

ارزیابی ریسک مخازن ذخیره‌سازی گاز نفتی مایع شونده در صنایع فرایندی با استفاده از روش پاپیونی

مصطفی میرزائی علی‌آبادی^۱، امید کلات پور^۱، ایرج محمد فام^۲، یوسف بابایی مسدرقی^{۳*}

^۱ استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

* نویسنده مسئول: یوسف بابایی مسدرقی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. ایمیل: usf.hse@gmail.com

DOI: 10.21859/johe-03021

چکیده

مقدمه: در مخازن ذخیره سازی LPG مقدار زیادی گازهای قابل اشتعال تحت فشار نگهداری می‌شود. رهایش محتویات این مخازن می‌تواند به پیامدهایی مانند BLEVE و انفجارهای آتشین منجر شود. بنابراین، شناسایی علل و پیامدها و سناریوهای حوادث و تعیین احتمال رخداد آن‌ها با استفاده از روش پاپیونی (Bowtie) که از ترکیب دو روش آنالیز درخت خطا و آنالیز درخت رویداد حاصل می‌شود امری ضروری بوده و هدف این مطالعه می‌باشد.

روش کار: در این مطالعه که در سال ۱۳۹۵ انجام شده است خطرات موجود در مخازن LPG پالایشگاه تهران با روش FTA شناسایی و پیامدهای بعد از رویداد اصلی با استفاده از ETA پیش‌بینی شده و احتمالات هر کدام محاسبه و با استفاده از دیاگرام Bowtie مسیر حادثه از فاز علل تا فاز پیامدها ترسیم و بررسی گردید.

یافته‌ها: در مجموع ۲۱ رویداد و ۱۱ برش حداقل همراه با احتمالات رخداد و میزان اهمیت هریک در سمت چپ و ۹ پیامد و سناریو بعد از رویداد اصلی همراه با احتمالات هریک در سمت راست دیاگرام Bowtie مشخص گردید. احتمال وقوع رویداد اصلی (رهایش LPG از مخزن کروی) $3/45 \times 10^{-2}$ محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: همه عوامل دخیل در رخداد حوادث و پیامدها به‌صورت تصویری در دیاگرام Bowtie نمایش داده می‌شود. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده، نقص در سیستم حفاظت کاتد یک و ابزار دقیق‌ها، سرریز شدن مخزن از جمله نقص‌های پراهمیت در مخزن LPG می‌باشد. به دلیل احتمال بالای پیامدها، نیاز به تعبیه سیستم‌های پیشگیری‌کننده یا کاهنده پیامدها، مانند سیستم خنک‌سازی و سیستم Fire stop در واحد مورد مطالعه مورد نیاز است.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی:

آنالیز درخت خطا

آنالیز درخت رویداد

گاز نفتی مایع شونده

صنایع فرایندی

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

مقدمه

مخازن ذخیره‌سازی یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها در صنایع فرایندی بوده که در آن نفت، محصولات پتروشیمی و طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی نگهداری می‌شود. این مخازن در پالایشگاه‌ها حجم زیادی از مواد شیمیایی قابل اشتعال و خطرناک را در برمی‌گیرند که همین امر باعث ایجاد پتانسیل خطرات متعددی در آن‌ها می‌شود [۱]. بروز حادثه در این مخازن ممکن است باعث تحمیل خسارت‌های مالی و جانی و همچنین وقفه‌های طولانی مدت در تولید صنایع مرتبط گردد. با توجه به بررسی‌های انجام‌پذیرفته مشخص شده‌است که

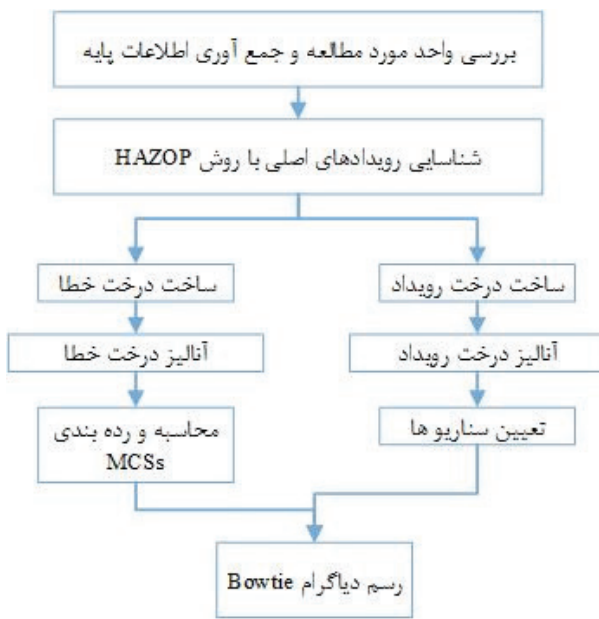
حوادث متعددی طی ۵۰ سال اخیر در ارتباط با مخازن گاز نفتی مایع شونده (LPG) رخ داده که این حوادث باعث کشته شدن افراد و ایجاد پرونده‌های حقوقی، کاهش ارزش سهام و ورشکستگی شرکت‌های متعددی در سطح دنیا شده است [۲]. از جمله مهم‌ترین این حوادث می‌توان به حادثه Vishakhapatnam هند در سال ۱۹۹۷ و حادثه انفجار شش مخزن کروی در مکزیکوسیتی در سال ۱۹۸۴ و حوادث مربوط به مخازن LPG در Pune هند در سال ۲۰۰۴ و بانکوک تایلند در سال ۱۹۹۰ و استرالیا در سال ۲۰۰۱ و Tomahawk آمریکا

مخازن ذخیره‌سازی یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها در صنایع فرایندی بوده که در آن نفت، محصولات پتروشیمی و طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی نگهداری می‌شود. این مخازن در پالایشگاه‌ها حجم زیادی از مواد شیمیایی قابل اشتعال و خطرناک را در برمی‌گیرند که همین امر باعث ایجاد پتانسیل خطرات متعددی در آن‌ها می‌شود [۱]. بروز حادثه در این مخازن ممکن است باعث تحمیل خسارت‌های مالی و جانی و همچنین وقفه‌های طولانی مدت در تولید صنایع مرتبط گردد. با توجه به بررسی‌های انجام‌پذیرفته مشخص شده‌است که

ذخیره‌سازی گاز نفتی مایع شونده (LPG) در صنایع فرایندی با استفاده از تکنیک Bowtie می‌باشد. این روش از سال ۲۰۰۵ به بعد بیشتر مورد توجه پژوهشگران در دنیا قرار گرفته است [۱۵].

روش کار

پس از بررسی‌های مقدماتی صورت گرفته در واحد مورد مطالعه الگویی به صورت تصویر ۱ جهت انجام مراحل تحقیق ترسیم شد. بررسی واحد مورد مطالعه و جمع‌آوری اطلاعات پایه: داده‌ها و اطلاعات لازم از طریق مشاهدات مستقیم، مصاحبه با کارشناسان، بررسی اسناد و نقشه‌های عملیاتی و ... جمع‌آوری گردید.



تصویر ۱: نمایش گرافیکی مراحل انجام تحقیق

شناسایی رویدادهای اصلی با روش HAZOP: با توجه به وجود خطرات مختلف در واحد مخازن LPG، تصمیم گرفته شد تا ارزیابی ریسک اولیه‌ای جهت انتخاب رویدادهای اصلی (Top event) انجام گیرد. جهت ترسیم و آنالیز دیاگرام Bowtie ابتدا باید درخت خطا و درخت رویداد ترسیم و محاسبات مربوطه انجام گردد. روش Bowtie از ترکیب دو روش آنالیز درخت خطا و آنالیز درخت رویداد ایجاد می‌شود. درخت خطا (FT): این روش از استاندارد NUREG-۰۴۹۲-۰۴ منتج شده است. روش آنالیز Fault Tree مدلی گرافیکی و یک نمودار منطقی است که ترکیب نواقصی که می‌توانند منجر به رخداد رویداد خاص مورد نظر که (Top Event)

در سال ۲۰۰۸ و کره جنوبی در سال ۱۹۹۳ اشاره نمود [۲-۷]. نگرانی‌های عمده‌ای در ارتباط با ذخیره‌سازی مواد خطرناک مانند LPG که در صورت رهاسازی سریعاً در هوا منتشر می‌شوند در صنایع فرایندی وجود دارد و به علت اینکه از هوا سنگین‌تر می‌باشند بر روی سطح زمین تجمع پیدا کرده و با کوچک‌ترین جرقه‌ای فاجعه‌ای عظیم را به بار می‌آورند [۸]. در مخازن ذخیره سازی LPG مقدار زیادی گازهای قابل اشتعال تحت فشار نگهداری می‌شود. رهايش محتویات این مخازن می‌تواند به پیامدهایی مانند انفجار بخار مایع در حال جوشان (BLEVE) و انفجارهای آتشین و پراکندگی مواد سمی منجر شود [۹].

برای کنترل آسیب‌ها و صدمات ناشی از عوامل مخاطره‌آمیز مرتبط با مخازن ذخیره‌سازی LPG باید به شناختی صحیح از خطرات بالقوه آن دست‌یافت. اصولاً برای ارزیابی ریسک از تکنیک‌های مختلفی استفاده می‌شود که انتخاب روش مناسب با توجه به صنایع مورد بررسی و اهداف مطالعات متفاوت می‌باشد [۱۰]. از روش‌های ارزیابی ریسک مورد استفاده در صنایع فرایندی می‌توان به روش‌های What if FTA, HAZOP, FMEA, ETA, Dow Index اشاره نمود که هر کدام اهداف مشخصی را دنبال کرده و ارزیابی ریسک را باهدف خاصی انجام می‌دهند [۲، ۱۱، ۱۲]. در مطالعه‌ای که توسط Tamil Selvan در مخازن LPG انجام شده است ریسک‌های موجود در این مخزن شناسایی و سناریوهای حوادث مشخص شده و به صورت کمی رتبه‌بندی شده است و سپس با استانداردهای بین‌المللی مقایسه شده و نواحی دارای سطح خطر ALARP مشخص گردیده است [۱۳]. Markowski در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۹ انجام داد، سه روش ETA و FTA و Bowtie را بررسی نمود. وی در این مطالعه عنوان کرد که روش‌های آنالیز ایمنی فرایندها از قبیل ETA و FTA می‌تواند بیشتر در رویکرد Bowtie برای ارزیابی ریسک سناریوهای حوادث استفاده شود. ایشان در این مطالعه یک مخزن ذخیره‌سازی ایزو بوتان را آنالیز کرده است [۱۴].

با توجه به توضیحات بالا و همچنین نبود سابقه ارزیابی ریسک با استفاده از روش Bowtie در مخازن ذخیره‌سازی LPG در سطح کشور، به نظر می‌رسد ارزیابی ریسک و همچنین تعیین سناریوهای حوادث مهم به صورت مصور و کمی با استفاده از روش Bowtie، در صنایع فرایندی کشور به ویژه در قسمت ذخیره‌سازی موادی همچون LPG ضرورتی ویژه دارد که نیاز به توجه بیشتری در این زمینه می‌باشد، بر این اساس هدف از این مطالعه ارزیابی ریسک مخازن

نامیده می‌شود) گردد را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این روش، روشی استنتاجی یعنی از کل به جزء است که در آن از نمادهای ریاضیاتی بولین (مانند AND, OR) استفاده می‌شود تا رویداد اصلی (Top Event) را به رویدادهای پایه (Basic Event) مرتبط کند. درخت رویداد (ET): به‌منظور شناسایی و محاسبه ترتیب رخداد سناریوهای دخیل در حادثه بالقوه، از روش آنالیز درخت رویداد استفاده گردید. هدف از استفاده از این روش، تعیین رخداد اولیه و پیامدهای آن در صورت عدم کارکرد صحیح سیستم‌های ایمنی می‌باشد و یک ابزار بسیار قدرتمند برای شناسایی و ارزیابی کلیه مسیرهای پیامدهای سیستم که ممکن است بعد از یک رخداد اولیه اتفاق بیفتد می‌باشد. آنالیز درخت خطا (FTA): آنالیز FTA به دو صورت کمی و کیفی صورت می‌پذیرد. در مدل کیفی تنها به بررسی و تعیین برش‌های حداقل یا Minimal Cut Sets (MCSs) پرداخته می‌شود، یک مجموعه برش‌های حداقل ترکیبی از رویدادهای پایه است که برای وقوع رویداد اصلی کفایت می‌کند، اما در مدل کمی، احتمالات Top Event و برش‌های حداقل نیز محاسبه می‌گردد. جهت کمی سازی درخت خطا از داده‌های عمومی مربوط به منابع شماره [۱۶، ۱۷] و ضمایم آن‌ها و نظر متخصصین ایمنی استفاده گردید. جهت محاسبه احتمال رخداد TE از رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده گردید.

رابطه ۵: $P_r(\text{consequence}) = P_r(\text{TE}) \times \prod_{j=1}^n P_r(E_j)$ که در این رابطه $P_r(\text{consequence})$ احتمال رخداد هر یک از پیامدها، $P_r(\text{TE})$ احتمال رویداد اصلی، $P_r(E_j)$ احتمال شکست یا موفقیت لایه‌های حفاظتی می‌باشد. رسم دیاگرام Bowtie: این تکنیک یک روش ارزیابی احتمالی یکپارچه است که از ترکیب دو تکنیک FTA و ETA ساخته شده است و سناریوهای حادثه را بر اساس احتمال و مسیرهای رخداد ارزیابی می‌کند. این روش باهدف پیشگیری، کنترل، حذف یا کاهش رویدادهای نامطلوب از طریق توسعه یک ارتباط منطقی بین دلایل و پیامدهای یک رویداد نامطلوب مطرح شده است. درواقع دیاگرام Bowtie به ما نشان می‌دهد که تجهیزات و افراد و سیستم‌های ایمنی در یک سناریوی حادثه چگونه عمل می‌کنند و خطاها و پیامدها چه ارتباطی با یکدیگر دارند. زمانی که احتمال وقوع هر سناریویی ارزیابی شد علت‌ها یا سناریوهای بحرانی (مهم) به‌وضوح آشکار می‌شوند. بر اساس دیاگرام Bowtie حادثه در دو فاز قبل و بعد از حادثه بررسی شد و رویدادهای و سناریوهای بحرانی مشخص گردید.

یافته‌ها

درخت خطا: با توجه به نتایج HAZOP در مخزن کروی حاوی LPG، رهایش گاز LPG به‌عنوان رویداد خاص موردنظر (رویداد اصلی) انتخاب گردید و سپس بخش درخت خطای مربوط به روش Bowtie، مطابق تصویر ۲ در پنل‌های تخصصی با حضور متخصصان ایمنی و افراد عملیاتی مربوطه

رابطه ۱: $P_{\text{And}}(E) = \prod_{i=1}^k P(E_i)$

رابطه ۲: $P_{\text{Or}}(E) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P(E_i))$

که در این رابطه‌ها، 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 $k=1, 2, 3, \dots$ یکی از مهم ترن خروجی‌های آنالیز درخت خطا در روش Bowtie، محاسبه میزان اهمیت (Importance measure) هر یک از رویدادهای پایه و یا میانی و برش‌های حداقل در بروز رویداد اصلی می‌باشد [۱۸]. جهت محاسبه میزان اهمیت رویدادهای پایه و میانی از رابطه ۳ و میزان اهمیت برش‌های حداقل از رابطه ۴ استفاده گردید.

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

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

رابطه ۳: $I_i^{\text{FV}} = \frac{P(\text{TE}) - P(\text{TE})}{P(\text{TE})}$

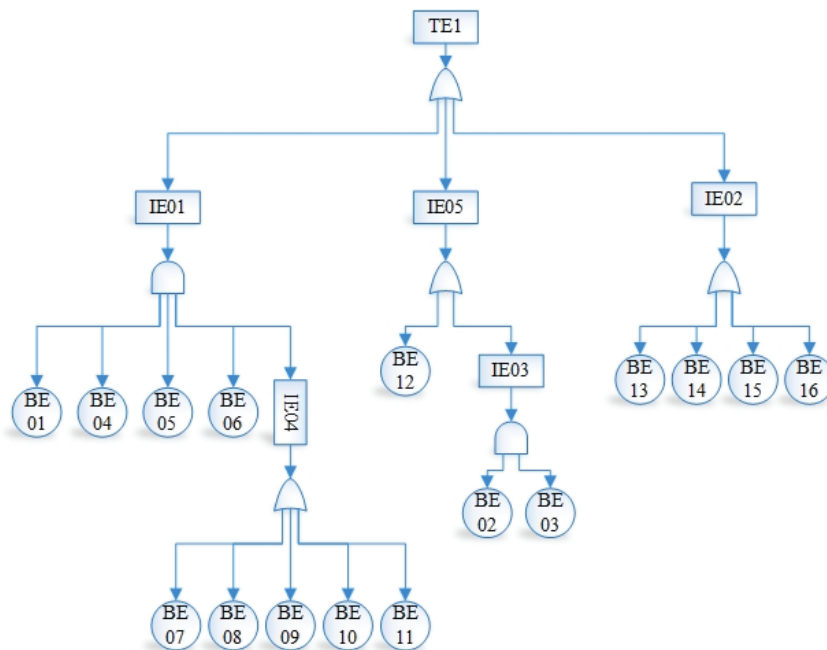
رابطه ۴: $IM_i = \frac{P(M_i)}{P(\text{TE})}$, $P(M_i) = \prod_{i \in M} P(BE_i)$

که در این رابطه IM میزان اهمیت برش حداقل، $P(\text{TE})$ احتمال رویداد اصلی، $P(M_i)$ احتمال برش حداقل، $P(BE_i)$

محاسبه احتمالات آن، بخش درخت رویداد مربوط به روش Bowtie نیز مطابق تصویر ۳ با حضور متخصصان ایمنی و افراد عملیاتی، در دو حالت رهایش ناگهانی و رهایش تدریجی و با در نظر گرفتن چهار لایه حفاظتی (سیستم‌های ایمنی) باهدف تعیین سناریوهای مختلف حوادث و توالی رویدادها بعد از رویداد اصلی، ترسیم گردید. بعدازاینکه ترسیم کیفی درخت رویداد انجام شد احتمال شکست یا موفقیت هر یک از لایه‌های حفاظتی تعیین شده و سپس با استفاده از رابطه شماره ۵ احتمال هر یک از پیامدها محاسبه شد که در جدول ۳ نمایش داده شده است. ضمناً سناریوهای مختلفی که منجر به این نتایج شده است نیز در این جدول آورده شده است.

ترسیم گردید. بعدازاینکه ترسیم کیفی درخت خطا با تمرکز بر رهایش گاز LPG به اتمام رسید احتمال رخداد رویدادهای پایه استخراج شده و کمی‌سازی درخت خطا با استفاده از ترکیب دروازه‌های منطقی و روابط ۱ و ۲ انجام گرفت. جدول ۱ احتمال رخداد رویدادهای پایه و احتمال رخداد رویدادهای میانی و رویداد نهایی (رهایش LPG از مخزن کروی) را نشان می‌دهد. همچنین میزان اهمیت هر یک رویدادهای پایه و میانی و برش‌های حداقل (MCSS) در بروز رویداد اصلی با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه شده و به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است. درخت رویداد: بعد از ترسیم درخت خطا و مشخص شدن رویداد اصلی موردنظر و علت‌های به وجود آورنده و

جدول ۱: احتمال رخداد رویدادهای پایه و میانی درخت خطا و میزان اهمیت رویدادها				
رویدادها	توصیف رویداد	احتمال رخداد (در یک سال)	میزان اهمیت رویداد	رتبه‌بندی اهمیت رویداد پایه
BE۰۱	ریختن اشتباه مواد به داخل مخزن (filling از بالا)	1×10^{-2}	$1/8 \times 10^{-6}$	۴
BE۰۲	نقص سلول‌های کاتدی	$6/3 \times 10^{-2}$	$6/24 \times 10^{-1}$	۲
BE۰۳	نقص در سیستم انتقال (پوشش خارجی)	$6/3 \times 10^{-2}$	$6/24 \times 10^{-1}$	۲
BE۰۴	عدم تخلیه قبل از نمونه‌گیری	1×10^{-1}	$1/5 \times 10^{-6}$	۱
BE۰۵	معرف با مواد تخلیه شده واکنش نشان می‌دهد	1×10^{-1}	$1/5 \times 10^{-6}$	۱
BE۰۶	افزایش فشار بیش از ظرفیت PSV	1×10^{-1}	$1/5 \times 10^{-6}$	۱
BE۰۷	نقص در کمپرسور	$8/1 \times 10^{-2}$	$2/89 \times 10^{-6}$	۳
BE۰۸	نقص در Surge drum	1×10^{-1}	$2/89 \times 10^{-6}$	۱
BE۰۹	نقص در PRV	1×10^{-2}	$2/89 \times 10^{-6}$	۵
BE۱۰	نقص در PSV	1×10^{-2}	$2/89 \times 10^{-6}$	۵
BE۱۱	نقص در فن هوایی	$2/19 \times 10^{-3}$	$2/89 \times 10^{-6}$	۷
BE۱۲	نشستی از drain valve	1×10^{-4}	$2/9 \times 10^{-3}$	۸
BE۱۳	شکست یا نقص LI	1×10^{-2}	$2/81 \times 10^{-1}$	۵
BE۱۴	خطای اپراتور	3×10^{-3}	$8/1 \times 10^{-2}$	۶
BE۱۵	حجم ناکافی در مخزن در هنگام بارگیری	1×10^{-2}	$2/81 \times 10^{-1}$	۵
BE۱۶	نقص در TI&PI	8×10^{-3}	$2/24 \times 10^{-1}$	۶
TE۰۱	رهایش LPG از مخزن کروی	$3/45 \times 10^{-2}$	رویداد اصلی	رویداد اصلی
IE۰۱	ترکیدگی مخزن	$1/91 \times 10^{-6}$	$2/89 \times 10^{-3}$	۵
IE۰۲	سرریز شدن مخزن و رهایش از شیر اطمینان (PRV)	$3/06 \times 10^{-1}$	$8/82 \times 10^{-1}$	۲
IE۰۳	سوراخ شدن مخزن به علت خوردگی	$3/97 \times 10^{-3}$	$1/1 \times 10^{-1}$	۴
IE۰۴	نقص در سیستم‌های کاهنده فشار	$3/09 \times 10^{-2}$	$2/89 \times 10^{-3}$	۱
IE۰۵	نشستی از مخزن	$4/07 \times 10^{-3}$	$1/13 \times 10^{-1}$	۳



تصویر ۲: درخت خطا ترسیم شده مربوط به رهاش گاز LPG از مخزن کروی در روش Bowtie

جدول ۲: توصیف برش‌های حداقل مربوط به درخت خطا و میزان اهمیت هر یک از آن‌ها

شماره برش حداقل	توصیف	احتمال (در یک سال)	میزان اهمیت برش حداقل	رتبه بندی اهمیت برش حداقل
CS1	BE01, BE04, BE05, BE06, BE07	$8/1 \times 10^{-7}$	$2/35 \times 10^{-5}$	۳
CS2	BE01, BE04, BE05, BE06, BE08	1×10^{-6}	$2/9 \times 10^{-5}$	۳
CS3	BE01, BE04, BE05, BE06, BE09	1×10^{-7}	$2/9 \times 10^{-6}$	۳
CS4	BE01, BE04, BE05, BE06, BE10	1×10^{-7}	$2/9 \times 10^{-6}$	۳
CS5	BE01, BE04, BE05, BE06, BE11	$2/19 \times 10^{-8}$	$6/35 \times 10^{-7}$	۳
CS6	BE02, BE03	$3/969 \times 10^{-3}$	$1/15 \times 10^{-1}$	۲
CS7	BE12	1×10^{-4}	$2/9 \times 10^{-3}$	۱
CS8	BE13	1×10^{-2}	$2/9 \times 10^{-1}$	۱
CS9	BE14	3×10^{-2}	$8/7 \times 10^{-2}$	۱
CS10	BE15	1×10^{-2}	$2/9 \times 10^{-1}$	۱
CS11	BE16	8×10^{-2}	$2/32 \times 10^{-1}$	۱

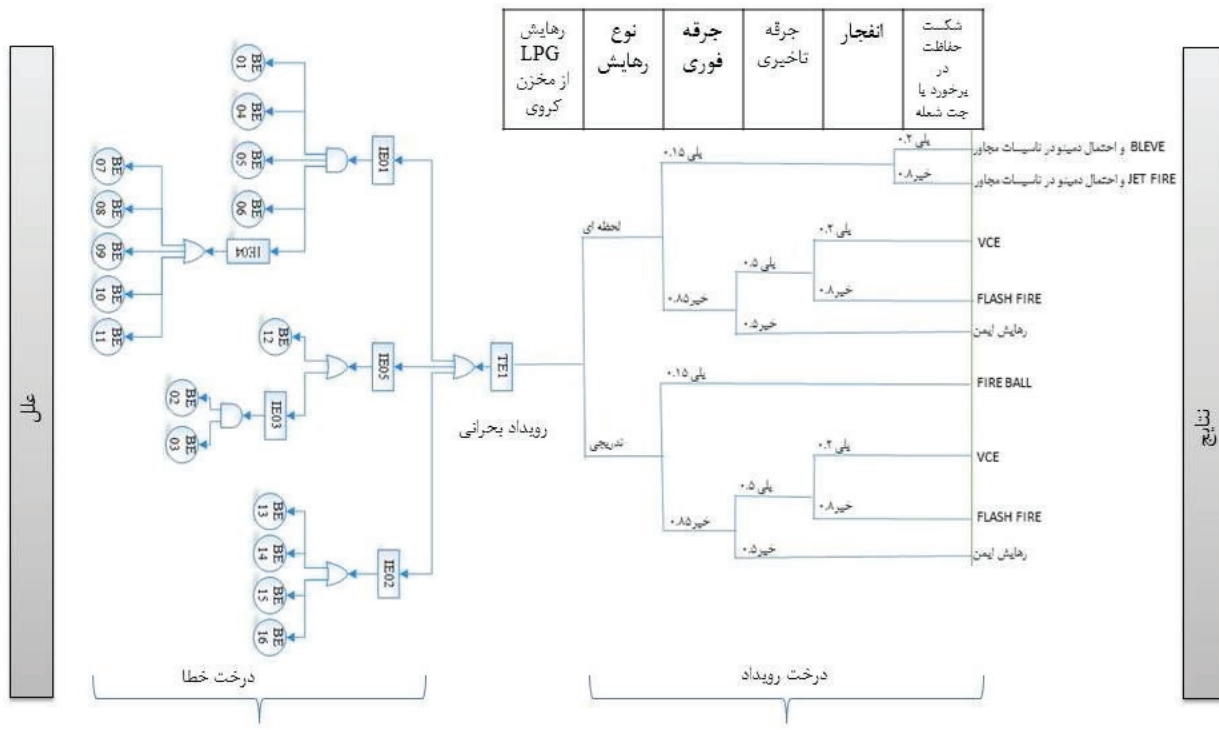
جدول ۳: احتمال طبقه بندی شده پیامدهای نهایی درخت رویداد (حروف انگلیسی به تصویر B حالت موفقیت و به تصویر B̄ حالت شکست لایه حفاظتی)

شاخه های ایجاد کننده پیامد

پیامد	احتمال (در یک سال)
ABCF	$1/0.35 \times 10^{-3}$
ABCĀ	$4/14 \times 10^{-3}$
ABĀCDE	$2/93 \times 10^{-3}$
ABĀCĀDE	$1/17 \times 10^{-2}$
ABĀCĀD	$1/46 \times 10^{-2}$
ABĀC	$5/17 \times 10^{-3}$
ABĀCDE	$2/93 \times 10^{-3}$
ABĀCĀDE	$1/17 \times 10^{-2}$
ABĀCĀD	$1/46 \times 10^{-2}$



تصویر ۳: درخت رویداد ترسیم‌شده مربوط به رهایش گاز LPG از مخزن کروی در روش Bowti



تصویر ۴: دیاگرام Bowtie و اجزاء تشکیل‌دهنده آن

رخداد رویداد اصلی نیز 1×10^{-4} محاسبه شد [۲۳]. علت نبود نشتی از مخزن در دلایل وقوع رویداد اصلی در مطالعه فوق می‌تواند به بسط ندادن بیشتر شاخه درخت خطای دیاگرام Bowtie ارتباط داشته باشد. همچنین دلیل تفاوت در عدد محاسبه شده برای احتمال وقوع رویداد اصلی نیز می‌تواند به دلیل بهتر بودن دستگاه‌های ایمنی و احتمال رخداد پایین رویدادهای پایه در مخزن‌های مورد مطالعه در مطالعه فوق باشد. با توجه به جدول ۲ در مجموع ۱۱ برش حداقل در شاخه درخت خطای دیاگرام Bowtie محاسبه شد و میزان اهمیت هر یک از آن‌ها محاسبه شده و رتبه‌بندی گردید. رتبه‌بندی برش‌های حداقل با توجه به تعداد رویدادهای پایه در هر برش انجام شد که این نوع رتبه‌بندی در مطالعات مشابه [۲۰] نیز دیده می‌شود.

با توجه به مقایسه نتایج این مطالعه با مطالعه آقای Nima khakzad و همکاران [۲۰] و نیز مطالعه آقای Daqing Wang و همکاران [۲۵] می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تعداد برش‌های حداقل هر درخت خطایی بستگی به تعداد رویدادهای پایه و نحوه ورود رویدادهای پایه از طریق دروازه‌های «و» و «یا» دارد. البته نباید از نظر دور داشت که هر چه تعداد برش‌های حداقل در یک درخت خطا زیاد باشد سیستم مورد مطالعه در به وقوع پیوستن حادثه آسیب‌پذیرتر می‌باشد.

میزان اهمیت هر یک رویدادهای پایه و میانی در جدول ۱ و میزان اهمیت برش‌های حداقل (MCSS) در جدول ۲ آمده است که در آن رویداد پایه ۲ و ۳ ($BE_{0.2}$, $BE_{0.3}$) در بین رویدادهای پایه و رویداد میانی ۲ ($IE_{0.2}$) در بین رویدادهای میانی دارای بیشترین اهمیت و بیشترین تأثیر در وقوع رویداد رأس را دارا می‌باشند و نیز برش‌های حداقل ۸ و ۱۰ (CS^8 , CS^{10}) بیشترین و برش حداقل ۵ (CS^5) کمترین تأثیر و اهمیت را در رخداد رویداد اصلی دارا می‌باشند. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که باوجود عوامل مختلف در اکسایش دیواره و تجهیزات مخزن، توجه به تعمیرات و نگهداری و تست‌های دوره‌ای سیستم حفاظت کاتدیک توجه ویژه‌ای را در واحد مورد مطالعه می‌طلبد و دارای اولویت بیشتری نسبت به سایر تجهیزات جانبی می‌باشد. نتیجه این مطالعه با مطالعه زیر مقایسه گردید. در مطالعه آقای Rachid Ouache و همکاران که با روش Bowtie انجام شده است در مجموع شش رویداد پایه و چهار برش حداقل را می‌توان محاسبه نمود. اینکه کدام رویداد پایه و کدام برش حداقل بیشترین تأثیر را در رخداد رویداد رأس دارد نیز قابل محاسبه می‌باشد و برش حداقل حساس و مهم در مطالعه فوق مشابه برش حداقل حساس و مهم این مطالعه

دیاگرام Bowtie با کمک داده‌ها و اطلاعات مربوط به درخت خطا و درخت رویداد ترسیم شده و اطلاعات آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همان‌گونه که در تصویر ۴ مشخص می‌باشد عوامل به وجود آورنده رویداد اصلی همراه با شاخه‌ها و دروازه‌های منطقی در سمت چپ دیاگرام و لایه‌های حفاظتی همراه با شکست یا موفقیت این لایه‌ها و پیامدها در سمت راست دیاگرام Bowtie قرار گرفته است.

بحث

شناسایی خطرات یک وظیفه ابتدایی جهت ارزیابی خطرات است. هر چه ارزیابی‌ها دقیق و جامع باشد و بتواند احتمالات خطرات و سنا یوهای به وجود آورنده حوادث را به‌طور تقریباً کامل بیان کند می‌تواند رهنمودهای بسیاری را برای مدیران ارشد یک سازمان مهیا سازد. با توجه به تصویر ۲ نتایج مرحله ترسیم کیفی درخت خطای دیاگرام Bowtie نشان داد در مجموع ۲۱ علل یا نقص (۱۵ رویداد پایه‌ای و ۵ رویداد میانی) در رخداد رهايش گاز LPG دخیل هستند. نتایج این مطالعه با مطالعات زیر مورد بررسی و مطابقت قرار گرفت. در درخت خطای ترسیم شده مربوط به مطالعه Rajakarunakaran و همکاران در ارتباط با رهايش گاز LPG از مخزن یک کامیون در مجموع ۱۶ رویداد پایه و ۴ رویداد میانی [۲۲] و در درخت خطای ترسیم شده مربوط به مطالعه RefaulFerdous و همکاران ۶ رویداد پایه [۲۳] و در مطالعه مربوط Rachid Ouache و همکاران نیز ۶ رویداد پایه و ۲ رویداد میانی شناسایی شده است [۲۴]. وجود تجهیزات جانبی مختلف در هر یک از انواع مخازن LPG، حجم مخزن، گسترش دادن رویدادهای پایه، در نظر گرفتن مرزهای فیزیکی مختلف در انواع مطالعات، تعداد رخدادها غیرمجاز و سطح تمرکز دلایل عمده تفاوت در تعداد رویدادهای پایه و میانی شناسایی شده می‌تواند باشد. با توجه به جدول ۱ سرریز شدن مخزن و رهايش از شیر اطمینان (احتمال رخداد: $4/07 \times 10^{-3}$) نشتی از مخزن (احتمال رخداد: $3/09 \times 10^{-7}$) به ترتیب و ترکیب مخزن (احتمال رخداد: $3/09 \times 10^{-7}$) به ترتیب بیشترین نقش را در رهايش گاز LPG دارا می‌باشند. احتمال رخداد رویداد اصلی (رهايش LPG از مخزن کروی) نیز $3/45 \times 10^{-2}$ محاسبه گردید. نتایج این مطالعه با مطالعات زیر مورد بررسی و مطابقت قرار گرفت.

در مطالعه‌ای که آقای Rachid Ouache و همکاران در ارتباط با مخزن ذخیره‌سازی LPG با استفاده از روش Bowtie انجام داد، ترکیب مخزن و سرریز شدن مخزن به ترتیب بیشترین تأثیر را در رخداد رهايش گاز LPG داشتند و احتمال

حفاظتی در مطالعه فوق نسبت به این مطالعه متفاوت است. مطابق با تصویر ۴ که دیاگرام Bowtie را نمایش می‌دهد دو نوع آنالیز شامل آنالیز کمی و آنالیز کیفی دارای پنج بخش اساسی و کاربردی شامل خطرات (تهدیدها)، درخت خطا، رویداد اصلی، درخت رویداد، پیامدها به همراه چندین بخش فرعی شامل لایه‌های حفاظتی، سناریوهای قبل و بعد از وقوع حوادث، احتمالات رخداد سناریوها و برش‌های حداقل، میزان اهمیت، شناسایی و محاسبه شده است. این اطلاعات ارزشمند روش Bowtie از ترکیب دو روش آنالیز درخت خطا و آنالیز درخت رویداد حاصل شده است. نتایج این مطالعه با مطالعات زیر بررسی و مطابقت داده شد.

De.Ruijter و همکاران دو نوع آنالیز شامل آنالیز کیفی (دیاگرام درخت خطا و درخت رویداد همراه با لایه‌های حفاظتی) و آنالیز کمی (دیاگرام درخت خطا و درخت رویداد و لایه‌های حفاظتی همراه با محاسبه احتمالات رویداد اصلی و پیامدها) را همراه با ارتباط خطاها و پیامدها برای روش Bowtie بررسی کردند [۲۶]. همچنین Targoutzidis و همکاران در مطالعه خود روش Bowtie را روشی که از پتانسیل خطرات شروع کرده و در ادامه به رویداد اصلی بسط داده می‌شود و سپس پیامدهای حادثه بررسی می‌شود تعریف کرده و سپس در آنالیز عملی خود برش‌های حداقل و سناریوهای حادثه را تعیین و احتمالات آن همراه با میزان اهمیت هر یک از رویدادها و برش‌ها را محاسبه نموده‌اند [۲۷]. نتایج این مطالعه با مطالعات فوق و همچنین مطالعات [۱۵، ۲۸-۳۲] مشابه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

هدف از ارزیابی کمی ریسک به روش Bowtie محاسبه ارزش علل شروع‌کننده و احتمال پیامدهای حاصله و نیز تعیین سناریوها شروع‌کننده و ادامه‌دهنده تا پیامدهای حاصله می‌باشد. در دیاگرام Bowtie مسیر حادثه از فاز علل وقوع حادثه تا پیامدهای حوادث ردیابی شد. در این فرایند میزان اهمیت رویدادها و برش‌های حداقل و سناریوهای مختلف نیز مشخص شد که می‌تواند در تخصیص منابع و امکانات جهت کاهش رخداد حوادث و پیامدهای آن مورد بهره قرار گیرد. از دیگر مزیت‌های کاربرد روش Bowtie در ارزیابی ریسک مخازن LPG، پیشگیرانه و واکنشی بودن و ارائه راهکارهای کنترلی، پوشش دادن تمامی فرایندهای مربوط به مخزن LPG، ساده و قابل اجرا بودن، هزینه پایین اجرا، قابل فهم بودن برای همگان، خروجی دیاگرامی و قابل نصب در فضاهای اداری می‌باشد. دیاگرام Bowtie نشان داد که عوامل متعددی

می‌باشد [۲۳] اما مطلبی که در اینجا اهمیت دارد این است که کاربرد میزان اهمیت چه برای رویدادهای پایه و چه برای برش‌های حداقل دو چیز است: ۱- تخصیص بهتر منابع برای کنترل ۲- تعیین دامنه آنالیز هریک از رویدادهای پایه و یا برش‌های حداقل. آنچه که اغلب به هنگام محاسبه این اهمیت‌ها نتیجه‌گیری و استنباط می‌شود این است که تنها تعداد اندکی از رویدادها، نقش برجسته‌تری در وقوع رویداد رأس دارند در بسیاری از موارد تنها کمتر از ۲۰ درصد رویدادها در وقوع بیش از ۹۰ درصد رویداد رأس نقش دارند. علاوه بر مشخص شدن میزان اهمیت رویدادها، از دیگر نتایج سودمند این محاسبه، روشن شدن وضعیت تخصیص منابع به‌منظور تست، تعمیر و نگهداری، بازرسی، کنترل کیفیت و غیره می‌باشد تا بدین‌وسیله با بهینه‌سازی توزیع منابع، هزینه‌ها به حداقل برسد و سیستم به وضعیت بهتری سوق داده شود. علاوه بر تخصیص منابع، از سنجش میزان اهمیت می‌توان برای تعیین زمان‌های تعمیر یا از سرویس خارج کردن قطعات بهره برد. آنچه مسلم است قطعه‌ای که سهم عمده‌ای در وقوع رویداد رأس دارد بایستی در زمان کمتری تعمیر یا از سرویس خارج گردد.

با توجه به تصویر ۳، نتایج مرحله کیفی ترسیم درخت رویداد مربوط به روش Bowtie نشان داد که در مجموع ۹ پیامد در حالت‌های مختلف شکست یا موفقیت لایه‌های حفاظتی و توالی رویدادها می‌تواند به وجود آید. بعدازاینکه ترسیم کیفی درخت رویداد انجام شد احتمال شکست یا موفقیت هر یک از لایه‌های حفاظتی تعیین شده و احتمال هر یک از پیامدها به همراه سناریوهای مختلفی که منجر به این پیامدها می‌شود محاسبه شد که در جدول ۳ نمایش داده شده است. سناریوی ABCD دارای بیشترین احتمال و سناریوی ABCF دارای کمترین احتمال در به وقوع پیوستن پیامد پیش‌بینی شده را دارا است. نتایج این مطالعه با مطالعات زیر موردبررسی و مطابقت قرار گرفت. در مطالعه Rachid Ouache و همکاران ۱۰ پیامد و سناریو در بخش درخت رویداد روش Bowtie شناسایی و احتمالات رخداد آن‌ها محاسبه شده است [۱۳]. همچنین در مطالعه Tamil Selvan و همکاران نیز ۵ پیامد در نتیجه رهایش ناگهانی گاز LPG شناسایی و محاسبه گردیده است، همچنین سناریو و پیامد مهم این مطالعه نیز رهایش ایمن گاز LPG محاسبه شده است [۲۳]. نتایج مطالعات فوق با نتایج این مطالعه مشابه است و تنها تفاوت در احتمالات محاسبه شده برای پیامدها می‌باشد و این تفاوت به این دلیل می‌باشد که احتمال رخداد رویداد اصلی و احتمال شکست یا موفقیت لایه‌های

تست‌های ضخامت سنجی دیواره، احتیاط در هنگام نمونه‌برداری یا هنگام Drain کردن، کمتر نمودن حجم مواد ذخیره‌شده در داخل مخزن و تعمیرات و نگهداری ابزار دقیق‌ها. همچنین با توجه به احتمال محاسبه‌شده برای رویداد اصلی (رهاش گاز LPG) توجهات ویژه‌ای در واحد مورد مطالعه مورد نیاز است که از جمله آن‌ها تعبیه سیستم خنک‌سازی مخازن، عایق‌بندی دیواره، تست‌های ضخامت سنجی بیشتر و دقیق‌تر، تعبیه سه عدد پمپ و کمپرسور و فن هوایی (همیشه یکی از این تجهیزات در مسیر باشد و دو مورد دیگر به‌عنوان یدک نگهداری شود). وجود عدم قطعیت در احتمالات ورودی رویدادهای پایه از جمله معایب مطالعه فوق به شمار می‌رود که نیاز به انجام مطالعه به شیوه منطق فازی یا فازی - عصبی دارد که در آینده انجام شود.

سیاسگزاری

در پایان از کارکنان واحد ایمنی پالایشگاه نفت شهید تندگویان تهران به سبب همکاری‌های مفیدی که با نویسندگان داشتند نهایت تقدیر و تشکر را داریم.

REFERENCES

1. Lees F. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. Philadelphia: Elsevier Science; 2012.
2. Chang JI, Lin C-C. A study of storage tank accidents. *J Loss Prev Process Ind.* 2006;19(1):51-9. DOI: [10.1016/j.jlpp.2005.05.015](https://doi.org/10.1016/j.jlpp.2005.05.015)
3. Mou X, Carleton University. Dissertation. Engineering C, Co P. Quantitative Fire Risk Analysis Case Study Using CURisk. Ottawa: Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada; 2009.
4. Reed S, Tromp F, Lam A. Major hazards—Thinking the unthinkable. *Environ Manage.* 1992;16(6):715-22. DOI: [10.1007/bf02645661](https://doi.org/10.1007/bf02645661)
5. Ronza A, Fàbrega J, Sánchez J. Contributions to the risk assessment of major accidents in port areas. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya; 2011.
6. Taveau J. Explosion of fixed roof atmospheric storage tanks, part 1: Background and review of case histories. *Process Saf Prog.* 2011;30(4):381-92. DOI: [10.1002/prs.10459](https://doi.org/10.1002/prs.10459)
7. Pallotta N, Giovannone M, Pezzotti P, Gigliozzi A, Barberani F, Piacentino D, et al. Ultrasonographic detection and assessment of the severity of Crohn's disease recurrence after ileal resection. *BMC Gastroenterol.* 2010;10:69. DOI: [10.1186/1471-230X-10-69](https://doi.org/10.1186/1471-230X-10-69) PMID: [20594291](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20594291/)
8. Florea G, Popa M. Safety and Security Integration in LPG Tank Farm Process Control. *IFAC Proc Vol.* 2012;45(6):1828-31. DOI: [10.3182/20120523-3-ro-2023.00436](https://doi.org/10.3182/20120523-3-ro-2023.00436)
9. Landucci G, D'Aulisa A, Tugnoli A, Cozzani V, Birk AM. Modeling heat transfer and pressure build-up in LPG vessels exposed to fires. *Int J Therm Sci.* 2016;104:228-44. DOI: [10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.002)
10. Marhavilas PK, Koulouriotis DE. A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents' data: Application in an aluminum extrusion industry. *J Loss Prev Process Ind.* 2008;21(6):596-603. DOI: [10.1016/j.jlpp.2008.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jlpp.2008.04.009)
11. Fabbrocino G, Iervolino I, Orlando F, Salzano E. Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas. *J Hazard Mater.* 2005;123(1-3):61-9. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2005.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.04.015) PMID: [15908107](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15908107/)
12. Tixier J, Dusserre G, Salvi O, Gaston D. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *J Loss Prev Process Ind.* 2002;15(4):291-303. DOI: [10.1016/s0950-4230\(02\)00008-6](https://doi.org/10.1016/s0950-4230(02)00008-6)
13. Tamil Selvan R. risk assessment study for LPG storage and handling system of heat treatment plant. *Int J Emerg Technol Adv Eng.* 2015;5(7):122-31.
14. Markowski AS, Mannan MS, Bigoszewska A. Fuzzy logic for process safety analysis. *J Loss Prev Process Ind.* 2009;22(6):695-702. DOI: [10.1016/j.jlpp.2008.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jlpp.2008.11.011)
15. Cockshott JE. Probability Bow-Ties. *Process Saf Environ Prot.* 2005;83(4):307-16. DOI: [10.1205/psep.04380](https://doi.org/10.1205/psep.04380)
16. Freeman RA. CCPS guidelines for chemical process quantitative risk analysis. *Plant Oper Prog.* 1990;9(4):231-5. DOI: [10.1002/prsb.720090409](https://doi.org/10.1002/prsb.720090409)
17. Autor O, Autor SIM. OREDA : Offshore reliability data handbook: PO Box; 2002.
18. Vesely DL, Straub KD, Nolan CM, Rolfe RD, Finegold SM, Monson TP. Purified Clostridium difficile cytotoxin stimulates guanylate cyclase activity and inhibits adenylate cyclase activity. *Infect Immun.* 1981;33(1):285-91. PMID: [6114928](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6114928/)
19. Rausand M. Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications: John Wiley & Sons; 2004.
20. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliabil Eng Syst Saf.* 2011;96(8):925-32. DOI: [10.1016/j.res.2011.03.012](https://doi.org/10.1016/j.res.2011.03.012)
21. Safety) CCfCP. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis: Wiley; 2000.
22. Ferdous R, Khan F, Sadiq R, Amyotte P, Veitch B. Fault and event tree analyses for process systems risk analysis: uncertainty handling formulations. *Risk Anal.* 2011;31(1):86-107. DOI: [10.1111/j.1539-6924.2010.01475.x](https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01475.x) PMID: [20731791](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20731791/)
23. Ouache R, Adham AA. Reliability Quantitative Risk Assessment in Engineering System using Fuzzy Bow-Tie. *Int J Curr Eng Technol.* 2014;4(2):1117-23.
24. Rajakarunakaran S, Maniram Kumar A, Arumuga Prabhu V. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. *J Loss Prev Process Ind.* 2015;33:109-23. DOI: [10.1016/j.jlpp.2014.11.016](https://doi.org/10.1016/j.jlpp.2014.11.016)
25. Wang D, Zhang P, Chen L. Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks. *J Loss Prev Process Ind.* 2013;26(6):1390-8.

- DOI: [10.1016/j.jlp.2013.08.022](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.08.022)
26. de Ruijter A, Guldenmund F. The bowtie method: A review. *Saf Sci*. 2016;88:211-8. DOI: [10.1016/j.ssci.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001)
 27. Targoutzidis A. Incorporating human factors into a simplified "bow-tie" approach for workplace risk assessment. *Saf Sci*. 2010;48(2):145-56. DOI: [10.1016/j.ssci.2009.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.07.005)
 28. de Dianous V, Fievez C. ARAMIS project: a more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. *J Hazard Mater*. 2006;130(3):220-33. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2005.07.010](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.010) PMID: [16107301](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16107301/)
 29. Delvosalle C, Fievez C, Pipart A, Debray B. ARAMIS project: a comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *J Hazard Mater*. 2006;130(3):200-19. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2005.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.005) PMID: [16126337](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16126337/)
 30. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network. *Process Saf Environ Prot*. 2013;91(1-2):46-53. DOI: [10.1016/j.psep.2012.01.005](https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.01.005)
 31. Markowski AS, Kotynia A. "Bow-tie" model in layer of protection analysis. *Process Saf Environ Prot*. 2011;89(4):205-13. DOI: [10.1016/j.psep.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.04.005)
 32. Mokhtari K, Ren J, Roberts C, Wang J. Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals. *J Hazard Mater*. 2011;192(2):465-75. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2011.05.035](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.035) PMID: [21705142](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21705142/)

Risk Assessment of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Storage Tanks in Process Industries Using the Bowtie Technique

Mostafa Mirzaee Aliabadi ¹, Omid Kalapour ¹, Iraj Mohammadfam ², Yousef Babaee Masdarghi ^{3,*}

¹ Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

² Associate Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

³ MSc Student, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

* Corresponding author: Yousef Babaee Masdarghi, MSc Student, Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran. E-mail: usfhse@gmail.com

DOI: 10.21859/johe-03021

Received: 04.05.2016

Accepted: 31.08.2016

Keywords:

Fault Tree Analyses
Event Tree Analyses
Bowtie
LPG
Process Industries

How to Cite this Article:

Mirzaee Aliabadi M, Kalapour O, Mohammadfam I, Babaee Masdarghi Y. Risk Assessment of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Storage Tanks in Process Industries Using the Bowtie Technique. J Occup Hyg. 2016;3(2):1-11. DOI: 10.21859/johe-03021

© 2016 Hamedan University of Medical Sciences.

Abstract

Introduction: Liquefied Petroleum Gas (LPG) storage tanks contain large volumes of flammable and pressurized gases. Release of these fluids can lead to disastrous accidents such as BLEVE, and fiery explosion. Therefore, identifying the causes, consequences, probabilities, and scenarios of accidents using Bowtie technique, that is a combination of Fault Tree Analyses (FTA) and Event Tree Analyses (ETA), is imperative and the purpose of this study.

Methods: This study was performed in 2016. The hazards of the mentioned study in Tehran Refinery LPG tanks were identified by Fault Tree Analyses and the consequences of the top event were predicted by Event Tree Analyses. Probabilities of the events were calculated and the accident route, from the causes phase to consequences phase, was drawn by the Bowtie diagram.

Results: In total, 21 events and 11 minimal cut sets with their occurrence probabilities and importance measure were determined at the left side of the Bowtie diagram. Also, 9 consequences and scenarios of the top event were determined on the right side of the diagram. The occurrence probability of the top event (LPG release of spherical tanks) was calculated as 3.45×10^{-2} .

Conclusions: All factors involved in the occurrence of accidents and their consequences are shown in the Bowtie diagram. According to the obtained data, failure of cathodic protection systems and instrumentation, and overflow of tanks are important defects of LPG tanks. Due to the high probability of consequences, preventing systems such as cooling systems and fire stop systems are required for installation in the studied unit to reduce the consequences of accidents.