ارزیابی ریسک و مدل سازی پیامد ناشی از موج انفجار پدیده BLEVE مخزن کروی LPG در یک پالایش‌گاه

محمد کمائی[۱] - سید شمس الدین علیزاده[۲*] - عبدالرحمن کشوری[۳] - زینب خیرخواه[۴] - پریسا مشعشعی[۵]

ss.alizadeh2013@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۴ *تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۲۹*

چکیده

مقدمه: فعالیت‌های صنعتی، بخشی از تلاش انسان برای رسیدن به رفاه و آسایش بیش‌تر است، اما در این فعالیت ها مخاطرات مربوط به آن ها نیز در حال گسترش می‌باشد. شناسایی دقیق خطرات در صنایع نفت و گاز و ارزیابی و مدیریت ریسک با هدف کاهش شدت و تکرار حوادث پیش از وقوع آن ها و به حداقل رساندن صدمه به انسان و اموال از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی مخزن کروی گاز نفتی مایع شده تحت فشار در ناحیه مخازن یک پالایش‌گاه و ارزیابی ریسک پدیده توسعه بخارات مایع در حال جوش می‌باشد.

روش کار: در این مطالعه ارزیابی ریسک پدیده توسعه بخارات مایع در حال جوش (BLEVE) با روش Bowtie و نیز بررسی پیامد ناشی از موج انفجار پدیده BLEVE، انجام و مقدار موج انفجار حاصل از این پدیده و تأثیرات آن بر روی تجهیزات و ادوات کناری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور از نرم افزار PHAST نسخه ۶/۵۴ جهت مدل سازی پدیده BLEVE استفاده شده است.

یافته ها: در این ارزیابی به طور کلی پنج علت و دو پیامد جهت ایجاد پدیده BLEVE شناسایی شدند. اقدامات کنترلی جهت پیش‌گیری از ایجاد پدیده BLEVE به طور کلی ۴۳ مورد و اقدامات کنترلی جهت کاهش پیامد و اثرات ۳۱ مورد تعیین شدند. طبق تجزیه و تحلیل به عمل آمده مشخص شد که موج انفجار ناشی از مخزن کروی LPG، می‌تواند مخازن کناری LPG را دچار انفجار کرده که این امر سبب زنجیره ای شدن انفجارات خواهد شد.

نتیجه گیری: با استفاده از نتایج حاصل از مدل سازی و ارزیابی ریسک می‌توان به درستی علل ایجاد و آسیب پدیده BLEVE برای انسان و تجهیزات مجاور را مشخص و بر اساس آنها اقدامات کنترلی پیش‌گیرانه را اجرا و با طراحی و جانمایی مناسب، حریم ایمنی محل اسکان کارکنان، تجهیزات و ادوات مجاور را تعیین نمود.

کلمات کلیدی: *ارزیابی ریسک، مدل سازی، مخزن کروی، Bowtie ،BLEVE*

۱- کارشناس ارشد مدیریت HSE، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.
۳- استادیار، رئیس دانشکده و پژوهشکده پدافند غیر عامل دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.
۴- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، اهواز، ایران.
۵- کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.

مقدمه

از مهم‌ترین تبعات پیشرفت صنعت و تکنولوژی، افزایش تولید، گسترش حمل و نقل و نیاز بیش‌تر به مواد شیمیایی است، به طوری که امروزه وقوع حوادث ناگواری که ناشی از رهایش و انفجار مواد شیمیایی و سمی در واحدهای صنعتی است سبب شده خطرات زیادی افراد جامعه را تهدید نماید(۱). آن‌چه باید مورد توجه قرار گیرد آن است که ابعاد بزرگ یک حادثه همیشه به معنی حتمی بودن آن حادثه نیست زیرا در اکثر موارد ابعاد حادثه با احتمال وقوع آن نسبت عکس دارد. سرآغاز پدیده توسعه بخارات مایع در حال جوش نشتی در مخزن است که با عواملی هم‌چون برخورد فیزیکی یک شی با مخزن و احاطه مخزن توسط آتش شروع می‌شود که بعد از شروع نشتی، کاهش فشار ناگهانی در مخزن به‌وجود می‌آید و در این حالت مایع درون مخزن به حالت سوپر هیت در آمده و در این حالت جوشش مایع آغاز می‌شود و بخار حاصل از مایع به بخار اولیه در مخزن اضافه می‌گردد. مایع تا یک حد می‌تواند حالت سوپر هیت را تحمل کند و بعد از این حد، جوشش هسته زایی و همگن شروع خواهد شد که این جوشش به صورت انفجاری عمل خواهد کرد و مایع را بصورت دوفازی از طریق منفذ نشتی یا سرعت بالایی به بیرون می‌راند. در اثر این رویداد مخزن خرد می‌شود و تکه‌های آن به اطراف پرتاب می‌شود. در صورتیکه مایع قابل اشتعال باشد به همراه انفجار ایجاد شده توپ آتش نیز ایجاد می‌گردد.

تعداد انفجارات رخ داده در اثر توسعه بخارات مایع در حال جوش، بسیار فراوان بوده و بخش عمده آن ها مربوط به بروز تصادفات در تانکرهای خودرویی یا خطوط ریلی حمل گازهای مایع LPG می‌باشند. از سال ۱۹۵۱ تا سال ۱۹۸۴ بیش از ۱۹ مورد از انفجارات نوع BLEVE وجود داشته که مهم‌ترین و بزرگ ترین انفجار رخ داده در سال ۱۹۸۴ انفجار مخازن کروی و استوانه ای افقی در ترمینال نگهداری LPG در مکزیکوسیتی مکزیک بوده که ۶۴۰۰ مصدوم و ۶۵۰ کشته بر جا گذاشته است(۲).

از مهم‌ترین و رایج ترین حوادث ناگوار در واحدهای صنعتی، ساختمان‌های عمومی و اماکن پر تردد که باعث به خطر انداختن جان انسان ها و آسیب به تجهیزات و ادوات می‌گردند، پدیده آتش و انفجار است. انفجار از جمله تهدیدهایی است که صنایع فرآیندی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. انفجار می‌تواند بر اثر عوامل فیزیکی مانند ترکیدن یک مخزن حاوی گاز به دلیل افزایش بیش از حد فشار در آن و یا بر اثر عوامل شیمیایی مانند احتراق گازها رخ دهد(۳). انفجار در اثر توسعه بخارات مایع در حال جوش، از نوع انفجارات مکانیکی می‌باشد. این پدیده زمانی رخ خواهد داد که ظرف حاوی گاز مایع و یا مایع به‌صورت تحت فشار بوده و در حالی که محتویات آن در دمایی بیش از نقطه جوش نرمال قرار دارند، به‌صورت ناگهانی ظرف از هم گسیخته گردد. افت ناگهانی فشار درون ظرف نسبت به فشار محیط باعث تبدیل ناگهانی بخشی از مایع به بخار می‌گردد. بر اثر افزایش حجم ناگهانی در تغییر فاز رخ داده، موج فشار شدیدی ایجاد می‌گردد. انفجارات از نظر قدرت به دو نوع تقسیم بندی می‌گردند: دفلگریشن و دتونیشن. انفجار در مخازن کروی حاوی مواد اشتعال پذیر از نوع دتونیشن می‌باشد که انفجار بسیار قوی بوده و سرعت انبساط گاز می‌تواند به سرعت مافوق صوت برسد(۴). به طور کلی پیش بینی فرآیندهای مختلف (فیزیکی،

شیمیایی، مکانیکی و ...) به وسیله دو روش اصلی مطالعات تجربی (روش آزمایش‌گاهی) و مطالعات نظری (مدل‌سازی ریاضی) انجام می‌شود. روش‌های آزمایش‌گاهی به دلیل یک‌سری مشکلات در تهیه شرایطی کاملاً مشابه با شرایط واقعی کم‌تر مورد توجه قرار می‌گیرند. مطالعات نظری حداکثر استفاده را از نتایج مربوط به مدل ریاضی و دیفرانسیل می برد که پاسخ آن شامل سری‌های نامحدود، توابع خواص، معادلات غیر جبری، مقادیر ویژه و غیره می‌باشد؛ به طوری که ممکن است حل تحلیلی آنها کار ساده ای نباشد. خوشبختانه توسعه روش‌های عددی و در دسترس بودن پردازش‌گرهای بزرگ اطمینان استفاده از آنها را به وجود آورده است(۳).

مدل‌سازی آثار حادثه و پیامدهای حاصل از آن با استفاده از روش‌های تحلیلی و فرمول‌های تجربی و نظری موجود و نیز استفاده از نرم افزارهای تجاری میسر می‌باشد. مدل‌های متعددی برای مدل‌سازی موج انفجار ارایه شده است که می‌توان مدل‌های جرم معادل تی ان تی و روش باکر را نام برد. از جمله نرم افزارهای تجاری که جهت مدل سازی انفجار و موج ناشی از آن استفاده می‌شود عبارتند از: اتمسفر خطرناک نقطه ای ، نرم افزار خطرات فرآیندی ، مدل ارزیابی خسارات ناشی از انفجارات شدید و موج انفجار پدیده توسعه بخارات مایع (۴). هر یک از این نرم افزارها دارای مزایا و معایبی می‌باشند، اما از نرم افزار PHAST نسخه ۶/۵۴ جهت تحلیل پیامد حوادث مربوط به شرکت‌های نفت، گاز و پتروشیمی و صنایع شمیایی استفاده می شود. از نکات مثبت این نرم افزار امکان سریع ارزیابی پیامد حادثه و بررسی نتایج حاصل و دینامیک بودن نتایج حاصل، بانک اطلاعات بسیار قوی بوده، هم‌چنین این نرم افزار قابلیت تعریف مخلوط و امکان مدل‌سازی یک یا چند ماده آزاد شده را دارد(۵).

در ارزیابی ریسک حوادث، دو پارامتر نقش مهمی ایفا می‌کنند: پارامتر اول احتمال وقوع حادثه و پارامتر دوم پیامد آن حادثه است. پیامد به معنای میزان خسارات وارد شده به سیستم در اثر وقوع حادثه و احتمال به معنای تعداد دفعاتی است که آن حادثه در یک بازه زمانی مشخص اتفاق خواهد افتاد و به طور عموم هیچ کدام از این دو پارامتر به تنهایی برای ارزیابی خطرات کافی نیستند. بسیاری از حوادث را می‌توان در نظر گرفت که پیامد شدیدی داشته باشند ولی در عمل احتمال وقوع آن ها ناچیز باشد و بر عکس برخی از آن ها ممکن است به دفعات رخ دهند ولی پیامد چشم‌گیری نداشته باشند. به همین دلیل تعیین معیاری که هر دو عامل را در نظر بگیرد در بررسی خطرات بسیار مفید می‌باشد. ریسک معیاری است که ترکیبی از پیامد و احتمال وقوع یک حادثه بوده و معیاری مناسب برای تعیین میزان مخاطره آمیز بودن یک حادثه به دست می‌دهد(۶).

روش کار

جهت ارزیابی ریسک از تکنیک‌ها، روش‌ها و حتی فرمول‌های متداول استفاده می‌شود که یکی از آنها روش Bowtie می‌باشد. این ابزار نمودارهای پاپیونی قدرت‌مندی از فرآیند ارزیابی ریسک ارایه می‌دهد که حتی توسط غیر متخصصین ایمنی نیز قابل درک است(۲). در این مطالعه هدف ارزیابی ریسک، پدیده انفجار ناشی از انفجار بخارات توسعه یافته مایع در حال جوش مخزن کروی گاز مایع شده نفتی با نرم افزارهای Bowtie و PHAST می‌باشد. می‌توان با استفاده از نتایج این مطالعه اثرات حاصل از موج انفجار

شکل ۱. مراحل اصلی فرآیند ارزیابی پیامد حادثه

را که پیامدهای جانی و مالی دارد، بررسی نمود و نگرش نوینی در ایمنی فرآیندی مخازن تحت فشار در ایران ایجاد کرد.

۱. بررسی پیامدهای حاصل از انفجار

منظور از پیامدهای حاصل از انفجار، تأثیر فشار حاصل از موج انفجار بر انسان، تجهیزات و محیط پیرامونی می‌باشد. به طور کلی فرآیند انجام ارزیابی پیامد حادثه شامل شش مرحله اصلی می‌باشد که شکل ۱ این مراحل را نشان می‌دهد(۴).

۱- تعیین اهداف ارزیابی پیامد: ارزیابی پیامد ناشی از موج انفجار پدیده BLEVE مخزن کروی LPG

۲- بررسی واحد فرآیند مورد نظر: برای بررسی واحد فرآیندی دسترسی به اسناد و مدارک از جمله نقشه‌های فرآیندی، جانمایی و شرح فرآیند و مواد شیمیایی موجود بررسی شدند.

۳- شناسایی خطرات: شناسایی مخاطرات و در پی آن ارزیابی ریسک در این مرحله به وسیله نرم افزار Bowtie انجام شد. به منظور ساخت یک نمودار پاپیونی، جهت فرایند ارزیابی ریسک، علل ایجاد رویداد در سمت چپ و پیامد ناشی از آن در سمت راست و رویداد در مرکز نمودار به عنوان گره قرار می‌گیرد و نهایتاً نمودار حاصل به شکل پاپیون در می‌آید(۷).

پدیده BLEVE در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ساخت این نمودار، از اطلاعات زیر استفاده شد:

- *علل وقوع پدیده BLEVE*

از جمله عواملی که سبب ایجاد پدیده BLEVE می‌گردد و در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار گرفت، افزایش فشار مخزن، خوردگی مخزن، قرارگیری مخزن در معرض آتش سوزی و حرارت، افزایش حجم مواد درون مخزن و خرابی مکانیکی توام با ضربه می‌باشد.

- پیامدهای پس از وقوع رویداد پدیده BLEVE

از جمله آسیب‌های به‌وجود آمده بعد از پدیده BLEVE، تلفات جانی (مرگ و میر) و صدمات حاد به نیروی انسانی و آسیب به تأسیسات و تجهیزات می‌باشد.

- کنترل هایی که برای جلوگیری از وقوع رویداد اعمال می‌شود.

این کنترل ها بعد از شناسایی هر یک از علت‌های وقوع پدیده BLEVE مدنظر قرار می‌گیرد. در این تحقیق به عنوان مثال جهت جلوگیری از افزایش فشار مخزن، از کنترل‌هایی هم‌چون طراحی و ساخت براساس استاندارد

ظروف تحت فشار (ASME)، از شیر کنترل فشار متناسب با استاندارد، ترموستات متناسب با نوع مخزن و شرایط آب و هوایی، تناسب شیر انسداد با ظرفیت مخزن، قرار دادن سطح سنج مناسب، استفاده از شیرهای ایمنی/اطمینان مناسب، کنترلر خودکار از راه دور کمپرسور، صفحه پاره شونده در ورودی شیر ایمنی، انتخاب شیر ایمنی تخلیه متناسب با استاندارد و لوله‌های تخلیه متناسب با استاندارد استفاده شده است.

- کنترل هایی که برای کاهش اثر پیامدهای رویداد استفاده می‌گردد.

موانع و کنترل‌هایی جهت کاهش تلفات جانی (مرگ و میر) و صدمات حاد به نیروی انسانی که یکی از پیامدهای ناشی از پدیده BLEVE می‌باشد، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. این عوامل شامل محصور کردن ناحیه مخزن، تشکیل تیم واکنش در شرایط اضطراری، تخلیه سریع نفرات از محدوده، استفاده از گاز سنج ثابت جهت شناسایی نشت گاز، کنترل منابع حریق و اشتعال و خاموش کردن سیستم می‌باشند.

ساخت یک نمودار پاپیونی، جهت فرایند ارزیابی ریسک هنگامی که علت ایجاد رویداد در سمت چپ و پیامد ناشی از آن در سمت راست و رویداد در مرکز نمودار به عنوان گره قرار می‌گیرد و نهایتاً نمودار حاصل به شکل یک پاپیون در می‌آید. در این مطالعه به منظور ساخت این نمودار، از اطلاعات زیر استفاده شد:

• تهدیدهایی که علت‌های وقوع رویداد هستند.

• پیامدهای رویداد که پس از وقوع رویداد به وجود می‌آیند.

• کنترل هایی که برای جلوگیری از وقوع رویداد اعمال می‌شود.

• کنترل هایی که برای کاهش اثر پیامدهای رویداد استفاده می‌گردد.

رویدادی که قصد پیش‌گیری از وقوع آن را داریم، در این مطالعه پدیده BLEVE می‌باشد. از جمله خصوصیات و ویژگی‌های اساسی و اصلی نرم افزار می‌توان به رابط گرافیکی قدرت‌مند، قابلیت استفاده آسان و سریع و چند منظوره، ارایه لیست مسوولیت‌ها و وظایف واحدهای HSE بر اساس درجه اولویت و اهمیت، قابلیت ارایه اسناد و مدارک تمامی نقص ها و کمبودهای شناسایی شده در فرآیندهای ارزیابی ریسک و امکان ورود اطلاعات به زبان فارسی اشاره کرد.

۴- تعیین و تحلیل سناریو: سناریو به صورت رخداد مستقلی در نظر گرفته می‌شود که ممکن است در یک واحد فرآیندی اتفاق بیفتد. مواردی که در سناریو باید مشخص گردد، بنابر هدفی است که سناریو نوشته می‌شود. سناریو مورد بررسی BLEVE مخزن کروی می‌باشد که محل وقوع سناریو، نوع ماده و فاز، دما، فشار و دبی و ... در این سناریو مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که مخزن کروی LPG از هم گسسته می‌گردد، تنها یک مدل تخلیه برای گاز مایع شده نفتی (در حالت دو فازی) وجود دارد. هم‌چنین به دلیل عدم تأثیر شرایط متفاوت اتمسفری در فصول مختلف بر موج انفجار، تعریف سناریوهای متفاوت همگی به یک نتیجه واحد ختم می‌گردند.

۵- مدل سازی پیامد: همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و نظری و نیز از مدل ها و نرم افزارهای تجاری جهت مدل سازی موج انفجار ایجاد شده استفاده کرد. راه بهتر و آسان تر استفاده از نرم افزار PHAST برای این منظور می‌باشد.

۶- کنترل و کاهش پیامد: پس از تعیین شدت پیامدهای ایجاد شده و اولویت بندی آن ها، می‌توان اقدامات لازم را جهت کنترل و کاهش اثرات آن ها از قبیل تحمل اثرات، انتقال اثرات به شرکت‌های بیمه گذار و کاهش پیامد حوادث انجام داد.

با توجه به سناریو انتخاب شده برای مخزن کروی LPG، اولین گام وارد نمودن مشخصات ماده شیمیایی می‌باشد. این مشخصات عبارتند از نوع ماده، جرم یا حجم ماده درون مخزن و شرایط فرآیندی دما و فشار. گاز مایع شده نفتی شامل هر ماده ای به حالت مایع است که از یک یا مخلوطی از هیدروکرین‌های پروپان، پروپیلن، بوتان و بوتیلن ها تشکیل شده باشد.

بعد از وارد کردن اطلاعات لازم جهت مدل سازی سناریو BLEVE، می‌توان ابعاد موج انفجار را بر روی سازه ها و تجهیزات مجاور بررسی نمود. جداول ۱ و۲ میزان اثرات موج انفجار بر روی تجهیزات و انسان را نشان می‌دهند(۸) . میزان فشار موج انفجار و مدت زمان اثر آن ممکن است سبب پاره شدن پرده گوش، مرگ بر اثر خونریزی داخلی ریه‌ها و شش‌ها و پرتاب افراد شود. لازم به ذکر است از آن‌جاکه بعد از انفجار پدیده توسعه بخارات مایع در حال جوش مخزن کروی LPG مورد مطالعه آتش کروی به‌وجود می‌آید، این نرم افزار قادر به مدل‌سازی این آتش نیز می‌باشد. جدول ۳ تأثیرات تشعشعات را بر روی انسان و تجهیزات نشان می‌دهد. شکل ۲ ماتریس ارزیابی ریسک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

یافته ها

مخزن ۳۰۳۵ حاوی LPG شامل پروپان، بوتان و بوتیلن در فشار عملیاتی نرمال و ماکسیمم ۸/۲ تا ۱۳/۲ بار گیج و فشار طراحی ۱۸/۸ بار، دمای

جدول ۱. میزان شدت پیامد ناشی از انفجار در مخازن

شدت خسارت (درصد)	نوع مخزن	فشار حداکثری (Bar)
مخزن ذخیره مواد نفتی- سقف شناور		
۲۰		۰/۲۴
۹۹		۱/۴
ظروف فشار عمودی		
۲۰		۰/۸۲
۹۹		۰/۹۵
مخزن کروی		
۲۰		۰/۵۴
۹۹		۱/۱

جدول ۲. تخمین اثرات انفجار بر انسان (شدت مصدومیت)

فشار حداکثری (Bar)	فرد در داخل فضا (شدت آسیب)	فرد در فضای آزاد (شدت آسیب)
$\Delta P > 0.3$ bar	٪۱۰۰	٪۱۰۰
0.1 bar $< \Delta P < 0.3$ bar	٪۲۵	٪۰
$\Delta P < 0.1$ bar	٪۰	٪۰

جدول ۳. تأثیرات سطوح مختلف تابش حرارتی

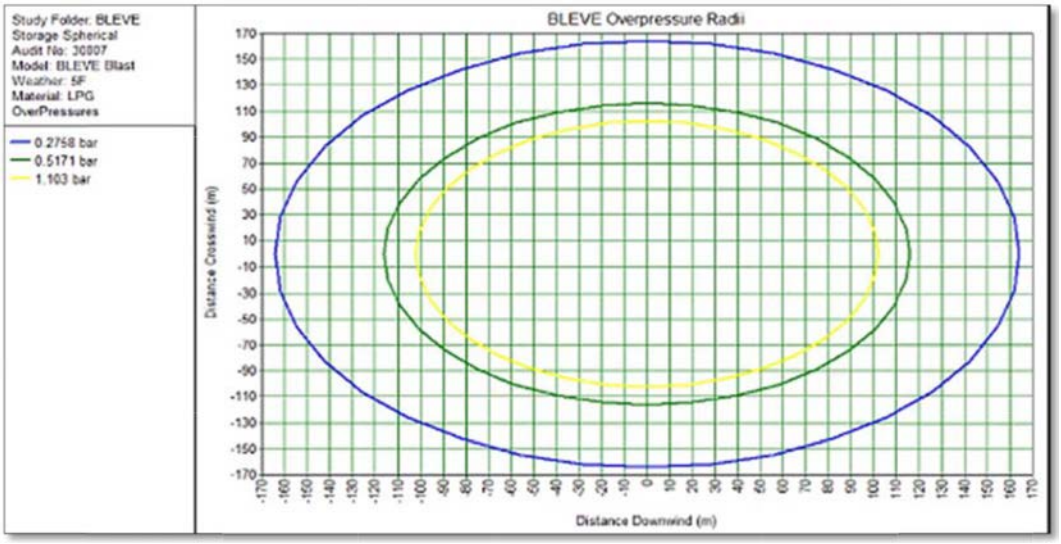
میزان تشعشع (KW/M2)	پیامد ها
۱/۶	در اثر تماس طولانی ایجاد عوارض نسبتاً خفیفی می‌کند.
۴/۵	ایجاد درد در افرادی که حداقل ۲۰ ثانیه در معرض آن می‌باشند، سوختگی درجه اول
۱۲/۵	حداقل انرژی لازم برای ایجاد جرقه در پایلوت‌های چوبی و ذوب شدن مواد پلاستیکی
۲۰	آسیب جدی به افراد در معرض، در صورت نرسیدن تیم نجات که موجب مرگ می‌شود
۳۷/۵	خسارت به واحدها و تجهیزات فرآیندی، ایجاد مرگ آنی برای افراد در معرض آن

شدت	پیامد				افزایش احتمال					
	افراد	سرمایه	محیط زیست	اعتبار	A	B	C	D	E	F
					وقوع آن درصنعت گزارش نشده است	وقوع آن درصنعت گزارش شده است	درشرکت ذیربط رخ داده است	درشرکت ذیربط طی سال بارها رخ می‌دهد	در واحد مورد بررسی طی سال بارها رخ می‌دهد	در واحد مورد بررسی طی ماه بارها رخ می‌دهد
۰	بدون اثر	بدون ضرر وزیان	بدون اثر	بدون تاثیر						
۱	اثر ناچیز	ضرر ناچیز	اثرناچیز	تاثیر ناچیز						
۲	اثر جزیی	ضرر جزیی	اثر جزیی	تاثیر محدود						
۳	اثر عمده	ضرر موضعی	اثر محلی	تأثیر قابل توجه						
۴	ناتوانی دایمی/ ۱ تا ۳ مرگ	ضرر شدید	اثر شدید	تاثیر ملی						
۵	مرگ و میر متعدد	ضرر وزیان بسیار شدید	اثر بسیار شدید	تاثیر بین المللی						

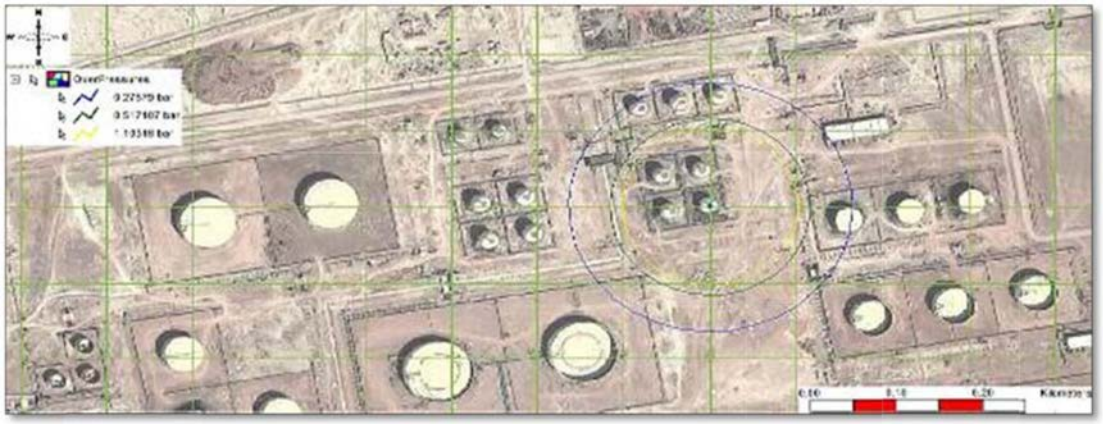
غیر قابل قبول | ALARP | قابل قبول

شکل ۲. ماتریس ارزیابی ریسک

عملیاتی بین ۶۰-۴۰ سانتی گراد و دمای طراحی ۸۵ درجه سانتی گراد، با جنسی از کربن استیل، هم‌چنین دارای محافظ در برابر تابش خورشید و با قطر ۱۰ متر و ارتفاع ۲۵ متر با احتساب پایه‌ها می‌باشد. در این ارزیابی به طور کلی پنج علت و دو پیامد جهت ایجاد پدیده BLEVE شناسایی شد. جهت ارزیابی ریسک پیامدها از شکل ۲ به عنوان ماتریس ریسک استفاده شد. اقدامات کنترلی علل ایجاد پدیده BLEVE به طور کلی ۴۳ مورد و اقدامات کنترلی کاهش پیامد و اثرات ۳۱ مورد



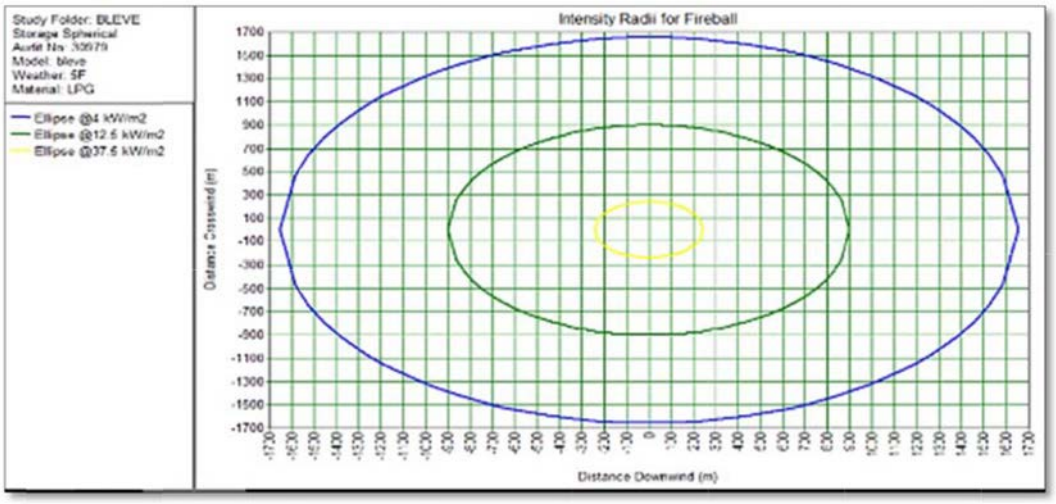
شکل۳. منحنی نمایش شعاع انفجار بر حسب مقادیر فشار



شکل ۴. پهنه بندی شدت موج انفجار

به ثبت رسید. جهت مدل سازی پیامد ناشی از موج انفجار بعد از وارد نمودن داده‌های مورد نیاز، خروجی نرم افزار PHAST در مدل سازی موج انفجار به صورت گراف و نقشه‌های اشکال ۳ الی ۵ ارایه می‌شود. منحنی نمایش شعاع انفجار بر حسب مقادیر فشار تعریف شده در شکل ۳ نشان داده شده است. موج انفجار ایجاد شده بصورت کروی در اطراف کانون انفجار از نوع دتونیشن می‌باشد که تا فاصله ای از کانون انفجار مقدار ثابتی دارد و پس از آن با تغییر مومنتوم ایجاد شده، به شدت کاهش می‌یابد تا به محدوده فشار اتمسفری و فاز دوم توسعه موج انفجار برسد. مطابق با شکل شماره ۳ و مدل سازی پیامد، موج انفجار ایجاد شده از مبدا در محدوده ۱۰۵ در ۱۰۰ متری مخزن با قدرت ۱/۱۰۳ بار، در محدوده ۱۱۵ در ۱۱۵متری با قدرت ۰/۵۱۷۱ بار و در محدوده ۱۶۵ در ۱۶۸ متری با قدرت ۰/۲۷۶۸ بار ایجاد می‌گردد.

هم‌چنین با توجه به در دسترس بودن نقشه محل مورد مطالعه و برای درک بهتر، تأثیر



شکل ۵. منحنی شعاع تشعشات ایجاد شده در آتش کروی

جدول ۴. آسیب ناشی از موج انفجار به تجهیزات

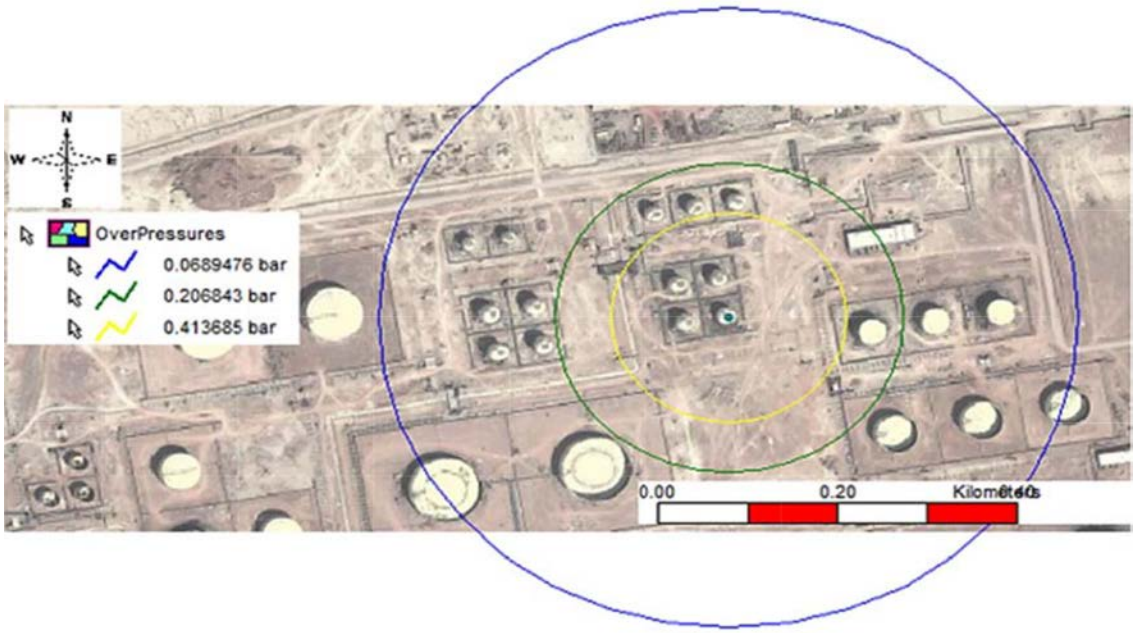
ردیف	دستگاه	میزان آسیب وارده به تجهیزات بر حسب فشار (bar)											
		۰/۶۹	۰/۲	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۵۱	۰/۵۴	۰/۸۲	۰/۹۵	۱/۰۹	۱/۳۶
۱	پمپ									I		V	
۲	تانک کروی							I			I	T	
۳	تانک استوانه ای	D	K				U						
۴	فلومتر گاز				Q								
۵	توربین گازی							I		M	S		V
۶	ساپورت خط لوله			P		SO							
۷	خطوط لوله		X			Y							
۸	کمپرسور									I		V	

موج انفجار ایجاد شده بر روی مخازن کناری و تجهیزات اطراف شکل ۴ ارایه شده است. شبکه مشبک سبز رنگ رسم شده بر روی شکل ۳ برای نمایش فواصل صد متری می‌باشد. پارامترهای فشار در مدل انفجار در شکل شماره ۳ مقادیر ۰/۲۷۵، ۰/۵۱۷ و ۱/۱ بر حسب بار در نظر گرفته شده است.

همان گونه که گفته شد، بعد از پدیده BLEVE آتش کروی ایجاد می‌شود. شکل ۵ نشان دهنده منحنی شعاع تشعشات ایجاد شده در آتش کروی می‌باشد. این منحنی ها در سه محدوده آسیب پذیری جزیی، متوسط و آسیب جدی و مرگ به ترتیب با تشعشعات ۴، ۱۲/۵ و ۳۷/۵ کیلووات بر متر مربع می‌باشند که محدوده آتش کروی ۲۵۰ در ۲۵۰ با میزان تشعشع ۳۷/۵ کیلووات بر متر مربع، محدوده ۹۰۰ در ۹۰۰ میزان تشعشع ۱۲/۵ کیلووات بر متر مربع و محدوده ۱۶۵۰ در ۱۶۵۰ میزان تشعشع ۴ کیلووات بر متر مربع را تشکیل می‌دهد. از آنجا که شدت آسیب پذیری ادوات و تجهیزات موجود در قسمت مخازن متفاوت می‌باشد، جدول ۴ شدت اثرات و آسیب‌ها را نشان می‌دهد. شدت تعیین مقدار آسیب وارده

جدول ۴. آسیب ناشی از موج انفجار به تجهیزات

شاخص	آسیب
D	فروریختن سقف
I	جابه‌جا شدن دستگاه از محل خود و شکستن لوله آن
K	نیمه واژگونی دستگاه
M	صدمه به تجهیزات کنترلی دستگاه
O	فروریختن قاب و چارچوب دستگاه
P	تغییر شکل و دفرم شدن قاب دستگاه
Q	صدمه به پوسته (case) دستگاه (ترک برداشتن)
S	شکستن خط لوله موجود در دستگاه
T	واژگونی (کج شدن) دستگاه یا تخریب آن (از سرویس خارج شدن)
U	واژگونی دستگاه تا ۹۰ درصد
V	کنه شدن و پرتاب شدن دستگاه از پایه و فونداسیون
X	ترک برداشتن جداره لوله
Y	جابه‌جا شدن لوله از محل خود و شکستن آن



شکل ۶. پیامد حاصل از موج انفجار بر روی مخازن

به تجهیزات، در جدول ۵ به عنوان یک راهنما آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، اطراف مخزن مورد مطالعه، مخازن کروی دیگر از جمله پروپان، بوتان و ایزو پنتان و مخازن استوانه ای از جمله بنزین معمولی و جت و مخازن محصولات باقی‌مانده دیده می‌شوند که پمپ‌ها، کمپرسور ها، لوله ها و ساپورت ها و توربین‌های گازی از جمله وسایل کناری این مخزن می‌باشد.

پهنه بندی موج انفجار در شکل ۵ جهت بررسی اثرات و حدود تحمل مخازن کروی بوده که مطابق با جدول ۴ به وضوح می‌توان به این مطلب

رسید که موج انفجار ناشی از مخزن کروی LPG، سه مخازن کناری LPG را دچار انفجار کرده که این امر سبب زنجیره ای شدن انفجارات می‌گردد. تنها یک انفجار سبب انفجارات بعدی و درپی آن افزایش و شدت موج انفجارات بعدی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اولین انفجار آخرین انفجار نخواهد بود، مخازن کروی LPG کناری و هم‌چنین مخازن نرمال بوتان نیز در پی آن در اثر موج انفجار ایجاد شده دچار انفجار خواهند شد.

جهت بررسی تأثیرات انفجار بر روی مخازن استوانه‌ای، باید پهنه بندی موج انفجار را تغییر داد، چون حداقل آسیب وارده به این مخازن بر حسب فشار با توجه به جدول ۴، ۰/۶۹بار می‌باشد و شکل ۵ پهنه بندی موج انفجار از ۰/۰۷ تا ۰/۴ را نشان می‌دهد. انفجار حاصله سبب فرو ریختن سقف و نیمه واژگونی مخازن استوانه ای بنزین معمولی و جت می‌شود.

تأثیرات موج انفجار با توجه به شدت آن می‌تواند بسیاری از تجهیزات و ادواتی را که در مجاور مخزن کروی LPG نصب شده است را تحت تأثیر قرار دهد، مخصوصاً مخازن کروی و استوانه ای که حاوی مواد هیدروکربنی سبک که قابلیت اشتعال پذیری بالایی دارند. انفجار ابتدایی مخزن کروی LPG می‌تواند سبب بروز اثرات زنجیره ای گردد که این امر شدت موج و رهایش مواد موجود را در پی دارد.

بحث

از جمله مهم‌ترین نتایج کسب شده در این مطالعه علل ایجاد (ریشه ای، پایه ای و فوری)، انتخاب، تعیین و قرارگیری موانع جهت جلوگیری از ایجاد پدیده BLEVE می‌باشد و هم‌چنین اقدامات پیش‌گیرانه و کنترلی جهت کاهش آسیب به انسان و تجهیزات و اموال که به وضوح درارزیابی ریسک به آن پرداخته شده است. از جمله نکات قوت این پژوهش مدل‌سازی پیامد ناشی از پدیده BLEVE بود که براساس آن می‌توان اقدامات کنترلی و پیش‌گیرانه متناسب با شرایط را در راستای به حداقل رساندن آسیب اجرا نمود.

ارزیابی ریسک پیامد BLEVE با نرم افزار Bowtie ProTM ما را قادر خواهد ساخت که به طور واضح و روشن هر یک از عناصر رویداد BLEVE و ارتباط آن ها را با یک‌دیگر در کل مجموعه مشاهده نماییم که این امر در روند بررسی فرآیند کمک شایانی خواهد کرد. هم‌چنین با استفاده از این ارزیابی قادر خواهیم بود به سرعت، سهولت و به وضوح نتایج خود را به دیگران و مجموعه هدف جهت پیش‌گیری و کاهش پیامدهای ناگوار بعدی منتقل کنیم.

تأثیرات موج انفجار با توجه به شدت آن می‌تواند بسیاری از تجهیزات و ادواتی را که در مجاور مخزن کروی LPG نصب شده است را تحت تأثیر قرار دهد، مخصوصاً مخازن کروی و استوانه ای که حاوی مواد هیدروکربنی سبک با قابلیت اشتعال‌پذیری بالایی هستند. انفجار ابتدایی مخزن کروی LPG می‌تواند سبب بروز اثرات زنجیره ای گردد که این امر شدت موج و رهایش مواد موجود را در پی خواهد داشت. با توجه به این‌که میزان آسیب پذیری ناشی از موج انفجار در مخازن، ادوات و تجهیزات متفاوت است می‌توان به این نتیجه رسید که مخازن استوانه ای با موج انفجار ۰/۶۹ بار کم‌ترین مقاومت را نسبت به بقیه ادوات دارا می‌باشند.

لازم به ذکر است از آن‌جا که ناحیه مخازن

مورد مطالعه در حال راه اندازی می‌باشد و کلیه تجهیزات و ادوات جانبی آن هنوز به مرحله نصب نرسیده است، این مورد نقطه قوت این پژوهش می‌باشد چرا که می‌توان اقدامات پیش‌گیرانه را لحاظ نمود، قبل از این‌که اقدامات اصلاحی نیاز باشد. بنابراین از نتایج ارزیابی ریسک می‌توان یک سری اقدامات جهت جلوگیری از پدیده BLEVE را ارایه کرد که شامل طراحی و ساخت براساس استاندارد انجمن امریکایی مهندسین مکانیک ظروف تحت فشار، نصب تجهیزات، اندازه‌گیری فشار و دمای متناسب و کالیبره شده، تزریق کردن گاز نیتروژن در مخزن تا زمان بهره برداری، توجه به دستورالعمل‌های تخلیه و بارگیری از مخزن می‌باشد.

در ادامه به بررسی و مقایسه مطالعات دیگر در این زمینه می‌پردازیم:

طاهری و نجفی پژوهشی را در مورد مخازن گاز مایع تحت فشار (LPG) و لزوم بازرسی دوره ای آن ها ارایه دادند که هدف از این مطالعه بررسی علل ایجاد پدیده توسعه بخارات مایع در حال جوش بوده و نتایج کسب شده حاکی از آن است که آتش، صدمات مکانیکی، بیش از حد پرشدن، افزایش دما، آلودگی فضای بخار و نقص مکانیکی از دلایل عمده ایجاد پدیده توسعه بخارات مایع در حال جوش بوده و اثرات BLEVE توپ آتش و پرتابه‌های حاصل از خرد شدن مخزن می‌باشد. کنترل لحظه به لحظه مخازن تحت فشار و بازرسی دوره‌ای، مهم‌ترین اقدامات پیش‌گیرانه در جلوگیری از این گونه حوادث می‌باشد(۹). در مقایسه با تحقیق پیش رو، طاهری و نجفی بیش‌تر بر روی خود پدیده BLEVE و دلایل ایجاد و اقدمات کنترلی در قالب یک راهنما عمل کردند اما این تحقیق به ارزیابی ریسک ناشی از پدیده BLEVE با روش Bowtie و مدل سازی پیامد ناشی از انفجار با نرم افزار PHAST پرداخته است که نتایج کامل تر و دقیق تری حاصل شده است.

نبهانی و همکارانش آنالیز پیامد نشتی متانول از مخزن یک مجتمع پتروشیمی با نرم افزار PHAST را انجام داده که هدف از این مدل سازی، بررسی تاثیرات سمی رهایش متانول، فشار حرارتی ناشی از آتش سوزی و موج تخریبی حاصل از انفجار آن می‌باشد. بررسی این نشتی در شرایط آب و هوایی متفاوت صورت گرفته و برای مدل سازی آن از نرم افزار قدرت‌مند PHAST استفاده شده است. نتیجه مدل سازی بیان‌گر آن است که بیش‌ترین فشار حرارتی حاصل از آتش سوزی و بیش‌ترین تاثیرات سمی برای کارکنان و محیط زیست در فصل تابستان بوده و فصل زمستان بیش‌ترین موج تخریبی حاصل از انفجار را به خود اختصاص داده است(۱۰). با توجه به تفاوت رفتار حریق در اثر عیوب متفاوت یک تجهیز، آقای نبهانی و همکاران بر روی نشتی یک مخزن مطالعه را انجام داده و اثرات نشتی را با کمک نرم افزار PHAST بررسی کردند. اما این تحقیق پدیده BLEVE را که تفاوت زیادی با نشتی دارد، مدل‌سازی کرده و ارزیابی ریسک آن را انجام داده است.

در خصوص ارزیابی ریسک ایمنی مخزن کروی گاز مایع، مطالعات دیگری نیز انجام شده است. نژادعلی و همکاران با هدف شناسایی انرژی ها و حفاظ‌های موجود در مخازن کروی گاز مایع در یک صنعت پتروشیمی به روش ردیابی انرژی و تحلیل حفاظ ها و در ادامه ارزیابی کمی حالات شکست و تأثیرات آن ها با استفاده از روش حالات

شکست و بررسی اثر پرداخته‌اند. این مطالعه تنها به شناسایی خطرات و ارزیابی ریسک پرداخته و پیامد حوادث را مدل سازی نکرده است(۱۱). در مطالعه ای دیگر اشتعال پروپیلن با استفاده از نرم افزار ALOHA در یک صنعت پتروشیمی مدل‌سازی شد در این مطالعه اثرات اشتعال پروپیلن و رهایش آن در محیط بررسی گردیده که تفاوت آن با مطالعه حاضر نحوه خروج ماده از درون مخزن کروی می‌باشد(۱۲). در مطالعه ای توسط پاپازاوغلو و آنزریس انفجارات بخارات (BLEVE) در دو نوع مدل و پارامترهای مدل ها بررسی شده اند. مدل شعله- جامد جهت برآورد قدرت انتشار مستقل توده احتراقی و مدل منبع نقطه ای جهت برآورد قدرت انتشار به عنوان تابعی از توده احتراقی به کار گرفته شده اند. سه اندازه پیامد BLEVE، شدت تابش حرارتی، مقدار تابش حرارتی و احتمال از بین رفتن زندگی به عنوان یکی از نتایج قرار گرفتن در معرض تابش حرارتی و هم‌چنین به عنوان تابعی از فاصله از مرکز مخزن در نظر گرفته شده اند. یکی از نتایج عمده این مطالعه عدم قطعیت، احتمال از دست دادن زندگی عمدتا ناشی از عدم قطعیت در مدل پدیده‌های فیزیکی به جای عدم قطعیت در مدل مقدار- پاسخ می‌باشد(۱۳). در مطالعه دیگر زنییر و همکاران یک حادثه مخزن LPG را از طریق چندین مدل شبیه سازی بازسازی نمودند. هدف اصلی از این برنامه‌های کاربردی بررسی امکان استفاده و کارایی مدل‌های شبیه سازی با استفاده از مقایسه شواهد براساس حوادث دینامیک بود. موقعیت‌های پیچیده مانند انتشار گازهای سنگین در یک ناحیه نیمه محدود همراه با امواج نورانی و ثبات متغیرهای جوی، مدت زمان طولانی رهاسازی و انواع مختلف جریانات، انواع حریق ها (حریق فلاش، حریق چت گذرا و BLEVE) با اقتباس از دیگر مدل ها شبیه سازی شدند(۱۴). پاتریکو و همکارانش بررسی مختصری از رابطه بین انواع حالات مدل‌های حادثه BLEVE، مدل‌های شبیه سازی انفجار و ترکیبی از ارزیابی پیامدها در یک مخزن LPG انجام دادند. نتایج بر روند بهبود پیش‌گیری از پدیده BLEVE با تمرکز بر ساختار مخازن، از زمان استفاده از کدهای ساختمانی تا به‌کار بردن پوشش ها و بهبود کارایی شیرهای اطمینان تاکید دارد(۱۵). تجزیه و تحلیل خطرات اولیه اثرات انفجار مخازن LPG بر روی جامعه، توسط الهارباوی و همکاران در دانشکده مهندسی دانشگاه پوترای مالزی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در این مطالعه تمرکز بر روی موارد اساسی مانند محدوده انفجار BLEVE، جت حریق و استخرهای حریق بوده است. چندین مدل فیزیکی از جمله مدل (TNT) جهت ارزیابی هر حادثه احتمالی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج نواحی متاثر و فواصل محاسبه شدند(۱۶).

نتیجه گیری

در خصوص پیامدهای حاصل از پدیده BLEVE و ارزیابی ریسک صورت گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که با استفاده از مدل سازی می‌توان اقداماتی جهت کاهش آسیب و اثرات به نیروی انسانی و تأسیسات و تجهیزات اثرات در نظر گرفت؛ اقداماتی از قبیل محصور کردن ناحیه مخزن، بازرسی‌های ادواری فنی مخازن (بازرسی خوردگی و ابزار دقیقی و ...)، تزریق نیتروژن جهت جلوگیری از واکنش مایع با بخار، تشکیل تیم واکنش در شرایط اضطراری، تخلیه سریع نفرات از

محدوده، استفاده از گاز سنج ثابت جهت شناسایی نشت گاز، کنترل منابع حریق و اشتعال و خاموش کردن سیستم. با اجرای اقدامات کاهش دهنده پیامدها می‌توان ریسک آسیب به نیروی انسانی را از حد غیر قابل قبول B5 به حد قابل قبول A3 و سطح ریسک را برای تأسیسات و تجهیزات مجاور مخزن LPG از B5 به A4 رسانید. از جمله دلایل مدل سازی اثرات پیامد می‌توان به میزان شدت آسیب‌های وارده و تعیین حریم ایمن اشاره کرد که با توجه به ارزیابی ریسک به عمل آمده می‌توان دلایل ایجاد رویداد را مشخص و اقدامات لازم را جهت کنترل آن انجام داد. نتایج حاصل از مدل سازی و ارزیابی ریسک به عمل آمده ما را قادر خواهد ساخت به درستی علل ایجاد و آسیب پدیده BLEVE به انسان و تجهیزات مجاور را بر طبق موج انفجار ایجاد شده مشخص نماییم و بر این اساس اقدامات کنترلی پیش‌گیرانه را اجرا و حریم ایمنی را با طراحی و جانمایی مناسب محل اسکان کارکنان، تجهیزات و ادوات مجاور معلوم کنیم.

REFERENCES

1. Salimi M, Janani M. Determine the margin of safety input sour gas pipeline to a petrochemical complex based on the outcome of the analysis. Seventh National Congress of Occupational Health. 2010.
2. Lees FP. Loss Prevention in the Process Industries. 2_{nd} edition, Butterworth-Heinemann. 1996.
3. Soltani M, Asl rR. Computational fluid dynamics software Fluent, publish designer 2004:446.
4. Abadi AD. Analysis of the consequences of the blast wave phenomenon of boiling liquid vapor spherical tank containing propane storage tanks in the petrochemical Borzouyeh. Kazshnasy senior thesis, Islamic Azad University, Tehran South. 2011.
5. Byglrzadh AS, Shekariyan A. Check the immediate release of kerosene tank farm maintenance software PHAS. The first international conference on oil, gas, petrochemical and power generation. 2012: 0-10.
6. Alizadeh SS, Moshashaei P. The Bowtie method in safety management system: A literature review. Scientific Journal of Review. 2015;4(9): 133-8.
7. Jacinto C, Silva C. A semi-quantitative assessment of occupational risks using bow-tie representation. Safety Science. 2010;48:973-9.
8. CCPS.Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. AIChE New York, ISBN 0-8169-0474-XP; 387. 1994: .
9. Taheri S, Najafi A. Pressure Liquid Gas Tanks And The Necessity Of Periodic Inspection. The first international conference on oil, gas and petrochemical Sustainable Development. 2014.
10. Nabhani N, Mohammadi M. consequence modeling leak of methanol tank in petrochemical industrial plant with PHAST Software. Third Conference of Environmental Planning and Management, Tehran, Tehran University. 2013.
11. Nezhadali H, Morzavi SB. Assessment Safety

LPG spherical tank with FMEA , ETBA. Kermanshah University of Medical Sciences (improvement). 2008;12(2):180-9.

12. Rihavipour S, Abbasalimadadi Z. Simulation of Propylene Flaming with ALOHA Software and Stablish emergency response plan in petrochemical industrial plant. 2010.
13. Papazoglou JA, Aneziris ON. Uncertainty quantification in the health consequences of the BLEVE phenomenon. Institute of Nuclear Technology-Radiation Protection,MNational Center for Scientific Research “DEMOKRITOS”. 1999; 67(3):217-35.
14. Zenier F, Antonello F, Dattilo F, LRosa. Investigation of an LPG accident with different mathematical model applicationsInt. Risk Assessment and Management. 2001;2(3):1-12.
15. Patrício. P, Baptista J, dos S, Bateira C. BLEVE of a road tanker LPG - A Short Review. International Symposium on Occupational Safety and Hygiene. 2012;5:433-7.
16. El-Harbawi M, Sa’ari M, Choong SYT, Chuah TG, Rashid MSA. Hazards Analysis of LPG Storage Installation in Universiti Putra Malaysia: A Preliminary Study. The Institution of Engineers, Malaysia. 2004;65(1):43-9.

Risk assessment and consequence modeling of BLEVE explosion wave phenomenon of LPG spherical tank in a refinery

Mohammad Kamaei [1], Seyed Shams Aldin Alizadeh [2*], Abdolrahman Keshvari [3], Zeynab Kheyrkhah [4], Parisa Moshashaei [5]

[1] M.Sc. of Health, Safety and Environmental Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[2] Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, Health Faculty, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

[3] Assistant Professor, University of Imam Hussein (AS), Tehran, Iran

[4] M.Sc. of Environmental Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

[5] M.Sc., Department of Occupational Health Engineering, Health Faculty, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

Abstract

Introduction: Although human industrial activities are as a part of efforts to achieve greater prosperity, the risks related to these activities are also expanding. Hazard identification and risk assessment in the oil and gas industries are essential to reduce the frequency and severity of accidents and minimize damage to people and property before their occurrence. The aim of this study was to evaluate the liquefied and pressurized petroleum gas spherical tanks in a refinery and assessing the risks of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) phenomenon.

Material and Method: In this study, the risks of BLEVE phenomenon were assessed, using the Bowtie method. The consequences of explosion wave phenomenon and the resulting wave quantity and its impacts on the neighboring machineries and equipment were analyzed. PHAST software version 6.54 has been used for modeling the BLEVE phenomenon.

Result: In this evaluation, generally five causes and two consequences were identified for BLEVE phenomenon. In order to reduce its consequences, forty-three controlling measures were introduced to prevent the BLEVE phenomenon and the impacts of 31 control measures were identified. According to the conducted analysis, it was found that the spherical tank blast wave caused by LPG can lead to explosion of close located tanks which can create a chain of explosions.

Conclusion: The results of modeling and risk assessment can be used to identify the BLEVE phenomenon causes and its effects on nearby people and equipment. Based on these results, preventive controlling measures can be implemented and also be determined by adopting proper design and layout, margin of safety for personnel, equipment and accessories.

Key words: *Risk Assessment, Modeling, Spherical Tank, BLEVE, Bowtie*

* Corresponding Author Email: *ss.alizadeh2013@gmail.com*