مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دوره ۱، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳، صفحات ۱۹ تا ۲۸

مقاله پژوهشی

تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای حوادث فرایندی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری با استفاده از تکنیک های تحلیل خطرات عملکردی و تحلیل پاپیونی

فاطمه خسروی راد[۱]، اسماعیل زارعی[۲]، ایرج محمد فام*[۳]، اسماعیل شجاع[٤]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۳۰

چکیده

زمینه وهدف: جهت کنترل و پیشگیری از حوادث توجه به علل ریشه‌ای وقوع حوادث بسیار حائز اهمیت است. ریسک ایمنی واحدی فرآیندی واقع شده در کلان شهرها بایستی همواره تحت کنترل و مطابق با معیارهای پذیرش ریسک جامعه باشد. در همین راستا، مطالعه حاضر با هدف شناسایی نقص‌های عملکردی و تحلیل علل ریشه‌ای و پیامدهای نهایی ناشی از انتشار گاز در ایستگاه‌های تقلیل فشار شهری انجام گرفت.

روش بررسی: نخست با بکارگیری همزمان دو روش آنالیز خطرات عملکردی (FuHA) و حالات شکست و تجزیه و تحلیل اثرات آن (FMEA) شناسایی محل‌های وقوع شکست به همراه آنالیز کیفی ریسک آن‌ها انجام گرفت. جهت شناسایی و تجزیه و تحلیل علل وقوع حادثه از روش آنالیز پاپیونی) Tie (Bow استفاده گردید.

یافته‌ها: احتمال وقوع رویداد اصلی مورد نظر (نشت گاز سنسینگ) ، برابر۰/۷۱و نرخ وقوع آن ۱/۲٤ در سال است. رفتارهای ناایمن (FP=۰/۳٦ و ۰/٤٤٦=) بیش‌ترین و علل مکانیکی (FP=۰/۱۳۳ و ۰/۱٤۲=) کمترین سهم در وقوع رویداد اصلی داشتند. در بین پیامدهای نهایی شناسایی شده، انفجار ابر بخار (VCE) دارای بیش‌ترین احتمال وقوع (FP=۰/۲۱٦) و نرخ وقوع(۰/۲٤۳=) بود.

نتیجه‌گیری: پیشگیری از وقوع علل ریشه‌ای و توجه به علل انسانی سهم قابل‌توجهی در کنترل حوادث واحدهای فرآیندی دارد. در روش ترکیبی مورد استفاده در این مطالعه، در صورتی‌که نقش موانع در برابر وقوع علل ریشه‌ای و پیامدهای نهایی در نظر گرفته شود، می‌تواند یک روش مناسب برای شناسایی علل ریشه‌ای و کنترل مخاطرات فرآیندی باشد.

کلیدواژه‌ها: حادثه، ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری، مدیریت ریسک، تحلیل پاپیونی

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

۲. دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی بهداشت حرفه‌ای ، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

۳*. (نویسنده مسئول) دانشیار مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی همدان، ایران، پست الکترونیک: Mohammadfam@umsha.ac.ir

٤.اداره بهداشت، ایمنی و محیط زیست ، شرکت ملی گاز، تهران، ایران.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

مقدمه

توسعه فناوری‌های بسیار پیچیده و پراهمیت در صنایع مختلف، به ویژه در صنایع مخاطره‌آمیز سبب شده است که فلسفه ایمنی از رویکرد پس از وقوع به رویکرد پیش از وقوع تغییر یابد رویکرد جدید بر پایه شناسایی و کنترل علل ریشه‌ای حوادث پیش از وقوع آن‌ها است[۱].

تحلیل حوادث بزرگ فرآیندی، نشان داده‌است که بخش بزرگی از آسیب و خسارتهای حوادث و احتمال وقوع آن‌ها، نه‌تنها قابل پیشگیری است، بلکه قابل پیش‌بینی نیز می‌باشد، مشروط بر اینکه اقداماتی مانند شناسایی علل ریشه‌ای و پیامدهای نهایی آن‌ها و کنترل آن‌ها به موقع انجام گیرد(۲). تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای حوادثی همچون رها شدن مواد شیمیایی قابل اشتعال و انفجار در محیط، یکی از ضروری‌ترین مراحل برای افزایش سطح ایمنی در واحدهای موجود یا در حال طراحی فرآیندی است[۳].

ریسک حوادث شدید(severe accident)یک معیار مهم برای تصمیم‌گیری رسمی و کمی‌سازی دقیق و جامع ریسک می‌باشد. در سالهای اخیر تلاشهای زیادی صورت گرفته است که نه تنها از وقوع حوادث شدید پیشگیری شود، بلکه شدت پیامد آن‌ها نیز کاهش یابد[۴, ۵] که این امر مستلزم آگاهی از علل ریشه‌ای وقوع حوادث می‌باشد تا قادر بود با کمترین هزینه، بیش‌ترین پیشگیری و کنترل برروی سناریوهای محتمل وقوع حوادث انجام داد.

اداره ایمنی خطوط لوله گاز آمریکا (Federal Office of Pipeline Safety) در سال ۲۰۰۱ به منظور تأمین ایمنی مناطق مسکونی و جلوگیری از خسارت به مناطق مسکونی و غیرصنعتی مجاور سایتهای مخاطره‌آمیز، فواصل بین منابع خطر و این مناطق را مورد بررسی و انطباق قرارداد. هدف از این اقدام، توجه و تأمین ایمنی افراد شاغل و ساکن در مجاورت مناطق صنعتی و یا سایت-های مخاطره‌آمیز و کاهش هر چه ممکن فواصل تاثیرگذار حوادثی مانند حریق و انفجار ناشی این تاسیسات می‌باشد[۶].

توجه به این موضوع برای سایت‌های مانند ایستگاه‌های تقلیل فشار گازی شهری که در داخل شهر و در مناطقی با تراکم بالای جمعیت به خصوص در کلان شهرهایی مانند تهران قرار دارند، اقدام بسیار حیاتی می‌باشد.

حوادث اصلی در چنین ایستگاه‌هایی حریق و انفجار می‌باشد که از نظر بعد تلفات و خسارت‌های ایجاد شده و میزان وقوع، انفجار از اهمیت بیشتری برخودار است. آمار انفجار و میزان خسارت آن در صنایع فرآیندی در متون علمی زیادی ذکر و بحث شده است [۷-۹].

در ایران نیز صنایع فرآیندی و متعاقبا حوادث آن‌ها در دهه‌های اخیر رشد چشمگیری داشته‌است[۱۰،۱۱]. جلوگیری از تکرار وقوع چنین حوادث بزرگ، فقدان قوانین جامع و دقیق ایمنی فرآیندی در کشور مانند مدیریت ایمنی فرآیندی(process safety management of osha)[۱۲]، نظارت ضعیف بر اجرای قوانین موجود و سطح فرهنگ ایمنی نه چندان بالای صنایع موجود در کشور، ضرورت توجه به اجرای مطالعات دقیق ارزیابی ریسک انفجار به خصوص در سایت‌های مانند ایستگاه‌های TBS که در داخل کلان شهرها قرار دارد که در صورت وقوع، خسارت‌های انسانی و مالی به مراتب ببیشتری دارند، بیش از پیش احساس می‌گردد.

در فرایند مورد مطالعه گاز با فشار ۲۵۰psi و دمای ۶۰ درجه فارنهایت از طریق خطوط لوله ایستگاه CGS وارد ایستگاه TBS می‌گردد، خط لوله گاز ورودی به ایستگاه به سه خط لوله تبدیل و در نهایت از طریق یک خط لوله از ایستگاه خارج می‌گردد.

مطالعات متعددی برروی حوادث صنایع فرآیندی انجام گرفته است که بیشتر تمرکز برروی ارزیابی و مدلسازی ریسک انفجار و حریق در این صنایع داشته‌است [۱۵-۱۳،۱۱-۷، ۵،۲]. ولی مطالعات اندکی در زمینه شناسایی و تحلیل علل ریشه‌ای وقوع این حوادث انجام گرفته‌است. متاسفانه هیچ‌گونه منبع و بانک داده معتبر جهت ثبت حوادث فرآیندی ایستگاه‌های TBS در کشور موجود نمی‌باشد و نمی‌توان آمار دقیقی از حوادث آن‌ها را ذکر کرد. از طرف دیگر جستجوی علمی در پایگاه‌های معتبر اسناد علمی، نشان داده که تاکنون مطالعه خاصی در زمینه ارزیابی ریسک و تجزیه و تحلیل علل حوادث فرآیندی در چنین ایستگاه-های انجام نشده است، لذا ضرورت انجام این مطالعه با توجه به پتانسیل بالای وقوع حوادث با خسارت جانی و مالی زیاد در این ایستگاه ها پیش از پیش احساس گردید.

برای تجزیه و تحلیل علل حوادث روش‌های مختلفی از جمله، آنالیز موانع، روش استخون ماهی ، تریپوید بتا و آنالیز علت-پیامد وجود دارد. این روشها نگرش کیفی دارند و اغلب متکی به تحلیل ذهنی، سلیقه و تجارب افراد هستند،که این امر سبب افزایش خطا و کاهش دقت نتایج می‌گردد. از طرفی هم این روشها فاقد توانایی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

لازم برای کمی‌سازی علل شکست‌ها، شناسایی پیامدهای نهایی نشت مواد و نقص‌های عملکردی می‌باشند، به همین خاطر در این مطالعه از روشهایی که توانایی بیشتری در جهت رفع نواقص تکنیک‌های فوق دارند و با اهداف مطالعه نیز سازگاری بیشتری دارند، استفاده گردید.

لذا مطالعه حاضر با هدف شناسایی نقص‌های عملکردی و تحلیل کیفی و کمی علل ریشه و پیامدهای نهایی ناشی از انتشار گاز در ایستگاه‌های تقلیل فشار درون شهری با استفاده از روش‌های (failure mode and effects analysis) FMEA و (Functional Hazard Analysis) FuHA و آنالیز پاپیونی انجام گرفت.

روش بررسی

پس از آشنایی با واحد مورد نظر طی چهار مرحله، مطالعه حاضر طبق اهداف از پیش تعیین شده به صورت زیر انجام شد:

مرحله اول: شناخت کامل ایستگاه TBS

در این مرحله تمام اطلاعات مربوط به واحد فرآیندی مورد نظر جهت ارزیابی ریسک انفجار جمع‌آوری گردید. که شامل موقعیت جغرافیایی ایستگاه، نقشه‌های فرآیندی (Plot plan, P&IDs, PFDs)، نقشه‌های جانمایی و مکان‌یابی ایستگاه، رویه‌های عملیاتی و تعمیرات ایستگاه، خواص فیزیکی و شیمیایی مواد موجود در فرآیند (MSDS) و... است.

مرحله دوم: شناسایی خطرات با استفاده از روش‌های FuHA و FMEA

این مرحله از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد، چراکه عدم شناسایی مخاطرات بالقوه، یعنی نادیده گرفتن پیامدها و ریسک-های آن‌ها. FMEA یک روش کیفی و استقرایی در شناسایی نقص‌های اجزای یک سیستم و ارزشیابی اثرات حالات نقص‌های اجزاء یک سیستم می‌باشد که به‌منظور حذف یا کاهش احتمال وقوع نقص و مستندسازی آن‌ها در سیستم تحت بررسی انجام می‌شود [۱۶].

ابتدا با استفاده از روش FMEA ضمن شناسایی اجزاء اصلی سیستم، نقص‌های احتمالی آن‌ها نیز شناسایی شده و با استفاده از روش‌های معمول، درجه ریسک هر نقص تعیین شد. برای رتبه‌بندی شدت خطر براساس نظر خبرگان و متخصصان از یک مقیاس ۷ رتبه‌ای، که رتبه ۱ یعنی هیچگونه اثر سوء شناخته شده‌ای برای کارکنان، محیط زیست و دارایی سازمان ندارد و رتبه ۷ نشان‌دهنده اینست که خطر باعث از کار افتادگی دائم و یا فوت حداقل یک نفر از کارکنان می‌گردد. همچنین جهت رتبه بندی احتمال وقوع خطر نیز از یک مقیاس ۷ رتبه‌ای، که رتبه ۱ نشان‌دهنده‌ی وقوع خطر یا رخ داد شکست حتمی است و رتبه۷ نشان دهنده اینست وقوع خطر بعید به نظر می‌رسد.

جهت تعیین درجه کشف خطرات (کشف عیب) نیز از یک مقیاس ۷ رتبه‌ای، که رتبه ۱ نشان‌دهنده اینکه، با کنترل‌های موجود و جاری در سیستم خطرهای بالقوه بطور صدرصد ردیابی و آشکار می‌گردد و رتبه ۷ نشان‌دهنده، مطلقاً امکان تشخیص ندارد، می‌باشد.

آنالیز خطر عملکردی FuHA یک تکنیک قوی،کارآمد و جامع برای آنالیز ایمنی سیستم و پیدا کردن خطرات و وسیله‌ای برای مشخص کردن ریسک‌ها از طریق ارزیابی دقیق سیستم است. FuHA اثر حوادث ناشی از عیب و نقص‌ها و خطاهای عملکردی و سوء عمل‌های عملکردی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. هدف FuHA تعیین خطرات سیستم بوسیله آنالیز عملکردی است، آنالیز خطر عملکردی، تأثیر بسزایی در اجرای هرچه بیشتر FMEA دارد. خروجی‌های این روش شامل خطرات عملکردی، عملکردهای ایمنی بحرانی، منابع مسبب خطر، ریسک‌های سیستم و نیازمندی‌های سیستم می‌باشد که ورودی مرحله بعدی است [۱۷].

مرحله سوم: ارزیابی ریسک‌های شناسایی شده

FTA یک مدل منطقی گرافیکی است که چگونگی وقوع یک حادثه ناخواسته را از ترکیب چند حادثه بنیانی نشان می‌دهد. آن حادثه ناخواسته معمولاً به نام واقعه رأس درخت خطا معرفی می‌شود. این آنالیز راه‌های متفاوتی که منجر به این حادثه می‌شود را مشخص کرده و با داشتن داده‌های صحیح قادر به محاسبه احتمال و دفعات تکرار این واقعه می‌باشد. تکنیک تجزیه و تحلیل درخت خطا در سه مرحله‌ی ساخت درخت خطا، تجزیه و تحلیل کیفی درخت خطا وتجزیه و تحلیل کمی درخت خطا برای هر خطر غیر قابل قبول انجام می‌گیرد [۱۶].

جهت ساخت درخت خطا، بعد از شناسایی کانون‌های خطر ایستگاه مورد مطالعه و به‌دست‌آوردن عدد اولویت ریسک (RPN)، درخت خطا با برگزاری پنل‌های تخصصی با حضور متخصصان ایمنی و افرادی که دارای دانش فرآیندی از ایستگاه تقلیل فشار گاز بودند، برای مخاطراتی که عدد الویت ریسک آن‌ها بالا بود ترسیم گردد. برای استخراج احتمال وقوع رویدادهای پایه که نقطه

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

شروع کمی‌سازی درخت کمی است، از نظرات خبرگان و... [۱۸, ۱] استفاده گردید.

در مواردی که واقعه پایه از نوع عامل انسانی بود، احتمال طبق رابطه با استفاده از روش TESEO به صورت زیرمحاسبه گردید[۱۹].

$$P = K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times 5$$

احتمال بروز خطای انسانی: P

K1: ضریب نوع فعالیت (معمول، غیر معمول)

K2: ضریب استرس موقت (وابسته به فرصت زمانی)

K3: ضریب کیفیت کار اپراتورها (وابسته به میزان اموزش)

K4: ضریب اظطراب فعالیت (وابسته به موقعیت بوجود آمده)

K5: ضریب ارگونومی (وابسته به سهل‌الاستفاده بودن وسایل)

در ادامه براساس ارتباط منطقی بین رویدادهای پایه با رویدادهای میانی، احتمال رویدادهای میانی و در نهایت احتمال رویداد اصلی از طریق قوانین ترکیب دروازها طبق روابط زیر محاسبه گردید.

قوانین ترکیب دروازه‌ها:

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

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

برای بیش از دو حادثه نیز نتایج مشابهی برقرار است. بطور مثال ترکیب سه حادثه A، B و C با دروازه OR به صورت زیر است:

$$P(A+B+C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A).P(B) -$$

$$+ P(A).P(B).P(C)\ P(A).P(C) - P(B).P(C)$$

مقدار λ یا نرخ نقص در واحد سال به صورت زیر محاسبه می‌شود.(P و t به ترتیب نشان دهنده احتمال و زمان یک سال می‌باشد).

$$P = 1 - e^{-\lambda t}, \qquad \lambda = -Ln(1 - P$$

مرحله چهارم: آنالیز رویداد منتخب با استفاده از آنالیز پاپیونی Bow tie

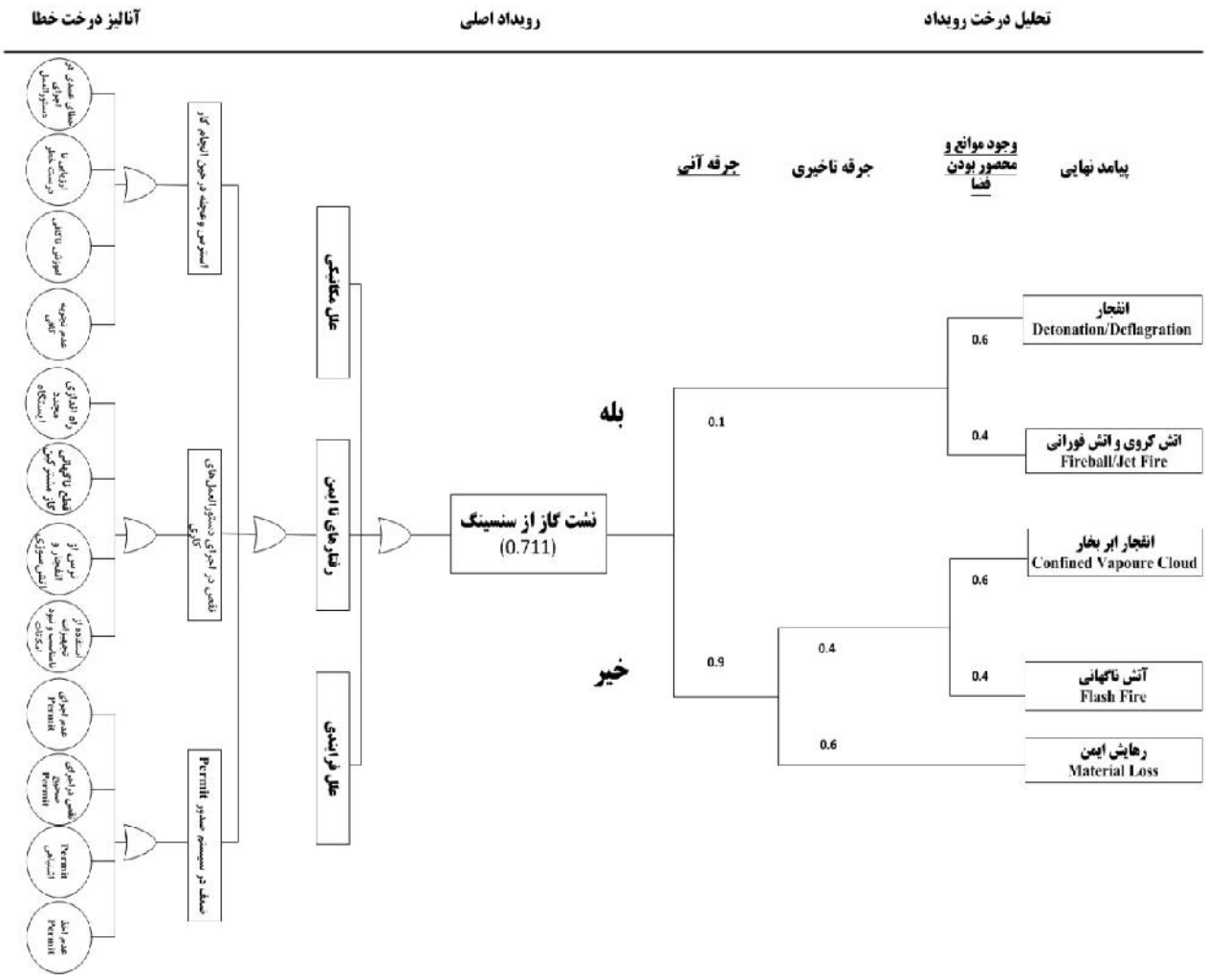
تکنیک پاپیونی(Bow-Tie) از موثر و نوین‌ترین روش‌های تجزیه و تحلیل علل وقوع حوادث به شمار می‌رود. این تکنیک سیستماتیک تحلیلی، ایده‌ای است ساده از ترکیب درخت خطا (Fault Tree) و درخت رویداد (Event Tree). روش تحلیل درخت رویداد به منظور محاسبه احتمال پیامدهای متنوعی که در صورت وقوع یک واقعه ابتدایی ممکن است رخ دهد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.در هر مرحله از درخت رویداد با طرح پرسش‌هایی شاخه‌های درخت افزایش یافته و در نهایت لیستی از وقایع نهایی معین می‌شود که احتمال آن با توجه به احتمال شاخه‌های درخت رویداد محاسبه می‌گردد[۲۰]. اجرای روش‌های بکار گرفته در این مطالعه، از طریق برگزار پنل‌های تخصصی با حضور افراد مختلف از جمله، مهندسین بهداشت صنعتی، ایمنی صنعتی، مهندسی شیمی گرایش فرآیند، اپراتور و تکنسین‌های ایستگاه‌های TBS و مشاوره اساتید ایمنی دانشگاه صورت گرفت.

نتایج

جدول ۱ نتایج محاسبات عدد الویت ریسک کانون‌های خطر شناسایی‌شده در ایستگاه TBS را نشان می¬دهد. بعد از اینکه کانون‌های خطر شناسایی گردید، بر اساس جداول تکنیک FuHA و FMEA از طریق برگزار پنل‌های تخصصی با حضور متخصصان ایمنی و افرادی عملیاتی مربوطه میزان شدت وقوع خطر، نرخ وقوع خطر و درجه تشخیص خطر برای تک‌تک کانون‌های شناسایی‌شده تعیین گردید و از حاصل‌ضرب سه پارامتر مذکور، عدد الویت ریسک استخراج گردید. نتایج مطالعه نشان داد که بیش‌ترین عدد الویت ریسک ایستگاه TBS مربوط به سنسینگ (RPN=۲۴) می‌باشد که نقش حیاتی در تنظیم فشار ایستگاه دارد. بعد از سنسینگ، لوله و اتصالات (فلنج¬ها) رتبه دوم عدد اولویت ریسک (RPN=۲۱) را به خود اختصاص دادند(جدول ۱).

جدول ۲ احتمال شکست و نرخ وقوع نقص‌های اصلی ایستگاه‌های TBS را نشان می‌دهد، بر اساس نتایج، بیش‌ترین احتمال شکست و نرخ وقوع نقص مربوط به رفتارهای ناایمن (FP (failure probability) = ۰/۴۴۶ λ) و کمترین احتمال شکست و نرخ وقوع نقص (FP=۰/۱۳۳ و ۰/۱۴۲=) مربوط به علل مکانیکی بود (جدول ۲).

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]



شکل۱ -خروجی آنالیز نشتی گاز از سنسینگ در ایستگاه‌های TBS با استفاده از روش آنالیز پاپیونی

جدول۲- نتایج محاسبات احتمال شکست و نرخ وقوع نقص‌ها

نوع نقص	احتمال شکست	نرخ وقوع(در سال)
رفتارهای ناایمن	۳٦۱/۰	٤٤٦/۰
علل فرایندی	۰/۲۱۸	۰/۲٤٦
علل مکانیکی	۱۳۳/۰	۰/۱٤۲
نشت گاز از سنسینگ	۷۱۱/۰	۱/۲٤۱

احتمال و نرخ وقوع پیامدهای نهایی ناشی از نشت گاز در ایستگاه‌های TBS در جدول ۳ نشان داده شده است. تمام پیامدهای نهایی که ممکن است در اثر وقوع نشتی گاز در ایستگاه TBS ممکن است رخ دهد در شکل ۱ با استفاده از آنالیز پاپیونی نیز نشان داده شده است. نتایج مطالعه نشان داد که در صورت نشتی گاز، رهایش ایمن مواد که از دست دادن مواد را نیز همراه دارد دارای بیش‌ترین احتمال و نرخ وقوع می‌باشد(FP۰/۳۸۴= و ۰/۴۸۴). در بین پیامدهای که از نظرگاه ایمنی حائز اهمیت می‌باشد، انفجار ابر بخار(VCE) دارای بیش‌ترین احتمال شکست و نرخ وقوع نقص می‌باشد(۰/۲۱۶ FP= و ۰/۲۴۳).

شکل ۱ ترسیم آنالیز پاپیونی انجام‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد، در سمت چپ درخت خطای و در سمت راست آن‌ها

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

تحلیل پیامدهای نهایی ناشی از نشت گاز با استفاده از درخت رویداد نشان داده شده است. در شاخه‌های درخت رویداد احتمال وجود جرقه و موانع موجود در ایستگاه‌های TBS نشان داده شده است.

جدول ۳- احتمال و نرخ وقوع پیامدهای نهایی نشت گاز از سنسینگ

پیامد نهایی	احتمال	نرخ وقوع (در سال)
انفجار	۰/۰۴۲	۰/۰۴۳
آتش کروی و آتش فورانی	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳
انفجار ابر بخار	۰/۲۱۶	۰/۲۴۳
آتش ناگهانی	۰/۱۰۲	۰/۱۰۷
رهایش ایمن	۰/۳۸۴	۰/۴۸۴

بعد از اینکه اعداد اولویت ریسک محاسبه گردید، تحلیل درخت خطا با هدف تحلیل علل وقوع نشتی و محاسبه احتمال رخداد نشتی برای تک‌تک کانون‌های خطر شناسایی شده، اجرا گردید. در این مقاله ترسیم درخت خطای سنسینگ که دارای بیش‌ترین عدد اولویت ریسک بود به همراه درخت رویداد آن‌ها در قالب آنالیز پاپیونی در شکل ۱ نشان داده شده است.

جهت استخراج احتمال هر کدام از شاخه‌های درخت رویداد از داده‌های ارائه‌شده در راهنمای آنالیز ریسک، مرکز ایمنی فرآیندی، انجمن مهندسی شیمی آمریکا[۱] و داده‌های ارائه‌شده در مطالعه جعفری و همکاران[۵] استفاده گردید. معمولاً در مطالعات آنالیز ریسک‌های فرآیندی، احتمال وقوع انفجار ابر بخار را ۰/۶ و آتش ناگهانی را ۰/۴ در نظر می‌گیرند[۱،۵]. احتمال جرقه آنی و تأخیری با توجه به وجود تعداد منابع جرقه و اندازه نشتی ممکن در تجهیزات مورد نظر و متعاقباً دبی تخلیه سناریوهای مورد نظر محاسبه می‌گردد، که این اطاعات معمولاً در جداول مربوطه موجود می‌باشد[۵].

بحث و نتیجه گیری

نتایج اجرای همزمان روش FMEA و FuHA در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری نشان داد که نشتی از سنسینگ دارای بیش‌ترین عدد الویت ریسک است(جدول۱) که این امر از نظر تجربی نیز با نظر متخصصان ایمنی و سایر متخصصان مربوطه همخوانی داشت و علت این امر به خاطر نقش حیاتی آن در تنظیم فشار از طریق برقراری ارتباط فرآیندی با رگلاتور و شیر قطع کننده اضطراری و در نهایت تأمین ایمنی ایستگاه در مواقع افزایش بیش از حد فشار خطوط می‌باشد.

روش‌های مانند FMEA فاقد تحلیل جامع و دقیق از علل وقوع حوادث هستند و به همین دلیل در این مطالعه از ابزار کمکی قوی بنام روش FTA جهت شناسایی علل وقوع نشتی از کانون‌های خطری که در مرحله قبلی از ریسک بالای برخوردار بود استفاده شد(شکل۱). نتایج مرحله ترسیم کیفی درخت خطا نشان داد که سه عامل، علل رفتارهای ناایمن، علل فرآیندی و علل مکانیکی مهم‌ترین علل وقوع حادثه اولیه (نشتی) در ایستگاه مورد مطالعه می‌باشد در مجموع ۶۷ علل یا نقص (۴۸ علل پایه‌ای و ۱۹ علل میانی) در وقوع رویداد اصلی مورد بررسی دخیل بود، که این امر حاکی از توانایی تحلیل دقیق روش FTA می‌باشد. شکل ۱ بخشی از اجزای این روش جهت رویداد اصلی، نشت گاز سنسنیگ نشان می‌دهد. نتایج مطالعه نشان داد که احتمال نشتی گاز از سنسینگ برابر ۰/۷۱۱ و نرخ نشتی گاز برابر ۱/۲۴در سال می‌باشد (جدول۲)، یعنی در ۱/۲ سال یا هر ۱۵ ماه، یک بار نشتی گاز از سنسینگ ممکن است به دلیل علل شناسایی شده در این مطالعه رخ دهد. احتمال بروز رفتارهای ناایمن، شکست‌های فرآیندی و مکانیکی منجر به وقوع نشتی گاز از سنسنیگ به ترتیب برابر ۰/۳۶، ۰/۲۱۸ و ۰/۱۳۳ است که رفتارهای ناایمن بیش‌ترین سهم و نقص‌های مکانیکی کمترین سهم را در رخ داد واقعه اصلی درخت خطا (نشتی گاز از سنسینگ) دارند (جدول۲).

نتایج مطالعه نشان داد که نرخ وقوع نقص‌های انسانی و فرآیندی و مکانیکی منجر به وقوع رخداد حادثه اصلی به ترتیب برابر ۰/۴۴۶، ۰/۲۴۶ و ۰/۱۴۲ در هر سال می‌باشد. مفهوم علمی این اعداد به این صورت است که وقوع حادثه اصلی در اثر نقص‌های انسانی به ازای هر ۲/۲۴ سال، به ازای نقص‌های فرآیندی هر ۴ سال و به ازای نقص‌های مکانیکی هر ۷ سال، یک بار ممکن است رخ دهد(جدول۲).

مطالعه‌ی علی سخاوتی و همکاران نشان داد که احتمال و نرخ نقص علل انسانی در توقف عملیات ایستگاه‌های تقویت فشار گاز به ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۲/۴ سال محاسبه شده است[۲۱]، که با نتایج این مطالعه سازگار می‌باشد، علت این امر می‌تواند استفاده از روش TESEO جهت محاسبه نقص‌های انسانی که سهم

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

قابل‌توجهی در رخداد واقعه رأس دارند باشد.

نتایج اجرای درخت رویداد برروی واقعه رأس جهت شناسایی رویدادهای نهایی ناشی از نشت گاز نشان داد که احتمال و رخداد رهایش ایمن نسبت به سایر رویدادهای نهایی محتمل (انواع آتش و انفجار) دارای بیش‌ترین احتمال ۰/۳۸۴ و نرخ وقوع ۰/۴۸۴ در سال می‌باشد(جدول۳). در بین رویدادها نهایی نامطلوب که از نظر ایمنی حائز اهمیت می‌باشد، انفجار ابر بخار نسبت به مابقی رویدادها دارای بیش‌ترین احتمال ۰/۱۵۳ و نرخ وقوع ۰/۱۷۰ در هر سال می‌باشد. به عبارتی حدود هر ۶ سال ممکن است یک بار انفجار ابر بخار در اثر وقوع نشتی گاز از سنسینگ رخ دهد، البته این برآورد بدون در نظر گرفتن تأثیر لایه‌های حفاظتی و اقدامات جلو گیرنده از وقوع انفجار برآورد شده است. در مطالعه بدری و همکاران[۱۳] در بررسی رویدادهای نهایی ناشی از نشت گاز در ایستگاه‌های CNG، احتمال وقوع انفجار ($۹/۴۴ \times ۱۰^{-۵}$) ناشی از رهایش گاز نسبت به سایر رویدادهای نهایی مانند آتش ناگهانی و فورانی بود که با نتایج مطالعه حاضر سازگار است. در مطالعه زارعی و همکاران[۲۲] برروی تحلیل رویدادهای نهایی رهایش هیدروژن، به ترتیب آتش فورانی، آتش ناگهانی و انفجار دارای بیش‌ترین احتمال وقوع داشت که با نتایج مطالعه حاضر متفاوت است، علت این تفاوت بیشتر به خاطر تفاوت در روش محاسبه احتمال وقوع رویداد رأس، چگونگی توسعه شاخه‌های درخت رویداد، تفاوت در وجود موانع و عوامل محصورکننده در برابر انتشار ابر بخار و نهایتاً میزان منابع جرقه در دو مطالعه می‌باشد.

به خاطر عدم انجام مطالعات مشابه، عدم امکان مقایسه نتایج مطالعات ریسک با یکدیگر به خاطر ماهیت این‌گونه مطالعات و وجود عدم قطعیت در نتایج چنین مطالعات، در این مطالعه بحث و مقایسه نتایج با نتایج سایر مطالعات بیشتر از موارد اشاره‌شده، امکان‌پذیر نمی‌باشد.

جهت کنترل وقوع رویدادهای نامطلوب به خصوص انفجار پیشنهاد می‌گردد از طراحی لایه‌های حفاظتی با سطوح مختلف در مراحل قبل و بعد از نشتی گاز، و جهت کاهش شدت خسارات آن، استفاده از سیستم Blast Proofing تجهیزات و سازهای اطراف ایستگاه، استفاده از سیستم‌ها آشکارساز نشتی گاز و... استفاده گردد، بر اساس نتایج مطالعه تمرکز بر پیشگیری و کاهش شکست‌های انسانی جهت کاهش رفتارهای ناایمن از الویت بیشتری نسبت به سایر اقدامات دارد.

همچنین می‌توان، طراحی ایمن تجهیزات را به عنوان یک اصل مهم در نظر گرفت که سبب تأثیر قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و نیازمندی سیستم به تجهیزات ابزار دقیق می‌باشد[۲۳].

از نقاط قوت این مطالعه، می‌توان به جدید بودن آن، استفاده از روش‌های مختلف به صورت ترکیبی در مراحل مختلف تحلیل مخاطرات و از محدودیت‌های آن می‌توان به عدم قطعیت در روش درخت خطا و تحلیل درخت رویداد مورد استفاده در این مطالعه، اختصاصی نبودن بانک اطلاعات اولیه جهت محاسبه تکرارپذیری و احتمالات در ساختار آنالیز پاپیونی اشاره داشت.

جهت مطالعات بعدی، شبیه‌سازی رویدادهای نهایی به خصوص انفجار، آتش فورانی و ناگهانی جهت برآورد دقیق از میزان خسارات جانی و مالی وارده ناشی از وقوع این حوادث و برآورد ریسک کمی آن با استفاده از روش‌های جامع مانند ارزیابی ریسک کمی (QRA) پیشنهاد می‌گردد. اجرای آنالیز پاپیونی با در نظر گرفتن نقش و تأثیر موانع در برابر نشت گاز، موانع در برابر وقوع پیامدهای نهایی ناشی از نشت گاز و محاسبه احتمال شکست موانع می‌تواند نتایج بهتری و واقعی تر حاصل گردد. نتایج مطالعات پیشنهادشده، به همراه نتایج مطالعه حاضر، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر را جهت مدیریت ریسک‌های ایمنی ایستگاه-های TBS فراهم می‌کند.

قدردانی

بدین وسیله نویسندگان مقاله از شرکت ملی گاز ایران و گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشگاه علوم پزشکی همدان به خاطر همکاری و حمایت مالی مطالعه حاضر تشکر و قدردانی به عمل می‌آورند.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

منابع

1. Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. 2nd ed. New York: American Institute of Chemical Engineers (AIChE); 2000.

2. Zarei E, Jafari M, 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 Occupational Health. 2014; 10(6):52-63. [Persian]. Mannan, Sam, ed. Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control. Butterworth-Heinemann, 2004.

3. Eckle P, Burgherr P. Bayesian data analysis of severe fatal accident risk in the oil chain. Risk Anal. 2013; 33(1):146-60.

4. Jafari M, Zarei E, Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. International Journal of Hydrogen Energy. International Journal of Hydrogen Energy 2012; 37(24):19241-9.

5. Jafari M, Zarei E, Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. International Journal of Hydrogen Energy. International Journal of Hydrogen Energy 2012; 37(24):19241-9.

6. Sklavounos S, Rigas F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2006;19(1):24-31.

7. Dormohammadi A, Zarei E, Delkhosh M, Gholami A. Risk analysis by means of a QRA approach on a LPG cylinder filling installation. Process Safety Progress 2014; 33(1):77-84.

8. Jafari M, Zarei E, Badri N. Risk assessment of vapor cloud explosions in a hydrogen production facility with consequence modeling. Journal of Research in Health Sciences. 2013; 13(2):181-7.

9. Zarei E, Dormohammadi A. Semi-quantitative and quantitative risk assessment in the process industries Focusing on methods on QRA, LOPA, DOW Index. Tehran: Fanavaran Co 2012. [persian].

10 Abdolhamidzadeh B, Hassan C, Hamid M, FarrokhMehr S, Badri N, Rashtchian D. Anatomy of a domino accident: Roots, triggers and lessons learnt. Process Safety and Environmental Protection 2012; 90(5):424-9.

11. Jafari, Mohammad Javad, Iraj Mohammadfam, and Esmaeil Zarei. "Analysis and Simulation of Severe Accidents in a Steam Methane Reforming Plant."International Journal of Occupational Hygiene 6.3 (2014): 120-130.

12. Jahangiri M, Norozi MA, Choobineh A, Narimannejad A. Feasibility Study of Implementing Process Safety Management (PSM) Requirements in an Iranian Petrochemical Company. International Journal of Occupational Hygiene. 2013;5(2):71-5.

13. Badri N, Nourai F, Rashtchian D. The Role of Quantitative Risk Assessment in Improving Hazardous Installations Siting: A Case Study. Iran. J. Chem. Chem. Eng. 2011; 30(4):113-9.

14. Mohammadfam I, Kalatpour O, Golmohammadi R, Khotanlou H. Developing a process equipment failure knowledge base using ontology approach for process equipment related incident investigations. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013; 26(6):1300-7.

15. Mohammadfam I, Kalatpour O, Golmohammadi R, Khotanlou H. Developing an ontological explosion knowledge base for business continuity planning purposes. Journal of business continuity & emergency planning. 2013;7(1):77-86.

16. Clifton A. Ericson I. Hazard Analysis Techniques for System Safety New Jersey: John Wiley & Sons, Inc; 2005

17. Hai-feng w. A Case Study on Model Based Functional hazard Analysis. Rransactions of Beijing Institute of Technology. 2010; 7:023.

18. Qinglei T, Guoming C, Lei Z, Jianmin F, Li Z. Dynamic accident modeling for high-sulfur natural gasgathering station. Process Safety and Environmental Protection. 2014; 92(6):565-76.

19. Abdolhamidzadeh B, Badri N. Qualitative and quantitative risk assessment. Andishesara Press; Tehran: 2011.

20. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic risk analysis using bow-tie approach. Reliability Engineering & System Safety. 2012; 104:36-44.

21. Sekhavati A, Norozi H, Shojaei A. Application of Fault Tree Analysis in a Gas Compressor Unit.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

Journal of Exploration & Production Oil & Gas. 2013; 10(97). [Persian].

22. Jafari M, 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). Journal of Health and Safety at Work. 2013; 3(1):55-68. [Persian].

23. Jafari M, Askarian A, Omidi L, Miri Lavasani SM, Taghavi L, Ashori AR. The Assessment of Independent Layers of Protection in Gas Sweetening Towers of Two Gas Refineries. Journal of Safety Promotion and Injury Prevention. 2014;2(2). [Persian].

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]

Journal of Occupational Hygiene Engineering. **2014; 1(3):19-28**

Research Article

Analysis of Root Causes of Major Process Accident in Town Border Stations (TBS) using Functional Hazard Analysis (FuHA) and Bow tie Methods

Fatemeh Khosravirad [1], Esmaeil Zarei[2], Iraj Mohammadfam[3*], Esmaeil Shoja [4]

Received: 1 August 2014 Accepted: 22 October 2014

Abstract

Background and objective: To control and prevention of accidents, attention to root causes of accident occurrence is very important. Safety risk of process units located in metropolis, must be always under control and in accordance with risk acceptance criteria of the community. In this regard, the purpose of this study is identification of functional failures, root cause analysis and incident outcomes arising from gas release in the Town Border Stations (TBS).

Materials and method: Using at the same time of both methods the Functional Hazard Analysis (FuHA) and Failure Mode & Effect Analysis (FMEA), identification of the failure locations and qualitative risk analysis were carried out. For identification and analysis of the causes accident, Bow tie analysis method was also used.

Results: Occurrence probability of identified top events was 0.71 and its failure rate was 1.24 per year. Unsafe behavioral (FP=0.36, λ=0.446) and mechanical causes (FP= 0.133, λ= 0.142) had highest and lowest the contribution in the top event occurrence. Vapor cloud explosion (VCE) had the highest probability (0.261) and failure rate (0.243) among the all identified incidents outcomes.

Conclusion: Prevention of the root causes and attention to the human factors have the considerable contribution in accident control in the process units. In the combined approach used in present study, if are considered to be, the barriers role against of the root causes and incident outcomes occurrence, it could be an appropriate approach for identification of root causes and control of the hazards process.

Key words: Root cause analysis; Town gas pressure reduction stations (TBS); Risk management; Bow tie analysis.

Please cite this article as: Khosravirad F, Zarei E, Mohammadfam I, Moghimbeygi A. Analysis of Root Causes of Major Process Accident in Town Border Stations (TBS) using Functional Hazard Analysis (FuHA) and Bow tie Methods. *Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2014; 1(3):19-28.*

1.Msc Student of Industrial Hygiene Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.
2.PhD Student of Industrial Hygiene Engineering, School of Public Health and Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran.
3.*(Corresponding author) Research Center for Health Sciences, Hamadan University of Medical Sciences. Hamadan, Iran, E-mail: mohammadfam@umsha.ac.ir
4.Department of Health, Safety and Environment (HSE), the National Gas Company.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-10-31]