مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۱۴/ شماره ۲/ صفحه ۴۵-۶۳

نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: 10.22044/JSFM.2024.13730.3802

مدل‌سازی و مطالعه انفجار مخازن ذخیره گاز در ایستگاه‌های سوخت گاز طبیعی فشرده (CNG)

امید مجنونی[۱]، قنبرعلی شیخ زاده[۲،*]

[۱] کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

[۲] استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

چکیده

به‌علت فشار بالای فشرده‌سازی گاز طبیعی برای استفاده در خودروها، همواره احتمال بروز خطراتی چون انفجار و آتش‌سوزی وجود دارد. در این مقاله به بررسی سناریوی احتمالی انفجار در مخازن ذخیره جایگاه پرداخته شده‌است. ابتدا انفجار در یک مخزن تکی ۸۰ لیتری و سپس انفجار در دسته‌ای از مخازن مدل‌سازی شده‌است که یک حادثه به‌صورت دومینو را تشکیل می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در فاصله ۲ متری از محل انفجار مخزن تکی، فشار تا ۴bar ادامه دارد و احتمال مرگ افراد در این فاصله، ۹۹ درصد است. در فاصله ۱۶ متری از محل انفجار دسته مخازن، فشار به ۲۰bar می‌رسد و احتمال مرگ افراد در این محدوده ۹۹ درصد خواهد بود. در هر دو حالت مدل‌سازی، مقدار تشعشع حرارتی به ۳۷/۵ kW/m^2 می‌رسد. میزان تشعشع در انفجار مخزن ۸۰ لیتری، شعاع ۱۷/۶۶ متر و در انفجار دسته‌ای مخازن شعاع ۵۵ متر را در برمی‌گیرد که منجربه آسیب ساختمان‌های اطراف و مرگ افراد خواهد شد. با مقایسه نتایج، حریم ایمن و میزان خسارت نیز پیش‌بینی شده‌است. نتایج تحقیق می‌تواند در جهت بهبود ایمنی در استفاده صحیح از گاز طبیعی فشرده و جانمایی صحیح تجهیزات جایگاه‌ها استفاده شود.

کلمات کلیدی: گاز طبیعی؛ انفجار مخازن؛ شبیه‌سازی پیامد؛ ارزیابی ریسک؛ مرگ و میر.

Modeling and study of the explosion of gas storage tanks in compressed natural gas fuel stations (CNG)

Omid. Majnouni[1], Ghanbar ali. Sheikhzadeh[2,*]

[1] MSc., Energy Systems. Eng, University of Kashan, Kashan, Iran

[2] Prof, Mech. Eng.,University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

Due to the high pressure of natural gas compression for use in cars, there is always a possibility of danger such as explosion and fire. In this article, the possible scenario of the explosion in the storage tanks of the station has been investigated. First, the explosion in a single 80-liter tank and then the explosion in a group of tanks that form a domino incident are modeled. The results show that at a distance of 2 meters from the explosion site of a single tank, the pressure continues up to 4 bar and the probability of fatality of people in this distance is 99%. At a distance of 16 meters from the explosion site of a group of tanks, the pressure will reach 20 bar and the fatality of people in this range will be 99%. In both modeling modes, the amount of radiation heat flux reaches 37.5 kW/m^2. Radiation in the explosion of the 80-liter tank covers a radius of 17.66 meters, and in the explosion of a group of tanks, the radius covers a radius of 55 meters, which will lead to the damage of the surrounding buildings and the fatality of people. By comparing the results, safely privacy and the amount of damage have also been predicted. The results of the research can be used to improve safety in the correct use of compressed natural gas and the correct positioning of station equipment.

Keywords: natural gas; explosion of tanks; simulating the outcome; risk assessment; fatality.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۵۵۹۱۳۴۲۴- ۰۳۱ فکس: ۵۵۹۱۳۴۰۰- ۰۳۱

آدرس پست الکترونیک: sheikhz@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

رشد روزافزون مصرف انرژی و گستردگی صنعت حمل و نقل باعث بروز مشکلاتی از قبیل آلودگی هوا، مصرف بالای انرژی‌های تجدیدناپذیر و تولید گازهای گلخانه‌ای شده‌است. ایران با داشتن بیش از ۲۲ میلیون خودرو در سال ۱۴۰۱، یکی از کشورهای پرمصرف در حوزه انرژی بخصوص مصرف بنزین در صنعت حمل و نقل به شمار می‌آید [۱]. گستردگی منابع گازی در ایران باعث شده که تمایل به گاز طبیعی به‌عنوان سوخت جایگزین در خودروها افزایش یابد. به‌طوریکه هم‌اکنون ایران با مصرف متوسط ۲۳/۵ میلیون متر مکعب سوخت CNG[1] در روز و دارا بودن ۲۵۵۶ ایستگاه CNG در میان پنج کشور جهان از لحاظ این ایستگاه‌ها قرار دارد [۲].

گسترش استفاده از گاز طبیعی در خودروها، توجه بیشتر به ایمنی و رعایت استانداردهای مربوطه را می‌طلبد. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که تعطیلی برخی از ایستگاه‌های عرضه سوخت CNG به علت کاهش قابلیت اطمینان و خرابی تجهیزات آن و حتی بروز برخی حوادث است. لذا بخش اعظمی از هزینه‌های توسعه صنعت CNG، برای جبران خسارات حاصل از حوادث بوده است. به همین دلیل، نمی‌توان منتظر حوادث بود و سپس به تجزیه و تحلیل آن‌ها پرداخت، بلکه می‌توان با شبیه‌سازی حوادث پیش از وقوع آن‌ها و تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل، نقایص ایمنی را برطرف نمود [۳].

رشد جایگاه‌های CNG و قرار گرفتن ایران در بین ۵ کشور برتر در این زمینه هرچند بسیار موفقیت‌آمیز به‌نظر می‌رسد، ولی با گسترش این ایستگاه‌ها در کشور به ایمنی در این زمینه توجه چندانی نشده است. بسیاری از ایستگاه‌های موجود در کشور دارای عمر بیش از ۱۰ سال بوده، به‌طوری که تجهیزات این ایستگاه‌ها سیکل کاری خود را طی نموده‌اند. مشکل عدم توجه به بخش تعمیر و نگهداری در این حوزه باعث مشکلاتی از قبیل تعطیلی برخی از جایگاه‌ها به دلیل عدم استاندارد، فرسوده شدن قطعات، انفجار برخی از مخازن CNG بر روی خودروها و در مدار نبودن خشک‌کن بسیاری از ایستگاه‌ها شده‌است.

سیفی و غفرانی [۴] به بررسی پیامدهای رها شدن گاز و میزان نشتی گاز در ایستگاه CNG پرداخته‌اند و نتیجه گرفته‌اند که بیشترین میزان نشتی مربوط به اتاقک کمپرسور بوده که علاوه بر کمپرسور شامل مخازن ذخیره گاز CNG نیز است. شیرالی [۵] مطالعه‌ای روی مخازن ذخیره انجام داده‌اند و در یک مدل‌سازی، سناریوهای مختلف روی مخازن را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس این مطالعه مهمترین خطری که کارکنان و منازل مسکونی را تهدید می‌کند، عواقب ناشی از موج انفجار است که می‌تواند در غلظت گاز ppm ۳۰۰۰ با ۶۰ درصد غلظت قابل اشتعال متان در بدترین سناریو تا فاصله ۱۶۰ متری منجر به تخریب ساختمان‌ها و خودروهای اطراف گردد. در ارزیابی ریسک مخزن ذخیره پروپان که توسط کارپنتر و همکاران [۶] صورت گرفته‌است، یک مخزن پروپان که شامل تجهیزات خطوط انتقال گاز، ایستگاه کمپرسور و تجهیزات بودار کننده گاز بود، بررسی شده است. در زمان تأسیس، این تجهیزات و مخزن با فاصله دورتری از ساختمان و اماکن اطراف احداث گردیده است، ولی با گذشت ۳۰سال و گسترش ساخت و ساز اطراف این تجهیزات، از فاصله ایمنی کاسته شده است. با بررسی صورت گرفته و با توجه به حالت آماده به کار بودن مخزن از زمان تأسیس، یکپارچگی نامشخص مخزن و مشاهده خوردگی در قسمت زیرین مخزن، در صورت وقوع پیامد و عدم ناتوانی در متوقف کردن حادثه پیش‌بینی شده، تصمیم به حذف مخزن گرفته شده‌است. صادقی یارندی و کریمی [۷] به بررسی انفجار یک مخزن ذخیره گاز طبیعی پرداختند که در اثر نشت گاز متان با سوراخ ۱۵۰ میلی‌متر رخ می‌دهد. نتایج حاصل از مدل‌سازی انفجار نشان می‌دهد تا فاصله ۲۰ متری میزان افزایش فشار ۱ بار بوده و احتمال مرگ افراد در این فشار ۱۰۰درصد است. در این مطالعه به بررسی تأثیر انفجار یک مخزن بر سایر مخازن دسته‌ای و تشدید حادثه پرداخته نشده است. در یک مطالعه که توسط پروینی و کرد رستمی [۸] بر روی مخزن ذخیره CNG نصب‌شده روی خودرو انجام گرفته، مدل‌سازی انفجار یک مخزن که در سال ۲۰۱۰ در آزادشهر ایران اتفاق افتاد و باعث مرگ ۴ نفر و آسیب رساندن به تجهیزات اطراف گردید، انجام شده است. پس از بررسی عوامل انفجار مخزن، بیان گردید که مخزن ذخیره CNG روی خودرو دست‌کاری و سپس جوشکاری شده که تحمل فشار ۲۰۰bar را نداشته و منجر به حادثه شده‌است. در مدل‌سازی انفجار نشان داده شد با فشار ۱۸bar، فرد در معرض

[1] Compressed Natural Gas (CNG)

این فشار که در فاصله یک متری از انفجار قرار دارد، کشته خواهد شد. ایمانی و همکاران [۹] به ارزیابی معیارهای جانمایی جایگاه‌های سوخت CNG در شهر اردبیل پرداختند و نتیجه گرفتند که ایستگاه‌های CNG موجود در شهر اردبیل، از نظر استانداردهای شهرسازی در موقعیت مناسبی قرار ندارند و با کاربری‌های اطراف خود نیز سازگاری مناسبی ندارند و ۶۹/۲ درصد آنها در پهنه‌های نامناسب قرار دارند. اسکندری و همکاران [۱۰] ایمنی ایستگاه‌های سوخت گاز طبیعی را با استفاده از تکنیک درخت خطا و شبکه بیزین را تحلیل کردند و سیستم توزیع‌کننده، به‌عنوان بحرانی‌ترین تجهیز شناسایی گردید و ترک و خوردگی شلنگ توزیع‌کننده، مؤثرترین عامل در بروز رویداد اصلی تعیین شد. موسایی و همکاران [۱۱] مدل جامعی برای انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی برای کشور ایران طراحی نمودند و نتایج نشان داد بهترین گزینه برای کشور گاز طبیعی مایع و بعد از آن، گاز طبیعی فشرده است.

در این مقاله ابتدا به بررسی مقدار مصرف گاز طبیعی فشرده در ایران و سایر کشورها پرداخته شده و توجیه فنی و اقتصادی CNG در ایران بررسی می‌شود. سپس به شرح کلی ایستگاه‌های CNG پرداخته و مشکلات این بخش از صنعت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت مدل‌سازی انفجار یک مخزن نمونه CNG صورت گرفته و نتایج آن بیان می‌شود، همچنین سناریوی دومینو بر اثر انفجار در مخازن دسته‌ای بررسی می‌شود که تاکنون پژوهشی درباره آن انجام نشده است.

۲- روند مصرف گاز طبیعی فشرده

در سال ۱۴۰۱ مصرف گاز طبیعی فشرده (CNG) در خودروها در ایران روزانه به سطح ۲۳/۵ میلیون مترمکعب رسید که تنها یک درصد نسبت به سال ۱۴۰۰ افزایش داشته است. مجموع تعداد جایگاه‌های عرضه‌کننده گاز طبیعی نیز طی چند سال اخیر ثابت بوده است. مطالب ذکر شده نشان می‌دهد، جهت فراگیرشدن و افزایش قابل توجه سهم CNG به‌عنوان سوخت خودروها در کشور نیاز به تعداد زیادی ایستگاه عرضه سوخت CNG وجود دارد. ارزیابی کمی CNG با مقایسه سوخت‌های فسیلی رایج مانند بنزین و گازوئیل قابل انجام است. ارزش حرارتی گاز CNG کمی بیشتر از معادل جرمی بنزین و در حد سوخت دیزل است؛ یعنی یک کیلوگرم گاز طبیعی معادل یک کیلوگرم گازوئیل انرژی حرارتی دارد و می‌تواند به همان میزان در موتور خودرو کار تولید نماید. هر خودروی سنگین قادر است، در حدود ۸۰۰ لیتر آبی معادل ۱۵۰ کیلوگرم گاز طبیعی را حمل کند. این مقدار در خودروهای سواری به ۸۰ لیتر آبی معادل تقریبی ۱۵ کیلوگرم کاهش می‌یابد. یعنی هر شارژ کامل CNG یک خودروی سواری به‌طور تقریبی معادل کمتر از ۲۰ لیتر بنزین خواهد بود و باعث می‌شود، خودروهای گاز سوز به تعداد دفعات بیشتری نسبت به خودروهای بنزین سوز به جایگاه سوخت‌گیری مراجعه کنند.

موسسه جهانی خودروهای گازسوز (NGV Global) در آسیا و اقیانوسیه اقدام به انتشار آمار بروز شده از تعداد خودروهای گازسوز و جایگاه‌های سوخت‌گیری در جهان نموده است. بر اساس گزارش این موسسه، تعداد خودروهای گازسوز و جایگاه‌های عرضه سوخت به تفکیک مناطق مختلف تا پایان نوامبر سال ۲۰۱۸ طبق جدول ۱ برآورد شده است. آمار ارائه شده شامل تمامی وسایل نقلیه زمینی اعم از تولید کارخانه‌ای گازسوز و یا تبدیل کارگاهی با سوخت‌های CNG، LNG و بیومتان (RNG) در سراسر جهان است [۱۲]. بیش از ۲۰/۵ میلیون خودروی گاز سوز تنها در ۱۰ کشوری تردد می‌کنند که بیشترین مصرف CNG را دارند که در جدول ۲ آمار آنها نشان داده شده‌است [۱۳].

در شکل ۱ میزان مصرف CNG طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ نشان داده شده‌است. بر این اساس مصرف CNG از روزانه ۰/۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۳ به روزانه ۱۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۱ رسیده که حاکی از افزایش ۴۷ برابری مصرف این سوخت است؛ اما پس از آن و طی سال‌های اخیر دولت توجه کمتری را به توسعه CNG داشته، به‌طوری که میزان مصرف روزانه CNG از ۱۹ میلیون مترمکعب در روز در سال ۱۳۹۱ به ۲۳/۵ میلیون متر مکعب در روز در سال ۱۴۰۱ رسیده است و رشد چندانی نداشته است [۱۴].

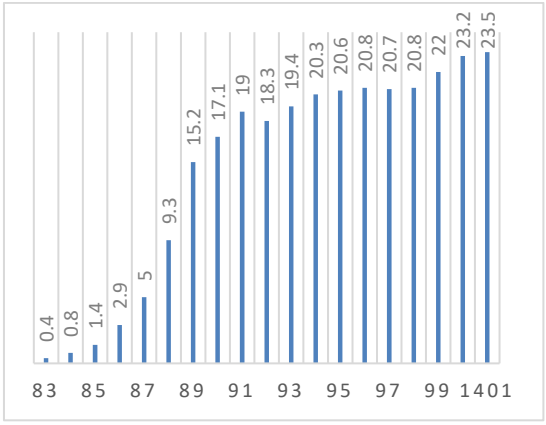
همان‌گونه که از شکل ۱ مشخص است، طی ۴ سال اخیر مصرف CNG رشد چندانی نداشته است و گاهی کاهش مصرف مشاهده می‌شود. بی‌توجهی به توسعه مصرف CNG، عدم اصلاح قیمت گاز طبیعی فشرده نسبت به بنزین و بحث ایمنی که حوادثی را طی سال‌های اخیر به وجود آورده است، باعث کاهش مصرف این سوخت در میان مصرف‌کنندگان شده‌است.

جدول ۱- جایگاه‌های عرضه سوخت گاز طبیعی مناطق مختلف تا پایان نوامبر سال ۲۰۱۸ [۱۲]

منطقه	خودروهای گازسوز	جایگاه‌های عرضه سوخت
آسیا پاسفیک	۱۸۵۰۹۶۷۷	۱۸۷۳۵
اروپا	۱۸۶۳۱۶۷	۴۸۹۳
آمریکای شمالی	۲۰۵۰۰۰	۱۹۳۰
آمریکای لاتین	۵۶۲۱۳۵۰	۵۴۸۰
آفریقا	۲۵۶۵۹۹	۲۰۸
مجموع	۲۶۴۵۵۷۹۳	۳۱۲۴۶

جدول ۲- ده کشور برتر در تعداد خودروهای گازسوز [۱۳]

کشور	تعداد (دستگاه خودرو)	سهم از خودروهای جهان
چین	۶۰۸۰۰۰۰	۲۳/۲ درصد
ایران	۴۵۰۲۰۰۰	۱۷/۲ درصد
هند	۳۰۹۰۱۳۹	۱۱/۸ درصد
پاکستان	۳۰۰۰۰۰۰	۱۱/۵ درصد
آرژانتین	۲۱۸۵۰۰۰	۸/۴ درصد
برزیل	۱۸۵۹۳۰۰	۷/۱ درصد
ایتالیا	۱۰۰۴۹۸۲	۳/۸ درصد
ازبکستان	۸۱۵۰۰۰	۳/۱ درصد
کلمبیا	۵۷۱۶۶۸	۲/۲ درصد
تایلند	۴۷۴۴۸۶	۱/۸ درصد

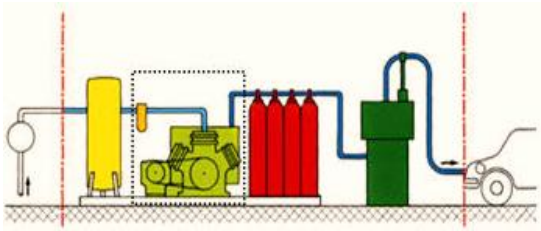


شکل ۱- میزان مصرف روزانه CNG در ایران در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ برحسب میلیون مترمکعب در روز [۱۴]

امروز در کشورهای مختلف جهان وجود ذخایر عظیمی از گاز طبیعی به اثبات رسیده است. در کشور ایران این ذخایر بالغ بر ۲۳ تریلیون متر مکعب برآورد می‌شود که در میان سایر کشورهای جهان، پس از روسیه در جایگاه دوم قرار دارد. این ذخایر می‌تواند تا ۱۰۰ سال آینده نیازهای کشور را برآورده سازد [۱۵]. علاوه بر آن شبکه گسترده گاز طبیعی در ایران یکی از عواملی است که سیاست‌گذاران بخش انرژی را به استفاده از این انرژی پاک ترغیب می‌کند.

۳- بررسی و تجزیه و تحلیل جایگاه‌های گاز طبیعی

روند افزایش مصرف گاز طبیعی در خودروهای گازسوز نخست نیازمند احداث ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG است تا تمایل مصرف‌کننده به استفاده از این سوخت پاک بیشتر گردد و پشتوانه مناسب برای تأمین سوخت گاز طبیعی از طریق ایستگاه‌های سوخت‌رسانی به‌وجود آید. در طراحی ایستگاه سوخت‌رسانی CNG باید به مسائلی نظیر انتخاب محل مناسب برای احداث ایستگاه، میزان سوددهی و همچنین پتانسیل رشد و بهره‌برداری توجه نمود. این کار باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG قابل رقابت با ایستگاه‌های سوخت‌رسانی بنزین و گازوئیل باشند. در این راستا، سیستم‌های توزیع سوخت در ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG باید از امکاناتی مشابه یا حتی بالاتر از ایستگاه‌های سوخت‌رسانی مرسوم برخوردار باشند. به‌طور کلی اجزای اصلی مکانیکی ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG عبارتند از: کمپرسور، مخازن، توزیع کننده. علاوه بر سه جزء مذکور وجود اجزای دیگری نظیر اتاق اندازه‌گیری، خشک‌کن، واحدهای کنترل الکتریکی و مکانیکی ضروری است تا سهولت سوخت‌گیری و ایمنی را برای مصرف‌کننده مهیا سازد. ارتباط اجزاء یک ایستگاه CNG در شکل ۲ به‌صورت شماتیک نشان داده شده‌است.



شکل ۲- تجهیزات اصلی ایستگاه CNG

۳-۱- انواع ایستگاه‌های ذخیره گاز طبیعی فشرده

ایستگاه‌های سوخت‌گیری CNG بسته به نوع سوخت‌رسانی می‌تواند متفاوت باشد؛ هرچند کلیات کار مشابه هستند ولی از نظر مدت سوخت‌گیری تفاوت می‌کند. این ایستگاه‌ها به ایستگاه‌های کند و سریع تقسیم می‌شوند که بحث اصلی این پژوهش مربوط به ایستگاهی با سوخت‌رسانی سریع است.

ایستگاه‌های با سوخت‌گیری کند بیشتر برای ارگان‌های دولتی که نیاز چندانی به سوخت‌گیری سریع نباشد، طراحی شده است. در این روش کمپرسور گاز را مستقیم به مخزن خودرو انتقال می‌دهد. در نظر نگرفتن مخازن دسته‌ای فشار بالا در این جایگاه‌ها باعث کاهش سرعت در روند سوخت‌گیری می‌شود که به‌طور متوسط نیاز به زمانی در حدود ۸ تا ۱۰ ساعت دارد.. با این توصیف، هرچند زمان سوخت‌گیری زیاد خواهد شد ولی با حذف مخازن فشار بالا، هزینه احداث جایگاه بسیار کاهش می‌یابد [۱۶].

برای عمومی شدن مصرف گاز طبیعی، نیاز به ایستگاه‌هایی است که خودرو در مراجعه به جایگاه بتواند در یک بازه زمانی کوتاه سوخت‌گیری نماید. بدین منظور از یک سری مخازن دسته‌ای، بین کمپرسور و توزیع‌کننده استفاده می‌شود تا اختلاف فشار در مخازن دسته‌ای جایگاه و مخازن خودروها افزایش یابد و عمل سوخت‌گیری در کمترین زمان ممکن صورت گیرد؛ بنابراین در ایستگاه‌های سوخت‌گیری سریع، که بیشتر جایگاه‌های ساخته شده در ایران نیز از این نوع است، به علت اضافه شدن تجهیزاتی مانند مخزن ذخیره و کمپرسور با ظرفیت بیشتر، سوخت‌گیری در زمانی حدود ۵ دقیقه انجام می‌گیرد؛ بنابراین بهترین روش به‌منظور کاهش زمان سوخت گیری، استفاده از مخازن فشار بالا در ایستگاه است [۱۷]. طراحی و جانمایی بیشتر ایستگاه‌های سوخت‌رسانی در ایران از نوع سیستم سه خط سریع می‌باشند. از نظر طراحی ممکن است از کمپرسورهای متنوعی برای فشرده‌سازی استفاده شود، ولی کارکرد و سوخت‌گیری در تمام ایستگاه‌ها یکی است.

۳-۲- نشتی گاز و خرابی در تجهیزات جایگاه CNG

در پژوهشی که توسط سیفی و غفرانی [۴] صورت گرفت، به مطالعه وقایعی که منجر به رهاشدن گاز CNG می‌شود و پیامدهای آن پرداخته شده‌است. وقایعی که منجر به حادثه می‌شوند به‌صورت زیر دسته‌بندی شده‌اند:

- طراحی نادرست (عدم تعبیه خشک‌کن)
- خرابی ساختاری در اثر نقصان مواد تشکیل‌دهنده (خستگی، خوردگی، فرسایش)
- خرابی تجهیزات مکانیکی (عدم عملکرد شیرهای اطمینان)
- خطاهای اپراتور (خطای انسانی در بستن شیرهای دستی جدا کننده‌های بخش‌های مختلف سیستم سوخت‌رسانی در مواقع اضطراری).
- وقایع خارجی (برخورد خودرو به توزیع کننده)

سه پیامدی که در اثر نشتی گاز می‌تواند رخ دهد، آتش‌سوزی، انفجار و پتانسیل خفگی است. با توجه به مطالعه صورت گرفته احتمال کل رهاشدن گاز CNG در ایستگاه‌های با سیستم سوخت‌رسانی سریع ۰/۱۳۷۳ در سال برآورد شده است. بیشترین میزان نشتی در اتاق کمپرسور صورت می‌گیرد، به‌طوری که فرکانس نشتی در این قسمت ایستگاه ۰/۱۳۷۳ در سال برآورد شده است. به طبع آن با توجه به اینکه این بخش تنها قسمت پرفشار و بسته ایستگاه نیز محسوب می‌شود، پیامدهای حاصل از وقوع این نشتی بسیار بیشتر از سایر قسمت‌های ایستگاه خواهد بود. با توجه به اینکه این مطالعه در سال ۱۳۸۴ صورت گرفته نمی‌توان با استناد به آن به پیامدهای حوادث احتمالی اتکا کرد؛ زیرا بسیاری از تجهیزات جایگاه دچار استهلاک شده‌اند و نیاز به تعویض دارند، به‌طوری که نشتی در این ایستگاه‌ها در تمام قسمت‌ها وجود دارد. یکی از دلایل خرابی تجهیزات را عدم آموزش به اپراتورهای جایگاه می‌توان بیان کرد، به‌طوری که از پنج جایگاه مورد بررسی در تهران هیچ‌یک از پرسنل جایگاه آموزش‌های لازم را نداشته‌اند و به همین جهت در مواقع تعویض قطعاتی مانند جداکننده در توزیع کننده باعث آسیب به آن می‌شوند.

یکی از مشکلاتی که هزینه تعمیر و نگهداری جایگاه‌های CNG را بالا می‌برد، نفوذ رطوبت به سیستم انتقال سوخت CNG است که منجر به خرابی تجهیزات بکار رفته می‌گردد. بنابراین کنترل میعان بخارات گاز و حذف بخارات آب از گاز به دلیل آسیب رساندن به تجهیزات ایستگاه CNG، یکی از موارد مهم در طراحی یک ایستگاه محسوب می‌شود؛ بنابراین برای کاهش رطوبت گاز در حد قابل قبول، استفاده از خشک‌کن در ایستگاه‌های CNG ضروری است. این موضوع در مطالعه دیگری توسط مجنونی و همکاران [۱۸] مورد توجه قرار گرفته

و تاکید شده است که در جایگاه‌های CNG حتما باید از خشک‌کن استفاده شود تا رطوبت به همراه گاز وارد مخزن خودرو نشده و احتراق سوخت به شکل بهتری انجام شود.

۳-۳- ضرورت ایمنی مخازن ذخیره جایگاه گاز طبیعی

هدف از بررسی مخازن CNG جایگاه، تعیین حریم ایمنی و شبیه‌سازی پیامدهای حاصل از نشت گاز و انفجار این مخازن است. از عمده نگرانی‌ها در ارتباط با یک ایستگاه عرضه گاز طبیعی فشرده، در مدار نبودن خشک‌کن اکثر جایگاه‌ها، طی کردن عمر مفید قطعات و فرسوده شدن آن‌ها، نبود تجهیزات ایمنی و کافی در جایگاه‌ها، در معرض قرار گرفتن مخازن ذخیره در مقابل باد و باران و گردوغبار است که باعث بروز مشکل و ایجاد حادثه خواهد شد؛ بنابراین رعایت موارد فوق دارای اهمیت فراوان است. نگرانی‌های سازمان استاندارد در مورد جایگاه‌های CNG به خاطر عدم ایمنی، باعث تعطیلی بسیاری از این جایگاه‌ها شده‌است. مطالعه و نتایج این پژوهش در ارتباط با تمهیدات کاهش ریسک مورد نیاز و حریم ایمنی این مخازن با مصرف کننده است. به علت انفجار مخازن تعبیه شده بر روی خودروها در سال‌های اخیر بیشتر توجه‌ها به این بخش معطوف گردیده است. این در حالی است که مخازن ذخیره خود ایستگاه‌ها که گاهی به ۱۰۰ مخزن ذخیره می‌رسد، به‌صورت موازی به هم وصل شده‌اند به‌طوری که وقوع یک انفجار باعث تخریب و انفجار سایر مخازن شده و فاجعه‌ای بزرگ را در پی خواهد داشت. از آسیب‌های متعدد ناشی از حوادث فرایندی می‌توان به مرگ افراد و جراحت انسانی، آسیب به تجهیزات و ساختمان‌های اطراف و کاهش اعتماد مصرف کننده به این سوخت اشاره کرد.

بخشی از مطالعات و بررسی‌ها در صنایع فرایندی بخصوص در مخازن تحت‌فشار مربوط به ارزیابی ریسک مخاطرات برای تعیین میزان ریسک است. به همین جهت، مرحله اول شناسایی خطر و منبع خطر است تا آثار و پیامدهای آن از جمله فشار ناشی از انفجار، شدت حرارت ناشی از آتش احتمالی و موج انفجار بر شمرده شوند. در این مقاله سعی شده است به بررسی علل وقوع حادثه پرداخته شود و پیامدها و ارزیابی ریسک در محل مخازن ذخیره، پیامدهای ناشی از انفجار، آتش و سمیت ارزیابی شود؛ بنابراین هدف از ایمنی و مطالعه مخازن ذخیره ایستگاه CNG به شرح زیر است:

- مدل‌سازی انفجار و پیامدهای ناشی از موج انفجار و آتش‌سوزی‌ها.
- تخمین میزان مرگ‌ومیر ناشی از انفجار که ممکن است مصرف‌کننده و ساکنین اطراف را تهدید کند.
- ارائه راهکارها و روش‌هایی برای کاهش خسارات و تعیین حریم ایمنی.

۴- بیان مسئله و مدل‌سازی انفجار مخازن

در این مقاله یک نمونه ایستگاه CNG به‌منظور تعیین حریم ایمنی تجهیزات و مصرف‌کنندگان و شبیه‌سازی پیامدهای ناشی از انفجار ناگهانی مخازن ذخیره دسته‌ای ایستگاه CNG با نرم افزار PHAST[1] بررسی می‌شود. پرسش اصلی این است که اگر مخزن دچار گسست ناگهانی شود، چه پیامدهایی را خواهد داشت و اگر حادثه به‌صورت زنجیره‌ای ادامه پیدا کند و تشکیل یک دومینو بشود مدل‌سازی و اثر تخریب حوادث به چه شکلی خواهد بود؟ قابل ذکر است از زمان تأسیس جایگاه‌های CNG تاکنون هیچ‌گونه انفجاری در رابطه با مخازن ذخیره ایستگاه‌های CNG گزارش نشده، با اینحال در مدار نبودن خشک‌کن بسیاری از ایستگاه‌ها و افزایش عمر استفاده از مخازن از زمان تأسیس تاکنون و نبود بازرسی جدی در این زمینه، احتمال خطر و ایجاد حادثه را به وجود خواهد آورد که بررسی این مسئله بیش از پیش قابل توجه خواهد بود.

طبق سوابق مطالعات صورت گرفته، روابط و معادلات حاکم بر مسئله اشاره بیان شده و فرایند حل، بررسی عوامل بروز رویداد، محاسبه پیامدهای رخداده و نهایتاً محاسبه کمی آسیب‌های فردی و اجتماعی در محدوده ایستگاه CNG ارائه می‌شود؛ همچنین مدل‌سازی نرخ تخلیه مواد، مدل‌سازی انتشار مواد در جهت وزش باد، مدل‌سازی انفجار و آتش، بررسی شده و با توجه به نتایج مدل‌سازی،حداقل فاصله ایمن از محل انفجار بسته به میزان فشار و انتشار مواد، تعیین می شود.

برای شبیه‌سازی سناریوهای پیش‌بینی شده علاوه بر اطلاعات فنی، باید موقعیت مکانی و متغیرهای جوی در

[1] Process Hazard Analysis Software Too

دسترس باشد. ازآنجا که در این پژوهش حوادث روی یک تجهیز و احتمال پیامد دومینو شدن حوادث پرداخته شده، سعی شده است، ظرفیت و فشار کلی مخازن دسته‌ای موجود در یک ایستگاه در نظر گرفته شود. فرض بر این است که تمام مخازن دارای موجودی کاملی از CNG باشند. همچنین ارتفاع مخازن، زاویه رهایش و برخی متغیرها مانند تغییرات آب‌وهوایی به‌صورت اختیاری بوده و تأثیری در حالت کلی مدل‌سازی نخواهد داشت.

گاز طبیعی ممکن است دارای مقدار کمی دی‌اکسید کربن باشد که استشمام حجم زیاد آن باعث بیهوشی می‌شود. ازآنجایی که مواد در دو حالت آتش‌زایی و سمیت مدل‌سازی می‌شوند، به علت درصد ناچیز دی‌اکسید کربن در گاز طبیعی از سمیت آن در مدل‌سازی صرف‌نظر شده‌است.

۴-۱- ایستگاه گاز طبیعی فشرده مورد مطالعه

به‌منظور امکان تعمیم نتایج حاصله، ایستگاهی انتخاب شده است که دارای تجهیزات دو شرکت هوایار و دلتا (که طراحی و ساخت متفاوتی دارند) باشد. ایستگاه مورد بررسی در میدان بهمن شهر تهران واقع شده و دارای ۸ نازل با فشار bar ۲۵۰ است. ۴ نازل با تأمین فشار از کمپرسور شرکت هوایار و ۴ نازل با تأمین فشار از کمپرسور شرکت دلتا بوده که هر دو کمپرسور از نوع رفت برگشتی می‌باشند. در طراحی تجهیزات شرکت دلتا، کمپرسور و تمام مخازن دسته‌ای ذخیره در یک چهارچوب بتنی قرار داده شده‌اند که در صورت بروز حادثه، فقط به تجهیزات آسیب وارد می‌شود. در طراحی شرکت هوایار، کمپرسور در یک اتاقک چوبی قرار گرفته و مخازن در اطراف یا قسمت بالایی اتاقک کمپرسور قرار داده می‌شوند. به علت اینکه این مخازن در هوای باز نصب شده‌اند، در صورت بروز مشکل می‌تواند تهدید جدی برای مصرف کنندگان، تجهیزات و ساختمان‌های اطراف باشد. مدل‌سازی روی این دسته مخازن صورت گرفته است. رطوبت موجود در سیال فشرده شده باعث خوردگی و آسیب رساندن به تجهیزات می‌شود. وجود رطوبت در سیستم انتقال سیال باعث زنگ‌زدگی شیرها، لوله‌کشی و مخازن ذخیره خواهد شد که باعث معیوب شدن سیستم و در برخی موارد به علت تشکیل هیدارت‌های متان و یخ زدن گاز و در پی آن مسدود شدن مسیر گاز انتقالی می‌شود. متأسفانه علی‌رغم رطوبت زیاد گاز طبیعی موجود در سیستم لوله‌کشی شهر تهران، ایستگاه‌هایی که توسط شرکت دلتا نصب شده‌اند (اکثر ایستگاه‌ها در شهر تهران توسط همین شرکت نصب شده اند)، فاقد خشک‌کن هستند [۴].

۴-۲- مدلسازی حادثه در یک مخزن CNG

برای بررسی شدت پیامدها، در مدل‌سازی حادثه یک مخزن، سه سناریوی محتمل که باعث وقوع یک پیامد مخرب می‌شوند عبارتند از: ۱- انتشار مواد. ۲- انفجار. ۳- گوی آتش. در ادامه تشریح هریک از این موارد ارائه می‌گردد.

به‌منظور انتشار غلظت ماده پخش شده، پیش‌بینی رفتار سیال و چگونگی انتشار آن ضروری است تا فرایند تخلیه مدل‌سازی شود. برای تشکیل غلظت اولیه و انتشار ماده به‌صورت ابر بخار از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۸].

$$C_o = y_c^o \frac{M_C}{M_a} \rho_a (P_a, T_a) \qquad (۱)$$

در این رابطه غلظت اولیه ابر C_o، مربوط به آلاینده اولیه یا نقطه شکستگی قابل اشتعال توسط y است. مقدار M_C وزن مولکولی آلاینده‌ها، M_a وزن مولکولی هوا و ρ_a چگالی محیط در فشار اتمسفر P_a و دمای T_a که در آن اثر رطوبت نادیده گرفته شده است. در گسست مخزن به علت فشار بالا، مواد به‌صورت آنی به محیط بیرون گسترش می‌یابند، انتشار حجم زیادی از مواد به محیط بیرون در حضور عامل جرقه باعث شکل‌گیری آتش می‌شود. با گسترش آتش و کاهش چگالی گاز و افزایش نیروی بویانسی آتش به شکل نیمکره کامل درمی‌آید. با در نظر گرفتن توزیع توده گازی اولیه به‌صورت همگن بر روی یک کره با غلظت اولیه C_o و شعاع ابر R_O، می‌توان از رابطه (۲) جرم آلاینده m_c را تعیین کرد [۸]:

$$m_c = \frac{4}{3}\pi R_O^3 C_O \qquad (۲)$$

به علت چگالی پائین گاز متان نسبت به هوا که باعث شناوری مثبت آن خواهد شد، برای تخمین توزیع غلظت از مدل گاوسی استفاده می‌شود. در این مدل بازه زمانی را برای یک نقطه در نظر گرفته و متوسط غلظت ماده پخش شده در یک نقطه خاص در آن بازه زمانی محاسبه می‌گردد. روابط ریاضی گسترش غلظت ابر کروی که به‌صورت تابع نمایی با

شعاع R(x) می‌باشد، در مرجع [۸] به آنها اشاره شده است که به‌منظور اختصار در اینجا تکرار نمی‌شود.

در رابطه با سناریوی دوم یعنی انفجار، همواره این نگرانی وجود داشته است که ذخیره‌سازی گاز طبیعی و استفاده از آن در خودروها ممکن است، منجر به انفجار گردد که در فشار بالا باعث انبساط سریع و تشکیل یک موج فشار خواهد شد. در مدل‌سازی موج انفجار روش‌های زیادی ارائه شده است که پرکاربردترین آن‌ها بیان می‌شود.

روش اول روش TNT Equivalency می‌باشد که در این روش با داشتن جرم TNT معادل و خصوصیات TNT می‌توان انفجار گاز را شبیه‌سازی کرد و مقدار گاز مشخص شده از رابطه (۳) معادل‌سازی می‌شود که در آن، W جرم معادل با TNT، M جرم گاز قابل اشتعال، E_C گرمای احتراق گاز، E_{TNT} گرمای احتراق TNT معادل با $^{kJ}/_{kg}$ ۴۶۰۰ و η بازده انفجار است که بسته به میزان واکنش، عددی بین ۲٪ تا ۵٪ است.

$$W = \frac{\eta M E_C}{E_{TNT}} \qquad (۳)$$

روش دوم با نام TNO Multi-energy شناخته می‌شود. موج انفجار ایجاد شده در این روش بیشتر بستگی به میزان محدودیت، تراکم تجهیزات و مناطق مسکونی در محل انفجار دارد. این مدل ابتدا پخش مواد حاصل از انفجار را مدل‌سازی کرده و میزان ابر تشکیل‌شده از پخش مواد را مشخص‌کند. سپس به بررسی نواحی که حجمی از ابر درون این نواحی قرار می‌گیرد که شامل ساختمان‌ها و تأسیسات بکار رفته است، می‌پردازد. انرژی انفجاری طبق رابطه (۴) بدست می‌آید که در آن P_1 فشار مطلق در حالت متلاشی شدن، P_a فشار مطلق در هوای محیط و γ_1 ضریبی از گرمای ویژه گاز ذخیره شده در حالت انفجار مخزن توسط گاز ذخیره شده است [۸].

$$E_{EX} = \frac{P_1 - P_a}{\gamma_1 - 1} \qquad (۴)$$

در مدلی دیگر با نام بیکر استرلا، رابطه (۵) برقرار است که یک پارامتر واسطه با توجه به فاصله مقیاس شده $\bar{R}$ داشته و P_0 فشار محیط و r فاصله از منبع انفجار را نشان می‌دهد [۸].

$$\overline{R} = r\left[\frac{P_0}{E_{EX}}\right]^{1/3} \qquad (۵)$$

اگر $\overline{P_s}$ فشار بیشینه مقیاس شده و $\bar{R}$ مشخص باشند، حداکثر فشار ایجاد شده در یک نقطه P_s می‌تواند از رابطه (۶) بدست آید [۸]:

$$\overline{P}_S = \frac{P_S}{P_0} - 1 \qquad (۶)$$

در مورد سناریوی سوم نیز جرم ماده سوختنی قابل محاسبه است. $M_{flammable}$، جرم ماده سوختنی درگیر در آتش، M_{Input} مقدار جرم ماده سوختنی که در اثر انفجار از مخزن خارج می‌شود، f_{Vapor} جزء جرمی فاز بخار رها شده هنگام انفجار و $f_{correction}$ ضریب اصلاح جرمی (برابر با ۳ در نظرگرفته می‌شود)، هستند. اگر $\boldsymbol{f_{Vapor} \geq \frac{1}{f_{correction}}}$ باشد، جرم ماده سوختنی برابر با $\boldsymbol{M_{Input}}$ و درصورتی‌که $\boldsymbol{f_{vapor} < \frac{1}{f_{correction}}}$ باشد، جرم ماده سوختنی از رابطه (۷) حاصل می‌گردد. از آنجا که گاز طبیعی موجود در مخزن در مرحله گاز است و هیچ مایعی در مخزن وجود ندارد، تمام مواد قابل حمل بلافاصله پس از متلاشی شدن مخزن، از مخزن خارج می‌شود؛ بنابراین، جرم قابل ملاحظه‌ای (در این مطالعه، جرم کل گاز طبیعی موجود در مخزن) محسوب می‌شود [۸].

$$M_{Flammable} = f_{correction} f_{vapor} M_{Input} \qquad (۷)$$

شعاع شعله r_{flame} و مدت دوام یا ماندگاری شعله t_{flame} که تابعی از جرم ماده سهیم در آتش هستند به‌ترتیب برابرند با [۸]:

$$r_{flame} = 3.24 M_{Flammable}^{0.35} \qquad (۸)$$

$$t_{flame} = 0.852 M_{Flammable}^{0.26} \qquad (۹)$$

قدرت انتشار سطحی شعله به‌صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود که E_f، توان تشعشعی سطحی شعله، f_s انرژی تشعشعی تابیده شده موجود و ΔH_C گرمای خالص موجود برای انتشار است [۸].

$$E_f = \frac{f_s M_{flammable} \Delta H_C}{4\pi r_{flame}^2 t_{flame}} \qquad (۱۰)$$

مقدار f_s در رابطه (۱۰) برابر است با [۸]:

$$f_s = 0.27(\frac{P_{sat}}{10^6})^{0.32} \quad (11)$$

که برحسب فشار در حالت بخار اشباع هنگام انفجار مخزن بیان شده است.

۴-۳- مشخصات مخزن ذخیره و محدوده قرارگیری جایگاه مورد مطالعه

مخازن مورد مطالعه در این پژوهش شامل کلیه مخازن دسته‌ای جایگاه است که وظیفه ذخیره گاز طبیعی را دارند. این مخازن تعداد ۴۵ عدد، با حجم ۸۰lit، وزن ۱۰۷ kg و فشار کاری ۲۴۵ bar تا ۲۴۸ bar می‌باشند. مخازن ایستگاه به‌صورت تمام فلزی بوده که بر اساس استانداردهای ISO۱-۹۸۰۹ و ISO ۲-۹۸۰۹ طراحی می‌شوند.

شرایط قرارگیری جایگاه از نظر موقعیت مکانی آن بسیار حائز اهمیت است. این ایستگاه در نزدیک میدان بهمن شهر تهران قرار دارد که در شکل ۴ تصویر آن نشان داده شده و در آن، موقعیت مخازن CNG و صف طولانی مصرف‌کنندگان مشخص شده‌است.

شکل ۴- موقعیت ایستگاه CNG مورد مطالعه

این جایگاه نزدیک مناطق مسکونی و تجاری احداث شده که در صورت انفجار مخازن شدت حادثه فاجعه بار خواهد بود. یکی دیگر از نواحی مستعد پیامدهای ناشی از انفجار مخازن، رانندگان و مراجعه کنندگان به ایستگاه است که در طول روز به این جایگاه مراجعه می‌کنند. با توجه به‌موقعیت مکانی این ایستگاه و قابل دسترسی بودن آن همواره یکی از ایستگاه‌های شلوغ با صف طولانی ماشین‌های گازسوز به شمار می‌آید. از زمان تأسیس این جایگاه خشک‌کن شرکت دلتا سال ۱۳۹۴ نصب گردید و تاکنون در مدار قرار نگرفته و خشک‌کن هوایار نیز به علت نقص فنی در مدار نیست و گاز با همان رطوبت بعد از فشرده‌سازی وارد مخازن ذخیره می‌گردد.

فواصل هریک از تجهیزات ایستگاه با مخازن ذخیره عبارت است از: کمپرسور هوایار ۳ متر، ساختمان سیستم الکتریکی ۱۲ متر، کمپرسور دلتا ۱۵ متر، مخازن دلتا ۱۷ متر، محل سوخت‌گیری ۲۰ متر و دفتر فنی ۴۰ متر.

۴-۴- سناریوی دومینو در مخازن دسته‌ای

برای بررسی احتمال بروز یک حادثه و پیش‌بینی رویدادهای احتمالی مشابه دیگر، ابتدا حوادث به‌صورت منفرد بررسی می‌شوند. سپس احتمال گسترش حادثه به سایر تجهیزات و آسیب رساندن به آن‌ها و تشکیل حادثه به‌صورت دومینو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بررسی سناریوی دومینو باید توجه کرد که تخریب ایجاد شده در یک واحد فرایندی فقط به واسطه بروز حادثه اولیه رخ می‌دهد که پیامد آن سبب گسترش آسیب شده و تجهیزات اطراف به‌طور مستقیم دچار آسیب نمی‌شوند.

عمده حوادثی که به‌صورت زنجیره‌ای رخ می‌دهد، در اثر انفجار یا آزادسازی انرژی به‌صورت آنی از یک منبع ذخیره صورت می‌گیرد که پتانسیل تشکیل یک حادثه دومینو و آسیب‌رسان می‌شود. موج انفجار، تشعشع حرارتی و ترکش‌های ایجاد شده در اثر انفجار یک منبع ذخیره عامل ضربه و آسیب رساندن به دستگاه‌های مجاور است. از آنجایی که در کار حاضر اثر ترکش‌ها و پرتابه‌های مکانیکی مدل‌سازی نمی‌شود، شدت تخریب می‌تواند گسترده و متفاوت باشد.

مخازن دسته‌ای ایستگاه CNG که به‌صورت دائمی به یکدیگر متصل شده‌اند، به علت اینکه ساکن هستند، دارای محدودیت وزنی نبوده و به‌صورت تمام فولادی باضخامت ۱۴ میلی‌متر ساخته می‌شوند. بسته به طراحی ایستگاه، مخازن ذخیره یا به‌صورت ایستاده یا خوابیده در ردیف‌های ۲۰ تایی یا بیشتر کنار هم چیده می‌شوند. در ایستگاه مورد بررسی در این تحقیق، مخازن به‌صورت ایستاده قرار گرفته‌اند. نفوذ رطوبت گاز به داخل مخازن و ترکیب آن با روغن خنک‌کاری کمپرسور، می‌تواند باعث زنگ‌زدگی یا خستگی در قسمت انتهایی مخازن گردد. بیشتر تنش بر قسمت استوانه مخزن وارد می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط مهدوی و لواسانی [۱۹]روی ارزیابی قابلیت اطمینان جایگاه CNG انجام گرفته است، مخازن ذخیره دارای قابلیت اطمینان ۰/۸۳ و نرخ شکست ۰/۰۰۰۰۰۷۷ می‌باشند،

که نشان می‌دهد، مخازن از قابلیت اطمینان بالایی برخوردارند. بدیهی است این تحقیق در شرایطی صورت گرفته است که جایگاه مورد مطالعه تازه احداث شده بود و تمام تجهیزات از جمله خشک‌کن جایگاه در مدار بوده و رطوبت گاز توسط خشک کن کنترل می‌شد.

۴-۵- شبیه‌سازی انفجار

یک مخزن CNG با ظرفیت ۸۰ لیتر، تحت‌فشار ۲۵۰ bar و دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد درنظر گرفته شده است. مقدار غلظت گاز ۵۰۰۰۰ ppm (حد پایین انفجار) تا ۱۵۰۰۰۰ ppm (حد بالای انفجار) از متان در نظر گرفته می‌شود. در طراحی اکثر ایستگاه‌های CNG، مخازن دسته‌ای در محیط باز جایگذاری می‌شوند. این مخازن از طریق لوله‌ای رابط مطابق شکل ۵ به هم متصل شده‌اند. از این رو پتانسیل بسیار بالایی برای به وجود آوردن حادثه دارند.

شکل ۵- اتصال مخازن ذخیره با لوله‌های فشار قوی

هرگونه نشتی در این لوله‌ها، عوامل تروریستی و دست‌کاری مخازن می‌تواند منجر به حادثه شود. انفجار در یکی از مخازن باعث می‌شود مخازن کناری نیز تحت تأثیر این انفجار و فشار وارده دچار حادثه و پیامد شوند. گستردگی این انفجار با فشار ۲۵۰ bar می‌تواند قابل توجه باشد.

در مدل‌سازی انفجار مخزن CNG، ابتدا انفجار یک مخزن بدون در نظر گرفتن حالت دومینو بودن انفجار در نظر گرفته می‌شود. سپس پیامدهای حادثه با شرایط انفجار کل مخازن دسته‌ای مقایسه خواهد شد. در این پژوهش سعی شده است، تمام وقایعی که ممکن است در اثر انفجار مخزن رخ دهد، انتشار مواد اولیه، تشعشع آتش و موج انفجار مدل‌سازی شده و نتایج تحلیل گردد. سناریوی انتخابی به‌صورت یک پارگی یا گسست ناگهانی در اثر زنگ‌زدگی، دست‌کاری مخازن یا ترک‌های داخلی صورت می‌گیرد. حل مسئله بر پایه معادلات ریاضی حاکم و نتایج به‌صورت نمودار ارائه می‌شود.

برای سنجش اعتبار نتایج شبیه‌سازی برنامه PHAST از نتایج کار پروینی و کردرستمی [۸] استفاده شده‌است. به نحوی که نتایج به دست آمده از برنامه PHAST در کار حاضر با نتایج پروینی و همکاران هم‌خوانی داشته باشد. تمام داده‌ها به نرم‌افزار با مرجع سنجیده شده‌است[۱۸].

۵- نتایج شبیه‌سازی انفجار

قبل از بررسی انفجار و نتایج آن به تأثیر انفجار بر انسان، تأسیسات و ساختمان‌های اطراف پرداخته می‌شود. انفجار می‌تواند برحسب میزان ازدیاد فشار تلفات متفاوتی داشته باشد و گاهی تا چندین متر باعث تخریب یک سازه یا تلفات انسانی شود. جدول ۳ میزان تأثیر افزایش فشار بر انسان و تجهیزات را نشان می‌دهد. تأثیر میزان افزایش فشار در اثر انفجار بر روی انسان نیز در جدول ۴ نشان داده شده‌است.

جدول ۳- تأثیر فشار بر انسان و تجهیزات [۲۰،۲۱]

فشار (mbar)	تأثیر بر انسان	تأثیر بر تجهیزات و ساختمان‌ها
۱۰۰۰	جراحت شدید براثر ترکش‌ها و پرتابه‌های مکانیکی	تخریب ساختمان‌ها، گسست مخازن
۶۰۰	پرتاب افراد به اطراف در اثر موج شوک، احتمال پارگی پرده گوش	صدمه به ساختمان‌ها، گسست مخازن و پارگی لوله‌ها
۳۰۰	جراحت شدید به افراد به دلیل برخورد پرتابه‌ها، ناشنوایی موقت	ترک در مخازن، صدمه به ساختمان‌ها
۲۰۰	۵ درصد احتمال مرگ، جراحت و پرتاب افراد در اثر موج شوک	خسارت اندک به ماشین‌ها و ساختمان‌های صنعتی
۱۴۰	۵ درصد احتمال مرگ، جراحت و زخم‌ها در اثر برخورد پرتابه‌ها	تخریب بخشی از دیوار یا سقف ساختمان‌ها

جدول ۴- تأثیرات فیزیکی افزایش فشار ناشی از انفجار بر انسان [۲۲]

میزان افزایش فشار (mbar)	صدمات فیزیکی بر انسان
۱۰۳ - ۲۰۰	کارکنان بر اثر موج انفجار از زمین بلند شده و مجدداً به زمین برخورد می‌کنند
۳۳۱	۵۰ درصد احتمال پارگی پرده گوش
۲۷۶ - ۳۴۵	جراحت شدید در اثر برخورد پرتابه‌ها و احتمال ۵۰ درصدی مرگ
۳۴۵ - ۴۸۳	احتمال پارگی گوش
۴۸۳ - ۶۸۹	جراحت شدید در اثر برخورد پرتابه‌ها و تقریباً ۱۰۰ درصدی مرگ
۵۵۲ - ۱۱۰۳	پرتاب افراد در اثر موج انفجار
۶۸۹ - ۱۰۳۴	احتمال ۹۰ درصد پارگی پرده گوش
۸۲۷ - ۱۰۳۴	آستانه خونریزی ریوی
۱۳۷۹ - ۱۷۲۴	احتمال ۵۰ درصدی مرگ در اثر خونریزی ریوی
۲۰۶۸ - ۲۴۱۳	احتمال ۹۹ درصدی مرگ در اثر خونریزی ریوی
۴۸۲۶ - ۱۳۷۹۰	مرگ فوری

۵-۱- پیامد ناشی از انفجار مخزن ۸۰ لیتری

در سناریوی گسست مخزن CNG به علت فشار بالا کلیه مواد به‌صورت آنی تخلیه شده و انفجار شکل می‌گیرد. با استفاده از معادلات حاکم و داده‌های بیان شده، خروجی بر اساس شرایط آب هوایی پایدار نشان داده می‌شود. هدف تعیین حریم ایمن تجهیزات و فاصله مناسب مصرف کننده از مخازن ذخیره جایگاه است؛ بنابراین پیامد حوادث در شرایط پایدار جوی با سرعت باد ۱/۵ m/s مدل‌سازی می‌شود؛ لذا جهت وزش باد تاثیر زیادی در مدل‌سازی انفجار ندارد.

شکل ۶، تغییرات فشار بیشینه برحسب فاصله از مرکز انفجار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است انفجار رخ‌داده باعث ایجاد فشار تا ۲۰ bar می‌شود، نزدیک‌ترین فردی که در فاصله ۲ متری از محل انفجار قرار دارد دچار مرگ فوری خواهد شد. در فشار نزدیک به ۴ bar خطر مرگ تا ۹۹ درصد افزایش می‌یابد. تلفات ناشی از انفجار، موج انفجار ایجاد شده و به همراه آن پرتابه‌های مکانیکی می‌تواند بسیار وسیع‌تر و صدمات جدی خارج از حاشیه ایمن وارد کند. مقدار فاصله مجاز در فشار ۴ bar، ۴ متر را نشان می‌دهد که به‌عنوان حداکثر فاصله مجاز و حاشیه ایمن در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۷ شعاع متاثر از موج انفجار با توجه به میزان فشار اضافی (Overpressure) ایجاد شده را نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود، فشار اضافی ۰/۲۰۶۸ bar تا شعاع ۱۶ متری، فشار ۰/۱۳۷۹ bar تا شعاع ۲۰ متری و فشار ۰/۰۲۰۶۸ bar تا شعاع ۱۱۲ متری از مرکز انفجار ایجاد می‌شود، تأثیرات موج انفجار هرچند ناچیز بر ساختمان‌های اطراف می‌تواند حائز اهمیت باشد.

شکل ۸ منطقه متأثر از گوی آتش احتمالی را با غلظت ۲۲۰۰۰ ppm تا ۵۰۰۰۰ ppm نشان می‌دهد. تا شعاع ۵ متری احتمال احتراق با منبع جرقه وجود دارد. در محدوده مخازن ایستگاه CNG منبع جرقه وجود ندارد، ولی در اثر برخورد پرتابه‌های مکانیکی احتمال جرقه و تشکیل گوی آتش در محدوده مشخص شده وجود دارد.

طبق شکل ۹ در لحظه انفجار که ۰/۲ ثانیه طول می‌کشد، غلظت متان به بیش از ۵۰۰۰ ppm (حدود ۵۲۰۰ ppm) افزایش می‌یابد، ولی بعد از چند ثانیه کاملاً از بین می‌رود. ازآنجایی که انفجار در فضای باز صورت می‌گیرد، نمی‌تواند باعث خفگی شود.

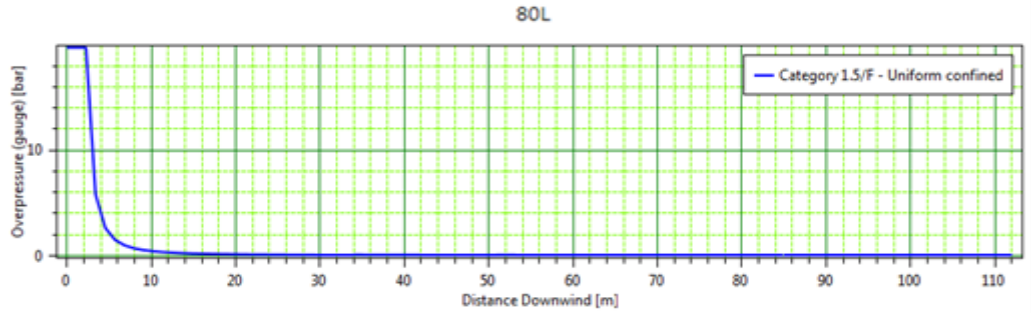
۵-۲- پیامد ناشی از شدت تابش حرارتی

در مخازن ذخیره با فشار 250 bar به دلیل ازدیاد فشار و تخلیه شدن آنی کل سیال، اگر دچار اشتعال شود، بسته به شدت تشعشع و زمان در معرض قرارگیری می‌تواند در سطوح مختلف باعث سوختگی و مرگ شود. میزان تشعشع حرارتی و پیامدهای آن در جدول ۵ نشان داده شده است. شدت تشعشع در شرایط آب و هوای F ۱/۵ نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شعاع ۱۷/۶۶ متری محدوده قرمز، شدت تشعشع ۳۷/۵ kW/m^2 را که محدوده خطر است و باعث مرگ افراد در معرض تشعشع خواهد شد، نشان می‌دهد. مقدار تشعشع تا شعاع ۶۷ متری (محدوده آبی رنگ)، به میزان ۴ kW/m^2 خواهد بود.

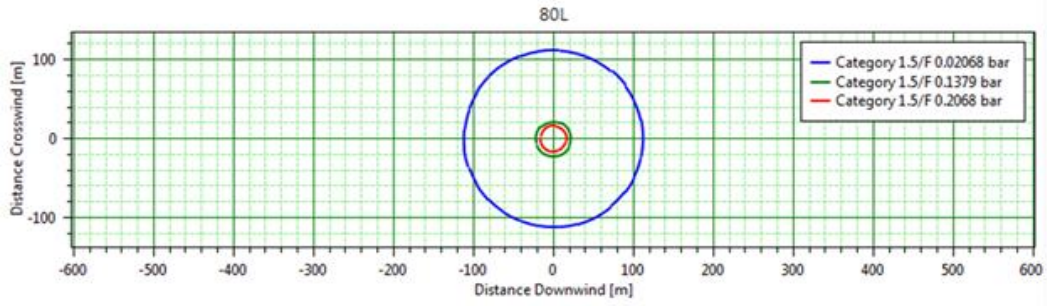
در شکل ۱۱ نیز، میزان فاصله تأثیرگذار تشعشع حرارتی به‌خوبی نشان داده شده است.

جدول ۵- اثرات شار حرارتی تشعشعی بر انسان و ساختمان [۱۹،۲۰]

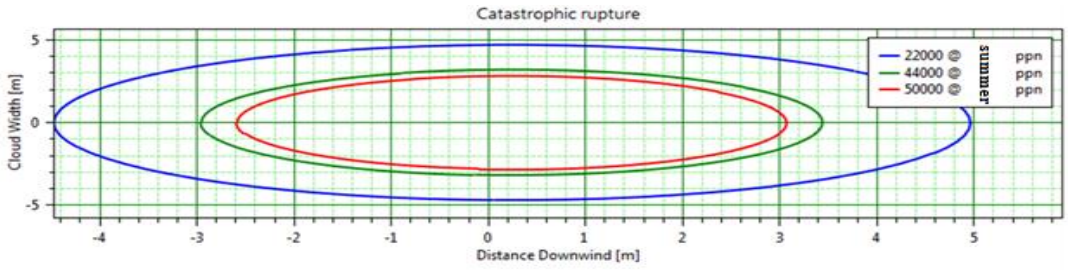
میزان تشعشع (kW/m^2)	پیامدهای احتمالی
۷۰	احتمال ۱۰۰ مرگ
۳۷/۵	مرگ آنی افراد در ۸ ثانیه، تخریب ساختمان‌های واحدهای فرایندی
۳۵	تلفات انسانی و آتش گرفتن ساختمان‌ها
۲۰	جراحت جدی به افراد، خسارت به ساختمان‌های نزدیک
۱۲/۵	خطر مرگ و آسیب به سیم‌کشی‌ها، مواد پلاستیکی و چوب‌ها
۴/۵	احتمال مرگ در ۶۰ ثانیه و سوختگی درجه ۱
۴	احتمال درد شدید بعد از ۲۰ ثانیه، سوختگی و تاول‌زدگی پوست



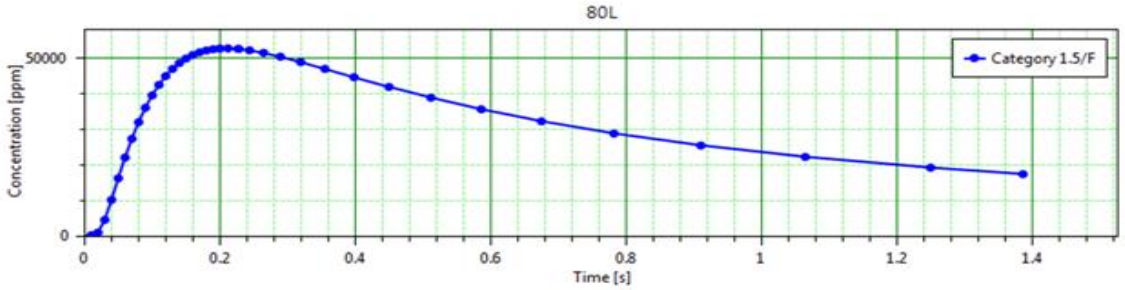
شکل ۶- تغییرات فشار برحسب فاصله از مرکز انفجار



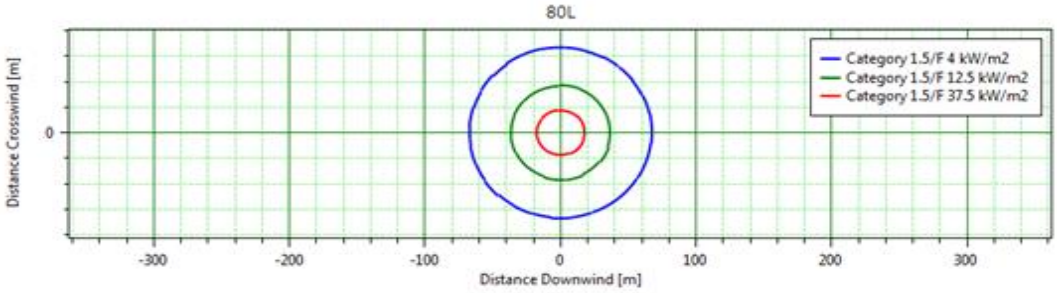
شکل ۷- انفجار اولیه در مقابل شعاع تأثیرگذاری



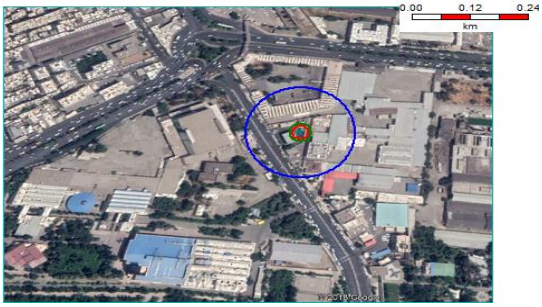
شکل ۸- ابر گاز منتشر شده در اثر انفجار



شکل ۹- غلظت متان برحسب زمان در فاصله مشخص شده در انفجار مخزن ۸۰ لیتری



شکل ۱۰- میزان تشعشع در شرایط آب‌وهوای پایدار



شکل ۱۱- میزان فاصله تأثیرگذار تشعشع حرارتی

شکل ۱۲- نمونه مخازن دسته ای ایستگاه CNG

۵-۳- نتایج انفجار مخازن دسته‌ای

در طراحی ایستگاه CNG مخازن دسته‌ای با فاصله حداقل cm ۵ کنار هم قرار می‌گیرند. هر بانک از مخازن مطابق شکل ۱۲ به وسیله لوله‌های استیل و به‌صورت سری با هم در ارتباط می‌باشند. این مخازن به‌طور مشخص در شبانه روز پر و خالی می‌شوند. در مدل‌سازی انفجار یک مخزن اثبات گردید که شدت تشعشع به $۳۷/۵\ kW/m^2$ می‌رسد که باعث تخریب کامل واحد فرایندی خواهد شد.

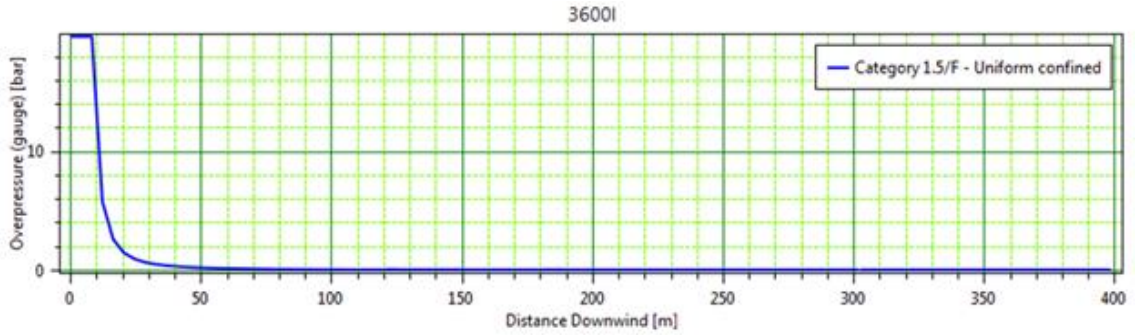
در لحظه انفجار تا فاصله ۲ متر فشار به bar ۲۰ رسیده و موج فشار تا شعاع ۱۶ متر با فشار bar ۰/۶۸۲۰ ادامه دارد؛ که نشان از تخریب تأسیسات اطراف خواهد بود. به دلیل عدم مدل‌سازی حادثه دومینو فرض می‌شود در انفجار یک مخزن، تمام مخازن دچار گسست شده و یک حادثه زنجیره‌ای، که از شدت حادثه اولیه به وقوع می‌پیوندد، تشکیل می‌شود. این فرضیه بسیار محافظه کارانه و براساس مدل‌سازی و شدت انفجار در یک مخزن در نظر گرفته می‌شود. ممکن است بر اثر ادامه‌دار بودن حادثه، شدت انفجار یا گسترش تشعشع حرارتی تحت تأثیر قرار گیرد و یا بر اساس میزان مقاومت بدنه مخازن

کناری، شدت آسیب متفاوت باشد. چون در مرجع خاصی به این موضوع پرداخته نشده است، احتمال خطا در چنین ارزیابی وجود خواهد داشت.

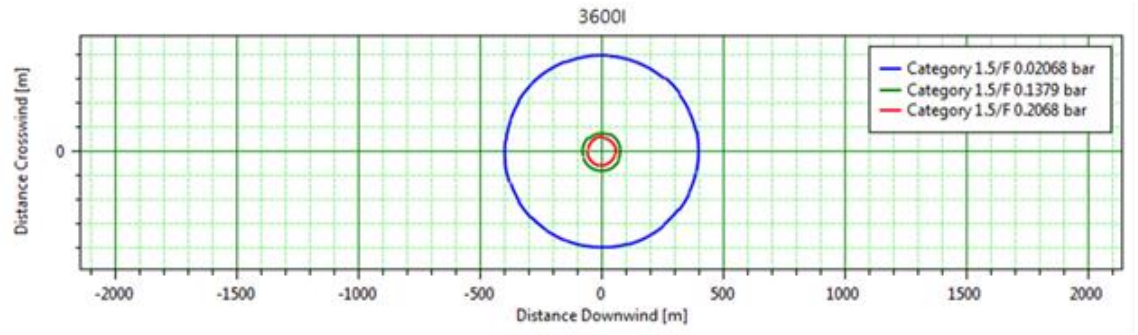
همان‌گونه که بیان گردید، تلفات در فشار بیش از ۴ bar رخ می‌دهد، بنابراین طبق شکل ۱۳ حاشیه ایمن مطابق نمودار، فاصله متناوب تا فشار ۴ bar در محور عمودی و ۱۶ متر بر روی محور افقی است؛ بنابراین فاصله ۱۶ متر از مخزن می‌تواند به‌عنوان حداکثر فاصله مجاز یا به‌عنوان حاشیه ایمنی در نظر گرفته شود. فشار حداکثری ۲۰ bar تا فاصله ۱۰ متر ادامه خواهد داشت و نزدیک‌ترین فرد به این فاصله کشته خواهد شد. در این سناریو ترکش‌های مکانیکی و پرتابه‌ها که می‌تواند آسیب جدی‌تر و شعاع تأثیرگذاری بیشتری را تحت تأثیر قرار دهد در نظر گرفته نشده است.

شکل ۱۴ محدوده متأثر از فشار ۰/۲۰۶۸ bar در فاصله ۵۷ متر را نشان می‌دهد که محدوده خطر بوده و منجربه آسیب ساختمان‌های اسکلت فلزی و کشیده شدن آن در جهت موج انفجار خواهد شد. شکل ۱۵ نیز غلظت پراکندگی گاز متان را نشان می‌دهد که تا شعاع ۱۸m احتمال آتش‌سوزی وجود دارد و در برخورد به اولین منبع جرقه، گوی آتش تشکیل می‌شود.

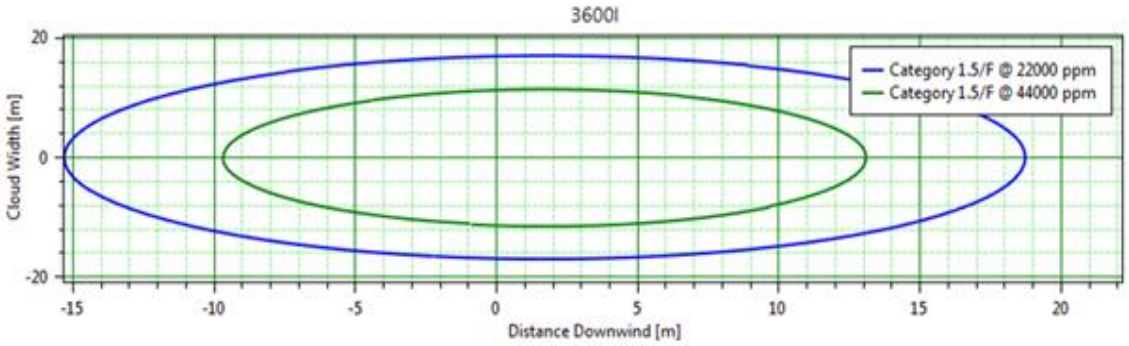
تشعشع حرارتی ناشی از انفجار دسته مخازن می‌تواند بسیار نگران کننده باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است، تشعشع حرارتی ۳۷/۵ kW/m^2 می‌تواند شعاع ۵۵ متر را دربرگیرد که تبعات حادثه را بسیار گسترده خواهد کرد به‌طوری که تشعشع ۴ kW/m^2 تا شعاع ۲۱۶ متری ادامه خواهد داشت. در انفجار زنجیره‌ای دسته مخازن مقدار ppm گاز طبیعی طبق شکل ۱۷ نشان داده شده و در شکل ۱۸ انفجار اولیه و شعاع موج انفجار در اثر فشار مشخص شده‌است.



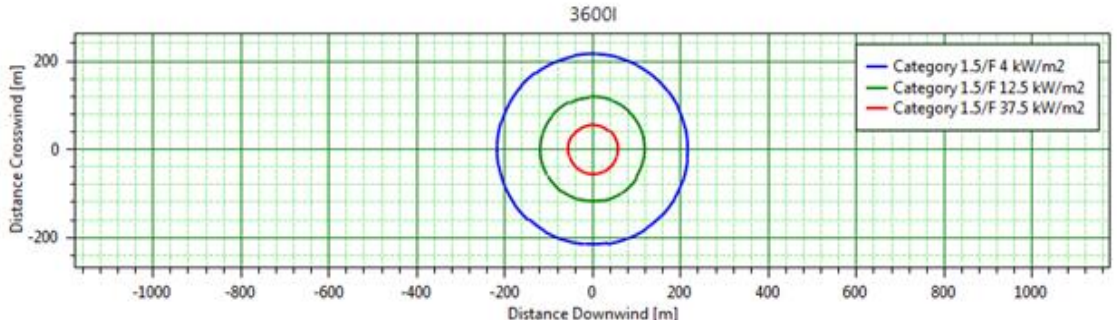
شکل ۱۳- تأثیر فشار در مقابل فاصله در انفجار مخازن دسته‌ای



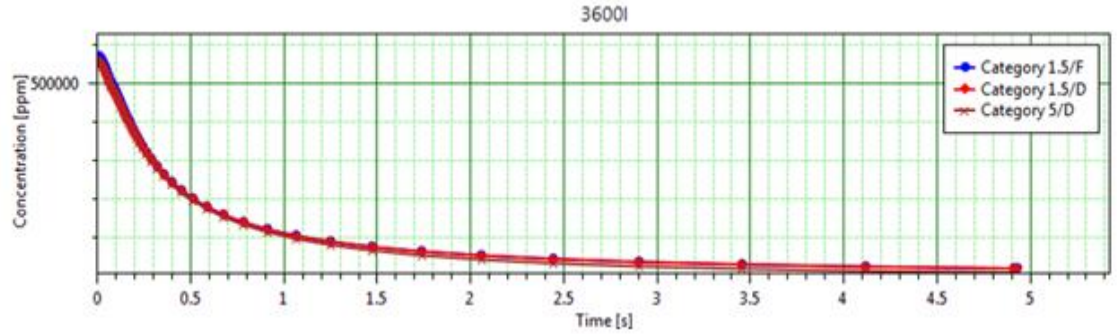
شکل ۱۴- انفجار اولیه در مقابل شعاع تأثیرگذاری در انفجار دسته مخازن



شکل ۱۵- غلظت پراکندگی گاز متان



شکل ۱۶- شعاع گسترش تشعشع حرارتی در انفجار دسته‌ای مخازن



شکل ۱۷- غلظت در مقابل زمان در فاصله مشخص شده در انفجار مخزن دسته‌ای

شکل ۱۸- محدوده تحت تاثیر موج فشار در اثر انفجار مخازن دسته‌ای

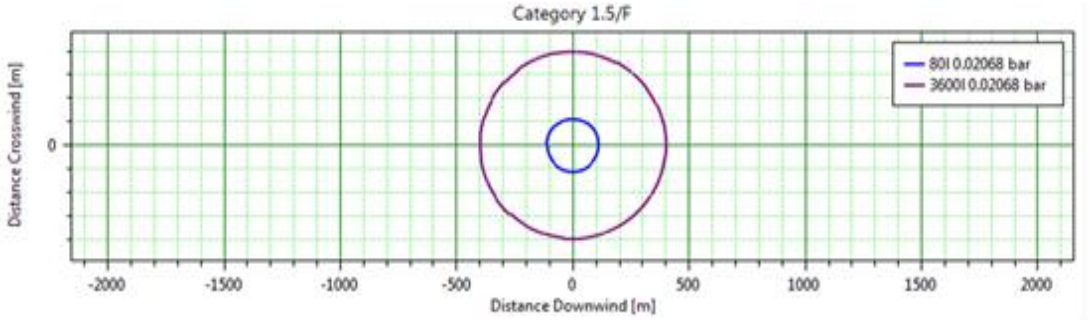
۵-۴- بررسی نهایی نتایج انفجار مخازن

در مدل‌سازی حادثه به‌صورت منفرد حداکثر فاصله مجاز حاشیه ایمن ۲ متر در نظر گرفته شد، ولی با ادامه‌دار بودن حادثه و انفجار در کل مخازن دسته‌ای ایستگاه که ۴۵ مخزن ۸۰ لیتری بود، دامنه حادثه گسترده‌تر و حاشیه ایمن به ۱۶ متر افزایش یافت که در شکل ۱۹ نشان داده شده‌است. در صورت بروز حادثه تمام تجهیزات و تأسیسات مکانیکی از بین خواهد رفت. تا فاصله ۴۰ متر از وقوع حادثه فشار برابر ۰/۳۷۲bar است که احتمال پارگی گوش افراد در این فاصله وجود دارد. شکل ۲۰ شعاع متأثر از فشار انفجار را نشان می‌دهد که در انفجار مخزن ۸۰ لیتری، فشار تا فاصله ۱۱۱ متر و فشار ۰/۰۲۰۶۸ bar ادامه دارد و در انفجار دسته‌ای مخازن، این فشار تا شعاع ۳۹۸ متری ادامه خواهد داشت. شدت اثر انفجار و شعاع دربرگیرنده موج انتشار این حادثه در شکل ۲۱ نشان داده شده‌است.

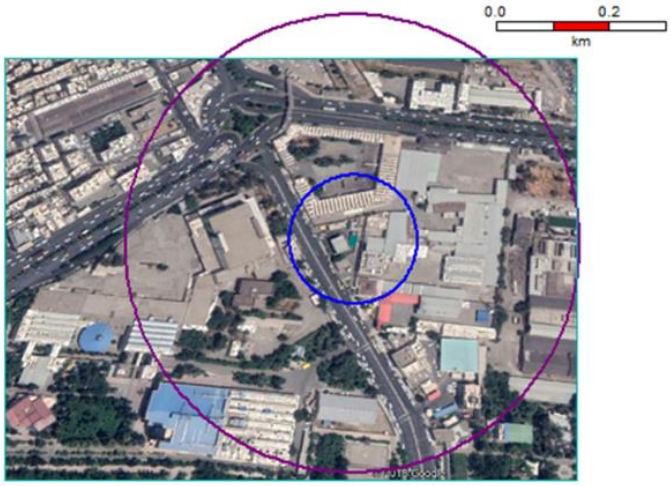
در انفجار مخازن و پخش شدن گاز متان به علت اشتعال‌پذیری بالای آن در اولین برخورد با منبع جرقه که می‌تواند در اثر برخورد قطعات مکانیکی حاصل از انفجار نیز صورت گیرد، گوی آتش شکل می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل ۲۲ نشان داده شده‌است، تشعشع حاصل از انفجار می‌تواند بسیار نگران کننده باشد، به‌طوری که در اثر انفجار دسته‌ای مخازن که حجم گاز به ۳۶۰۰ لیتر می‌رسد، تشعشع حرارتی ۴ kW/m^2 تا شعاع ۲۱۵ متر را دربرمی‌گیرد که باعث آسیب به افراد در این شعاع می‌شود. به علت تردد شبانه‌روزی مصرف‌کنندگان CNG به خصوص رانندگان تاکسی و مجاورت جایگاه با ساختمان‌ها و کارخانه‌ها و از طرفی نزدیکی به فرهنگ‌سرای بهمن که روزانه مراجعه‌کنندگان زیادی دارد، پیامد و تلفات حادثه می‌تواند بسیار گسترده باشد، به‌طوری که خسارت جانی و مالی زیادی را در پی خواهد داشت.

چند لحظه بعد از انفجار مخازن دسته‌ای، غلظت گاز به بالای ۵۰۰۰۰ ppm خواهد رسید که در شکل ۲۳ نشان داده شده است. این غلظت متان با گذشت زمان بعد از ۵ ثانیه به سمت صفر میل می‌کند

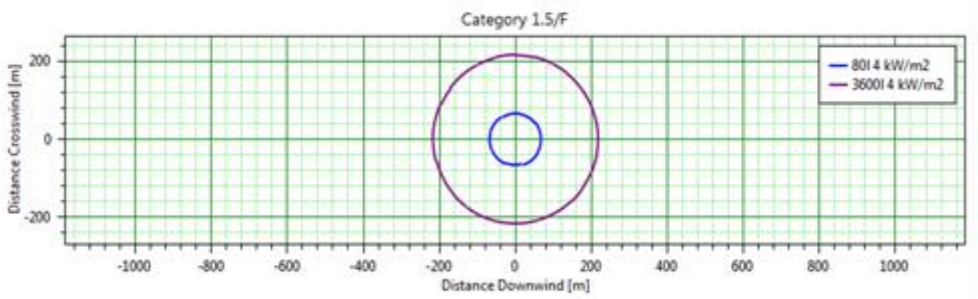
شکل ۱۹- تغییرات فشار برحسب فاصله در انفجار منفرد و زنجیره‌ای



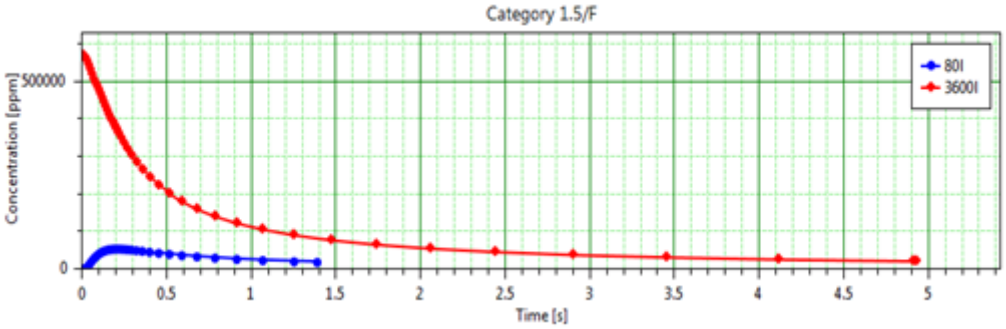
شکل ۲۰- شعاع متأثر از فشار انفجار



شکل ۲۱- شدت فشار حاصل از انفجار مخازن دسته‌ای



شکل ۲۲- شعاع متأثر از گوی آتش در انفجار مخازن دسته‌ای



شکل ۲۳- غلظت گاز برحسب زمان در فاصله معین

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در کار حاضر انفجار مخازن ذخیره سوخت در یک جایگاه توزیع سوخت به دو صورت تکی (یک مخزن ۸۰ لیتری) و زنجیره‌ای (۴۵ مخزن ۸۰ لیتری) مدل‌سازی و مقایسه شد و شرایط پیشامد حادثه بررسی شد. در صورت بروز حادثه در یکی از مخازن که فشار گاز ذخیره شده به ۲۵۰ bar می‌رسد، شدت انفجار باعث گسست در سایر مخازن می‌شود. در این مدل‌سازی با فرض فشار ۲۵۰ bar و جمع حجم کل مخازن ۳۶۰۰ لیتر، مدل‌سازی انجام گردید. نتایج مدل‌سازی در هر دو حالت بسیار نگران‌کننده بوده و پیامدهای جانی و اثرات تخریب بسیار فاجعه بار را پیش‌بینی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو حالت مدل‌سازی، مقدار تشعشع حرارتی به ۳۷/۵ kW/m^2 می‌رسد و تشعشعات تا نزدیک شعاع ۱۸ متری در انفجار مخزن تکی و تا شعاع ۵۵ متری در انفجار دسته‌ای مخازن گسترش می‌یابد و منجر به آسیب‌رساندن به ساختمان‌های اطراف و افراد در این محدوده می‌شود. قابل ذکر است که در فاصله ۲ متری از محل انفجار مخزن تکی و در فاصله ۱۶ متری از محل انفجار دسته مخازن، احتمال ۹۹ درصدی مرگ افراد وجود دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در جانمایی صحیح تجهیزات ایستگاه بخصوص ایستگاه های چند منظوره (بنزین و گاز) استفاده شود و از پیامد حادثه بصورت دومینو جلوگیری کند.

۶- فهرست علایم

c_o	غلظت اولیه ابر، kg/m^2
M_c	وزن مولکولی آلاینده ها
M_a	وزن مولکولی هوا
ρ_a	چگالی هوا، kg/m^3
P_a	فشار محیط، Pa
T_a	دمای محیط، °C
P	فشار مطلق، Pa
$M_{flammable}$	جرم ماده سوختنی در آتش کروی، kg
M_{Input}	جرم ماده سوختنی خارج شده از مخزن، kg
f_{vapor}	جزء جرمی فاز بخار رها شده هنگام انفجار
$f_{correction}$	ضریب اصلاح جرمی
t_{flame}	مدت دوام یا ماندگاری شعله، s
r_{flame}	شعاع کره آتش، m

γ	نسبت گرمایی ویژه
E	انرژی حاصل از جرم ماده سوختنی، J
R	فاصله نقطه مورد نظر از محل انفجار، m
t	زمان مواجهه به خطر، t
I	میزان حرارت تشعشعی ناشی از آتش، w
R_O	شعاع ابر، m
E_{TNT}	گرمای احتراق TNT، kJ/kg
η	بازده انفجاری

مراجع

[1] https://sdata.ir/articles

[۲] مدیریت طرح احداث و توسعه ایستگاه‌های CNG شرکت پخش فراوردهای نفتی ایران، http://cng.niopdc.ir

[۳] مجیدی مقدم، ر، بیاتی، ا، خواجویی، ا، جادری، ف، (۱۳۹۲)شبیه‌سازی حوادث حاصل از نشتی درخطوط انتقال گاز با استفاده از نرم‌افزار PHAST، سومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران.

[۴] سیفی، س، غفرانی، م ب، (۱۳۸۴) تحلیل ریسک و ارزیابی قابلیت اطمینان در ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG، اولین همایش ملی مهندسی ایمنی و مدیریت HSE، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۵] شیرالی، غ ع، موسویان اصل، ز، جهانی، ف، سیاهی آهنگر، ع، اعتماد، ص، (۱۳۹۷) مدلسازی پیامد نشت آمونیاک از مخازن آن با استفاده از نرم‌افزار ALOHA و تدوین برنامه واکنش در شرایط اضطراری در یکی از صنایع فرایندی، مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای.، دوره ۵، شماره ۲، صفحات ۱۲-۱۹.

[6] Andrew R. Carpenter, Russell A. Ogle, Ph.D., P.E., CSP Juan Carlos Ramirez, Ph.D., (2011) Risk Assessment of a Propane Storage Sphere:Maintain orDecommission?, Prepared for Presentation at American Institute of Chemical Engineers 2011 Spring Meeting 7th Global Congress on Process SafetyChicago, Illinois March 13-16, 2011.

[۷] صادقی یارندی م، کریمی ع، (۱۳۹۷) ارزیابی پیامد حریق و انفجار مخازن گاز متان در یک جایگاه توزیع گاز طبیعی فشرده، مجله ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها، دوره ۶، شماره ۴، صفحات ۲۳۷ - ۲۴۶.

[8] Mehdi Parvini, Ali Kordrostami, (2014) "Consequence modeling of explosion at Azad-Shahr CNG refueling", J. Loss Prevention in the Process Industries.

[۹] ایمانی ب، حبیب زاده ع، حبیب زاده ع، (۱۳۹۶) تحلیل توزیع فضایی بهینگی استقرار جایگاه‌های سوخت (CNG) (نمونه موردی: شهر اردبیل)، نشریه پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، سال هشتم، شماره سی‌ام.

[۱۰] اسکندری ط، محمد فام ا، میرزایی علی‌آبادی م، (۱۳۹۸) تحلیل ایمنی پویای ایستگاه‌های CNG با استفاده از تکنیک درخت خطا و شبکه بیزین، فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، جلد ۹، شماره ۴.

[۱۱] موسایی ا، هاتفی م ع، حیدری اصل م م، (۱۳۹۹)طراحی مدل جامع انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی (مطالعه موردی: کشور ایران)، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، دوره ۱۰، شماره ۳۷.

[12] https://www.iangv.org

[13] https://farsnews.ir/news/14011129000290

[14] https://farsnews.ir/news/14020715000328

[15] khaki, A.H., "Iran One of the World Largest NGV Market," Ninth International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles (NGV 2004), Buenos Aires, Argentina, 26-28 October, 2004.

[۱۶] اصفهانیان، و، بهرامی بالاجاده، ح، کردی، م، (۱۳۸۵)ایستگاه سوخت‌رسانی CNG، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، تهران.

[17] Neeraas, O.B., Hennine, E., Stenersen, D.,(2002) "NGV Master Plan for Iran, Conceptusal Design of Filling Station and Vehicle System."Marintek Report.

[۱۸] مجنونی، ا، شکیبائی، م، شیخ‌زاده، ق ع، (۱۴۰۲) بررسی تجربی و مقایسه آلایندگی بنزین و گاز طبیعی در یک موتور احتراق داخلی، بیستمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، سمنان، دانشگاه سمنان.

[۱۹] مهدوی، ش، لواسانی، م، (۱۳۹۲) ارزیابی قابلیت اطمینان جایگاه سوخت‌رسانی CNG، ماهنامه سلامت کار در ایران.

[20] C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings, (2005) Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases),Yellow book, Third edition Second revised print.

[21] Lees, FP, (1996) Loss prevention in the process industries, 2 nd edn, butterworth Heinemann, oxford.

[22] Quest Consultants Inc, (2009) Comparative Quanntitative Risk Analysis OF Motor Gasolne, LPG, and Anhydrous Ammonia as an Automotive Fuel.