایمنی و محیط زیست، مرکز تحقیقات ایمنی و بهداشت شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

### مکیده

**مقدمه:** تحلیل ایمنی برای جلوگیری از وقایع ناخواسته که ممکن است باعث حوادث فاجعه بار شوند، ضروری است. ایمنی ایستگاه های CNG به علت قرارگیری در مناطق شهری و جلوگیری از بروز حوادث فاجعه بار شغلی و شهری و حفظ ایمنی پرسنل، اموال و محیط حائز اهمیت است. تحلیل وقوع رویدادها با به روز رسانی احتمال بروز آنها کلید تجزیه و تحلیل ایمنی پویا است. هدف مطالعه حاضر ارائه یک روش تحلیل ایمنی کامل، جامع و پویا در ایستگاه های CNG است.

**روش کار:** در این مطالعه، ابتدا جهت شناسایی خطرات واحد مورد مطالعه از روش تجزیه و تحلیل حالات شکست و اثرات آن (FMEA) استفاده گردید. با استفاده از این روش عدد اولویت ریسک (RPN) مخاطرات شناسایی شده محاسبه گردید و خطر دارای بیشترین عدد اولویت ریسک به عنوان رویداد اصلی مورد مطالعه انتخاب شد. تحلیل علل اصلی در وقوع رویداد اصلی با استفاده از تکنیک تحلیل درخت خطا (FTA) انجام شد. سپس جهت تعیین علل موثر در بروز رویداد اصلی، نوع روابط احتمالی آنها و همچنین پویا سازی مدل FTA، از تحلیل درخت خطای بیزین شده استفاده گردید.

**یافته ها:** در فاز شناسایی خطرات، ۱۶ تجهیز دارای خطر شناسایی گردید. سپس عدد اولویت ریسک برای تجهیزات شناسایی شده محاسبه گردید. نتایج نشان داد که سیستم توزیع کننده دارای بیشترین عدد اولویت ریسک است و به عنوان بحرانی ترین تجهیز شناسایی گردید. بنابراین نشت گاز از توزیع کننده (به عنوان رویداد اصلی) انتخاب گردید. سپس تحلیل نشت گاز توزیع کننده با استفاده از تحلیل درخت خطا، ۵۶ علت اصلی را شناسایی کرد که شامل ۱۷ رویداد میانی و ۳۹ رویداد پایه ای می باشد. سپس مدل درخت خطای ساخته شده جهت پویاسازی به داخل شبکه بیزین انتقال یافت. نتایج تحلیل درخت خطای بیزین شده نشان داد که ترک و خوردگی شلنگ توزیع کننده مؤثرترین عامل در بروز رویداد اصلی تعیین شد. احتمال وقوع رویداد اصلی براساس تحلیل درخت خطا و درخت خطای بیزین شده به ترتیب  $۹/۶۷ \times ۱۰^{-۲}$  و  $۹/۱۱ \times ۱۰^{-۲}$  محاسبه شد.

**نتیجه گیری:** مطالعه حاضر، کاربرد رویکردی جامع و پویا به منظور تحلیل ایمنی ایستگاه های CNG را نشان می دهد. نتیجه مطالعه نشان داد که با بکارگیری شبکه بیزین امکان تعیین نحوه روابط علل ایجاد کننده رویداد اصلی امکان پذیر می شود. این امر ارزیابی اثربخشی اقدامات پیشگیرانه قبل از بکارگیری آنها را فراهم می سازد. همچنین نتایج مطالعه نشان می دهد که شناسایی رویدادهای پایه ای بحرانی باید براساس نرخ تغییرات احتمال به جای صرفاً تمرکز بر احتمال های پیشین یا پسین انجام شود.

**کلمات کلیدی:** ایمنی پویا، شبکه بیزین، تحلیل درخت خطا، تحلیل درخت خطای بیزین شده

به دلیل مزایای اقتصادی و زیست محیطی، گاز طبیعی بعنوان یک منبع انرژی پاک یکی از پرمصرف ترین انرژی ها در جامعه امروزی است (۱-۳). گاز طبیعی اساسا از متان تشکیل شده است که بسیار قابل اشتعال و انفجار است (۳، ۴). به طوری که ترکیب ۴،۵ تا ۱۶،۵ درصد از آن با هوا قابلیت اشتعال و انفجار را دارد و دمای احتراق آن ۵۳۰ درجه سانتیگراد است (۵). متان می تواند به عنوان سوخت خودرو بصورت فشرده شده استفاده شود (۶). از اوایل دهه ۱۹۸۰ استفاده از بعنوان سوخت وسایل نقلیه افزایش پیدا کرد (۱). بررسی ها نشان داده است که اکنون بیش از ۲۶،۶۷۷ ایستگاه سوختگیری CNG<sup>۱</sup> در سراسر جهان وجود دارد و همانطور که در منابع معتبر اخیر آمده است، ایران سردهسته جهان در استفاده از سوخت CNG با حدود ۴،۰۷ میلیون NGVs<sup>۲</sup> است (۲). ایستگاه های سوخت گیری در داخل محیط شهری به عنوان یکی از خطرات بالقوه و موجود در شهرها محسوب می شوند (۷). به علت قرارگیری ایستگاه های CNG در مناطق شهری عواقب هر آسیبی (تصادفی یا عمدی) به سیستم می تواند فاجعه آمیز باشد (۸). بنییر این امنیت مردم، مهم ترین نگرانی از زمان شروع استفاده تجاری از گاز طبیعی فشرده به عنوان یک سوخت جدید خودرو بوده است (۴، ۹).

حوادث ایستگاه های CNG بعلت خصوصیات ویژه گاز طبیعی (قابلیت اشتعال بالا، انفجار و پراکندگی) متفاوت از سایر حوادث صنعتی می باشد (۹). برای مثال حوادث مربوط به ایستگاه های CNG در کره نشان داد که ۴۱ حادثه در سالهای ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ اتفاق افتاده است که ۲۵ مورد (۶۱٪) آتش سوزی و انفجار بودند. در یکی از این حوادث، میزان آسیب ۱۳ میلیون دلار بود (۱۰). در سال ۲۰۰۴، انفجار کارخانه NG در بلژیک باعث مرگ ۱۴ نفر و زخمی شدن بیش از ۲۰۰ نفر گردید، در همان سال انفجار NG در پاراگوئه نیز باعث مرگ بیش

1-Compressed Natural Gas (CNG)

2-Natural Gas Vehicles (NGVs)

3-Bayesian Network (BN)

از ۲۵۰ نفر شد و در سال ۲۰۰۹، انفجار ناشی از نشت گاز منجر به بزرگترین تلفات در مسکو شد (۲). همچنین با توجه به آمار های به دست آمده از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ در تهران، ۴۸۰ مورد آتش سوزی در مکان های خطرناک، مانند ایستگاه های CNG اتفاق افتاده است (۱۳۱) در سال ۲۰۰۴، ۱۶۱ در سال ۲۰۰۵، ۱۸۴ در سال ۲۰۰۶ (۷). بنابراین، تخلیل ایمنی در تاسیسات CNG بسیار حائز اهمیت است (۱۱). تخلیل ایمنی برای جلوگیری از وقایع ناخواسته که ممکن است باعث حوادث فاجعه بار شوند، ضروری است. تخلیل وقوع رویدادها با به روز رسانی احتمال بروز آنها کلید تجزیه و تخلیل ایمنی پویا است.

چند مطالعه مربوط به ارزیابی خطرات ایمنی در جایگاه های CNG انجام شده است، که بر عملکرد نامناسب مخازن CNG خوردروها و عدم استانداردها بودن آنها تاکید کرده اند (۴، ۶، ۱۲). همچنین مطالعات دیگری نیز در زمینه ارزیابی استاتیک ایمنی در ایستگاه های CNG انجام شده است (۱۳، ۱۴). در حالی که پارامترهای یک ایستگاه CNG دائم در حال نوسان و تغییر است و مطالعات پویای ایمنی در این زمینه یک ضرورت است.

از آنجایی که روش های مرسوم ارزیابی ایمنی مانند درخت خطا، درخت رویداد و دیاگرام Bow-tie حالت استاتیک دارند، لذا قادر به تخلیل پویای ایمنی یک سیستم نمی باشند (۱۵-۱۸). شبکه بیزین (BN) یک ابزار محبوب برای انجام آنالیز کمی در صنایع می باشد (۱۷). BN یک رویکرداستنتاج احتمالی برای استدلال در عدم قطعیت است که می تواند محدودیت روش های مرسوم را کاهش دهد، و وابستگی های مشروط، نقص های مشترک و حالت های مختلف رویدادهای اولیه در فرایند ارزیابی خطر را در نظر می گیرد. مزیت اصلی BN، توانایی انجام به روزرسانی احتمال است، که آن را به یک روش عالی برای تخلیل ایمنی سیستم های پویا تبدیل کرده است (۱۹، ۲۰). BN یک رویکرد استنتاج احتمالی برای استدلال در عدم قطعیت است که می تواند محدودیت روش های مرسوم را کاهش دهد، و وابستگی

رویداد اصلی منتخب با استفاده از تکنیک تحلیل درخت خطا (FTA) انجام شد. FTA یک مدل منطقی و سلسله مراتبی است که چگونگی وقوع یک حادثه ناخواسته را از ترکیب رویدادهای میانی (Intermediate Events) و رویدادهای پایه ای (Basic Events) نشان می دهد. حادثه ناخواسته معمولاً به عنوان رویداد اصلی درخت خطا معرفی می شود. در این روش ارتباط بین رویدادها و علل آنها با استفاده از دروازه های منطقی AND و OR نشان داده می شود (۲۵، ۲۶). همچنین براساس ارتباط منطقی بین رویدادهای پایه با رویدادهای میانی، احتمال رویدادهای میانی و در نهایت احتمال رویداد اصلی از طریق قوانین ترکیب دروازه ها طبق روابط ۴ و ۵ محاسبه می شود.

قوانین ترکیب دروازه ها:

$$\text{AND Gate: } P(A.B) = P(A) \times P(B) \quad (2)$$

$$\text{OR Gate: } P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A).P(B) \quad (3)$$

$$P_{\text{And}}(E) = \prod_{i=1}^k P(E_i) \quad (4)$$

$$P_{\text{Or}}(E) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P(E_i)) \quad (5)$$

$k$ : تعداد کل رویدادهای ورودی به دروازه موردنظر  
 $P_{\text{And}}(E)$ : احتمال وقوع رویداد میانی یا رویداد اصلی با ورودی And  
 $P_{\text{Or}}(E)$ : احتمال وقوع رویداد میانی یا رویداد اصلی با ورودی OR  
 $P(E_i)$ : احتمال رخداد رویدادها در درخت خطا  $E_i$   
 برای  $k = 1, 2, 3$

FTA یک روش کیفی و کمی است. کیفی به این معنی که آن رویدادهای پایه ای و مسیرهایی را که منجر به رویداد اصلی می شوند، شناسایی می کند و کمی به این معنی است که فرکانس یا احتمال رخداد یک رویداد

های مشروط، نقص های مشترک و حالت های مختلف رویدادهای اولیه در فرایند ارزیابی خطر را در نظر می گیرد. با توجه به موارد ذکر شده هدف مطالعه حاضر شناسایی و کمی سازی خطرات موجود در ایستگاه های CNG با استفاده از دو تکنیک FM&EA<sup>۱</sup> و FTA و همچنین تعیین نوع و نحوه روابط علل موثر در بروز حوادث فاجعه بار با استفاده از رویکرد BN می باشد.

### روش کار

این مطالعه در سه گام اصلی بشرح زیر صورت گرفت

#### الف) شناسایی و ارزیابی اولیه خطرات

در این مطالعه ابتدا برای شناسایی و ارزیابی اولیه خطرات موجود در ایستگاههای CNG از روش حالت شکست و تحلیل تاثیر آن استفاده گردید. FMEA ابزاری است که اولین بار از طرف سازمان ناسا در سال ۱۹۶۳ برای الزامات واضح قابلیت اطمینان پیشنهاد شد. از آن به بعد، FMEA به طور گسترده ای برای ایمنی سیستم و آنالیز قابلیت اطمینان فرآیندها و طیف وسیعی از صنایع مورد استفاده قرار گرفت. این تکنیک یک ابزار تحلیلی بسیار قدرتمند و موثر است که به شناسایی و شمارش نقاط ضعف در فرآیند می پردازد (۲۱، ۲۲).

در این روش پس از شناسایی خطرات موجود عدد اولویت ریسک (RPN) از حاصلضرب سه عامل شدت پیامد، احتمال وقوع و نرخ احتمال کشف در یک بازه ۱ تا ۱۰ محاسبه می شود. حد غیر قابل قبول ریسک های شناسایی شده ۵۱۲ از حداکثر ۱۰۰۰ بود.

$$RPN = S \times P \times D \quad (1)$$

ب) شناسایی و ارزیابی علل اصلی خطر منتخب (رویداد اصلی)

در گام بعد، شناسایی و ارزیابی علل اصلی رخداد

1- Failure Mode and Effect Analysis (FM&EA)

2- Fault Tree Analysis (FTA)

3- Risk Priority Number (RPN)

در BN برای محاسبه توزیع احتمال مشترک مجموعه ای از متغیرها  $U = \{X_1, \dots, X_n\}$  از رابطه ۶ استفاده می شود:

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(A_i | Pa(A_i)) \quad (۶)$$

$Pa(A_i)$  مجموعه والدین  $A_i$  در BN است، در حالی که  $P(U)$  نشان دهنده خواص BN است (۱۷، ۲۹). در تحلیل تشخیصی، BN از قضیه Bayes برای به روزرسانی رویدادهای پیشین با مشاهدات جدید مجموعه دیگری از متغیرهایی که شواهد  $E$  نامیده می شوند، استفاده می کند. توزیع احتمال پسین را می توان با استفاده از انواع مختلفی از الگوریتم های استنتاج مانند Bayes درخت اتصال یا حذف متغیر، بر اساس قضیه Bayes محاسبه کرد.

$$P(U|E) = \frac{P(U|E)}{P(E)} = \frac{P(U|E)}{\sum_U P(U|E)} \quad (۷)$$

شناسایی مؤثرترین رویداد های پایه در تحلیل ایمنی سیستم ها بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور، استفاده از مقادیر به روز شده احتمال رویدادهای پایه به تنهایی برای تعیین مؤثرترین رویدادهای پایه ممکن است سبب خطا در انتخاب این رویدادها و پیامدها میگردد. و برای جلوگیری از وقوع این امر می توان از نرخ تغییرات (RoV) جهت انتخاب مؤثرترین رویدادهای پایه استفاده کرد (۸). مقدار RoV برای هر یک از رویدادهای پایه ای طبق رابطه زیر قابل محاسبه می باشد.

$$RoV(BE_i) = \frac{\pi(BE_i) - \theta(BE_i)}{\theta(BE_i)} \quad (۸)$$

$\pi(BE_i)$  و  $\theta(BE_i)$  به ترتیب نشان دهند، احتمالات پیشین و به روز شده رویداد پایه ای  $(BE_i)$  می باشد.

را نیز برآورد می کند (۲۷، ۲۸). این تکنیک می تواند یک مبنای قابل اعتماد برای تعیین برخی اقدامات ایمنی به منظور پیش بینی و پیشگیری از حوادث ارائه کند. با این حال کاربرد FTA در تحلیل ایمنی سیستم های پویا محدودیت دارد و مهمترین علت آن استاتیک بودن این مدل است (۱۶).

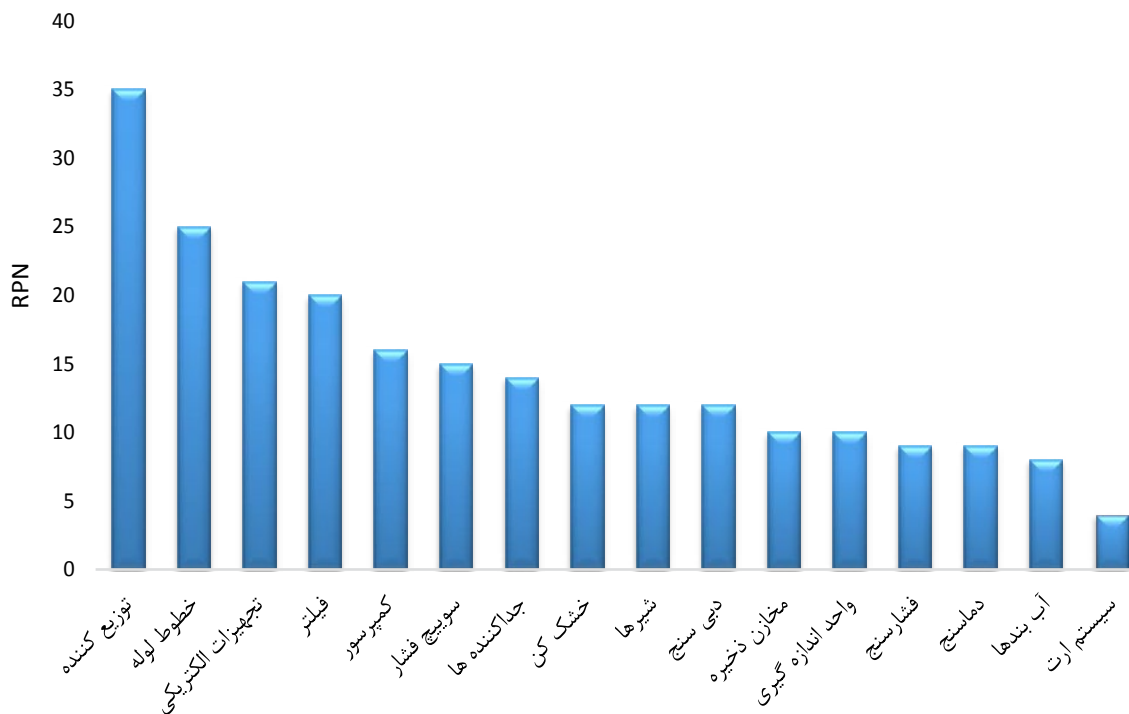
### ج) درخت خطای بیزین شده

برای تعیین مؤثرترین رویدادهای پایه در بروز رویداد اصلی و نوع روابط احتمالی و همچنین جهت رفع محدودیت ساختار استاتیک درخت خطا از روش آنالیز درخت خطای بیزین (BFTA) شده استفاده شد.

استفاده از شبکه بیزین (BN) در تحلیل ایمنی صنایع نسبتا نوین است. اخیرا BN اغلب در تحلیل درخت خطا و Bow-tie استفاده می شود (۱۷، ۲۹، ۳۰). تحلیل BN به یک روش استنتاج احتمالی محبوب برای استدلال در عدم قطعیت تبدیل شده است. تحلیل BN می تواند متغیرهای چند حالته، علل نقص مشترک و وابستگی های شرطی را مدل کند. به علاوه شبکه های بیزین شدت ارتباط بین متغیرها را به صورت کمی مدل میکنند که اجازه می دهند با دست یابی به اطلاعات جدید احتمالات به روز رسانی شوند (۱۶، ۱۷، ۳۰). که این به معنی دارا بودن ماهیت دینامیک BN و غلبه بر محدودیت های سایر تکنیک های ارزیابی ایمنی است. BN همچنین می تواند وابستگی های شرطی میان دیگر روش های ارزیابی ایمنی مانند درخت خطا، درخت رویداد، و Bow-tie را مدل کند (۱۷، ۳۰).

BN شامل اجزای کیفی و کمی است (۳۱). عنصر کیفی توسط ساختار شبکه نشان داده شده است، در حالی که مولفه کمی با انتساب توزیع احتمالی شرطی به گره ها بیان می شود (۱۷). در BN به طور خاص هر گره (نود) در گراف نشان دهنده یک متغیر تصادفی است و شاخه ها (کمان) وابستگی های احتمالاتی بین متغیرها را نشان میدهند.

4- Bayesian Fault Tree Analysis (BFTA)



شکل (۱) - رتبه بندی تجهیزات ایستگاه های CNG بر حسب عدد اولویت ریسک

همانطور که مشاهده می شود، توزیع کننده دارای بالاترین RPN است و با توجه به این که در ایستگاه CNG، گاز به صورت فشرده و با فشار بالا (در حدود 250 bar) عرضه می شود، نشت گاز از سیستم توزیع کننده می تواند به عنوان رویداد اصلی درخت خطا در نظر گرفته شود.

ب) شناسایی و ارزیابی علل وقوع رویداد اصلی  
 شناسایی علل اصلی نشت گاز از سیستم توزیع کننده از طریق مشاهدات مستقیم، مصاحبه با کارشناسان، بررسی اسناد و نقشه های عملیاتی جمع آوری گردید. نتایج به پنج علل اصلی، از جمله نقص ابزارهای کنترلی، پارگی شلنگ توزیع کننده، فشار گاز بالا، خطای اپراتور و نقص در سیستم لوله کشی اشاره کرد. این علل اصلی به علل میانی و پایه ای بیشتر شکسته شدند. بعد از ترسیم کیفی درخت خطا، در مرحله بعد احتمال رخداد رویدادهای پایه با استفاده از پایگاه داده های

### یافته ها

یافته های اصلی مطالعه بر اساس مراحل اجرای آن بشرح زیر ارائه می شود:

#### الف) شناسایی و ارزیابی اولیه خطرات

شناسایی نقص و اثرات آن در ایستگاه CNG انجام شد که : ۱- منجر به شناسایی منابع خطر شد. ۲- یک دیدگاه کیفی کامل از منابع خطر با توجه به عملکرد آنها، حالت های نقص، علل نقص و اثرات نقص بر روی ایستگاه CNG را ارائه داد. ۳- یک آنالیز کمی خطر با تعیین شدت وقوع، احتمال وقوع و درجه تشخیص برای هر منبع خطر به منظور بدست آوردن عدد اولویت ریسک را ارائه داد.

لازم به ذکر است که مقادیر S، P و D برای حالت های نقص اجزا و اثرات آنها توسط یک گروه از کارشناسان ایمنی و فرآیند در این زمینه تعیین شد. شکل ۱، RPN را برای همه منابع خطر در ایستگاه های CNG ارائه می دهد.

جدول (1) - نمادها، توصیف ها و احتمالات رویدادهای پایه (BE)

نماد	توصیف	احتمال	نماد	توصیف	احتمال
BE01	نقص عملکرد شیر قطع اضطراری	$2/47 \times 10^{-3}$	BE21	نقص عملکرد خنک کن ها	$1/03 \times 10^{-3}$
BE02	نقص Breakaway connection	$1/62 \times 10^{-3}$	BE22	سوییچ فشار	$3/99 \times 10^{-3}$
BE03	نقص Reactor Reel	$1/29 \times 10^{-3}$	BE23	ترانسمیتر فشار	$3/04 \times 10^{-3}$
BE04	نقص عملکرد رگلاتور	$1/23 \times 10^{-3}$	BE24	نشانهگر فشار	$2/53 \times 10^{-3}$
BE05	نقص سنسور	$3/06 \times 10^{-3}$	BE25	نقص عملکرد شیر قطع کن	$1/08 \times 10^{-3}$
BE06	نقص ترانسمیتر	$3/06 \times 10^{-3}$	BE26	اتصالات نامناسب	$9/52 \times 10^{-3}$
BE07	عدم عملکرد بموقع شیر جریان اضافی	$4/23 \times 10^{-3}$	BE27	فیلترینگ نامناسب	$1/23 \times 10^{-3}$
BE08	نقص شیر یک طرفه	$1/46 \times 10^{-3}$	BE28	عملیات غیر معمول	$1 \times 10^{-3}$
BE09	نقص شیر تویی	$2/09 \times 10^{-3}$	BE29	انتخاب کنترلر مشابه به اشتباه	$2 \times 10^{-4}$
BE10	عدم تعمیرات مناسب و بموقع	$5 \times 10^{-3}$	BE30	خواندن دستور کار یا صفحه نمایش توزیع کننده به اشتباه	$1/6 \times 10^{-3}$
BE11	فشار بالای گاز حین عملیات سوخت رسانی	$5/62 \times 10^{-3}$	BE31	خطای عمدی در انجام دستورالعمل	$5 \times 10^{-3}$
BE12	تروریسم	$1/48 \times 10^{-3}$	BE32	ارزیابی نادرست خطر	$9/42 \times 10^{-3}$
BE13	ترک یا سوراخ شلنگ	$1/24 \times 10^{-3}$	BE33	آموزش ناکافی	$1/34 \times 10^{-3}$
BE14	برخورد خودرو با نازل	$3 \times 10^{-3}$	BE34	عدم تجربه کافی	$1/34 \times 10^{-3}$
BE15	نقص PRV	$1 \times 10^{-4}$	BE35	جوش نامناسب	$9/96 \times 10^{-4}$
BE16	نقص شیر اطمینان	$1 \times 10^{-4}$	BE36	نصب نامناسب	$9/52 \times 10^{-4}$
BE17	نقص سوییچ فشار	$5/19 \times 10^{-4}$	BE37	نقص جداکننده ها	$9/75 \times 10^{-4}$
BE18	نقص ترانسمیتر دما	$1/35 \times 10^{-3}$	BE38	نقص در سیستم انتقال (پوشش خارجی)	$6/3 \times 10^{-3}$
BE19	نقص عملکرد دماسنج معمولی	$1/08 \times 10^{-3}$	BE39	نقص سلولهای کاندی	$6/3 \times 10^{-3}$
BE20	عدم دفع گرما توسط لوله ها و محفظه کارتل	$4/56 \times 10^{-3}$			

مورد مطالعه را با رویکرد BFTA نشان داده شده است. جدول ۳ احتمالات رویدادهای میانی، رویداد اصلی با استفاده FTA و BFTA را نشان می دهد. در شکل ۳ نیز نرخ تغییرات (RoV) احتمال شکست رویدادهای پایه ای ارائه گردیده است. همانگونه که در این شکا دیده می شود احتمال محاسبه شده برای رویدادهای پایه در هر دو روش FTA و BFTA یکسان می باشد.

### بحث

شناسایی خطرات یک وظیفه ابتدایی جهت ارزیابی خطرات است. هرچه ارزیابی ها دقیق و جامع باشد و بتواند احتمالات خطرات به وجود آورنده حوادث را به طور تقریباً کامل بیان کند می تواند رهنمودهای بسیاری را برای مدیران ارشد یک سازمان مهیا سازد. در مطالعه حاضر،

OREDA و نظر کارشناسان در این زمینه استخراج شده و کمی سازی درخت خطا با استفاده از ترکیب دروازه های منطقی روابط ۲ و ۳ انجام گرفت. نمادها، توصیف ها و احتمالات نقص ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. نمادها BE و IE به ترتیب نشان دهنده رویدادهای پایه و میانی هستند.

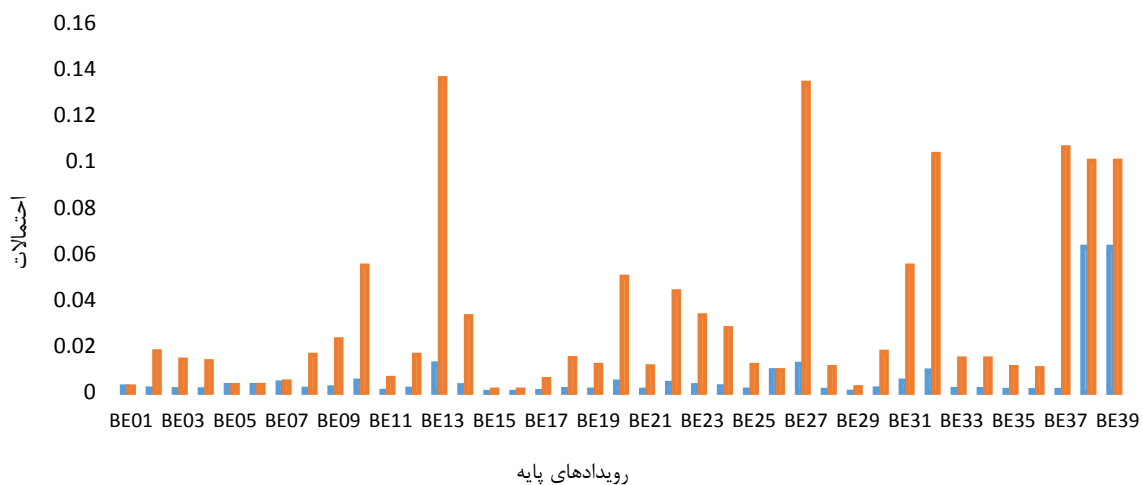
### ج) درخت خطای بیزین شده (BFTA)

الگوریتم انعکاس مدل FTA به شبکه بیزین (BN) براساس مطالعه Bobbio و همکاران انجام شد (۳۲). در این مطالعه مدل BFTA در نرم افزار Genie ساخته و آنالیز استفاده شد.

در شکل ۲ مقادیر احتمال پیشین (Prior) و پسین (Posterior) نقص رویدادهای پایه ای رویداد اصلی

جدول (۲) - نمادها، توصیف ها و احتمالات رویدادهای میانی (IE)

احتمال	توصیف	نماد	احتمال	توصیف	نماد
$1/97 \times 10^{-2}$	نقص کمپرسور	IE10	$2/2 \times 10^{-2}$	نقص ابزارهای کنترلی	IE01
$8/73 \times 10^{-3}$	افزایش دمای محفظه کمپرسور	IE11	$2/53 \times 10^{-2}$	پارگی شلنگ	IE02
$1/05 \times 10^{-2}$	عدم عملکرد صحیح تنظیم کننده های فشار	IE12	$1/97 \times 10^{-2}$	فشار بالای گاز	IE03
$5/58 \times 10^{-3}$	نقص عملکرد مبدل حرارتی	IE13	$2/03 \times 10^{-2}$	خطای اپراتور	IE04
$1/17 \times 10^{-4}$	انسداد لوله	IE14	$1/94 \times 10^{-2}$	نقص در سیستم لوله کشی	IE05
$2/79 \times 10^{-3}$	نقص در اجرای دستورالعمل های کاری	IE15	$9/36 \times 10^{-4}$	نقص عملکرد جریان سنج	IE06
$1/7 \times 10^{-2}$	استرس و عجله حین انجام کار	IE16	$1/37 \times 10^{-2}$	عملکرد نامناسب شیر ها	IE07
$3/96 \times 10^{-2}$	خوردگی	IE17	$5/55 \times 10^{-2}$	ترکیدن ناگهانی شیر	IE08
			$1/96 \times 10^{-2}$	نقص سیستم های کاهنده فشار	IE09



شکل (۲) - مقایسه احتمال پیشین (prior) و پسین (Posterior) رویدادهای پایه

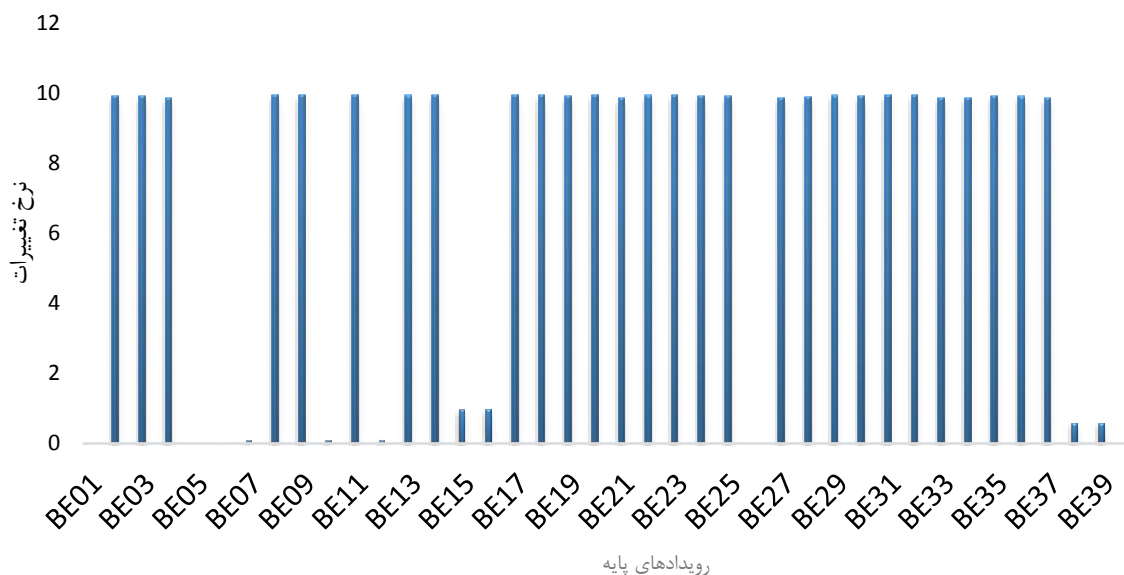
اگرچه یک مدلسازی قوی از علل پایه منجر به رویداد اصلی را فراهم می آورد ولی دارای محدودیت های مهم و زیادی می باشد که مهم ترین این محدودیتها استاتیک بودن و عدم توانایی آن برای سازگاری با حوادث پویا است که این مساله امروزه در تحلیل ایمنی صنایع فرآیندی بسیار حائز اهمیت می باشد. در این مطالعه برای رفع این محدودیت، از FTA بیزین شده (BFTA) استفاده شد. در BN پس از دریافت اطلاعات جدید مانند آمار شبه حوادث، حوادث و ... احتمالات وقوع پیشین رویدادهای پایه به روز رسانی می شوند و به عبارتی تحلیل ایمنی حالت پویا و دینامیک پیدا می کند (۱۶، ۱۷).

سیستم توزیع کننده ایستگاه CNG به عنوان بحرانی ترین تجهیز شناخته شد. که این مورد با نتایج حاصل از مطالعه بدری و رشتچیان (۳۳) که سیستم توزیع کننده و خطوط لوله گاز ایستگاه CNG بعنوان مهم ترین منابع خطر شناخته شدند، همسو است.

درخت خطا ترسیم شده نشان داد، در مجموع ۳۸ علت یا نقص (رویداد پایه) در رخداد نشت گاز توزیع کننده دخیل هستند که این امر حاکی از توانایی دقیق روش FTA است. جدول ۱ و ۲ نتایج تحلیل درخت خطا را ارائه می کند که احتمال وقوع رویداد اصلی (نشت گاز توزیع کننده)،  $9/67 \times 10^{-2}$  محاسبه گردید. روش FTA

جدول (۳) - نتایج احتمالات BFTA و FTA

احتمال پسین (BFTA)	احتمال پیشین (BFTA)	احتمال پیشین (FTA)	رویدادهای اصلی و میانی و پیامدها
۱	$9/11 \times 10^{-2}$	$9/67 \times 10^{-2}$	Top Event
$2/17 \times 10^{-1}$	$1/97 \times 10^{-2}$	$2/2 \times 10^{-2}$	IE01
$2/44 \times 10^{-1}$	$2/2 \times 10^{-2}$	$2/53 \times 10^{-2}$	IE02
$2/12 \times 10^{-1}$	$1/93 \times 10^{-2}$	$1/97 \times 10^{-2}$	IE03
$2/16 \times 10^{-1}$	$1/97 \times 10^{-2}$	$2/03 \times 10^{-2}$	IE04
$2/09 \times 10^{-1}$	$1/9 \times 10^{-2}$	$1/94 \times 10^{-2}$	IE05
$1/02 \times 10^{-2}$	$9/36 \times 10^{-4}$	$9/36 \times 10^{-4}$	IE06
$1/45 \times 10^{-1}$	$1/32 \times 10^{-2}$	$1/37 \times 10^{-2}$	IE07
$6/09 \times 10^{-2}$	$5/55 \times 10^{-2}$	$5/55 \times 10^{-2}$	IE08
$2/1 \times 10^{-1}$	$1/92 \times 10^{-2}$	$1/96 \times 10^{-2}$	IE09
$2/08 \times 10^{-1}$	$1/9 \times 10^{-2}$	$1/97 \times 10^{-2}$	IE10
$9/33 \times 10^{-2}$	$8/51 \times 10^{-2}$	$8/73 \times 10^{-2}$	IE11
$1/16 \times 10^{-1}$	$1/05 \times 10^{-2}$	$1/05 \times 10^{-2}$	IE12
$6/12 \times 10^{-2}$	$5/58 \times 10^{-2}$	$5/58 \times 10^{-2}$	IE13
$1/28 \times 10^{-2}$	$1/17 \times 10^{-4}$	$1/17 \times 10^{-4}$	IE14
$3/06 \times 10^{-2}$	$2/79 \times 10^{-2}$	$2/79 \times 10^{-2}$	IE15
$1/86 \times 10^{-1}$	$1/7 \times 10^{-2}$	$1/7 \times 10^{-2}$	IE16
$4/35 \times 10^{-2}$	$3/96 \times 10^{-2}$	$3/96 \times 10^{-2}$	IE17



شکل (۳) - نرخ تغییرات (RoV) احتمال شکست رویدادهای پایه ای

برابر  $9/67 \times 10^{-2}$  و نتایج مدل BFTA احتمال رخداد رویداد اصلی را  $9/11 \times 10^{-2}$  نشان داد که این مقدار پایین تر از مقدار بدست آمده از مدل FTA ( $9/67 \times 10^{-2}$ )

یکی از ویژگی های BFTA استدلال استقرایی است که احتمال وقوع رویداد اصلی را پیش بینی می کند (۱۱). نتایج FTA نشان می دهد که احتمال رخداد رویداد اصلی



معرض نور، گرما و سرما و برخورد خودروها و افراد با آن و همچنین نامناسب بودن جنس مواد بکار رفته در ساخت آن می تواند علت این امر باشد.

با توجه به شکل ۲ بعد از BE13 (ترک و خوردگی شلنگ توزیع کننده)، فلترینگ نامناسب (BE27) و ارزیابی نادرست خطرات (BE32)، عدم تعمیرات به موقع و مناسب (BE10) و خطای عمدی در انجام دستورات عمل (BE31) به ترتیب بیشترین افزایش در زمان به روز رسانی احتمال وقوع رویداد اصلی را دارند.

شکل ۲ نرخ تغییرات احتمال شکست رویدادهای پایه ای سناریو حادثه نشت گاز از سیستم توزیع کننده را نشان می دهد. همانطوریه که قابل مشاهده است BE13، BE14، BE17، BE18 و BE20 دارای بیشترین مقدار نرخ تغییرات احتمال می باشند که مهم ترین رویداد های پایه ای که بیشترین سهم در وقوع رویداد اصلی (نشت گاز سیستم توزیع کننده) دارند را نشان می دهد. بنابراین در صورت مقایسه نتایج شکل ۳ (نرخ تغییرات احتمال)، با شکل ۲ (مقایسه احتمال پیشین و پسین) مشخص می شود نتایج حاضر با نتایج شکل ۳ متفاوت است، بنابراین می توان نتیجه گرفت که صرفا تکیه بر احتمالات پیشین یا احتمالات پسین برای شناسایی رویدادهای بحرانی منجر به نتایج نادرست خواهد شد. که نتیجه مذکور با نتیجه حاصل از مطالعه زارعی و همکاران (۸) مطابقت دارد.

### نتیجه گیری

مطالعه حاضر، کاربرد رویکردی جامع و پویا به منظور تحلیل ایمنی ایستگاه های CNG را نشان می دهد. این رویکرد، تمام خطرات موجود در ایستگاه CNG را با استفاده از تکنیک FMEA شناسایی می کند. بر این اساس، نشت گاز توزیع کننده به عنوان بحرانی ترین خطر (رویداد اصلی) در ایستگاه شناسایی شد. شناسایی علل اصلی بروز نشت گاز توزیع کننده (رویداد اصلی) با استفاده از دیاگرام FTA، رویدادهای پایه ای و رویدادهای میانی انجام شد. دیاگرام FTA نشان داد که عوامل متعددی

است. همانطور که از جدول ۳ نیز قابل مشاهده است مقادیر احتمال محاسبه شده برای رویدادهای میانی و رویداد اصلی با استفاده از FTA و BFTA با هم اندکی اختلاف دارند. دلیل این اختلاف در نظر گرفتن وابستگی شرطی بین رویدادهای از نوع نقص با علل مشترک در مدل BFTA است که مدل FTA این توانایی را ندارد (۳۴).

مدل BFTA علاوه بر استدلال استقرایی توانایی استدلال قیاسی را نیز دارد که این امر اهمیت زیادی در تحلیل ریسک پویا دارد. زیرا امکان به روزرسانی احتمال رخداد های پایه را با دریافت آمار شبه حوادث، رویدادهای نامطلوب و ... در صنعت مورد مطالعه فراهم می آورد. این امر باعث می شود داده های مدل ساخته شده (داده های به روز شده یا پسین) به واقعیت نزدیک تر گردد و یک مدل بومی پویای تحلیل ریسک ساخته شود (۱۶، ۱۷). که این امر باعث کاهش عدم قطعیت در مدل و نتایج بدست آمده خواهد شد (۱۱).

نتایج استدلال استقرایی در ستون چهارم جدول ۲ نشان داده شده است. برای این منظور احتمال به روز شده یا پسین هر رویداد پایه  $BE_i$  با فرض بر احتمال رخداد رویداد پایه  $BE_i$  به شرط رخداد رویداد اصلی (نشت گاز توزیع کننده)،  $P(BE_i | \text{Gas leakage of dispenser})$  محاسبه میگردد. با به روز رسانی احتمال رخداد رویدادهای پایه، امکان انتخاب بحرانی ترین (تاثیرگذارترین) رویدادهای پایه که بیشترین سهم در وقوع رویداد اصلی را دارند وجود خواهد داشت.

همانطوریکه در شکل ۲ قابل مشاهده است، احتمال ترک و خوردگی شلنگ توزیع کننده (BE13) دارای بیشترین افزایش در زمان به روز رسانی احتمال وقوع رویداد اصلی از  $1/24 \times 10^{-2}$  تا  $1/36 \times 10^{-1}$  ( $RoV = 9,96$ ) است، لذا این رویداد به عنوان مؤثرترین (بیشترین سهم) متغیر در وقوع رویداد اصلی مورد مطالعه می باشد. با توجه به مشاهدات انجام شده به نظر می رسد که قرار گرفتن شلنگ توزیع کننده در

باید براساس نرخ تغییرات احتمال به جای صرفاً تمرکز بر احتمال های پیشین یا پسین انجام شود.

### تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه ای به شماره ۹۵۱۲۰۳۷۳۷۰ دانشگاه علوم پزشکی همدان می باشد. نویسندگان مقاله از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه سپاسگزاری می نمایند.

### REFERENCES

1. Chamberlain S, Modarres M. Compressed natural gas bus safety: a quantitative risk assessment. *Risk Analysis*. 2005;25(2):377-87.
2. Khan MI, Yasmin T, Shakoor A. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;51:785-97.
3. Mohammadfam I, Ghasemi F, Kalatpour O, Moghimbeigi A. Constructing a Bayesian network model for improving safety behavior of employees at workplaces. *Applied ergonomics*. 2017;58:35-47.
4. Parvini M, Kordrostami A. Consequence modeling of explosion at Azad-Shahr CNG refueling station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014;30:47-54.
5. Berghmans J, Vanierschot M. Safety aspects of CNG cars. *Procedia Engineering*. 2014;84:33-46.
6. Mohammadfam I, Sajedi A, Mahmoudi S, Mohammadfam F. Application of Hazard and Operability Study (HAZOP) in evaluation of health, safety and environmental (HSE) hazards. *International Journal of occupational hygiene*. 2012;4(2):17-20.
7. Azadeh A, Mohammad Fam I. A framework for development of integrated intelligent human engineering environment. *Information Technology Journal*. 2006;5(2):290-9.
8. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of hazardous materials*. 2017;321:830-40.

به تنهایی یا در کنار هم در وقوع رویداد اصلی می توانند دخیل باشند. به منظور به روز رسانی احتمال و تعیین نحوه روابط علل ایجاد کننده رویداد اصلی و همچنین شناسایی مؤثرترین عامل در بروز رویداد اصلی، دیاگرام FTA به داخل شبکه بیزین (BN) انتقال یافت. بر اساس تحلیل درخت خطای بیزین شده (BFTA) ترک و خوردگی شلنگ توزیع کننده به عنوان مهم ترین عامل در وقوع نشت گاز سیستم توزیع کننده شناخته شد. نتایج مطالعه نشان می دهد که شناسایی رویدادهای پایه ای بحرانی

9. Han Z, Weng W. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of hazardous materials*. 2011;189(1-2):509-18.
10. Park K, Mannan MS, Jo Y-D, Kim J-Y, Keren N, Wang Y. Incident analysis of Bucheon LPG filling station pool fire and BLEVE. *Journal of hazardous materials*. 2006;13(1):62-7.
11. Azadeh MA, Keramati A, Mohammadfam I, Jamshidnejad B. Enhancing the availability and reliability of power plants through macroergonomics approach. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2006;65(11):873-8.
12. Kalatpour O. P-HAZOP: A New Extended HAZOP (Hazard and operability study) for Pipelines Risk Analysis. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2018 Jul 24;10(2).
13. Badri N, Nourai F, Rashtchian D. Quantitative Risk Assessment to Site CNG Refueling Stations. *Chemical Engineering Transactions*. 2010;19:255.
14. Yong L, Sui Y, editors. Risk analysis for explosion and burning of compressed natural gas (CNG) station vehicles exclusively. *Industrial Mechatronics and Automation, 2009 ICIMA 2009 International Conference on; 2009: IEEE*.
15. Heyrani P, Baghaei A. Risk assessment in gas and oil pipelines based on the fuzzy Bow-tie technique. *Health and Safety at Work*. 2016 Apr 15;6(1):59-70.
16. Mohammadfam I, Moghimbeigi A. Evaluation of injuries among a manufacturing industry staff in Iran. *Journal of research in health sciences*. 2009;9(1):7-12.

17. Shirali GA, Motamedzade M, Mohammadfam I, Ebrahimipour V, Moghimbeigi A. Assessment of resilience engineering factors based on system properties in a process industry. *Cognition, Technology & Work*. 2016;18(1):19-31.
18. Amiri M, Ardeshir A, Abbasi A. Hybrid approach for occupational hazard assessment in road construction projects. *Health and Safety at Work*. 2019 Jan 15;8(4):345-58.
19. Li X, Chen G, Zhu H. Quantitative risk analysis on leakage failure of submarine oil and gas pipelines using Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*. 2016;103:163-73.
20. Zhang G, Thai VV. Addressing the epistemic uncertainty in maritime accidents modelling using Bayesian network with interval probabilities. *Safety science*. 2018;102:211-25.
21. Chen JK. Utility priority number evaluation for FMEA. *Journal of failure analysis and Prevention*. 2007;7(5):321-8.
22. Puente J, Pino R, Priore P, de la Fuente D. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2002;19(2):137-50.
23. Hu AH, Hsu C-W, Kuo T-C, Wu W-C. Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. *Expert Systems with Applications*. 2009;36(3):7142-7.
24. Xiao N, Huang H-Z, Li Y, He L, Jin T. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*. 2011;18(4):1162-70.
25. Cai B, Liu Y, Zhang Y, Fan Q, Liu Z, Tian X. A dynamic Bayesian networks modeling of human factors on offshore blowouts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013;26(4):639-49.
26. Zulqarnain M, Tyagi M, editors. Quantification of Risks Associated With a Representative Production Well in the Gulf of Mexico. ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering; 2015: American Society of Mechanical Engineers.
27. Aiyou W, Shiliang S, Runqiu L, Deming T, Xiafang T. City fire risk analysis based on coupling fault tree method and triangle fuzzy theory. *Procedia Engineering*. 2014;84:204-12.
28. Khan FI, Abbasi S. Analytical simulation and PROFAT II: a new methodology and a computer automated tool for fault tree analysis in chemical process industries. *Journal of Hazardous Materials*. 2000;75(1):1-27.
29. Abimbola M, Khan F, Khakzad N, Butt S. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Safety science*. 2015;76:133-44.
30. Khakzad Rostami N. Dynamic safety analysis using advanced approaches: Memorial University of Newfoundland; 2012.
31. Cai B, Liu Y, Liu Z, Tian X, Zhang Y, Ji R. Application of Bayesian networks in quantitative risk assessment of subsea blowout preventer operations. *Risk Analysis*. 2013;33(7):1293-311.
32. Bobbio A, Portinale L, Minichino M, Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2001;71(3):249-60.
33. Badri N, Nourai F, Rashtchian D. The role of quantitative risk assessment in improving hazardous installations siting: a case study. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCCE)*. 2011;30(4):113-9.
34. Yuan Z, Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Risk analysis of dust explosion scenarios using Bayesian networks. *Risk analysis*. 2015;35(2):278-91.

# Dynamic Safety Analysis in CNG Stations Using a Hybrid Fault Tree Approach and Bayesian Network Techniques

Tahereh Eskandari<sup>1</sup>, Mostafa Mirzaei Aliabadi<sup>2</sup>, Iraj Mohammadfam<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Occupational Health Engineering, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

<sup>2</sup> Department of Health, Safety and Environment Management, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.

## Abstract

**Introduction:** The safety of CNG stations is important because of their location in urban areas, as well as to prevent accidents and to protect the safety of personnel, property, and environment. An event occurrence analysis with probability updating is the key to dynamic safety analysis.

**Material and Methods:** In this study, the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique was used to determine the hazards of the study unit, the method of analyzing. After determining the hazards with high risk, the Bayesian fault tree analysis (BFTA) method was used to determine the effective causes of events occurrence and the type of possible relationships among them.

**Results:** First, the phase of hazards identification, 16 Hazardous equipment were identified. Then the Risk Priority Number for the identified equipment was calculated. The results showed that the dispenser system had the highest risk priority number and was identified as the most critical equipment. According to this, the dispenser gas leakage (as the top event) was selected in this study. Then, the analysis of the dispenser gas leakage, using BFTA method identified 56 main causes, including 17 intermediate events and 39 basic events. Finally, cracking and corrosion of the dispenser hose were determined the most effective factor in the occurrence of the top event. The probability of occurrence of the top event based on FTA and BFTA analysis was calculated  $9.67 \times 10^{-2}$  and  $9.11 \times 10^{-2}$ , respectively.

**Conclusion:** The result of the study that by employing the Bayesian Network, can create a useful guideline to determine the relationship between the occurrence causes of the top event. This provides an assessment of the effectiveness of preventive measures before using them.

**Keywords:** Dynamic Safety, Bayesian Network, Fault Tree Analysis, FMEA

\*Corresponding Author: Iraj Mohammadfam

Email Address: Mohammadfam@umsha.ac.ir

## 1. Introduction

Natural gas is a clean, economical, and environmentally beneficial energy source with a lot of uses in today's world [1]. It is primarily composed of methane, which is highly flammable and explosive. A mixture of 4.5 to 16.5 percent of methane in the air is flammable and explosive, and its ignition energy is 280 micro Joules. Methane can be used as a compressed fuel for vehicles [2]. Due to the CNG stations locations, they are potentially dangerous where as have a high safety importance. As a result, the safety of people has been a major concern since the start of the commercial use of compressed natural gas as a new type of vehicle fuel [2, 3]. Having considered these, safety analysis is very important at CNG facilities. An event occurrence analysis with probability updating is the key to dynamic safety analysis. The purpose of the current study is a comprehensive and dynamic safety analysis of CNG stations.

## 2. Material and Methods

In this study, the failure modes and effect the hazards of the study unit. This technique provides a very powerful and effective analytical tool that identifies and counts process weaknesses [4]. Using this method, the Risk Priority Number (RPN) of identified hazards was calculated and for the risk with the highest risk priority number, the top event was determined. FTA technique was applied to identify and analysis to occurrence causes of the top event. FTA is a logical and hierarchical model that

shows the occurrence of the undesired accident by combining the intermediate events and basic events. Commonly, the undesired accident was regarded as the top event of the fault tree. In FTA, the logical "AND" and "OR" gateways were applied to show the relationship among events and their causes [5]. Then, Bayesian Fault Tree Analysis method (BFTA) was used to determine the effective causes of events occurrence and the type of their possible relationships and the dynamics of risk analysis,. Bayesian network model shows the severity of the quantitative relation between variables, allowing the probabilities to be updated by accessing new information [6].

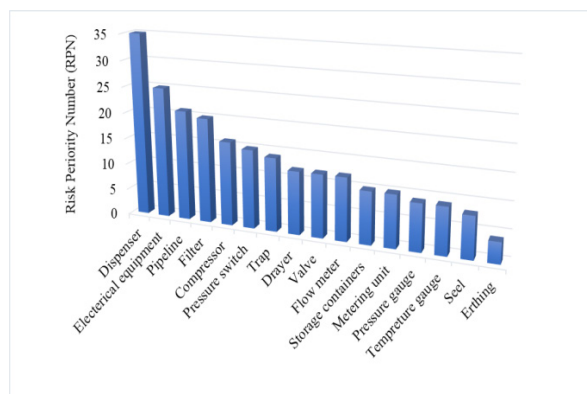
It is important to identify the most effective basic events in systems safety analysis. To this end, using updated basic events probability values lonely to determine the most effective basic events may cause errors in selecting these events. To avoid this, the ratio of variation (RoV) can be used to select the most effective basic events [7].

## 3. Results and Discussion

In the phase of hazards identification, 16 hazardous equipment risk were identified. Then the Risk Priority Number for the identified equipment was calculated and was shown in Figure 1. RPN for all hazard sources in CNG stations. As seen in this figure, the dispenser system had the highest risk priority number and was identified as the most critical equipment. Considering all above, the dispenser gas leakage (as the top event) was selected in this study.

Dispenser gas leakage (top event) Fault Tree was assessed and was shown in Figure 2. Identification of the main causes of dispenser gas leakage system were collected through direct observations, interviews with experts, and review of documents and operational maps. In the present study, the occurrence probability of events was obtained from the databases such as OREDA and the experts' opinion in this field.

Although, the FTA method provides a powerful modelling of the basic causes leading to the top event, it has many important limitations, the most



**Fig. 1.** CNG Station Equipment Ranking by Risk Priority Number.

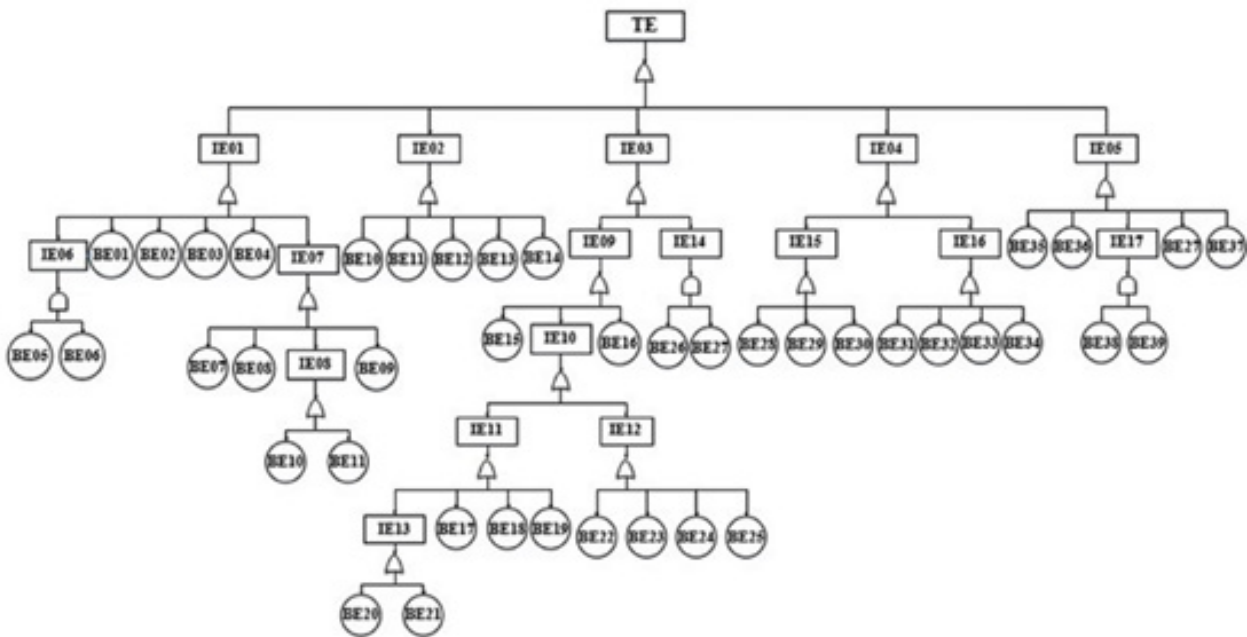


Fig. 2. The fault tree of the dispenser gas leakage.

important of which are static and inability to adapt dynamic events, that nowadays this issue has become significantly more important in the safety analysis of process industries (6). In the currently study, in order to eliminate the limitations of the FTA, Bayesian Fault Tree Analysis method (BFTA) was used. The analysis of the dispenser gas leakage, using BFTA was identified 56 main causes, including 17 intermediate events and 39 basic events.

One feature of the BFTA is deductive reasoning to predict the top event occurrence probability (8). The FTA results was cleared the occurrence probability of the top event was  $9.67 \times 10^{-2}$  and the results of the BFTA model was indicated the occurrence probability of the top event  $9.11 \times 10^{-2}$ , which is lower than the value was obtained from the FTA model. This is due to the consideration of a conditional dependency among basic events in BFTA, which cannot be considered in FTA.

Despite to the deductive reasoning, BFTA model has the capability of inductive reasoning, which is very important in dynamic safety analysis (8). Because, allowing the probabilities to be updated by accessing new information. In order to update the BFTA constructed model, the top node

(Dispenser gas leakage) was taken into account as evidence and the prior and posterior probabilities of all the basic and intermediate events were updated. In order to identify the most effective basic events in the top event occurrence prior and posterior probabilities of basic events were comprised that was shown in Figure 3.

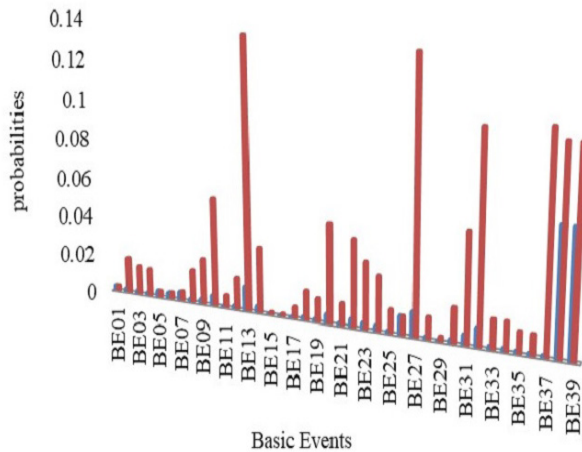
RoV in the basic events failure probability of the dispenser gas leakage incident was shown in Figure 4.

In the present study, comparison of Figure 3 (Comparison between the prior and posterior probabilities of basic events) with Figure 4 (RoV) were concluded to different results. In this research, the probability of cracking and corrosion dispenser hose (BE13) significantly increased from  $1.24 \times 10^{-2}$  to  $1.36 \times 10^{-1}$  (the ratio of variation (RoV) = 9.96), as the most effective basic event contributors to dispenser gas leakage.

#### 4. Conclusion

The present study was demonstrated the application of a comprehensive and a hybrid to the CNG station safety analysis using FMEA, FTA, and BFTA techniques. Accordingly, the dispenser gas leakage was identified as the most critical hazard



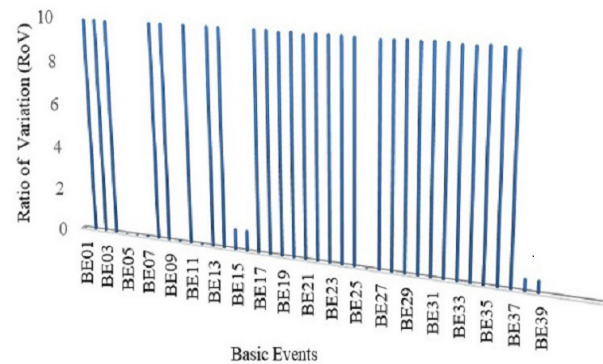


**Fig. 3.** Comparison between the prior and posterior probabilities of basic events.

(top event) in CNG stations. BFTA method was used to identify the main causes of the dispenser gas leakage occurrence probability, update and the relationship among the causes of the top event and the most effective factor in the occurrence of the top event. Based on BFTA analysis, crack and corrosion of the hose were identified as the most effective factor in the dispenser gas leakage. The results of the study was indicated that identification of critical basic events should be carried out based on the ratio of variation of probabilities instead of only focusing on prior or posterior probabilities.

## 5. References

1. Khan MI, Yasmin T, Shakoor A. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;51:785-97.
2. Parvini M, Kordrostami A. Consequence modeling of explosion at Azad-Shahr CNG refueling station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014;30:47-54.
3. Han ZY, Weng WG. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;189(1):509-18.
4. Chen JK. Utility priority number evaluation for FMEA. *Journal of failure analysis and Prevention*. 2007;7(5):321-8.
5. Zulqarnain M, Tyagi M, editors. Quantification



**Fig. 4.** RoV of the basic events probabilities.

of Risks Associated With a Representative Production Well in the Gulf of Mexico. *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*; 2015: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

6. Abimbola M, Khan F, Khakzad N, Butt S. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. *Safety science*. 2015;76:133-44.
7. Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, Aliabadi MM, Mohammadfam I. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of hazardous materials*. 2017;321:830-40.
8. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*. 2013;91(1-2):46-53.