

تحلیل سناریوهای منجر به حریق در مخازن نفتی با استفاده از متد Bow-Tie: رویکردی مبتنی بر شناسایی علل ریشه‌ای

مریم قلع جهی^{۱*}، علی کریمی^۲

۱. گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران.

۲. گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

چکیده

مقدمه: مخازن ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی به دلیل ماهیت ذاتی مواد تحت عملیات و شرایط عملیاتی خاص، از جمله تجهیزات بحرانی و پرخطر در صنایع نفت و گاز طبقه‌بندی می‌شوند. وقوع حوادثی از قبیل حریق، انفجار، نشت مواد و سرریز شدن، نه تنها می‌تواند منجر به خسارات اقتصادی قابل توجه گردد، بلکه پیامدهای زیست محیطی جدی و تهدیداتی برای ایمنی پرسنل به همراه دارد. بر این اساس، شناسایی فاکتورهای مشارکت کننده در رخداد چنین رویدادهایی و تحلیل روابط علی-معلولی میان آن‌ها از اهمیتی راهبردی برخوردار است. این مطالعه با به کارگیری روش (Bow-Tie) همراه با تحلیل نظام مند ریشه‌های علت، به تحلیل یکپارچه سناریوهای ریسک در مخازن نفتی می‌پردازد. برخلاف پژوهش‌های پیشین که به طور عمومی از روش (Bow-Tie) استفاده کرده‌اند، این مطالعه برای نخستین بار در یک پالایشگاه نفت ایران، زنجیره‌های علت و شکاف‌های عملکردی موانع پیشگیرانه و کاهش دهنده را در هفت سناریوی حریق شناسایی می‌کند.

روش: در این پژوهش، از روش Bow-Tie به منظور تلفیق نظام‌مند تکنیک‌های FTA (آنالیز درخت خطا) و ETA (آنالیز درخت رویداد) استفاده شد. هفت سناریوی بحرانی شامل حریق استخری، حریق ناحیه نشت‌بند، انفجار، گسیختگی، از دست دادن مهار، نشت و سرریز شدن مخزن انتخاب و بر پایه داده‌های میدانی و مطالعات کتابخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: تحلیل Bow-Tie نشان داد که عوامل مشارکت کننده مؤثر در وقوع سناریوهای فوق عمدتاً شامل منابع احتراق، پدیده خوردگی در بدنه مخزن، نقص عملکردی در شیرهای کنترل ورودی، خرابی اتصالات مکانیکی، عملکرد نامناسب سیستم‌های اندازه‌گیری سطح، نقص در تجهیزات ایمنی (مانند شیرهای اطمینان)، خطای اپراتور، فعالیت‌های تعمیراتی نادرست و همچنین عوامل خارجی نظیر رویدادهای لرزه‌ای و خرابکاری عمدی می‌باشند. همچنین، موانع پیشگیرانه و حفاظتی مؤثر برای هر یک از رویدادها شناسایی گردید.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که روش Bow-Tie قادر است درکی جامع و ساختاریافته از ریسک‌های موجود در واحدهای فرایندی ارائه نموده و با نمایش گرافیکی مناسب نقاط ضعف و شکاف‌های موجود در سیستم مدیریت ایمنی، راهکارهای مهندسی و مدیریتی را برای کاهش احتمال وقوع رویدادهای آغازگر و کاهش شدت پیامدهای آن‌ها پیشنهاد نماید. استقرار سیستم‌های پایش برخط، بهینه‌سازی برنامه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، اجرای دوره‌های آموزشی مستمر برای پرسنل و به‌روزرسانی سیستم‌های حفاظتی از جمله اقدامات کلیدی در راستای ارتقای سطح ایمنی و مدیریت ریسک این مخازن به شمار می‌روند.

کلید واژه: حریق مخازن نفتی، روش Bow-Tie، علل ریشه‌ای، ایمنی صنعتی، مدیریت ریسک

*نویسنده مسئول: مریم قلع جهی، ایمیل: Occmgh@gmail.com

ارجاع: قلع جهی مریم، کریمی علی. تحلیل سناریوهای منجر به حریق در مخازن نفتی با استفاده از متد Bow-Tie: رویکردی مبتنی بر شناسایی علل ریشه‌ای. مجله دانشکده علوم پزشکی ساوه ۱۴۰۵؛ ۲(۱) - doi: 10.22034/sumsj.2026.580970.1094.

مقدمه

زندگی در جهانی امن و عاری از خطر همواره آرزوی انسان ها بوده است و توجه به ایمنی، به صورت تلاش برای بقا، از بدو خلقت در نهاد بشر وجود داشته است (۱). فعالیت های صنعتی بخشی از تلاش انسان برای رسیدن به رفاه بیشتر است، اما در اثر این تغییرات و گسترش این نوع فعالیت ها، مخاطرات خاصی که ناشی از تغییر در نظام رایج طبیعت است نیز رخ نموده اند (۲). با گذر زمان و رشد فعالیت های صنعتی، مخاطرات مربوط به آنها نیز رشد داشته است (۳). بنابراین برای داشتن محیطی ایمن، امروزه داشتن صنایعی عاری از خطر به عنوان دغدغه ای بزرگ برای عامه مردم و به ویژه متخصصین و صنعتگران مطرح است (۱، ۴). نزدیکی واحدهای صنعتی به مراکز جمعیت، باعث افزایش اثرات اقتصادی و اجتماعی حوادث شده است (۵).

صنایع فرآیندی اغلب با مواد شیمیایی خطرناک و واحدهای عملیاتی تحت شرایط حاد (حجم عظیم نگهداری مواد خطرناک، فشار و دمای بالا) سروکار دارند (۶). بنابراین احتمال وقوع حوادثی از قبیل نشت مواد سمی، انفجار و حریق در آن ها وجود دارد (۷). رخ دادن این حوادث می تواند دلایل متعددی داشته باشد که مهم ترین این دلایل اشکالات در طراحی فرآیند، نقص فنی تجهیزات و خطاهای انسانی است (۸). به عنوان مثال، حادثه انفجار پالایشگاه تگزاس سیتی در سال ۲۰۰۵ که منجر به کشته شدن ۱۵ نفر و زخمی شدن بیش از ۱۷۰ نفر شد، نمونه ای از پیامدهای عدم رعایت استانداردهای ایمنی در این صنعت است بنابراین، اجرای دقیق مقررات ایمنی، استفاده از فناوری های پیشرفته و افزایش آگاهی کارکنان از الزامات ایمنی می تواند به کاهش مخاطرات و بهبود پایداری این صنعت کمک کند (۹).

حوادث واحدهای فرایندی همواره با یک واقعه آغاز می شوند (۱۰، ۱۱). چنین وقایعی می تواند شامل ترکیدن و یا شکستن خطوط لوله، سوراخ در مخازن ذخیره و یا وقوع واکنش های غیرقابل کنترل باشد (۱۲). بررسی نظام مند علل ریشه ای حوادث حریق در صنایع فرآیندی نشان می دهد که این حوادث عمدتاً ناشی از سه عامل اصلی می باشند: الف) نقص فنی تجهیزات شامل نشت از مخازن تحت فشار و خرابی

شیرآلات ایمنی، ب) خطاهای انسانی در مراحل عملیاتی و نگهداری و ج) عوامل خارجی نظیر تخلیه الکترواستاتیک و صاعقه است (۱۳). تحلیل کمی ریسک نشان می دهد که حدود ۴۰ درصد از حوادث بزرگ صنعتی در اثر پدیده آبخاری (دومینو از تجهیزات مجاور) رخ می دهد که در آن حریق اولیه به واحدهای مجاور گسترش می یابد (۱۴، ۱۵).

با توجه به مطالعات گذشته، حوادث حریق در تاسیسات مهمی مانند پالایشگاه های نفت، پایانه های نفت یا ترمینال های ذخیره سازی که زندگی، محیط زیست و افکار عمومی را تهدید می کنند، بیشترین تکرار را داشتند (۱۶). به عنوان مثال، در خرداد ۱۳۹۰، حادثه حریق انبار در پالایشگاه نفت تهران به دلیل نشتی رخ داد (۱۷). حریق به محصولات و تجهیزات مجاور سرایت کرد که منجر به حریق های ثانویه، خسارت مالی قابل توجه و نگرانی جدی برای مردم محلی شد. همچنین این حادثه سبب آلودگی محیط زیست، خسارات اقتصادی قابل توجه و ده ها تلفات مستقیم شده است (۱۸، ۱۹).

حریق در کارخانه های شیمیایی و فرآیندی در صورت عدم کنترل موثر و به موقع می تواند خطرات جدی برای دارایی ها و پرسنل ایجاد کند (۲۰). حریق ها می توانند از آتش سوزی های جزئی مانند حریق ناحیه نشت بند تا آتش سوزی های بزرگ نظیر حریق تمام سطح مخزن متغیر باشند، حریق ها از طریق برخورد مستقیم با آتش (با توجه به فاصله ایمنی ناکافی بین مخازن همراه با باد مطلوب)، تابش گرمایی یا در بدترین سناریو از طریق پدیده Bleve می توانند تشدید شوند و حریق های ثانویه را در واحدهای مجاور ایجاد کنند که منجر به دومینوی حریق می شود (۲۱، ۲۲).

در اثر رهائش محتویات مایع اشتعال پذیر از یک مخزن در محیط، ممکن است در اطراف منبع رهائش حوضچه ای از آن مایع ایجاد گردد که به تدریج شروع به تبخیر می کند (۲۲). در صورتی که بخارات ناشی از این حوضچه به منبع جرقه ای برسند مشتعل شده و باعث ایجاد حوضچه ای از مایع در حال اشتعال می گردد (۲۳). پس از بروز حادثه، به طور مثال حریق در یکی از مخازن ذخیره، این حادثه می تواند به صورت زنجیره ای از حوادث در پیاید که اصطلاحاً به آن پدیده دومینو گفته می شود (۲۴). یک حادثه نقطه شروعی برای بروز

حوادث بیشتر و گسترش فاجعه می باشد (۲۵). فواصل قرار گیری تجهیزات از یکدیگر، از مهم ترین فاکتورهای تعیین سرعت انتقال حادثه از بخشی به بخش دیگر می باشد (۲۶). مخازن ذخیره تحت فشار، مخازن اتمسفریک، خطوط انتقال مواد و دستگاه های فرایندی از مهم ترین تجهیزاتی می باشند که حریق و انفجار را به طور زنجیره ای به دیگر قسمت ها انتقال می دهند (۲۷). اثرات دومینو (حوادث زنجیره ای)، به حوادثی گفته می شوند که با پیامد بالا و احتمال کم هستند که طی آن ها وقوع یک حادثه اولیه (مانند حریق) در یک واحد منجر به درگیر شدن واحدهای مجاور می شود، به گونه ای که ابعاد حادثه اولیه گسترش می یابد (۲۸، ۲۹، ۳۰).

توسعه، پیشرفت و گسترش فناوری در صنایع مختلف به خصوص صنایع شیمیایی سبب شده است که فلسفه ایمنی از رویکرد پس از وقوع به رویکرد پیش از وقوع تغییر یابد (۱۸). رویکرد جدید بر پایه شناسایی و کنترل خطر پیش از وقوع می شود. یکی از اصول کلیدی در مدیریت ایمنی این صنایع، شناسایی و کنترل ریسک های عملیاتی است (۳۱). روش هایی مانند آنالیز خطر و عملیات (HAZOP)، تجزیه و تحلیل شکست و اثرات آن (FMEA) و ارزیابی ریسک کمی (QRA) ^۳ به صنایع این امکان را می دهند که خطرات فرایندی را به دقت بررسی کرده و تدابیر پیشگیرانه لازم را اعمال کنند (۳۲، ۳۳).

بنابراین، بکارگیری یک رویکرد ارزیابی ریسک کامل و موثر از مخازن ذخیره برای توصیف و شناسایی دقیق خطرات بسیار مهم می باشد. ارزیابی ریسک های موجود در صنایع فرایندی با استفاده از مدل های کمی و کیفی همچون، آنالیز درخت خطا (FTA)، آنالیز درخت رویداد (ETA) و Bow-Tie از اهمیت فراوانی برخوردار است. این روش ها به ویژه در شناسایی نقاط ضعف سیستم ها و مدیریت ریسک های احتمالی کاربرد دارند (۳۴).

در نهایت، با توجه به ماهیت حساس و پرخطر صنایع فرایندی نفت و پالایشگاه، اتخاذ یک رویکرد جامع برای مدیریت ایمنی امری ضروری است. در عصر حاضر، ایمنی دیگر یک انتخاب

نیست، بلکه یک الزام اساسی برای حفاظت از جان انسان ها، محیط زیست و دارایی های صنعتی محسوب می شود (۳۵). مدیریت مؤثر حریق در مخازن می تواند به بهبود ایمنی و کاهش خطرات کمک کند. با استفاده از فناوری های نوین، نظارت مستمر و طراحی سیستم های ایمنی مناسب، می توان وقوع این پدیده را کاهش داد و واکنش های سریع تری در برابر حوادث پیش بینی کرد. این اقدامات نه تنها از خسارات مالی و انسانی جلوگیری می کند، بلکه به حفظ سلامت عمومی و حفاظت از محیط زیست نیز کمک می کند. بنابراین، توجه به حریق در مخازن ذخیره صنایع فرایندی یک ضرورت حیاتی برای ایمنی و پایداری این صنایع است.

اگرچه روش Bow-Tie پیشتر در برخی مطالعات ایمنی فرایند به کار رفته است (۳۶، ۳۷)، اما نوآوری مطالعه حاضر در سه جنبه خلاصه می شود: نخست، استفاده همزمان از آنالیز درخت خطا (FTA) و آنالیز درخت رویداد (ETA) برای هفت سناریوی بحرانی حریق در مخازن نفتی به صورت یکپارچه و با تمرکز بر علل ریشه ای (از جمله خوردگی، خطای انسانی، نقص تجهیزات حفاظتی) که در مطالعات پیشین کمتر به طور همزمان مدل شده اند (۳۸). دوم، شناسایی و دسته بندی موانع پیشگیرانه و کاهش خاص برای صنعت نفت ایران (مانند سیستم فوم ثابت در ناحیه نشت بند، سیستم خنک کننده و الزامات سیستم جانمایی مخازن) که در پژوهش های خارجی به دلیل تفاوت در طراحی و قدمت تأسیسات کمتر دیده می شود (۳۹). سوم، ارائه یک چارچوب بصری و عملیاتی برای تیم های ایمنی و آتش نشانی که بتواند شکاف بین تئوری و عمل را در مدیریت حریق مخازن کاهش دهد (۴۰).

به عبارت دیگر، ارزش افزوده این مقاله نه در ابداع یک روش جدید، بلکه در کاربرد نظام مند و ترکیبی از روش های موجود برای حل یک مسئله صنعتی واقعی و اولویت دار در پالایشگاه های ایران است که تاکنون به طور جامع مدل سازی نشده بود. بنابراین، توجه به حریق در مخازن ذخیره صنایع

^۱ Hazard and Operability

^۲ Failure Modes and Effects Analysis

^۳ Quantitative Risk Assessment

فرایندی یک ضرورت حیاتی برای ایمنی و پایداری این صنایع است.

روش

۲.۱. طراحی مطالعه و مخازن هدف

این مطالعه به صورت توصیفی-تحلیلی و مقطعی بر روی مخازن ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی در یکی از پالایشگاه‌های ایران در سال ۱۴۰۲ انجام شد. مخازن هدف شامل ۸ مخزن ذخیره‌سازی اتمسفریک حاوی محصولات نفتی سبک و سنگین (بنزین، نفت سفید و گازوئیل) بود.

۲.۲. روش انتخاب سناریوهای بحرانی

برای انتخاب سناریوهای منجر به حریق، ابتدا ماتریس شناسایی خطرات (Hazard Identification) بر اساس استاندارد ISO 17776:2016 تشکیل شد. سپس با استفاده از تکنیک آنالیز مقدماتی خطر (PHA) و جلسات طوفان فکری با حضور ۸ نفر از متخصصین ایمنی فرایند (با حداقل ۱۰ سال سابقه کار در صنعت نفت)، تمام رویدادهای اولیه قابل تصور (نشت، سرریز، گسیختگی، از دست دادن مهار و) فهرست شدند. در مرحله بعد، با بهره‌گیری از روش امتیازدهی ریسک (سنجش شدت پیامد $\times$ احتمال وقوع نیمه‌کمی)، ۷ سناریویی که بالاترین امتیاز ریسک را داشتند به عنوان سناریوهای بحرانی انتخاب شدند: حریق استخری (Pool fire)، حریق ناحیه نشت‌بند (Rim seal fire)، انفجار (Explosion)، گسیختگی (Rupture)، از دست دادن مهار (Loss of containment)، نشت (Leakage) و سرریز مخزن (Overfilling) (۴۰).

۲.۳. منابع داده‌های میدانی و کتابخانه‌ای

داده‌های این پژوهش از سه منبع اصلی گردآوری شد:

۱. مطالعات کتابخانه‌ای: شامل گزارش‌های حوادث منتشرشده داخلی (سازمان بهداشت و ایمنی نفت ایران - HSE-MS) و خارجی (CSB, CCPS) و پایگاه داده‌های MHIDAS بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳.

۲. داده‌های میدانی: شامل بازدید میدانی از مخازن هدف، بررسی برگه‌های اطلاعات ایمنی تجهیزات (دیتاشیت‌ها)، گزارش‌های تعمیر و نگهداری (پیشگیرانه و اصلاحی) به مدت ۳ سال اخیر و گزارش‌های بازرسی فنی (آزمون‌های غیرمخرب و اندازه‌گیری ضخامت بدنه).

۳. مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با خبرگان: مصاحبه با ۸ نفر از مدیران و کارشناسان ایمنی، تعمیرات و بهره‌برداری که به طور میانگین ۱۰ سال تجربه در پالایشگاه داشتند. مصاحبه‌ها تا حد اشباع نظری ادامه یافت (۳۹).

۲.۴. معیار استخراج علل ریشه‌ای (Root Cause Analysis)

برای شناسایی علل ریشه‌ای، از روش WHY-TREE (درخت چرایی) استفاده شد. بدین صورت که برای هر رویداد پایه شناسایی شده در درخت خطا (FTA)، پرسش «چرا» به طور متوالی تکرار گردید تا به یک نقص فیزیکی، خطای انسانی، نقص رویه‌ای یا عامل خارجی برسیم که دیگر قابل تفکیک نبود. سپس علل ریشه‌ای بر اساس مدل چهاربعدی تریز (TRIZ) دسته‌بندی شدند: (الف) نقص تجهیزات و خوردگی، (ب) خطای انسانی (عملیاتی و تعمیراتی)، (ج) نقص سیستم‌های کنترلی و حفاظتی، (د) عوامل خارجی (طبیعی و خرابکاری). تنها عللی که حداقل توسط دو خبره تأیید شده بودند، در تحلیل نهایی وارد شدند (شاخص توافق بین‌ارزیابان < 0.8) (۴۰).

۲.۵. فرآیند تحلیل در مدل Bow-Tie

مدل Bow-Tie در پنج گام زیر پیاده‌سازی شد:

گام ۱: تعیین رویداد مرکزی (Top Event) - همان سناریوی بحرانی حریق مورد نظر.

گام ۲: ساخت درخت خطا (FTA) در سمت چپ - با شناسایی تمام رویدادهای پایه و میانی که می‌توانند به رویداد مرکزی منجر شوند. برای این کار از داده‌های میدانی و مصاحبه با خبرگان استفاده شد.

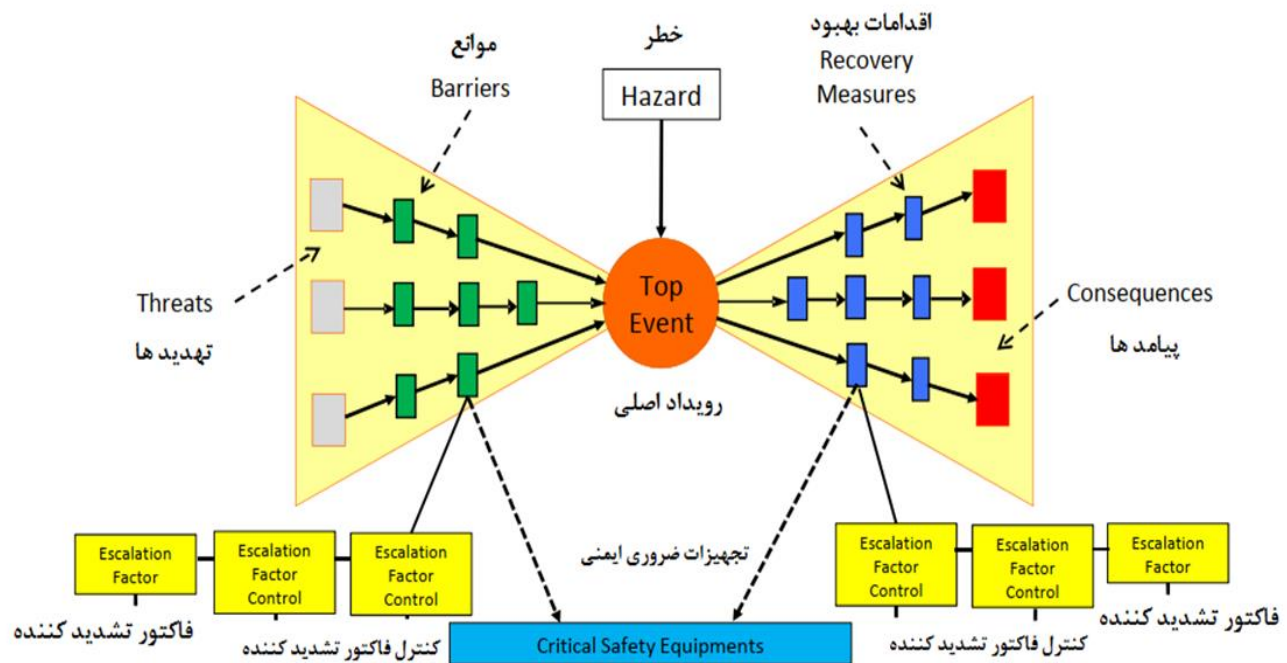
فاکتورهای تشدیدکننده (Escalation Factors) عواملی هستند که می‌توانند کارایی موانع را کاهش دهند (مانند نقص در سیستم اارت، عدم آگاهی پرسنل، عملکرد کند). این فاکتورها بر اساس بازرسی‌های میدانی و تحلیل گزارش‌های حوادث قبلی پالایشگاه شناسایی شدند. برای هر فاکتور تشدیدکننده، کنترل‌های مربوطه (مانند بازرسی دوره‌ای، آموزش، سیستم مجوز کار) نیز در مدل وارد گردید (۳۷). در این روش، رویداد اصلی (TE) و خطر در مرکز قرار دارند و تهدیدها^۴ علل یا رویدادهای آغازینی که منجر به رویداد اصلی می‌شوند، اقدامات پیشگیرانه (PB)^۵ فاکتورهای تشدیدکننده (EF)^۶ کنترل فاکتورهای تشدیدکننده (EC)^۷ در سمت چپ هستند. در حالی که پیامدها^۸ اقدامات کاهش دهنده (MB)^۹ فاکتورهای تشدیدکننده و کنترل فاکتورهای تشدیدکننده در سمت راست قرار دارند

گام ۳: شناسایی موانع پیشگیرانه (Preventive Barriers) – برای هر مسیر منتهی به رویداد مرکزی، موانع موجود (مانند سیستم اتصال به زمین، مجوز کار گرم، سیستم‌های اندازه‌گیری سطح) تعیین شدند.

گام ۴: ساخت درخت رویداد (ETA) در سمت راست – پیامدهای احتمالی پس از وقوع رویداد مرکزی، با در نظر گرفتن عملکرد یا عدم عملکرد موانع کاهش (مانند سیستم فوم، خنک‌کاری، تیم آتش‌نشانی) ترسیم شد.

گام ۵: ترسیم نهایی دیاگرام Bow-Tie – با استفاده از نرم‌افزار Bow-Tie XP (نسخه ۷,۲) و تأیید نهایی توسط تیم خبرگان. برای اطمینان از پایایی تحلیل، دو جلسه بازبینی با حضور خبرگان (با فاصله زمانی دو هفته) برگزار شد و اصلاحات لازم اعمال گردید (۳۶، ۴۱).

۲.۶. تحلیل فاکتورهای تشدیدکننده و کنترل آن‌ها



شکل ۱. مدل Bow-Tie

^۴ Top event

^۵ Hazard

^۶ Threats

^۷ Preventive barriers Mitigative barriers

^۸ Top event

^۹ Escalation factor control

^{۱۰} Consequences

^{۱۱} Mitigative barriers

مهار^{۱۲} نشت^{۱۳} گسیختگی^{۱۴} سرریز مخزن^{۱۵} حریق استخری^{۱۶}، حریق ناحیه نشت بند^{۱۷} انفجار^{۱۸}ی باشند.

انواع حوادث احتمالی بر اساس خواص احتراق مواد خطرناک ذخیره شده و همچنین نوع مخزن شناسایی شدند. سناریوهای بررسی شده در این قسمت شامل از دست دادن



شکل ۲. سناریوهای منجر به حریق در مخازن ذخیره نفتی

یافته ها

پس از تعیین مخازن هدف برای مطالعه، به ارزیابی ریسک جهت یافتن حوادث و سناریوهای احتمالی، علل آن ها و در نهایت پیامد حاصل از آن ها پرداخته شد. با روش Bow-Tie تمامی سناریوهای احتمالی که منجر به حریق می شود تک به تک بررسی و علل رخداد آن ها با توجه به صنعت مورد نظر مشخص شد. متعاقب آن پیامدهای حاصل تمامی سناریوها نیز بررسی گردید. ۷ سناریو منتج به حریق مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).

۳.۱. اولویت بندی سناریوهای حریق بر اساس سطح ریسک

برای فراتر رفتن از شناسایی صرف علل و موانع، سناریوهای هفت گانه با استفاده از روش ماتریس ریسک نیمه کمی (احتمال وقوع در پنج سطح: بسیار کم تا بسیار زیاد و شدت پیامد در پنج سطح: بسیار کم تا فاجعه بار) بر اساس نظر ۸ خبره صنعتی اولویت بندی شدند. نتایج نشان داد که سناریوی حریق استخری (Pool fire) با میانگین امتیاز ریسک ۱۸/۲ (از ۲۵) بالاترین اولویت را دارد، پس از آن به ترتیب انفجار (Explosion) با امتیاز ۱۶/۷، حریق ناحیه نشت بند (Rim seal fire) با امتیاز ۱۴/۵، گسیختگی (Rupture) با امتیاز ۱۳/۲، از دست دادن مهار (Loss of containment) با امتیاز ۱۱/۸، نشت (Leakage) با امتیاز ۹/۴ و سرریز مخزن (Overfilling) با امتیاز ۷/۶ قرار گرفتند. این اولویت بندی

^{۱۱} Loss of containment

^{۱۲} Leakage

^{۱۳} Rupture

^{۱۴} Over filling

^{۱۵} Pool fire

^{۱۶} Rim seal fire

^{۱۷} Explosion

نشان می‌دهد که تمرکز اصلی اقدامات کنترلی باید بر سناریوی حریق استخری و سپس انفجار معطوف شود (۴۲).

۳.۲. ارزیابی کارایی موانع کنترلی پیشگیرانه و کاهشی

کارایی موانع ایمنی شناسایی شده در سناریوهای مختلف با استفاده از روش تحلیل حالات خرابی و آثار آن (FMEA) و با در نظر گرفتن سه پارامتر شدت خرابی، احتمال خرابی و قابلیت تشخیص، به صورت نیمه کمی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که:

- موانع پیشگیرانه با بالاترین کارایی عبارتند از: سیستم اتصال به زمین و شانت (امتیاز کارایی ۸۲ از ۱۰۰)، سیستم مجوز کار گرم (امتیاز ۷۹) و سیستم اندازه‌گیری سطح با افزودنی (امتیاز ۷۵). این موانع در صورت عملکرد صحیح، بیش از ۷۰ درصد از وقوع رویدادهای آغازگر جلوگیری می‌کنند.

- موانع کاهشی با بالاترین کارایی عبارتند از: سیستم فوم ثابت در ناحیه نشست‌بند (امتیاز ۸۵)، سیستم خنک‌کاری آب (Cooling) (امتیاز ۷۸) و حضور تیم آتش‌نشانی آموزش‌دیده (امتیاز ۷۴). این موانع در صورت فعال‌سازی به موقع، شدت پیامد را تا ۶۵ درصد کاهش می‌دهند.

- موانع با پایین‌ترین کارایی شامل سیستم CFC (امتیاز ۴۵) و سیستم سیلابی (امتیاز ۴۲) بودند که به دلیل زمان پاسخ طولانی و آسیب‌پذیری در برابر حرارت شدید، کارایی محدودی دارند (۴۳).

۳.۳. مقایسه سناریوها از نظر زنجیره علّی و پیامدها

مقایسه سناریوهای هفت‌گانه نشان داد که سناریوی نشست (Leakage) دارای بیشترین تعداد رویدادهای پایه مشترک با سایر سناریوها (۶ رویداد پایه مشترک از جمله خوردگی بدنه، نقص شیر تخلیه و خطای انسانی) است که آن را به یک نقطه

اتصال بحرانی تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر، کنترل نشست می‌تواند به طور همزمان از وقوع حریق استخری، حریق ناحیه نشست‌بند و انفجار جلوگیری کند. از نظر پیامد، سناریوی انفجار دارای بالاترین پتانسیل برای ایجاد اثرات دومینو (احتمال گسترش به مخازن مجاور برابر با ۰/۴۵ بر اساس نظر خبرگان) و بیشترین شدت تلفات جانی (پیش‌بینی بیش از ۱۰ نفر در صورت وقوع) می‌باشد، در حالی که سناریوی سرریز مخزن کمترین شدت پیامد را دارد (عمدتاً آلودگی خاک و حریق محدود) (۴۴).

۳.۴. تحلیل شکاف موانع ایمنی (Gap Analysis)

با مقایسه موانع موجود در پالایشگاه مورد مطالعه با موانع پیشنهادی در استانداردهای بین‌المللی (مانند NFPA 30 و API 650)، شکاف‌های زیر شناسایی شدند:

- عدم وجود سیستم پایش برخط خوردگی در ۶۰ درصد مخازن

- فقدان سیستم اطفاء حریق خودکار تمام سطح در مخازن با ظرفیت بالای ۱۰۰۰۰ مترمکعب

- عدم اجرای آزمون‌های دوره‌ای سیستم اتصال به زمین در ۳۰ درصد موارد

- نبود برنامه منظم مانورهای یکپارچه آتش‌نشانی با مشارکت همه ذی‌نفعان

این شکاف‌ها به عنوان اولویت‌های بهبود در سیستم مدیریت ایمنی پیشنهاد می‌شوند (۴۵).

۳.۵. خلاصه یافته‌های تحلیلی

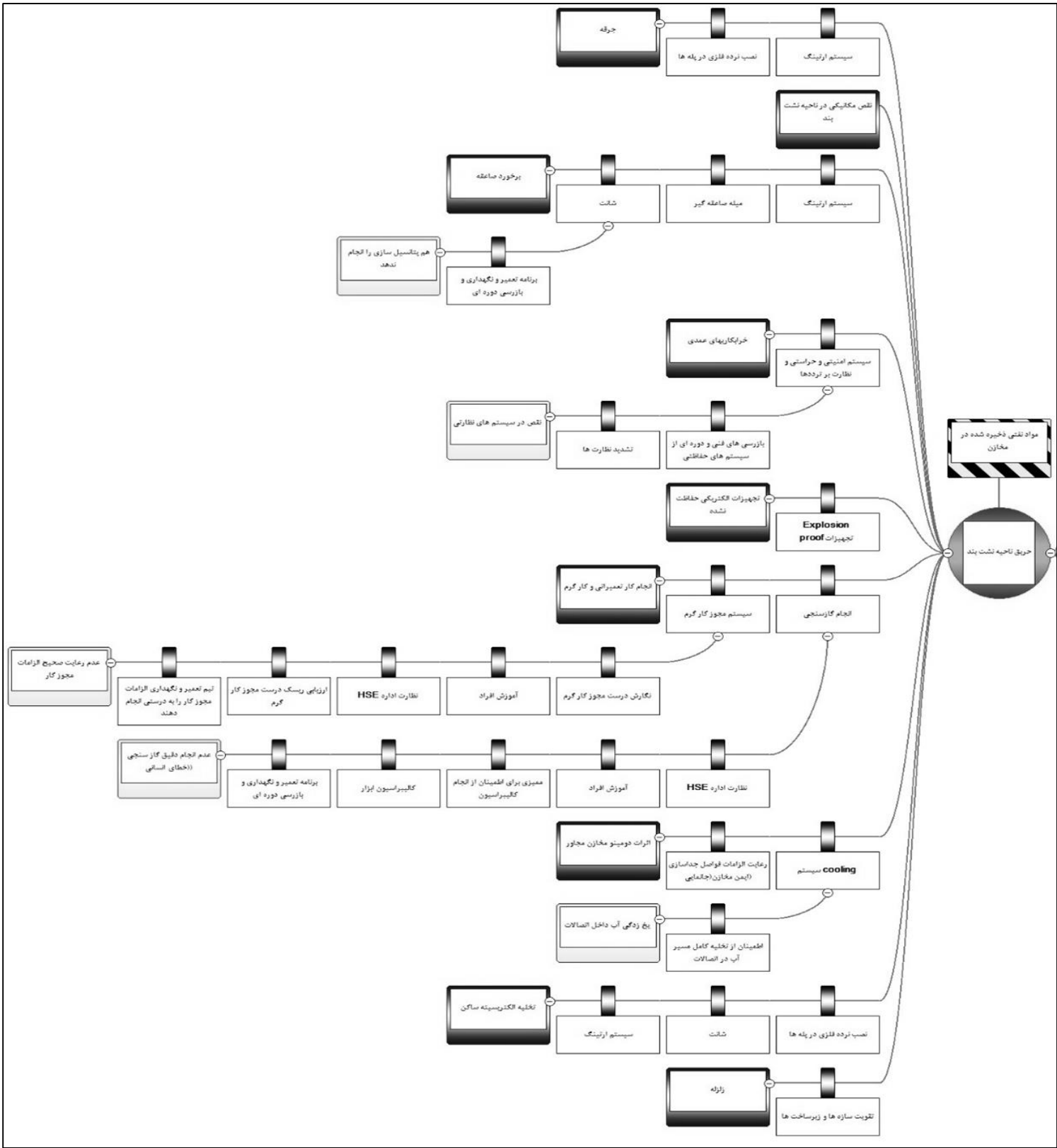
جدول شماره ۱ خلاصه اولویت‌بندی ریسک، کارایی موانع کلیدی و شکاف‌های اصلی را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۱. اولویت‌بندی ریسک و کارایی موانع در سناریوهای حریق مخازن نفتی

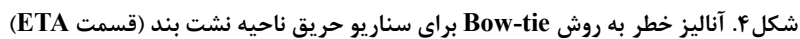
سناریو	امتیاز ریسک	موانع پیشگیرانه با بیشترین کارایی	موانع کاهشی با بیشترین کارایی	شکاف اصلی
حریق استخری	۱۸/۲	سیستم اتصال به زمین	سیستم فوم ثابت	نبود پایش برخط خوردگی
انفجار	۱۶/۷	سیستم مجوز کار گرم	سیستم خنک‌کاری (آب)	نقص در سیستم‌های ضد انفجار
حریق ناحیه نشت‌بند	۱۴/۵	میله صاعقه گیر	سیستم فوم ناحیه نشت‌بند	عدم مانور یکپارچه
گسیختگی	۱۳/۲	بازرسی دوره‌ای ضخامت	سیستم سیلابی	فقدان سیستم اطفاء خودکار
از دست دادن مهار	۱۱/۸	شیر تخلیه با افزونگی	تیم آتش‌نشانی	آموزش ناکافی پرسنل
نشت	۹/۴	سیستم اندازه‌گیری سطح	دایک و باند وال	عدم بازرسی دوره‌ای شیرها
سرریز	۷/۶	کنترل دبی ورودی	تخلیه اضطراری	نبود آلارم سطح

به عنوان مثال در سناریوی حریق ناحیه نشت بند (شکل ۳) در صنعت مورد مطالعه، مهم‌ترین تهدیدها شامل جرقه، نقص مکانیکی در ناحیه نشت بند، برخورد صاعقه، خرابکاری‌های عمدی، تجهیزات الکتریکی حفاظت نشده، انجام کار تعمیراتی و کار گرم، اثرات دومینو مخازن مجاور، تخلیه الکتریسته ساکن و زلزله می‌باشد و مهم‌ترین پیامدها نیز شامل حریق سطح کامل، آسیب به افراد، تجهیزات و آلودگی زیست محیطی (هوا) می‌باشد. موانع پیشگیرانه و کاهشی در این صنعت و این سناریو به ترتیب به صورت سیستم اتصال به زمین و شانت و میله صاعقه گیر، نصب میله فلزی در پله‌ها، سیستم امنیتی و حراستی و نظارت بر تردها، تجهیزات Explosion proof، انجام گازسنجی و وجود سیستم مجوز کار گرم، سیستم Cooling، رعایت الزامات سیستم جانمایی مخازن (فواصل جداسازی ایمن مخازن)، تقویت سازه‌ها و زیرساخت‌ها، سیستم CFC، سیستم سیلابی، سیستم فوم

ثابت در ناحیه نشت بند، حضور تیم آتش‌نشانی و تیم پاسخ اضطراری (کمیته مدیریت بحران)، وجود دایک و باند وال، پاسخ تیم پزشکی و تخلیه اضطراری، جداسازی افراد از ناحیه حریق، جستجو و نجات، ارتباطات رادیویی، برگزاری مانور در نظر گرفته شدند. فاکتورهای تشدید کننده نیز شامل نقص در سیستم ارت، صاعقه گیر و شانت، عدم توجه کافی به الزامات مجوز گرم صادر شده، نقص در عملکرد سیستم‌های حفاظتی، عدم آگاهی از محل دقیق استقرار پرسنل، عملکرد کند نیروی انسانی می‌باشد. همچنین فاکتورهای کنترلی موجود نیز شامل بازرسی‌های فنی و دوره‌ای از سیستم‌های حفاظتی، تشدید نظارت‌ها، نظارت و بازرسی دوره‌ای، اندازه‌گیری دوره‌ای مقاومت سیستم اتصال به زمین طبق استاندارد، سیستم مجوز کار گرم، آموزش شاغلین تیم تعمیراتی، تخصیص افراد شایسته، آنالیز ایمنی شغلی، آموزش دقیق به نیروهای مربوطه، جستجو و نجات افراد، ارتباطات بی سیم می‌باشد



شکل ۳. آنالیز خطر به روش Bow-tie برای سناریو حریق ناحیه نشت بند (قسمت FTA)



جدول شماره ۲. تعدادی از مهم ترین رویدادهای پایه و میانی در سناریوهای ایجاد حریق در مخازن ذخیره نفتی

سناریوی ایجاد حریق	رویداد میانی	رویداد پایه
حریق استخری	نشت، منابع جرقه، تخلیه الکتریسیته ساکن، برخورد صاعقه، نقص در تجهیزات حفاظت الکتریکی، تجمع الکتریسیته ساکن	کارگرم و تعمیراتی، دومینو از تجهیزات مجاور، تجهیزات الکتریکی حفاظت نشده، خطای انسانی
حریق ناحیه نشت بند	منابع جرقه، تخلیه الکتریسیته ساکن، برخورد صاعقه، نقص در تجهیزات حفاظت الکتریکی، تجمع الکتریسیته ساکن	نقص مکانیکی در ناحیه نشت بند، خرابکاری عمدی، زلزله، کارگرم و تعمیراتی
نشت	خوردگی بدنه، سرریز مخزن، آسیب لوله و اتصالات	خرابکاری عمدی، زلزله، نقص در شیر تخلیه، نقص در شیر نمونه برداری
از دست دادن مهار	خوردگی بدنه، سرریز مخزن، آسیب لوله و اتصالات	خرابکاری عمدی، زلزله، بازماندن شیر تخلیه
سرریز مخزن	نقص شیر ورودی	عدم کنترل اپراتور، عدم کنترل دبی ورودی و عملکرد ناقص سطح سنج
گسیختگی	خوردگی بدنه	شکستگی در مخزن، زلزله
انفجار	منابع جرقه، گسیختگی	مخلوط بخار و هوا در محدوده انفجاری، شکستگی در خطوط لوله و اتصالات

استخری (به عنوان رویداد پایه) و سناریوی سرریز مخزن (به صورت عدم کنترل اپراتور) ثبت شده است، اما در بسیاری از رویدادهای پایه دیگر مانند نقص شیر تخلیه یا عدم کنترل دبی ورودی نیز می‌تواند ریشه انسانی داشته باشد. به طور کلی، الگوی تکرار شونده «نقص تجهیزات + منبع جرقه» در اکثر سناریوها مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد شکست همزمان موانع پیشگیرانه (کنترل نشت) و موانع جرقه می‌تواند به سرعت به حریق منجر شود. این یافته، اهمیت رویکرد لایه‌ای دفاع در عمق (Layers of Protection) را تأیید می‌کند.

بررسی جدول شماره ۲ نشان می‌دهد که منابع جرقه (مانند کار گرم، صاعقه، تخلیه الکتریسیته ساکن و تجهیزات الکتریکی حفاظت نشده) در هر سه سناریوی حریق استخری، حریق ناحیه نشت‌بند و انفجار به عنوان رویداد میانی مشترک ظاهر می‌شوند که بیانگر نقش کلیدی کنترل منابع اشتعال در پیشگیری از حریق است. همچنین، خرابکاری عمدی و زلزله به عنوان رویدادهای پایه در چهار سناریوی نشت، از دست دادن مهار، حریق ناحیه نشت‌بند و گسیختگی دیده می‌شوند که لزوم توجه به تهدیدات خارجی را آشکار می‌کند. از طرف دیگر، خطای انسانی به طور مستقیم فقط در سناریوی حریق

جدول شماره ۳. مهم ترین پیامدهای حاصل از سناریوهای ایجاد حریق در صورت عدم عملکرد موانع ایمنی کاهنده در صنعت مورد مطالعه (سیستم CFC، سیستم سیلابی، سیستم Cooling، سیستم Foam Maker، حضور تیم آشنشانی)

سناریو ایجاد حریق	پیامد حاصل
حریق ناحیه نشت بند	حریق تمام سطح / سناریوی تشدید (حریق استخری)
حریق استخری	انفجار ابر بخار / (VCE) انفجار بخار مایع در حال جوش / (BLEVE) سناریوی تشدید / انفجار
از دست دادن مهار / نشت / سرریز مخزن	حریق استخری
گسیختگی	حریق استخری / انفجار

تئوری و عمل می‌شود (۴۱). از این رو، مطالعه حاضر با تأکید بر شناخت موانع موجود و علل ریشه‌ای قابل اندازه‌گیری (جدول ۱ و ۲) سعی در پر کردن این خلأ دارد.

از جمله مهم‌ترین حوادث صنایع فرایندی و به طور ویژه مخازن ذخیره نفتی، خطر وقوع حریق می‌باشد (۲۲). هنگام نشت از یک مخزن یا سرریز شدن آن، اثرات دومینو در نتیجه حریق رخ داده و زنجیره‌ای از حوادث فاجعه بار را ایجاد می‌کند حریق‌ها و به دنبال آن انفجار، از مهم‌ترین رویدادهای اصلی ایجاد پدیده دومینو در صنایع شیمیایی و فرایندی هستند و بردارهای تشدید (تابش حرارتی) ایجاد شده عامل اصلی پدیده دومینو می‌باشند. به دلیل قدیمی بودن مخازن ذخیره‌سازی و عدم امکان تغییر در طراحی و فواصل میان مخازن و شیوع زیاد حریق در پالایشگاه‌ها، لزوم اهمیت ارزیابی ریسک و شناسایی مخازن بحرانی و انجام اقدامات لازم در راستای حفاظت هر چه بیشتر از مخازن بحرانی به نگرانی اساسی تبدیل شده است (۴۶). در این مطالعه، با استفاده از روش‌های کیفی مانند Bow-Tie، آنالیز درخت خطا (FTA) و آنالیز درخت رویداد (ETA)، به بررسی رویدادهای پایه منجر به حریق در مخازن نفتی پرداخته شد.

مقایسه نتایج این مطالعه با پژوهش‌های پیشین

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که وقوع حریق استخری در مخازن نیازمند همزمانی دو رویداد پایه کلیدی است: نخست، نشت سیال و بخارات قابل اشتعال (ناشی از گسیختگی، نقص در ناحیه نشت‌بند یا سرریز) و دوم، وجود منابع جرقه‌زایی (صاعقه، الکتریسیته ساکن، کار گرم، تجهیزات حفاظت‌نشده). این یافته با مطالعات Ikwan و همکاران (۲۰۲۱) و Fuentes-Bargues و همکاران (۲۰۱۷) همسو است که هر دو به نقش همزمان نشت و جرقه در وقوع حریق تأکید کرده‌اند (۲۱، ۲۲).

جدول شماره ۳ نشان می‌دهد که در صورت عدم عملکرد موانع کاهشی (مانند سیستم CFC، سیستم سیلابی، سیستم خنک‌کاری، سیستم فوم ساز و تیم آتش‌نشانی)، هر سناریوی اولیه حریق می‌تواند به پیامدهای بسیار شدیدتری تشدید شود. به عنوان مثال، حریق ناحیه نشت‌بند در صورت عدم کنترل، به حریق تمام سطح تبدیل می‌شود که کنترل آن بسیار دشوارتر است. همچنین، حریق استخری در غیاب موانع مؤثر می‌تواند به انفجار ابر بخار (VCE) یا انفجار BLEVE منجر گردد که بالاترین میزان تلفات و خسارات را به همراه دارد. از سوی دیگر، سناریوهایی مانند از دست دادن مهار، نشت و سرریز مخزن در صورت عدم عملکرد موانع کاهشی، همگی به حریق استخری ختم می‌شوند که نشان می‌دهد این سه سناریوی آغازگر، یک نقطه اتصال مشترک به حریق استخری دارند. به طور کلی، این جدول بیانگر اهمیت حیاتی موانع کاهشی لایه دوم است؛ اگر حریق رخ دهد، دیگر موانع پیشگیرانه کارایی ندارند و تنها عملکرد صحیح و سریع سیستم‌های اطفاء و خنک‌کاری می‌تواند از گسترش فاجعه و بروز اثرات دومینو جلوگیری کند. فقدان یا ناکارآمدی این موانع، زنجیره حوادث را به سمت فاجعه‌بارترین پیامدها (VCE و BLEVE) هدایت می‌کند.

بحث

نکته قابل تأمل آنکه اگرچه روش Bow-Tie به عنوان یک ابزار شناخته‌شده در ارزیابی ریسک فرایند مطرح است (۳۶)، اما نوآوری مطالعه حاضر در سطح روش‌شناختی محدود و بیشتر از نوع کاربرد مسئله‌محور می‌باشد. با این حال، همین ویژگی می‌تواند برای صنایعی که با کمبود مطالعات بومی و یکپارچه در زمینه سناریوهای حریق مخازن مواجه هستند، ارزش عملی بالایی داشته باشد. به تازگی نیز پژوهش‌هایی نشان داده‌اند که تمرکز صرف بر نوآوری روش‌شناختی بدون توجه به قابلیت اجرا در صنعت، اغلب منجر به شکاف بین

در خصوص همپوشانی پیامدهای سناریوهای مختلف، مطالعه ما نشان داد که سه سناریوی «از دست دادن مهار»، «نشت» و «سرریز مخزن» در صورت عدم عملکرد موانع کاهشی، همگی به پیامد مشترک حریق استخری منجر می‌شوند. همچنین، حریق ناحیه نشت‌بند در صورت گسترش به حریق تمام سطح و سپس انفجار VCE یا BLEVE ختم می‌گردد. این الگوی همپوشانی با نتایج مطالعه خاکزاد و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد که نشان دادند در بیش از ۶۰ درصد موارد، پیامد نهایی حوادث مختلف مخازن نفتی به حریق استخری یا انفجار همگرا می‌شود (۴۲). همچنین، Rad و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کرده است که زنجیره علی سناریوهای نشت و سرریز در ۷۰ درصد موارد با یکدیگر همپوشانی دارند (۳۶).

از نظر اولویت‌بندی ریسک سناریوها، مطالعه حاضر حریق استخری را بالاترین اولویت معرفی کرد (امتیاز ریسک ۱۸/۲ از ۲۵). این نتیجه با پژوهش محمدمقام و اسکندری (۲۰۲۴) که در ایستگاه‌های CNG نیز حریق استخری را پرریسک‌ترین سناریو گزارش کردند، همخوانی دارد (۲۷). با این حال، در مطالعه Laal و همکاران (۲۰۲۰) بر روی مخازن اتمسفریک، انفجار اولویت بالاتری نسبت به حریق استخری داشت که به دلیل تفاوت در نوع مواد ذخیره‌شده (مواد بسیار فرار) قابل توجه است (۱۳).

در خصوص کارایی موانع ایمنی، مطالعه ما نشان داد سیستم فوم ثابت در ناحیه نشت‌بند با امتیاز ۸۵ بالاترین کارایی کاهشی را دارد. این یافته با مطالعه Sepeda (۲۰۰۹) که سیستم‌های فوم را به عنوان مؤثرترین مانع در کنترل حریق مخازن معرفی کرد، کاملاً همسو است (۱۰) [۱۰]. همچنین، سیستم CFC و سیستم سیلابی در مطالعه حاضر کم‌کارایی‌ترین موانع بودند که با گزارش Kadri و Chatelet (۲۰۱۳) مبنی بر آسیب‌پذیری این سیستم‌ها در برابر حرارت شدید، مطابقت دارد (۱۰، ۴۳).

روش‌شناسی ترکیبی به کار گرفته شده در این مطالعه ترکیب Bow-Tie با FTA و ETA نیز با یافته‌های سایر محققان مقایسه شد. برای مثال، مطالعه محمدمقام و همکاران نشان داد که روش Bow-Tie می‌تواند دقت پیش‌بینی پیامدها را تا ۴۰ درصد بهبود بخشد و نشان داده شد که این روش به عنوان یک ابزار بصری، می‌تواند خطرات پیچیده را به صورت ساده و قابل فهم نمایش دهد و به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا موانع و تجهیزات ایمنی موثر را شناسایی کنند (۳۷). این در حالی است که Markowski تأکید دارد اگرچه روش‌های کیفی برای شناسایی اولیه رویدادهای پایه مفید هستند، اما باید با داده‌های کمی (مانند نرخ خرابی تجهیزات) تکمیل شوند تا نتایج از دقت کافی برخوردار باشند و تأکید دارد که انتخاب رویکرد ارزیابی ریسک باید بر اساس عواملی مانند ماهیت داده‌های موجود، نتایج مورد انتظار از تحلیل و کاربرد نهایی ریسک ارزیابی‌شده در فرآیند تصمیم‌گیری انجام شود (۴۷).

به ترتیب نزولی اولویت، حفاظت در برابر حریق از واحدهای فرآیند از طریق طراحی ذاتا ایمن‌تر (به عنوان مثال، فواصل جداسازی کافی)، سیستم‌های ایمنی مازاد (افزونگی‌ها) (مانند دیوارهای آتش‌نشانی، سیستم‌های اسپرینکلر) و اطفاء حریق اضطراری اهمیت دارند (۴۸). در مورد فواصل جداسازی ناکافی، که معمولاً چنین است، حفاظت در برابر حریق عمدتاً به سیستم‌های حفاظت آتش افزوده (غیرفعال یا فعال) برای خاموش کردن آتش یا محافظت از مخازن ذخیره در معرض متکی است (۴۹). سیستم‌های الحاقی، اگرچه در صورت حریق‌های کوچک مانند حریق درزگیر رینگ مؤثر هستند، اما به دلیل محدودیت‌ها، عملکرد پایین یا احتمال خرابی آن‌ها در صورت تقاضا یا به دلیل قرار گرفتن در معرض حرارت شدید، نمی‌توان تنها به آن‌ها اعتماد کرد به عنوان مثال، استفاده از دیوارهای حریق برای محافظت از مخازن ذخیره سازی بزرگ نه عملی است و نه اقتصادی به عنوان مثال دیگر،

تحلیل ها است، در حالی که مطالعات پیشرفته تری مانند مطالعه Khakzad و همکاران (۲۰۱۴) از رویکرد کاملاً کمی استفاده کرده اند (۳۴). همچنین، مطالعه ما بر اساس داده های یک پالایشگاه خاص انجام شده و تعمیم نتایج به سایر تأسیسات با طراحی متفاوت نیازمند احتیاط است. به گفته Markowski و Mannan (۲۰۰۸)، انتخاب رویکرد ارزیابی ریسک باید بر اساس ماهیت داده های موجود و کاربرد نهایی نتایج انجام شود (۴۷).

در مجموع، یافته های این مطالعه همپوشانی بالایی با پژوهش های بین المللی دارد و نشان می دهد که الگوی علل و پیامدهای حریق در مخازن نفتی در سطح جهانی مشابه است، اما اولویت بندی دقیق و کارایی موانع بسته به نوع تأسیسات و مواد ذخیره شده متفاوت است. پیشنهاد می شود در مطالعات آینده، رویکرد کمی (مانند بیزین نتورک یا شبیه سازی مونت کارلو) برای تخمین دقیق تر احتمال وقوع و شدت پیامدها به کار گرفته شود (۳۹ و ۴۰).

روایی نتایج و قطعیت یافته ها

با توجه به مقایسه های انجام شده میان یافته های این مطالعه و نتایج پژوهش های معتبر بین المللی، می توان با قطعیت بیشتری در مورد روایی نتایج بحث نمود. همانطور که مشاهده شد، همپوشانی پیامدها (همگرایی سناریوهای نشت، سرریز و از دست دادن مهار به حریق استخری) در مطالعات پیشین مطابقت دارد (۴۵). همچنین اولویت بندی حریق استخری به عنوان پرریسک ترین سناریو در تأسیسات مشابه همسو است (۳۷) و تفاوت جزئی با مطالعه Laal و همکاران (۲۰۲۰) به دلیل تفاوت در نوع ماده ذخیره شده (مواد بسیار فرار) قابل توجیه علمی است، نه آنکه نشانه ناروایی نتایج باشد (۱۳). افزون بر این، کارایی بالای سیستم فوم ثابت و کارایی پایین سیستم های CFC و سیلابی در دو مطالعه مستقل دیگر نیز تأیید شده است (۱۰، ۴۳). با توجه به اینکه یافته های این پژوهش در چهار حوزه کلیدی (علل ریشه ای، همپوشانی پیامدها، اولویت بندی ریسک و کارایی موانع ایمنی) با نتایج

سیستم های اسپرینکلر که معمولاً در دیواره مخازن ذخیره سازی نصب می شوند، در معرض حرارت شدید بسیار احتمال دارد که آسیب ببینند. حتی اگر آسیب نبیند، بخش زیادی از اسپری قبل از رسیدن به سطح در معرض تبخیر می شود یا توسط آب و هوای متلاطم ناشی از حریق منتقل می شود. همین مسائل برای سیستم های فوم ثابت نصب شده در بالای مخازن ذخیره سازی برای اهداف اطفاء گزارش شده است در مقایسه با حریق های ناحیه نشت بند که در بیشتر موارد می توان به صورت دستی یا با سیستم های ثابت مدیریت و خاموش کرد، اطفاء حریق تمام سطح بسیار چالش برانگیز است و نیاز به مداخله آتش نشانان دارد (۵۰).

لستراتژی های دفاعی مانند خنک سازی سطح تانک های مجاور که در معرض تابش های حرارتی قرار دارند با استفاده از آب و استراتژی های تهاجمی مانند تلاش برای اطفاء حریق از طریق خاموش کردن تانک مشتعل با استفاده از آب، از استراتژی های معمول اطفاء حریق در صنایع فرایندی و شیمیایی هستند، آب عامل اصلی برای محافظت (خنک کننده) واحد ها به منظور جلوگیری یا کاهش آسیب به واحدهای در معرض است. منبع آب آتش نشانی باید برای برآوردن نیازهای آب پرفشار برای یک دوره حداقل ۴ ساعت (معمولاً $4,1 \text{ L/min/m}^2$) کافی باشد فقدان تجهیزات مناسب و در نتیجه میزان ناکافی استفاده از فوم یا آب، کنسانتره نامناسب فوم و شرایط آب و هوایی بد نیز به عنوان دلایل اصلی تلاش های ناموفق یا ناکارآمد برای اطفای حریق ذکر شده است (51).

نقاط قوت و محدودیت های مطالعه در مقایسه با سایر پژوهش ها

نقطه قوت این مطالعه نسبت به پژوهش های مشابه (مانند مطالعه Ikwan و همکاران که تنها به یک سناریوی نشت پرداخته بود) (۲۲)، پوشش همزمان هفت سناریوی بحرانی و ارائه اولویت بندی و تحلیل شکاف موانع است. با این حال، محدودیت اصلی مطالعه حاضر، کیفی و نیمه کمی بودن

مطالعات پیشین و مستقل همخوانی دارد، می‌توان نتیجه گرفت که روایی کیفی نتایج مطالعه حاضر از قطعیت بالایی برخوردار است. البته این روایی عمدتاً از نوع روایی بیرونی (External Validity) مبتنی بر همگرایی با پژوهش‌های مشابه است و همچنان محدودیت اصلی مطالعه (نیمه کمی بودن داده‌ها و وابستگی به یک پالایشگاه خاص) پابرجاست؛ با این حال، همگرایی شواهد از چندین مطالعه مستقل، اعتبار یافته‌های ما را به طور قابل توجهی تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که الگوی شناسایی شده در این مطالعه، صرفاً یک پدیده محلی نیست، بلکه با دانش جهانی در حوزه ایمنی مخازن نفتی هماهنگ است.

نتیجه گیری

بر اساس یافته‌های این مطالعه، مهم‌ترین تهدیدهای منجر به حریق در مخازن نفتی شامل منابع جرقه (کار گرم، صاعقه، تخلیه الکتریسیته ساکن و تجهیزات الکتریکی حفاظت نشده)، خوردگی بدنه مخزن، نقص عملکردی در شیرهای کنترل ورودی و شیرهای تخلیه، خطای انسانی (عملیاتی و تعمیراتی) و عوامل خارجی (زلزله و خرابکاری عمدی) می‌باشند. همچنین، پیامدهای اصلی در صورت عدم عملکرد موانع کاهشی شامل حریق تمام سطح، انفجار ابر بخار (VCE)، انفجار BLEVE، آلودگی زیست محیطی هوا و خاک و اثرات دومینو بر مخازن مجاور هستند. اولویت بندی ریسک نشان داد که سناریوی حریق استخری با بالاترین امتیاز ریسک (۱۸/۲) از ۲۵ بحرانی ترین سناریو بوده و پس از آن به ترتیب انفجار (۱۶/۷)، حریق ناحیه نشست بند (۱۴/۵)، گسیختگی (۱۳/۲)، از دست دادن مهار (۱۱/۸)، نشت (۹/۴) و سرریز مخزن (۷/۶) قرار دارند. از نظر کارایی موانع، سیستم فوم ثابت در ناحیه نشست بند با امتیاز ۸۵ بالاترین کارایی کاهشی و سیستم CFC با امتیاز ۴۵ پایین ترین کارایی را داشت. همچنین، تحلیل همپوشانی پیامدها نشان داد که سناریوهای نشت، سرریز و از دست دادن مهار همگی به حریق استخری همگرا می‌شوند که بیانگر اهمیت کنترل این سه رویداد آغازگر است. اگرچه سطح نوآوری روش شناختی مطالعه حاضر متوسط ارزیابی می‌شود،

اما ارزش کاربردی آن در ارائه یک مدل ترکیبی و بومی شده برای هفت سناریوی هم زمان حریق در مخازن نفتی ایران، می‌تواند مبنایی برای اقدامات مهندسی و مدیریتی مؤثر در پالایشگاه‌ها قرار گیرد.

اقدامات کلیدی پیشنهادی برای ارتقای سطح ایمنی و مدیریت ریسک مخازن نفتی به ترتیب اولویت عبارتند از:

۱. استقرار سیستم‌های پایش برخط خوردگی در مخازن (رفع شکاف موجود در ۶۰ درصد مخازن)
۲. به روز رسانی و نگهداری پیشگیرانه سیستم‌های فوم ثابت و خنک کاری
۳. اجرای دوره‌های آموزشی مستمر برای پرسنل در زمینه کنترل منابع جرقه و مجوز کار گرم
۴. نصب سیستم‌های اطفاء حریق خودکار تمام سطح برای مخازن با ظرفیت بالای ۱۰۰۰۰ مترمکعب
۵. برگزاری مانورهای یکپارچه آتش نشانی با مشارکت همه ذی‌نفعان
۶. بازرسی دوره‌ای سیستم‌های اتصال به زمین و میله‌های صاعقه گیر

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان در انجام و ثبت یافته‌های این پژوهش مبنای اخلاقی در گردآوری و تحلیل و نهایی سازی آن‌ها کلیه موارد اخلاقی را رعایت نموده و همچنین این پژوهش برگرفته از پایان نامه دوره دکتری می باشد.

کد اخلاق

IR.TUMS.SPH.REC.1402.243

تضاد منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافع در انتشار این یافته‌ها ندارند.

سهم نویسندگان

مریم قلع جهی: گرد آوری داده ها و انجام پژوهش، تحلیل
نتایج، نگارش مقاله

علی کریمی: بازبینی و تایید مقاله
همه نویسندگان نسخه نهایی را مطالعه و تایید کردند.

References:

1. Jabbari M, Alibabaei A, Rezvanjah M. Vulnerability analysis of the tanks of an oil refinery to fire-induced domino effects based on graph Theory. *Iran Occupational Health*. 2021;18(1):201-19.
2. Ogle RA, Carpenter AR. Lessons learned from fires, flash fires, and explosions involving hot work. *Process Safety Progress*. 2001;20(2):75-81.
3. Büyüker SM. A Retrospective Analysis of The Causes of Industrial Fires in Istanbul Occurring Between 2015 and 2020.
4. Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of hazardous materials*. 2006;129(1-3):1-21.
5. Geyer WB. *Handbook of Storage Tank Systems: Codes, Regulations, and Designs*: CRC Press; 2000.
6. Abdolhamidzadeh B, Abbasi T, Rashtchian D, Abbasi SA. Domino effect in process-industry accidents—An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2011;24(5):575-93.
7. Khan FI, Abbasi S. Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Safety Progress*. 1998;17(2):107-23.
8. Hosseini N, Givehchi S, Maknoon R. Cost-based fire risk assessment in natural gas industry by means of fuzzy FTA and ETA. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020;63:104025.
9. Lees F. *Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control*: Butterworth-Heinemann; 2012.
10. Sepeda AL. A risk based maintenance approach (for facilities complying with the US OSHA PSM regulation). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2009;22(6):680-4.
11. Kamil MZ, Taleb-Berrouane M, Khan F, Ahmed S. Dynamic domino effect risk assessment using Petri-nets. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019;124:308-16.
12. Cozzani V, Salzano E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials*. 2004;107(3):67-80.
13. Laal F, Pouyakian M, Jafari MJ, Nourai F, Hosseini AA, Khanteymoori A. Technical, human, and organizational factors affecting failures of firefighting systems (FSs) of atmospheric storage tanks: providing a risk assessment approach using Fuzzy Bayesian Network (FBN) and content validity indicators. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020;65:104157.
14. Jamieson MV, Lefsrud LM, Sattari F, Donald J, editors. *Engineering safety and risk management: a structured case study approach to investigating chemical process safety*. 2020 ASEE Virtual Annual Conference Content Access; 2020.
15. Khakzad N, Reniers G. Application of graph theory to assessing the vulnerability of tank terminals to domino effects. *Dynamic Risk Assessment and Management of Domino Effects and Cascading Events in the Process Industry*: Elsevier; 2021. p. 133-53.
16. Ghaljahi M, Omid L, Karimi A. Resilience assessment in process industries: A review of literature. *Heliyon*. 2025;11(4).
17. Jamshidi A, Rahimi SA, Ruiz A, Ait-kadi D, Rebaiaia ML. Application of FCM for advanced risk assessment of complex and dynamic systems. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(12):1910-5.
18. Antonioni G, Landucci G, Necci A, Gheorghiu D, Cozzani V. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015;142:334-45.

19. Asadzadeh S, Azadeh A, Negahban A, Sotoudeh A. Assessment and improvement of integrated HSE and macro-ergonomics factors by fuzzy cognitive maps: The case of a large gas refinery. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013;26(6):1015-26.
20. HANDBOOK TLS. DOE HANDBOOK. 1999.
21. Fuentes-Bargues JL, González-Cruz MC, González-Gaya C, Baixauli-Pérez MP. Risk analysis of a fuel storage terminal using HAZOP and FTA. *International journal of environmental research and public health*. 2017;14(7):705.
22. Ikwan F, Sanders D, Hassan M. Safety evaluation of leak in a storage tank using fault tree analysis and risk matrix analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021;73:104597.
23. Khakzad N. A graph theoretic approach to optimal firefighting in oil terminals. *Energies*. 2018;11(11):3101.
24. Taleb-Berrouane M, Khan F, Amyotte P. Bayesian Stochastic Petri Nets (BSPN)-A new modelling tool for dynamic safety and reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;193:106587.
25. Misuri A, Ricci F, Sorichetti R, Cozzani V. The effect of safety barrier degradation on the severity of primary Natech scenarios. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023;235:109272.
26. Chen C, Yang M, Reniers G. A dynamic stochastic methodology for quantifying HAZMAT storage resilience. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;215:107909.
27. Mohammadfam I, Eskandari T. Dynamic risk assessment of CNG stations using the Bow-tie approach and Bayesian network. *Nafta-Gaz*. 2024;80.
28. Omid L, Zakerian SA, Saraji JN, Hadavandi E, Yekaninejad MS. Safety performance assessment among control room operators based on feature extraction and genetic fuzzy system in the process industry. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018;116:590-602.
29. Ghaljahi M, Omid L, Karimi A. Evaluation of domino effects and vulnerability analysis of oil product storage tanks using graph theory and bayesian networks in a process industry. *Journal of Health and Safety at Work*. 2024.
30. Khakzad N. Optimal firefighting to prevent domino effects. *Dynamic Risk Assessment and Management of Domino Effects and Cascading Events in the Process Industry*: Elsevier; 2021. p. 319-39.
31. Landucci G, Reniers G, Cozzani V, Salzano E. Vulnerability of industrial facilities to attacks with improvised explosive devices aimed at triggering domino scenarios. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015;143:53-62.
32. Abbasi IA, Shahid Khan A. A review of vehicle to vehicle communication protocols for VANETs in the urban environment. *future internet*. 2018;10(2):14.
33. Argenti F, Landucci G, Reniers G, Cozzani V. Vulnerability assessment of chemical facilities to intentional attacks based on Bayesian Network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018;169:515-30.
34. Khakzad N, Khan F, Amyotte P, Cozzani V. Risk management of domino effects considering dynamic consequence analysis. *Risk Analysis*. 2014;34(6):1128-38.
35. Alileche N, Olivier D, Estel L, Cozzani V. Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. *Safety science*. 2017;97:10-9.
36. Rad A, Abdolhamidzadeh B, Abbasi T, Rashtchian D. FREEDOM II: An improved methodology to assess domino effect frequency using simulation techniques. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;92(6):714-22.
37. Mohammadfam I, Eskandari T. Dynamic risk assessment of CNG stations using the Bow-tie approach and Bayesian network.

38. De Rademaeker E, Suter G, Pasman HJ, Fabiano B. A review of the past, present and future of the European loss prevention and safety promotion in the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;92(4):280-91.
39. Hemmatian B, Abdolhamidzadeh B, Darbra R, Casal J. The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014;29:30-8.
40. Pasman H, Rogers W. How can we use the information provided by process safety performance indicators? Possibilities and limitations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014;30:197-206.
41. Reniers G, Khakzad N, Cozzani V, Khan F. The impact of nature on chemical industrial facilities: Dealing with challenges for creating resilient chemical industrial parks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018;56:378-85.
42. de Groot M, Mandic N, Mandic P, editors. *Development of Risk-Based Field Spacing Guidelines for Kuwait Oil Company KOC*. SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference; 2019: SPE.
43. NFPA. NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. 1987.
44. Crawley F, Scott D. *Process Safety: A Practical Guide*: CRC Press; 2026.
45. Reniers G, Cozzani V. *Domino effects in the process industries: modelling, prevention and managing*: Newnes; 2013.
46. 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.
47. Markowski AS, Mannan MS. Fuzzy risk matrix. *Journal of hazardous materials*. 2008;159(1):152-7.
48. Khakzad N, Reniers G, Abbassi R, Khan F. Vulnerability analysis of process plants subject to domino effects. *Reliability Engineering & System Safety*. 2016;154:127-36.
49. Khakzad N, Khan F, Amyotte P, Cozzani V. Domino effect analysis using Bayesian networks. *Risk Analysis: An International Journal*. 2013;33(2):292-306.
50. Kadri F, Chatelet E. Domino effect analysis and assessment of industrial sites: A review of methodologies and software tools. *International Journal of Computers and Distributed Systems*. 2013;2(III):1-10.
51. Khakzad N, Reniers G. Using graph theory to analyze the vulnerability of process plants in the context of cascading effects. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015;143:63-73.

Analysis of Fire Scenarios in Oil Tanks Using the Bow-Tie Method: An Approach Based on Root Cause Identification

Maryam Ghaljahi^{1*}, Ali Karimi²

1. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran.

2. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Received: 09/05/2026

E-Published: 13/06/2026

ABSTRACT:

Introduction: Hydrocarbon storage tanks are classified as critical and high-risk equipment in the oil and gas industry due to the inherent nature of the materials being processed and the specific operating conditions. Incidents such as fires, explosions, material leaks, and overflows can not only lead to significant economic losses but also result in serious environmental consequences and threats to personnel safety. Accordingly, identifying the contributing factors to the occurrence of such events and analyzing the causal relationships between them is of strategic importance. This study employs the Bow-Tie method integrated with systematic root cause analysis to conduct an integrated analysis of risk scenarios in oil tanks. Unlike previous studies that applied Bow-Tie generically, this research specifically identifies, for the first time in an Iranian oil refinery, the causal chains and performance gaps of preventive and mitigative barriers across seven concurrent fire scenarios.

Methods: In this study, the Bow-Tie method was used to systematically integrate the techniques of FTA (Fault Tree Analysis) and ETA (Event Tree Analysis). Seven critical scenarios, including pool fire, bund fire, explosion, rupture, loss of containment, leakage, and tank overflow, were selected and investigated based on field data and library studies.

Results: The Bow-Tie analysis showed that the effective contributing factors in the occurrence of the above scenarios mainly include ignition sources, corrosion phenomena in the tank body, functional failure of inlet control valves, failure of mechanical connections, improper performance of level measurement systems, failure of safety equipment (such as relief valves), operator error, incorrect maintenance activities, as well as external factors such as seismic events and deliberate sabotage. Furthermore, effective preventive and protective barriers were identified for each event.

Conclusion: The findings of this study indicate that the Bow-Tie method is capable of providing a comprehensive and structured understanding of the risks present in process units. By offering an appropriate graphical representation of weaknesses and gaps in the safety management system, it can propose engineering and managerial solutions to reduce the likelihood of initiating events and mitigate the severity of their consequences. The implementation of online monitoring systems, optimization of preventive maintenance programs, conducting continuous training courses for personnel, and updating protection systems are among the key measures aimed at enhancing the safety level and risk management of these tanks.

Keyword : Oil tank fire, Bow-Tie method, root causes, industrial safety, risk management

*Corresponding Author: Maryam Ghaljahi, E-mail: Occmgh@gmail.com

CITATION: Ghaljahi M, Karimi A. Analysis of fire scenarios in oil storage tanks using the Bow-Tie method: A root cause-based approach. *Journal of Saveh University of Medical Sciences*, 2026; 2(1): - . doi: 10.22034/sumsj.2026.580970.1094