حفاظت مخازن ذخیره گازهای مایع تحت فشار از رخداد BLEVE

آرش نجفی*،سعید طاهری

ایران، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، کد پستی ۵۶۱۹۹۱۳۱۳۱

arash_najafi@hotmail.com :نویسنده مسئول، ایمیل

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۸

چکیده:

مخازنی که به منظور ذخیره‌سازی و انتقال گازهای مایع تحت فشار به‌کار می‌روند همیشه در معرض خطر آتش‌سوزی و انفجار قرار دارند. مرور حوادث گذشته مخازن گاز مایع تحت فشار، نشان می‌دهد که شدیدترین و فاجعه‌آمیزترین حادثه‌ای که در طی ذخیره‌سازی گازهای مایع تحت فشار روی داده، انفجار بخار مایع انبساطی جوشان نام دارد. بررسی و تحلیل این حوادث نشان می‌دهد علت اصلی انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، احاطه مخزن در آتش و در نتیجه ورود حرارت بالا به مخزن بوده است. در این مقاله، دو روش تأمین ایمنی نسبت به بقیه روش‌ها، بیشتر مورد تأکید قرارگرفته است. نخست پیشگیری از آتش‌سوزی در اطراف مخزن و جلوگیری از رسیدن آتش به مخزن و دیگری بازرسی‌های دوره‌ای است. بازرسی دوره‌ای می‌تواند در پیشگیری از ایجاد نشتی در مخزن و همچنین سایر اتصالات و لوله های موجود کمک شایانی کند.

کلمات کلیدی: انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، بازرسی مخازن، مخازن گاز مایع تحت فشار

۱- مقدمه

استانداردهای بالای ایمنی، از عوامل اساسی رشد و پیشرفت صنعتی یک منطقه محسوب می‌شود. چرا که در صورت عدم رعایت ایمنی، استمرار تولید دچار آسیب شده و کاهش رشد اقتصادی را چه برای واحد صنعتی و چه برای منطقه اطراف آن به دنبال خواهد داشت. یکی از صنایعی که امروزه کاربرد فراوانی دارد، صنعت گاز مایع تحت فشار[1] است. گاز مایع تحت فشار، گازی است که تحت فشار به‌صورت مایع درآمده و به شکل مایع ذخیره و یا منتقل می‌شود (طاهری و نجفی، ۱۳۹۴). علت ذخیره‌سازی و انتقال این گازها به شکل مایع به دلیل حالت گازی این گازها در شرایط اتمسفری است و ذخیره و انتقال یک گاز دارای خطر انفجار بالاتری نسبت به ذخیره و انتقال آن به شکل مایع است (احتراق در فاز گازی صورت می گیرد). لذا این گازها به شکل مایع ذخیره و یا منتقل می‌شوند. از کاربردهای گازهای مایع تحت فشار می‌توان به سوخت‌هایی که در حمل و نقل شهری و جاده‌ای خودروهای سبک به‌کار می‌رود اشاره کرد که به این نوع گاز مایع تحت فشار، گاز طبیعی فشرده[2] گفته می‌شود. کاربرد رایج دیگر گازهای مایع تحت فشار، در بخش سوخت خانگی و صنعتی است. روستاها و کارخانجاتی که به گاز طبیعی دسترسی ندارند از گازهای مایع تحت فشار که به‌نام گاز مایع[3] شناخته می‌شوند، استفاده می‌کنند.

مخزن ذخیره گازی که تحت فشار به مایع تبدیل شده است همیشه در معرض خطر انفجار قرار دارد. در پیشینه (Davenport,1988)، مهمترین حادثه‌ای که برای یک مخزن ذخیره و یا انتقال گاز مایع تحت فشار اتفاق افتاده، یک نوع انفجار به نام انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[4] ذکر شده است. انفجار بخار مایع انبساطی جوشان در مخازنی که ماده قابل اشتعال ذخیره کرده‌اند، علاوه بر ایجاد پرتابه‌ها، منجر به ایجاد فایربال‌ها (توپ‌های آتشین) می‌شود. پرتابه‌ها در واقع تکه‌های مخزن هستند که در اثر انفجار به‌صورت موشک به اطراف پرتاب می‌شوند و می‌توانند تا چندصدمتری محل وقوع حادثه را تحت تأثیر خود قرار دهند.

1. Pressure Liquefied Gas (PLG)

2. Compressed Natural Gas (CNG)

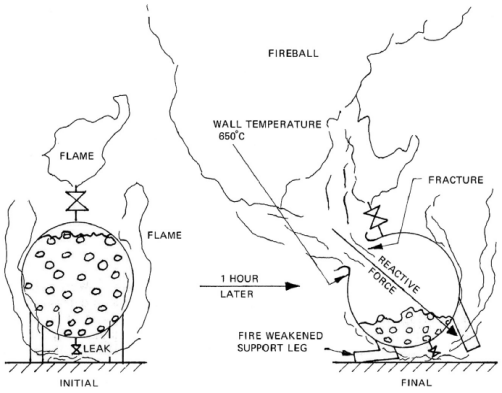
3. Liquefied Petroleum Gas (LPG)

4. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)

آنالیز دقیق انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشان روی داده در حوادث گذشته (Abbasi and Abbasi, 2007) نشان می‌دهد که عواملی مانند گرفتار شدن مخزن در یک آتش بزرگ، نقص فنّی تجهیزات ابزار دقیق مثل سطح‌سنج و فشارسنج، انتخاب شیر اطمینان نامتناسب با مخزن، افت مقاومت دیواره مخزن در دماهای بالا به دلیل کاهش ضخامت دیواره و... از عوامل اصلی ایجاد انفجار بخار مایع انبساطی جوشان بوده‌اند. بنابر آنچه که در بالا بیان شد، برای حفاظت از مخازن ذخیره گاز مایع تحت فشار، بازرسی دوره ای این مخازن الزامی است. بازرسی دوره‌ای شامل دور کردن منابع اشتعال از مخزن ذخیره سازی، بازرسی و کنترل تجهیزات ابزار دقیق، بازرسی ضخامت دیواره و... است (طاهری و نجفی، ۱۳۹۴). هدف از این مقاله، معرفی پدیده انفجار بخار مایع انبساطی جوشان و عوارض بعد از آن است و بعد از معرفی انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، راهکارهایی برای جلوگیری از این خطر فاجعه آمیز ارائه خواهد شد.

۲- انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[1] (BLEVE)

اصطلاح انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، ابتدا توسط سه عضو واحد تحقیق و توسعه یک کارخانه مواد شیمیایی در سال ۱۹۵۷ به‌کار برده شد (Abbasi and Abbasi, 2007). منشأ این پدیده، نشتی ایجاد شده در مخزن است. نشتی می‌تواند توسط عواملی مانند برخورد فیزیکی یک شیء به مخزن، احاطه مخزن توسط آتش و... ایجاد شود. نشتی ایجاد شده در مخزن، باعث کاهش فشار ناگهانی در مخزن می‌شود و در نتیجه این کاهش فشار ناگهانی، مایع ذخیره شده در مخزن به حالت سوپرهیت[2] می‌رسد. در حالت سوپرهیت، مایع شروع به جوشش می‌کند و با جوشش مایع، به حجم اولیه بخار موجود در مخزن نیز، اضافه می‌شود. حفظ حالت سوپرهیت توسط مایع، حد و مرز مشخصی دارد. بعد از عبور از این حد، فرآیند جوشش هسته ای همگن آغاز خواهد شد. این جوشش به صورت انفجاری عمل خواهد کرد و باعث می‌شود که مایع به صورت دوفازی از طریق محل نشتی با سرعت بسیار بالایی به بیرون رانده شود. در اثر این رویداد، مخزن خرد شده و تکه‌های آن به اطراف پرتاب می‌شود. به این رویداد انفجار بخار مایع انبساطی جوشان گفته می‌شـــود(Abbasi and Abbasi, 2007). در صورتی که ماده ذخیره شده در مخزن، یک ماده قابل اشتعال مانند گاز مایع تحت فشار باشد پیش از خرد شدن مخزن، توپ آتشین (شکل ۱) تشکیل خواهد شد. توپ آتشین، یک ابر دوفازی است که به علت نیروهای ممنتوم به شکل یک توپ به سمت بالا می‌رود به‌صورتی که داخل این توپ هوایی وجود ندارد لذا احتراقی در آن صورت نمی‌گیرد. اما در محیط بیرونی این توپ به دلیل وجود هوا احتراق صورت می‌گیرد. پدیده توپ آتشین، پدیده کوتاه مدتی است اما آثار تشعشعی بسیار شدیدی دارد(Eckhoff, 2014) .



شکل (۱)- تشکیل توپ آتشین (فایربال) قبل از خرد شدن مخزن (ffohkcE, ۴۱۰۲)

مایع تا حدی می‌تواند حالت سوپرهیت خودش را حفظ کند که به آن حد سوپرهیت مایع گفته می‌شود. این حد سوپرهیت در دمایی اتفاق می‌افتد که به آن دما اصطلاحا دمای حد سوپرهیت[1] گفته می‌شود. در تعریف انفجار بخار مایع انبساطی جوشان که در بالا آمد، ذکر شد که این انفجار در شرایط بعد از حد سوپرهیت اتفاق می‌افتد. اما پراق جزء اولین کسانی بود که تأکید کرد انفجار بخار مایع انبساطی جوشان می‌تواند حتی در دماهای زیر حد سوپرهیت هم روی دهد (Prugh a & b, 1991). بعدها برک و کانینگهام (Birk, 1994)، در گزارشات خود درباره‌ی انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشان پروپان اظهار داشتند که گاز مایع تحت فشار (پروپان)، در لحظه‌ی وقوع انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، در دمای محیط (۲۰ °C)، دمای پایین‌تر از حد سوپرهیت اتمسفریش (۵۳ °C)، قرار داشته است. شکل (۲)، به طور خلاصه مکانیسم وقوع انفجار بخار مایع انبساطی جوشان را به همراه پیامدهای احتمالی آن نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، بعد از ایجاد نشتی و وقوع کاهش فشار در مخزن و سوپرهیت شدن مایع، دو حالت ممکن است برای مخزن رخ دهد. حالت اول، موج انفجاری همراه با خرد شدن مخزن است که از آن به عنوان انفجار بخار مایع انبساطی جوشان تک مرحله‌ای یاد می‌شود. حالت دوم، انتشار ناگهانی و شدید محتویات مخزن است که بسته به قابل اشتعال بودن یا نبودن ماده، پیامدهای متفاوتی را در پی خواهد داشت. انفجار بخار مایع انبساطی جوشان می‌تواند پیامدهای متفاوت

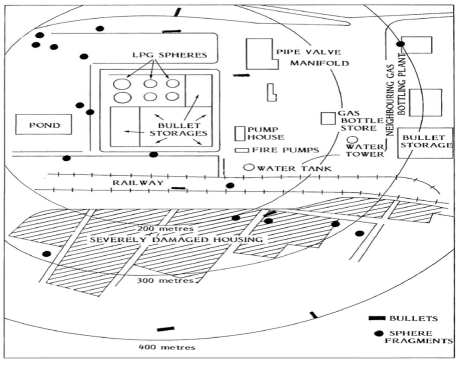
1. Superheat Limit Temperature (SLT)

در پی داشته باشد که هر کدام از آنها دارای محدوده‌ی اثری متفاوت بوده در بین آنها، پرتابه‌ها بیشترین برد آسیب‌رسانی را دارا هستند. نکته دیگری که می‌توان از این شکل استخراج کرد، غیرقابل پیش‌بینی بودن زمان وقوع انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[1] است. به دلیل اینکه از زمان به خطر افتادن مخزن، زمان دقیق و قطعی انفجار ناشی از این کاهش فشار و سوپرهیت شدن مایع معلوم نیست و نمی‌توان به طور قطع از این زمان سخن گفت.

۳- بررسی تاریخچه حوادث BLEVE

۳-۱. حادثه مکزیکوسیتی

شاید فاجعه‌آمیزترین حادثه انفجار بخار مایع انبساطی جوشان که تاکنون گزارش شده، حادثه مکزیکوسیتی در ۱۹ نوامبر ۱۹۸۴ باشد. در این حادثه تقریبا ۵۰۰ نفر کشته و حدود ۷۰۰۰ نفر به شدت زخمی شدند (Davenport, 1988). اوایل صبح ۱۹ نوامبر ۱۹۸۴، در حالی که مخازن از طریق خط لوله در حال پرشدن بودند، نشتی در سایت اتفاق افتاد. نشتی به خاطر پرشدن بیش از حد[2] و اضافه فشار[3] یک یا چند عدد از مخازن ایجاد شد. ابر بخار حاصل در واحد صنعتی مجاور مشتعل شد و حدود یک دقیقه بعد، یک یا احتمالا دو مخزن کروی ترکیدند. گازهای سوزان و نسوخته وارد خانه‌های مجاور شد و باعث آتش گرفتن همه چیز شدند. تا یک ساعت و بیست دقیقه بعد، ۹ انفجار کوچکتر، حاصل از انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشان مخزن، رخ داد. عمدهی مرگ‌ها در یک محدودهی ۳۰۰ متری (۱۰۰۰فوتی) از مرکز منطقه‌ی ذخیره‌سازی اتفاق افتاد (Davenport, 1988. شکل (۲)، برد پرتابه‌های حاصل از خرد شدن مخزن در انفجار بخار مایع انبساطی جوشان را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲) هم دیده می‌شود، تکه‌های مخزن تا فاصله ۴۰۰ متری از محل وقوع حادثه پرتاب شده اند.



شکل (۲)- برد پرتابه‌های حاصل از انفجار EVELB در حادثه مکزیکوسیتی (۹۱ نوامبر ۴۸۹۱) (ffohkcE, ۴۱۰۲)

1. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
2. Overfilling
3. Overpressure

۳-۲. حادثه بوچئون

در ۱۱ سپتامبر ۱۹۹۸، یک انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[4] همراه با آتش‌سوزی در ایستگاه تخلیه و بارگیری گاز مایع،س در بوچئون کره جنوبی روی داد.(Park, et al. 2006)

این حادثه نیز با یک نشتی آغاز شد. در حدود ساعت ۱۴:۰۶ نشتی آغاز شد. چهار دقیقه بعد آتش، تانکر بوتان را فراگرفت. در نهایت نخستین انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، در ساعت ۱۴:۲۵ در تانکر پروپان و به مدت ۹ ثانیه روی داد. انفجار بخار مایع انبساطی جوشان دوم در تانکر بوتان و به مدت ۷ ثانیه در ساعت ۱۴:۲۷ مشاهده شد. در این حادثه، علاوه بر کشته شدن یک نفر و زخمی شدن ۸۳ نفر، ۱۳ میلیون دلار خسارت اقتصادی هم بر جای ماند. اکثر تأسیسات از جمله تأسیسات پرکردن گاز، ۵۷۵۰ سیلندر گاز مایع، ۱۲ ساختمان، ۱۲ تانکر، ۱۱۳ وسیله نقلیه و ۹ خاموش کننده آتش آسیب دیدند. در این حادثه، حداکثر فاصله پرتاب شده تکه های مخزن ۶۷,۴ متر گزارش شده است(Park, et al. 2006).

۳-۳. تحلیل سایر حوادث

یکی از علل وقوع انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[5]، خرابی ابزار دقیق و نقص سیستم شیر اطمینان[6] ذکر شده است. خرابی ابزار دقیق و نقص در سیستم شیر اطمینان، می‌تواند نتیجه عدم بازرسی‌های به‌موقع از صحت عملکرد ابزار دقیق و سیستم شیر اطمینان باشد. البته عوامل دیگری هم موجب انفجار بخار مایع انبساطی جوشان می‌شوند که در همه‌ی آنها می‌توان به نوعی خطای انسانی را مشاهده کرد که این خود گواه این مطلب است که دوره‌های بازآموزی برای کارکنان تأسیسات گاز مایع تحت فشار[7] و کانتینرهای حامل آن الزامی است.

انفجار بخار مایع انبساطی جوشان صرفا در ایستگاه‌های ثابت ذخیره‌سازی گاز مایع روی نداده بلکه این انفجار فاجعه‌آمیز می‌تواند در مسیر انتقال گاز مایع به‌سمت مخازن گاز مایع نیز روی دهد (طاهری و نجفی، ۱۳۹۴).

۳-۴. تحلیل آماری حوادث انفجار بخار مایع انبساطی جوشان

عباسی و عباسی (Abbasi and Abbasi, 2007) از جداولی که حاوی رویدادهای قابل توجه و مهم انفجار بخار مایع انبساطی جوشان بوده و توسط پراق (Prugh a & b, 1991) و لیس (Lees, 1996) گردآوری شده اند و همچنین بررسی

4. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)
5. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)
6. Pressure Relief Valve (PRV)
7. Pressure Liquefied Gas (PLG)

حوادث انفجار بخار مایع انبساطی جوشان که در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴به وقوع پیوسته، تعداد وقوع حوادث را از نظر علل وقوع، به صورت جدول زیر دسته‌بندی کرده‌اند:

جدول (۱)- فرکانس علل وقوع حوادث
(Abbasi and Abbasi, 2007)

آتش	36%
آسیب مکانیکی	22%
پر شدن بیش از حد مخازن	20%
واکنش‌های ران اوی	12%
گرمایش اضافی	6%
آلودگی فضای بخار	2%
شکست مکانیکی	2%

جدول فوق حاصل یک ارزیابی وسیع از ۸۸ مورد رویداد انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، شامل تنها آن دسته از حوادث عمده انفجار بخار مایع انبساطی جوشان است که از سال ۱۹۲۶ به این سو در سراسر جهان رخ داده است (Abbasi and Abbasi, 2007).

همانطور که در جدول (۱) اشاره شده است، عمده‌ترین عامل ایجاد کنندهی انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، آتش بوده و بعد از آن عواملی مانند آسیب مکانیکی، پر شدن بیش از حد، واکنش‌های خارج از کنترل، گرمایش اضافی، آلودگی فضای بخار و شکست مکانیکی قرار دارند. با توجه به این آمار، می‌توان اقدامات پیشگیرانه و حفاظتی مخازن را به ترتیب درجه اثر، رده‌بندی و اجرا کرد.

آتش ممکن است در مکان‌های نزدیک به تأسیسات گاز مایع تحت فشار[1] آغاز شده باشد و در ادامه‌ی گسترش خود، به این تأسیسات برسد و آنها را در احاطه خود قرار دهد. عامل دیگری که در جدول (۱) آمده، آسیب مکانیکی است. آسیب مکانیکی می‌تواند ناشی از تصادف کانتینر حامل گاز مایع تحت فشار با یک خودروی دیگر و یا برخورد یک شیء به مخزن در تأسیسات ذخیره‌سازی گاز مایع تحت فشار و یا خوردگی فلز دیواره مخزن باشد. عامل پر شدن بیش از حد در نتیجه نقص در نشانگر سطح مایع درون مخزن رخ می‌دهد. عامل واکنش‌های خارج از کنترل، به‌دلیل واکنش‌پذیر بودن ماده ذخیره شده ایجاد می‌شود. گرمایش اضافی، به دلیل اثرات حرارتی ناشی از آتش که مدت زمان بیشتر از حد مقاومت دیواره مخزن به مخزن وارد می‌شود، ایجاد می‌گردد. آلودگی فضای بخار هم به‌صورتی اثرگذار است که ماده ذخیره شده که خود یک ماده واکنش‌پذیر باشد، با جزئی در فضای بخار واکنش دهد. معمولا در این موارد، یک ماده بی‌اثر مانند نیتروژن را برای پیشگیری از واکنش، به مایع موجود در مخزن (مانند هیدروژن) اضافه می‌کنند. شکست مکانیکی در اثر آسیب مکانیکی بوجود می‌آید (طاهری و نجفی، ۱۳۹۴).

۴-راه‌های جلوگیری از BLEVE

در مورد آن دسته از مخازن گاز مایع تحت فشار که بنا به دلایلی در معرض افزایش دما و فشار قرار گرفته‌اند، نمی‌توان با قطعیت در مورد امکان وقوع انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[2] صحبت کرد. این مسئله در مورد پیش‌بینی زمان وقوع انفجار بخار مایع انبساطی جوشان از لحظه‌ی قرار گرفتن مخزن در شرایط افزایش دما و فشار نیز صادق است. این جنبه‌ها و عدم قطعیت مرتبط با پیش‌بینی اندازه، محدوده، جهت، و ممنتوم پرتابه‌های احتمالی حاصل از یک انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، چالش‌های خاصی را نسبت به پیش‌بینی انفجار بخار مایع انبساطی جوشان یا محتویات آسیبی که یک انفجار بخار مایع انبساطی جوشان ممکن است ایجاد کند، مطرح می‌کند.

تاوسیف و همکاران(Tauseef, et al. 2010) طی تحقیق مفصلی که در سال ۲۰۱۰ در مورد خطرات احتمالی آتش‌سوزی و انفجار حاصل از استفاده از گاز مایع انجام دادند، استراتژی‌های مورد نیاز برای حداقل کردن وقوع و اثرات گوناگون انفجار بخار مایع انبساطی جوشان را بیان کردند که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

۴-۱. پیشگیری از در معرض قرار گرفتن مخزن در برابر آتش

رایج‌ترین علتی که به موجب آن مخازن گاز مایع تحت فشار[3] متحمل انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[4] می‌شوند، احاطه شدن مخزن در آتش است. مخازن حاوی گاز مایع تحت فشار باید در فاصله‌ای ایمن از منابع احتمالی آتش قرار داده شوند. منابع احتمالی آتش می‌توانند مخازن حاوی هرگونه ماده قابل اشتعال، در مجاورت مخزن گاز مایع تحت فشار باشند. البته

1. Pressure Liquefied Gas (PLG)

2. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)
3. Pressure Liquefied Gas (PLG)
4. Boiling liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)

این فاصله‌ی ایمن می‌تواند در بهترین حالت، احتمال گرم شدن مخزن گاز مایع تحت فشار به‌وسیله بار تشعشعی ناشی از سوختن مخزن مجاور را کاهش دهد. با این حال، مخزن گاز مایع تحت فشار هنوز ممکن است در خطر امواج انفجاری یا اصابت پرتابه‌های حاصل از انفجار مخازن دیگر باشد.

۴-۲. شیب‌دار کردن زمین مجاور تأسیسات مخازن ثابت گاز مایع

شیب‌دار کردن زمین مجاور باعث می‌شود در صورت نشتی مخزن، گاز مایع که سنگین‌تر از هواست در زیر مخزن تشکیل استخر ندهد و با این کار از وقوع آتش استخری پیشگیری می‌شود.

۴-۳. ایجاد دیواره‌های آب نزدیک به کانتینرهای PLG

دیواره‌های آب شامل سیستم‌های اسپری‌کننده هستند که دیواره‌هایی از قطرات کوچک آب ایجاد می‌کنند. دیواره‌ها می‌توانند بخار قابل اشتعال را در صورت آزاد شدن از کانتینر گاز مایع تحت فشار، جذب نموده و آنرا بدون مشتعل شدن پراکنده کنند. قطرات ریز (مه) آب میتوانند همچنین مقداری از ماده آزاد شده را در صورتی که ماده آزاد شده ماده ای مانند آمونیاک و کلر یا هر ماده دیگر قابل حل در آب باشد در خود حل کنند و به‌این‌گونه پراکندگی بخار سمّی کاهش می‌یابد.

۴-۴. پیشگیری از آسیب مکانیکی

آسیب مکانیکی به مخزن ثابت در اثر برخورد یک جسم فلزی به مخزن اتفاق می‌افتد. این جسم فلزی ممکن است یکی از پرتابه‌های حاصل از انفجار بخار مایع انبساطی جوشان یکی از مخازن مجاور باشد و یا تصادف یک کانتینر با مخزن ثابت می‌تواند نقش این جسم فلزی را بازی کند. در مورد کامیون‌های مخزن‌دار و ماشین‌های ریلی حامل گازهای مایع تحت فشار نیز ممکن است اتفاقات مشابهی رخ دهد. طراحی بدنه مخزن برای چنین مواقعی باید بر اساس دو برابر کردن ضخامت بدنه یا عایق‌کاری بدنه انجام گیرد. در مورد کانتینرهای جاده‌ای، تصادف یا واژگونی در طی انتقال، به پوسته‌ی بیرونی آسیب می‌زند. این موضوع، ساخت سطح بیرونی کانتینر با استفاده از ماده‌ای که حفاظت را برای ظرفیت درونی فراهم نماید، الزام‌آور می‌کند.

۴-۵. پیشگیری از پر شدن بیش از حد و اضافه فشار

احتیاط و رعایت دقیق استانداردها در طی پرکردن و وزن کردن تانک‌های مستعد انفجار بخار مایع انبساطی جوشان در نزدیکی تأسیسات و تست وسایل کاهش فشار (مانند شیر اطمینان[1])، فراوانی انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشان ناشی از پر شدن بیش از حد را کاهش داده است.

۴-۶. پیشگیری از واکنش‌های خارج از کنترل[2]

حادثه‌ای که منجر به ابداع اصطلاح انفجار بخار مایع انبساطی جوشان شد، واکنشی خارج از کنترل بود. واکنش خارج از کنترل، فرآیندی است که به موجب آن یک واکنش گرمازا از کنترل خارج و اغلب منجر به انفجار می‌شود. این فرآیند زمانی روی می‌دهد که بر اثر افزایش دما، شدت واکنش افزایش یابد، و این افزایش شدت واکنش، خود موجب افزایش بیشتر دما می‌شود و دوباره شدت واکنش تشدید می‌شود. این تشدید شدت واکنش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که یا واکنش دهندهها به اتمام برسند و یا مخزن حاوی آن دچار افزایش فشار بیش از حد شده و امکان مهار آن از بین برود. این فرآیند همواره همراه با صدمه دیدن تجهیزات است. با این حال، انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشان[3] ناشی از واکنش‌های خارج از کنترل نسبت به انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشانی که هنگام آسیب دیدن تصادفی یک مخزن ذخیره‌ی گاز مایع تحت فشار[4] رخ می‌دهند، بسیار کمتر رایج‌اند. تجهیزات ابزار دقیق باید برای نمایش پیوسته‌ی دما و فشار داخل تمامی تجهیزات فرآیند محتمل به داشتن مواد خود واکنشی، آماده شوند. چنین تجهیزاتی برای خنثی کردن اضافه فشار یا اضافه دما باید تأسیساتی مانند کویل (سیم پیچ) های سرمایش داخلی، پوشش‌های خارجی، شیرهای تخلیه از راه دور کنترلی، سیستم‌های بازدارنده-تزریقی و سیل‌های داخلی، همچنین هشداردهنده‌های دمای بالا و یا فشار بالا برای اتاق کنترل و حوزه‌ی کارکنان داشته باشند.

۴-۷. پیشگیری از آلودگی فضای بخار با مواد واکنشی

مخازن حاوی گازهای به شدت واکنشی مانند هیدروژن و کلر در شکل مایع شده، باید در برابر آلودگی توسط مواد دیگر که با آنها می‌توانند واکنش دهند، حفظ شوند. بی‌اثر کردن فضای بخار با نیتروژن یا گاز غیرواکنشی دیگر و نصب سیستم‌های فرونشانی انفجار ممکن است انفجارهای فضای بخار را پیشگیری کند، بدینگونه خطر آسیب به مخزن و درنتیجه انفجار بخار مایع انبساطی جوشان کاهش می‌یابد.

1. Pressure Relief Valve (PRV)
2. Run away
3. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)
4. Pressure Liquefied Gas (PLG)

۴-۸. پیشگیری از ضعیف شدن داخلی ساختار مخزن به علت فرسودگی، خزش، خوردگی و غیره

طراحی مناسب (صحیح) و تست پیش از استفاده کانتینرها می‌تواند از تغییر شکل و امکان پارگی کانتینرها پیشگیری کند. اندازه‌گیری های دوره‌ای ضخامت دیوار، بازرسی داخلی از نظر خوردگی، تست تابش صوتی برای امکان ترک برداشتن کانتینر و غیره، باید برای تضمین صلاحیت کانتینرها انجام شوند. تعمیر و نگهداری پیشگیرانه مانند بازرسی دوره‌ای مخزن، باید همراه با تعمیر و نگهداری پیشبینانه، مانند مطالعه رفتار مخزن در شرایط مختلف و شبیه‌سازی کامپیوتری آن، انجام شود.

۴-۹. محافظت کلی (عمومی) از آتش‌سوزی و احتمال برخوردهای تصادفی، به‌وسیله تدفین کانتینر

مخازن گاز مایع تحت فشار را می‌توان تا حد زیادی با دفن جزئی یا کامل آنها در زیر خاک در برابر آتش و برخوردهای خارجی محافظت کرد. با این‌حال، بازرسی چنین مخازنی با دشواری همراه است و مخازن در این شیوه حفاظتی در برابر خوردگی آسیب‌پذیر هستند.

۴-۱۰. پیشگیری از سوپرهیت اضافی که ممکن است از جوشش انفجاری پیشگیری کند

با الگو گرفتن از سیستم‌های تقطیر و راکتورهایی که در آنها وسایل هسته‌زایی مانند مواد سرامیکی لبه تیز و یا یک شبکه آلومینیومی در مایع برای کمک به جوشش و پیشگیری از سوپرهیت قرار داده می‌شود، وسایل مشابهی برای کانتینرهای گاز مایع تحت فشار کشف شده است. با این‌حال، یک استراتژی کاملا تست شده در راستای این خطوط هنوز در حال توسعه یافتن است.

۴-۱۱. عایق‌کاری گرمایی

با توجه به اینکه عایق‌کاری مخزن در کاهش گرمایش مخزن در هنگام روبرو شدن با حرارت زیاد و همچنین به تأخیر انداختن افزایش فشار داخلی مخزن نقش بسزایی دارد، بر این اساس کانتینرهای گاز مایع تحت فشار را باید از لحاظ حفاظت در برابر گرمای زیاد تا بیشینه حد ممکن، عایق‌کاری کرد. اگر دیوار کانتینر با یک روکش فولادی و یک عایق سرامیکی با ضخامت کافی (۱۳ میلیمتر یا بیشتر) محافظت شود، حفاظت گرمایی قابل توجهی را فراهم می‌کند. حتی روکش‌های فولادی با یک شکاف هوا بین دیوارهای روکش می‌تواند شدت گرمایش دیوار را تقریبا به میزان نصف دیوار محافظت نشده، کاهش دهد. با این‌حال، چنین مواد نسوزی خودشان نمی‌توانند از انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[1] پیشگیری کنند. در بهترین حالت می‌توانند حادثه فاجعه‌آمیز را تا حدود ۵-۴ ساعت به تأخیر بیاندازند که در این بازه‌ی زمانی آتش‌نشانان فرصت لازم برای حذف بار حرارتی را خواهند داشت.

در تأسیسات ثابت، حتی سیستم حمایتی مخزن، پایه‌هایی که مخزن روی آنها سوار شده، باید عایق شود به‌طوری‌که در زمان قرارگرفتن در معرض آتش، استحکام اولیه خود را حفظ کنند و در اثر حرارت دچار فرورفتگی و کاهش استحکام پایه‌ها نشوند. البته در حال حاضر پایه‌های بتنی در ایران به کار می‌رود. همچنین شیرها، لوله‌ها، و دیگر عوامل ایمنی استفاده شده در مخزن گاز مایع تحت فشار[2]، بایستی توانایی مقاومت کردن در برابر آتش‌سوزی و تحمل دماهای بالا که ممکن است در شرایط بحرانی ایجاد شوند، داشته باشند. سیستم عایق‌کاری گرمایی باید طوری نصب شود که تداخلی با بازرسی دوره‌ای سطح تانک و سیستم‌های حمایتی و پایه هایی که مخزن روی آنها سوار شده، ایجاد نکند. مواد نسوز، در صورتی که شیر فشارشکن[3] (شیر اطمینان) به درستی عمل کند، در به تأخیر انداختن یک انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، حتی می‌تواند مؤثرتر عمل کند.

۴-۱۲. سیلاب مستقیم (هدایت شده)

هنگامی که مخزن گاز مایع تحت فشار در آتش احاطه شده، برای کاهش و در نهایت حذف بار حرارتی، استفاده از آنچه سیلاب هدایت‌شده نامیده می‌شود، باید مورد توجه قرار گیرد. از میزان حجم کافی آب که کاملا دیوار مخزن را مخصوصا در قسمت‌هایی که به‌طور مستقیم توسط شعله پوشیده می‌شود، استفاده می‌گردد. آب باید تا حد امکان سریع به‌کار برده شود.

۴-۱۳. کاهش فشار سریع

گام دیگری که بایستی همراه با آغاز (سیلاب هدایت شده) برای کاهش احتمال انفجار بخار مایع انبساطی جوشان برداشته شود، کاهش فشار مخزن با استفاده از شیرهای ضدآتش و با قابلیت کنترل عملکرد از راه دور است. چنین وسایلی باید قادر باشند در ۱۵ دقیقه، فشار مخزن را به نصف فشار طراحی کاهش دهند. ماده آزاد شده باید در یک روش ایمن مانند یک مشعل، حذف شود. کاهش فشار نباید خیلی

1. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)
2. Pressure Liquefied Gas (PLG)
3. Pressure Relief Valve (PRV)

سریع باشد، زیرا ممکن است منجر به دمای بی‌نهایت پایین و شکنندگی در فولاد شود.

۴-۱۴. حـــداقل‌کردن آسیب در صورتی که BLEVE رخ دهد

اگر یک مخزن، در چند دقیقه کوتاه پس از وقوع خطر، دچار انفجار بخار مایع انبساطی جوشان شود، اقدامات بسیار کمی برای کاهش آسیب‌های ناشی از انفجار بخار مایع انبساطی جوشان می‌توان انجام داد. اما حتی اگر مدتی انفجار بخار مایع انبساطی جوشان (به‌اندازه چند ساعت) به تأخیر انداخته شود، چنین تأخیری یک مزیت دو گانه دارد. اگر پیشگیری از رفتن بازرسان به داخل فاصله برخورد (فاصله حتمی وارد شدن تلفات ناشی از انفجار مخازن) جدی گرفته نشود، امکان بروز توپ آتشین، موج ضربه‌ای، یا پرتابه‌ها وجود دارد و عوارض حاصل از یک انفجار بخار مایع انبساطی جوشان تأخیر یافته ممکن است حتی بزرگتر از عوارض حاصل از یک انفجار بخار مایع انبساطی جوشان سریع باشد، همچنان‌که در فیزین فرانسه اتفاق افتاد. آسیب حاصل از پرتابه‌ها بزرگ‌ترین نگرانی است زیرا منطقه تحت تاثیر پرتابه‌ها، بسیار بزرگتر از توپ آتشین یا موج ضربه‌ای است.

۱۵

۴-۱. کاهش شدّت آسیب‌های ناشی از برخورد پرتابه

نگرانی نخست در کمینه کردن آسیب ایجاد شده انفجار بخار مایع انبساطی جوشان[1]، پیشگیری کردن از بروز حوادث ثانویه و درجه بالاتر است. در واقع آنالیز حوادث گذشته انفجار بخار مایع انبساطی جوشان نشان می‌دهد که تعداد خیلی کمی از انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشان حوادث مستقلی هستند. تعداد زیادی از انفجارهای بخار مایع انبساطی جوشان اثرات زنجیره‌واری را به‌دنبال داشته و انفجارهای پیاپی را ایجاد کرده‌اند. برای پیشگیری از اثر زنجیره‌وار، باید تا جایی که ممکن است مخازن دیگر که ممکن است در گرمای موجود منفجر شوند یا به لحاظ مکانیکی آسیب ببینند، بسیار دور از مخازن حاوی گاز مایع تحت فشار[2] نگه داشته شوند. همچنین ممکن است دیواره هایی برای کاهش شدّت آسیب ناشی از برخورد پرتابه‌های وارد شونده یا خارج شونده، اطراف مخازن ایجاد شوند. آماده کردن یک سد برای قرارگیری در برابر پرتابه‌های احتمالی ناشی از انفجار بخار مایع انبساطی جوشان و کاهش تلفات ناشی از پرتابه‌ها، برای مخازن با محتوای انرژی در محدوده 10^3 تا 10^5ژول، مخازنی که با یک ظرفیت ذخیره‌سازی مشخص می‌توانند به اندازه مقدار گفته شده انرژی تولید کنند، نسبتا آسان است. اما همچنان‌که محتوای انرژی افزایش می‌یابد ایجاد سد به‌طور تصاعدی مشکل‌تر می‌شود، و برای محتوای انرژی که قادر به ایجاد یک موج ضربه ای 10^6×(۱۰۰-۵۰) ژول است، قرار دادن یک سد، نیاز به طراحی پیچیده و درنظر گرفتن حالت **۱۶**هینه‌ی مزایا و هزینه‌ها دارد.

۴-۱. بازرسی‌ها

اولین بازرسی فنّی، قبل از شروع به‌کار مخزن صورت می‌گیرد. این بازرسی می‌تواند شامل موارد زیر باشد: (۱) کنترل طول، قطر و ضخامت جداره مخزن و تطبیق آن با محاسبات طراحی مخزن و گواهی‌نامه و نقشه ساخت آن. (۲) اندازه‌گیری ضخامت بدنه و دو سر مخزن با دستگاه آلتراسونیک و مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با نتایج محاسبه شده. (۳) کنترل نشتی و هرگونه نقص و تغییر شکل مخزن به وسیله تست هیدرواستاتیک مخزن. (۴) کنترل نشتی اتصالات و جوشکاری‌های مخزن. (۵) کنترل اندازه‌ها و مشخصات شیرها، رهانه‌های اطمینان و وسائل حفاظتی مخزن با مدارک فنّی مخزن و استانداردهای مربوطه(ISIRI ۸۴۱) . پس از اینکه مخزن از بازرسی‌های اولیه موفق بیرون آمد، جهت استفاده عملی به سایت مورد نظر ارسال می‌شود. در هنگام شروع به کار مخزن نیز بایستی بازرسی‌های دوره‌ای طبق آئین‌نامه‌های محلی که با استانداردهای ملی و بین المللی سازگارند، در دوره‌های زمانی تعیین شده انجام شود.

بر پایه استاندارد ISIRI ۸۴۱که در حال حاضر در تأسیسات گاز مایع[3] موجود در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد، جهت بازرسی دوره‌ای مخازن ثابت مقررات زیر توصیه می‌شود:

(۱) هر مخزن ثابت گاز مایع نصب شده بر روی پایه، باید ۱۵ سال بعد از اولین تاریخ بهره‌برداری و سپس دو دوره ۱۰ ساله و بعد از آن هر ۵ سال یکبار، تحت آزمایش کلی و بازرسی دوره‌ای شامل: بازرسی کامل چشمی، بازرسی داخلی (در صورت وجود دریچه آدم رو)، بازرسی خارجی و ضخامت‌سنجی و همچنین موارد گفته شده در پاراگراف قبلی قرار گیرد و کلیه شیرها از نظر کارکرد صحیح آزمایش شوند.

(۲) رهانه‌های اطمینان مخزن ثابت گاز مایع نصب شده برروی پایه، حداقل هر ۷/۵ سال یک‌بار، توسط آزمایشگاه تأیید صلاحیت شده توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات

1. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)
2. Pressure Liquefied Gas (PLG)
3. Liquefied Petroleum Gas (LPG)

صنعتی ایران و یا شرکت ملّی پخش فرآورده‌های نفتی ایران آزمایش و تنظیم شود.

(۳) در آزمایش دوره‌ای، مخزن باید از لحاظ عیوب احتمالی، جوشکاری، زنگ زدگی، برآمدگی و فرورفتگی در اثر صدمات مکانیکی و نشت کردن و سایر عواملی که باعث معیوب بودن مخزن می شود، در حالی که مخزن تحت فشار آب و هوا است، مورد بازرسی فنّی قرار گیرد و در صورت مشاهده یکی از این عیوب، مخزن باید تا رفع نقص، از سرویس خارج شود.

(۴) چنانچه هر زمان، یک مخزن ثابت گاز مایع نصب شده روی پایه به دلایلی مانند آتش‌سوزی و نظایر آن صدمه ببیند، بایستی از آن آزمایش دوره‌ای به عمل آید.

۵. نتیجه گیری

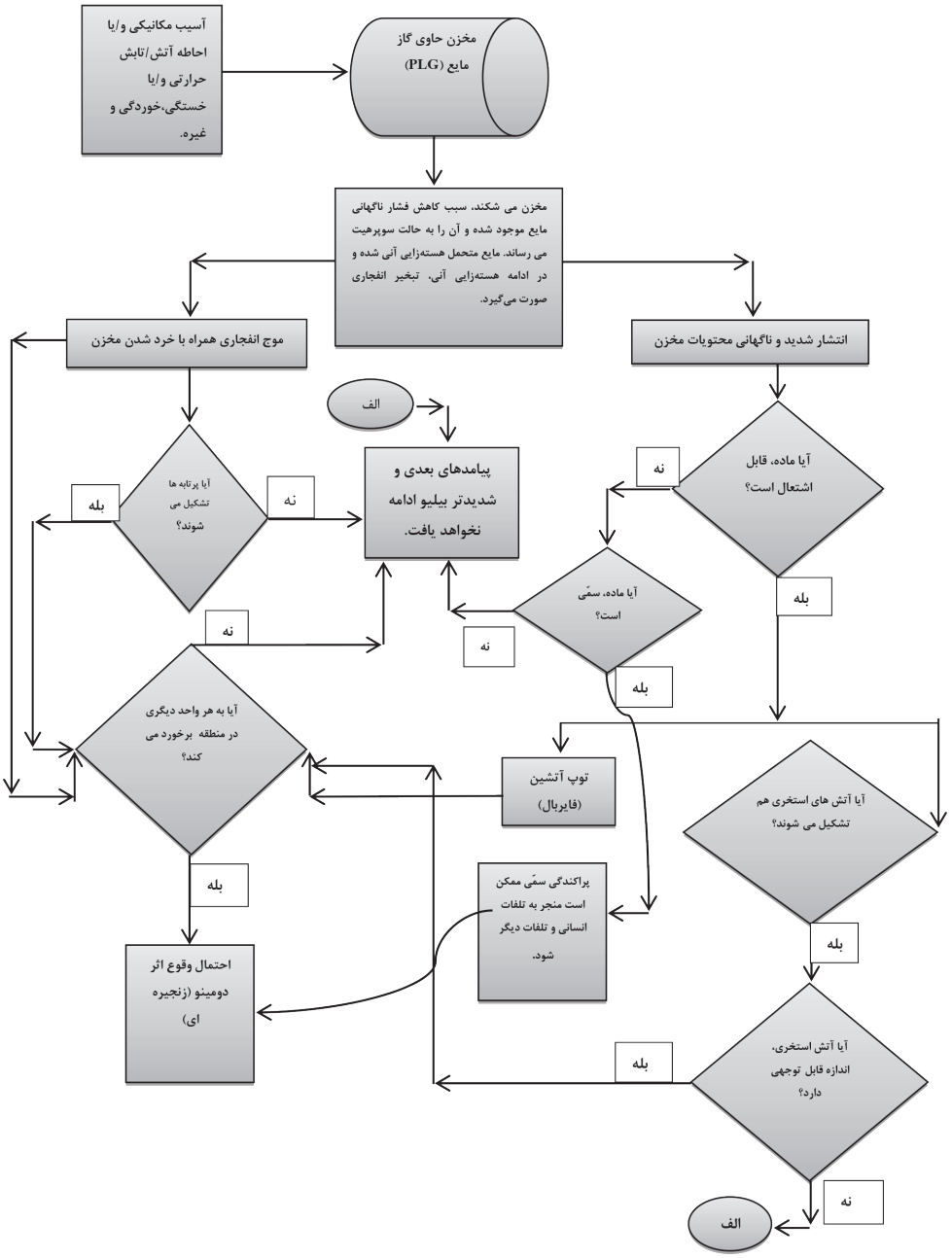
گازهای مایع تحت فشار که موضوع مطالعه حاضر است، دارای دو خاصیت هستند که این دو خاصیت باعث می‌شود که این گازها دارای پتانسیل خطر بالقوه بالایی باشند. گازهای مایع تحت فشار جزء مواد اشتعال‌پذیر محسوب می‌شوند و نکته دیگر، تحت فشار بودن آنهاست. دو خاصیت اشتعال پذیر بودن و تحت فشار بودن گازهای مایع، باعث حوادث مصیبت‌بار و فاجعه‌آمیزی در نقاط مختلف جهان شده است. در بین این حوادث، انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، فاجعه‌آمیزترین و پرتلفات‌ترین حادثه بوده است. شناخت انفجار بخار مایع انبساطی جوشان و اتخاذ تصمیمات ایمنی متناسب با آن می‌تواند محیطی ایمن‌تر را در تأسیسات ذخیره‌سازی و یا حتی کانتینرهای حمل و نقل این گازها ایجاد کند.

نتیجه اصلی این مطالعه این است که شدیدترین و فاجعه‌آمیزترین حادثه مخازن گازهای مایع یعنی انفجار بخار مایع انبساطی جوشان، عمدتا به دلیل آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده در اطراف مخزن، به وقوع پیوسته و این مسئله به ما نشان می‌دهد که اولین گام ایمنی در ارتباط با این مخازن، پیشگیری از آتش‌سوزی و ورود بار حرارتی زیاد به مخازن گاز مایع است. اقدامات بعدی در جهت ایمنی چنین مخازنی، همه در یک مجموعه به نام بازرسی‌های دوره‌ای قرار می‌گیرند. بازرسی‌های دوره‌ای شیر اطمینان، تجهیزات ابزار دقیق مثل فشارسنج و سطح‌سنج، ضخامت دیواره مخزن، از جمله موارد بازرسی‌های دوره‌ای مورد نظر هستند.

جدول (۱)- حوادث BLEVE موجود در پیشینه

محل وقوع حادثه	نوع حادثه	علت وقوع حادثه	تلفات ناشی از حادثه
کینگمن آریزونا (۵ژولای۱۹۷۳)	BLEVE و آثار آن (پرتابه و فایربال)	ایجاد نشتی و مشتعل شدن توسط ضربه آچار اپراتور	۳۱ نفر کشته و ۷۹ نفر مجروح شدند. تأسیسات ذخیره‌سازی و دفتر اداری به شدت آسیب یا تخریب شدند.
تگزاس سیتی،تگزاس (۳۰ می۱۹۷۸)	BLEVE و آثار آن (پرتابه و آثار آن)	به علت خرابی ابزار دقیق و نقص سیستم PRV، مخزن بیش از حد پرشد.	آسیب‌های شدید به واحدهای عملیاتی دیگر، هزینه‌های اقتصادی بیش از ۱۰۰ میلیون دلار(۱۹۸۶)
تونل بزرگراه نزدیک پالرمو در ایتالیا (مارس۱۹۹۶)	BLEVE و تشعشع شدید حاصل از آن	تصادف اتوبوس با تریلر و ایجاد نشتی در قسمت بالایی بدنه مخزن تریلر	ویران کردن ماشین‌های داخل تونل و کشته شدن ۵ نفر
بزرگراه نزدیک تیویسای اسپانیا (ژوئن۲۰۰۲)	BLEVE و آثار آن (پرتابه و فایربال)	واژگون شدن تانکر حامل سوخت CNG، نشت دیزل و یا CNG و مشتعل شدن آن	کشته شدن یک نفر و زخمی شدن دو نفر بر اثر سوختگی
راکتور برق هسته‌ای میهاما، ژاپن (آگوست۲۰۰۴)	BLEVE	ایجاد نشتی	۱۱ نفر از کارگران کشته و یا به شدت زخمی شدند.

حادثه تیگباو فیلیپین (۲ فوریه ۲۰۰۷)	EVELB	واژگون شدن کامیون یدک‌کش و آسیب دیدن مخزن آن	حداقل ۲۲ نفر کشته و ۱۰ نفر دیگر زخمی شدند.
حادثه جیپور هند (۱۰ نوامبر۲۰۰۸)	EVELB	حرکت تریلر بدون قطع اتصال رابط از مخزن بعد از اتمام بارگیری، و ایجاد سوراخ در کف تانک	کشته شدن ۳ نفر



شکل (۲)- مکانیسم BLEVE و پیامدهای آن(Tauseef, et al. 2010)

منابع

۱. طاهری، سعید و آرش نجفی، ۱۳۹۴، مخازن گاز مایع تحت فشار، ایمنی و لزوم بازرسی دوره ای آنها، نخستین کنفرانس بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی با رویکرد توسعه پایدار، مرکز همایشهای بین المللی صدا و سیما، تهران.

2. Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2007. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management, Journal of Hazardous Materials 141: 489–519.
3. Birk, A.M., 1994. Cunningham, M.H., The boiling liquid expanding vapor explosion, J. Loss Prev. Process Ind. 7: 474–480.
4. Davenport, J.A., 1988. Hazards and Protection of Pressure Storage and Transport of LP-Gas, Journal of Hazardous Materials, 20: pp 3-19.
5. Eckhoff, R.K., 2014. Boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs): A brief review, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 32: 30-43.
6. Lees, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries-Hazard Identification, Assessment, and Control, vols. 1–3, Butterworth-Heinemann, Oxford.
7. Park, K., Sam Mannan, M., Jo, Y.D., Kim, J.S., Keren, N., Wang, Y., 2006. Incident analysis of Bucheon LPG filling station pool fire and BLEVE, Journal of Hazardous Materials A137: 62–67.
8. Prugh, R.W., (a) 1991. Quantitative evaluation of “BLEVE” hazards, J. Fire Protect. Eng. 3: 9–24.
9. Prugh, R.W., (b) 1991. Quantify BLEVE hazards, Chem. Eng. Prog. 87: pp 66–72.
10. Rules for transportation, storage and distribution of LPG Gas, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI 841, 2nd. Revision.
11. Tauseef, S.M., Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2010. Risks of Fire and Explosion Associated With the Increasing Use of Liquefied Petroleum Gas, *J Fail. Anal. and Preven.* () ۱۰:۳۲۲–۳۳۳.

Protect PLG storage tanks from the BLEVE

Arash Najafi*, Saeed Taheri

Iran, Ardabil, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

Abstract

Pressure liquefied gas storage tanks are always at risk of fire and explosion. Review of past events shows that the worst and the most tragic incident occurred during storage of pressurized liquid gas, is “boiling liquid expanding vapor explosion”. Most of boiling liquid expanding vapor explosion occurred in a tank surrounded by fire. The fire prevention around the tanks and periodic inspections are two main methods for pressure liquefied gas tanks safety. Periodic inspections of tanks significantly help prevention of leakages in tanks and pipes it.

Keywords: Boiling liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE), Pressure Liquefied Gas (PLG), Tank inspection