ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(07):421-431.

Analysis of Liquid Gas (LPG) Storage Tank Explosion in a Road Vehicle due to the Boiling Liquid Vapor Phenomenon (BLEVE)

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Majnuoni O[1]
Sheikhzadeh G.A[2*]
Shakibaei M[1]

How to cite this article
Majnuoni O, Sheikhzadeh G.A, Shakibaei M, Analysis of Liquid Gas (LPG) Storage Tank Explosion in a Road Vehicle due to the Boiling Liquid Vapor Phenomenon (BLEVE). Modares Mechanical Engineering; *2024;24(07):421-431.*

[1] Energy Systems Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.
[2] Mechanical Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran.

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran.

sheikhz@kashanu.ac.ir

Article History
Received: August 14, 2024
Accepted: September 20, 2024
ePublished: October 27, 2024

ABSTRACT

The low amount of pollutant and smooth way of transition of some fuels such as liquid petroleum gas (LPG) for usage in cars have always been the concern of some consumers. Duo to the storage of this fuel with a pressure of 8 to 10 bar in non-standard tanks, there is a possibility of risk and danger likewise explosion and fire. In this article, the scenario of fire-caught car that caused the Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) and the formation of a fireball with a diameter of 19.14 meters has been investigated. The effect of pressure in the 60-liter tank and then the effect of radiation in the incident have been modeled. accordingly The results have illustrated the fact that until 2 meters from the liquid gas tank explosion site, the pressure continues up to 8 bar, and the radiation effect reaches 4 bar in a distance of 48 meters from the center of the accident, and in a distance of 14.60 meters, the amount of thermal radiation reaches 37.5 kilowatts per square meter, which it is very worrying. By considering the pressure and thermal radiation effects, the safe distance and the amount of damage are predicted. The results can be used to improve safety and revise the construction of LPG tanks to reduce losses.

Keywords LPG Gas, Tank explosion, BLEVE, Radiation, Fatality

CITATION LINKS

1- Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation. 2- 2D Numerical simulation of the nonlinear deformation of thin plate under gaseous mixture .... 3- Designing a Comprehensive Model for Selecting the Best Fuel in Natural Gas Value Chain (A case study in Iran) 4- Computational Fluid Dynamics Simulation of Blast Wave Using OpenFOAM: the Effect of Solver and .... 5- Evaluation the Extent of Explosion, Ignition and Gas Leakage Consequences in Cylinders .... 6- Consequence modeling and evaluation of LPG spherical tanks Isfahan Oil Refinery. 7- Incident analysis of Bucheon LPG filling station pool fire and BLEVE. 8- Analysis of Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) Due To Loss of Containment .... 9- Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. 10- Case study: Assessment on large scale LPG BLEVEs in the 2011 Tohoku earthquakes. 11- Modeling and study of the explosion of gas storage tanks ... 12-auto-gas.net 13- worldliquidgas.org 14- alef.ir 15- Strategies to Determine the Priorities of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Fuel Allocation. 16- Reliability evaluation of power systems. 17- The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. 18- Loss Prevention in the Process Industries. 19- Superheated Liquids: Liquids in the superheated state, far from being a laboratory curiosity, occur ... 20- Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and Bleves. 21-Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure, Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards. 22- Weterings, Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases). 23- Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. 24- Activity Responsible Function (AFR) Technical Library. 25- Quest Consultants Inc, Comparative Quantitative Risk Analysis OF Motor Gasoline, LPG .... 26- National Fire Prevention Association. Standard for the storage and handling of liquefied petroleum gases. 27- Semi quantitative and quantitative risk assessment in process industries with focus on techniques of QRA, LOPA, DOW index. 28- Numerical Investigation of Fire Spread from a Fire Source to a Near Body in a Tunnel. 29- Reliability assessment of CNG station by employing reliability blocks diagram (RBD).

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تجزیه و تحلیل انفجار مخزن ذخیره گاز مایع (LPG) در یک خودروی جاده ای بر اثر پدیده بخار مایع در حال جوش (BLEVE)

امید مجنونی[۱]، قنبرعلی شیخ زاده[۲*]، مهران شکیبائی[۱]
[۱] مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
[۲] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

چکیده
آلایندگی کم و جابجایی آسان برخی از سوخت‌ها مانند گاز نفتی مایع (ال‌پی‌جی:LPG) برای استفاده در خودروها همواره مورد توجه مصرف کنندگان بوده است. به‌علت ذخیره این سوخت با فشار ۸ تا ۱۰ بار در مخازن غیر استاندارد احتمال بروز خطراتی چون انفجار و آتش‌سوزی وجود دارد. در این مقاله به بررسی سناریوی آتش‌سوزی در یک خودرو که باعث ایجاد پدیده انفجار بخارات مایع در حال جوش (BLEVE) و تشکیل گوی آتش (Fireball) با قطر ۱۹/۱٤متر شد، پرداخته می‌شود. اثر فشار در مخزن ۶۰ لیتری و سپس اثر تشعشع در حادثه رخ داده شده مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد تا فاصله ۲ متری از محل انفجار مخزن گاز مایع، فشار تا ۸ بار ادامه دارد و اثر تشعشع تا فاصله ٤٨ متری از مرکز حادثه تا ٤ کیلووات بر متر مربع پیش می‌رود و تا فاصله ١٤/٦٠ متری مقدار تشعشع حرارتی به ۳۷/۵ کیلووات بر متر مربع می‌رسد که بسیار نگران‌کننده است. با درنظرگرفتن تأثیرات فشار و تشعشع حرارتی فاصله ایمن و میزان خسارت نیز پیش‌بینی شده است. نتایج می‌تواند در جهت بهبود ایمنی و بازنگری در ساخت مخازن ال‌پی‌جی جهت کاهش تلفات استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: ال‌پی‌جی LPG، انفجار مخزن، پدیده بلیوی BLEVE، تشعشع، مرگ و میر

تاریخ دریافت: ١٤٠٣/٠٥/٢٤
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰
*نویسنده مسئول: sheikhz@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه
دسترسی به انرژی در برخی کشورها به‌قدری گسترده شده است که مصرف آن به شکل‌های مختلفی در همه جنبه‌های زندگی مدرن تقریبا ثابت است. در این میان بخش حمل و نقل به یک مصرف‌کننده نهایی عظیم انرژی تبدیل شده است. امروزه این بخش بزرگترین مصرف‌کننده منابع نفتی در جهان و دومین مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر پس از نیروگاه است[1]. یک چالش منحصربه‌فرد در استفاده مداوم منابع مختلف انرژی در صنعت حمل و نقل نیاز به ذخیره انرژی در وسیله نقلیه است تا بتواند پیمایش بیشتری با صرف هزینه کمتر داشته باشد. گاز نفتی مایع یا به اختصار ال‌پی‌جی (LPG) که از پالایشگاه‌های نفت خام بدست می‌آید و بخش عمده ترکیب آن را پروپان و بوتان تشکیل می‌دهد، در مقایسه با سایر سوخت‌ها مانند بنزین، عدد اکتان بالاتری دارد، تمیز می‌سوزد و معمولا آلایندگی کمتری دارد. ال‌پی‌جی با کمی کاهش دما و افزایش فشار به مایع تبدیل می‌شود تا حمل و نقل و نگهداری آن راحت‌تر شود. به‌دلیل فشار کم ذخیره‌سازی نیاز به مخازن قوی نیست و بیشتر این مخازن با حجم ۶۰ و ۸۰ لیتری و با ورق فلزی ۳ میلی‌متری به‌صورت جوشکاری با الکترود (SMAW) مونتاژ می‌شود و برای ذخیره سوخت روی خودروها استفاده می‌شود. فشار مخازن ال‌پی‌جی که در صندوق خودروها نصب می‌شود ۸ تا ۱۰ بار است. افزایش فشار مخزن پیش از انفجار بر مقدار بیشینه فشار انفجار و کاهش زمان کلی انفجار تأثیرگذار است و همچنین استوانه با ظرفیت طولی بیشتر، در مورد تغییر شکل ورق توانمندتر است[2]. مسئله اساسی و نگران‌کننده ایمنی و قابلیت اطمینان پایین این مخازن در صورت برخورد با موانع در اثر سانحه یا آتش‌سوزی می‌باشد. به‌دلیل غیراستاندارد بودن این مخازن و عدم حمایت دولت برای گسترش سوخت ال‌پی‌جی خودروها در ایران، تاکنون در این زمینه تحقیق چندانی صورت نگرفته است ولی وقوع حوادث و مشکلات پیش آمده در این زمینه بخصوص در چند سال اخیر، لزوم توجه به این بخش را دو چندان می‌کند.

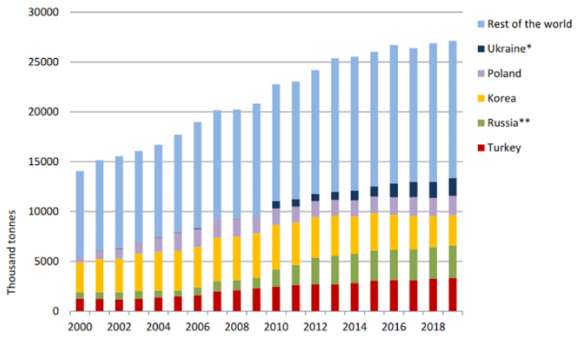
موسایی و همکاران[3] مدل جامعی برای انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی برای کشور ایران طراحی نمودند و نتایج نشان داد بهترین گزینه برای کشور گاز طبیعی مایع و بعد از آن، گاز طبیعی فشرده می‌باشد. نورپور و همکاران[4] رفتار جریان موج انفجار در فضای باز و در حضور موانع هندسی را به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار اپن فوم بررسی نمودند و بر اساس نتایج، مدلسازی گاز حقیقی نسبت به گاز ایده‌آل از دقت بیشتر و خطای کمتری برخوردار بوده است. بهشتی و همکاران[5] پیامدهای انفجار، اشتعال و نشت گاز در کپسول‌های ۲۶/۲ لیتری گاز مایع با رویکرد پدافند غیرعامل را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد اشتعال و انفجار گاز ال‌پی‌جی در این کپسول، تا فاصله ۳۵ متری پرسنل و افراد را تهدید می‌کند. کمالی و همکاران[6] پیامد و ارزیابی ریسک مخازن کروی ال‌پی‌جی در پالایشگاه نفت اصفهان را شبیه‌سازی نمودند و ریسک قرارگیری افراد تا شعاع حدود ۴۸۰ متری اطراف مخازن بسیار خطرناک برآورد شد. پارک و همکاران[7] یک حادثه پمپ گاز مایع که در ۱۱ سپتامبر سال ۱۹۹۸ و در کشور کره جنوبی اتفاق افتاده بود را مورد مطالعه قرار دادند. در این حادثه، اتصال معیوب شلنگ به مخزن کامیون منجر به نشت گسترده گاز و به دنبال آن انفجارهای فاجعه‌آمیز گردید؛ بطوریکه آزاد شدن ٤/٥ تن بوتان طی ۲۰ دقیقه باعث ایجاد پدیده انفجار بخارات مایع در حال جوش یا به اختصار پدیده بلیوی (BLEVE) در کامیون حامل سوخت پارک شده در محل شد. انفجار بخارات مایع در حال جوش در کامیون دارای مخزن پروپان با حداکثر قطر گوی آتش (Fireball) حدود ۱۳۰ متر و در کامیون مخزن بوتان با حداکثر قطر گوی آتش حدود ۹۰ متر مشاهده شد. پدیده بلیوی در یکی از بزرگراه‌های کشور مالزی که به‌دلیل از دست دادن مهار تانکرهای حامل گاز مایع به وقوع پیوست در مرجع[8] تجزیه و تحلیل و مشخص شد که تأثیر پدیده بلیوی بر افراد و سازه‌ها فاجعه‌بار بوده و تا فاصله ۲۰ متری از تانکر احتمال مرگ به ۱۰۰ درصد می‌رسد. در

این حادثه شرایط آب و هوایی تاثیر عمده‌ای در سناریوی پدیده بلیوی ندارد، زیرا انفجار به طور آنی رخ داده است. وانگ و همکاران[9] تحقیقی بر روی گوی آتش حاصل از انفجار بخارات مایع در حال جوش در یک تانکر حامل گاز مایع با استفاده از شبیه‌سازی به روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند و نتایج نشان داد که با افزایش جرم گوی آتش، شار حرارتی تابشی تولید شده افزایش، ولی سرعت افزایش شار حرارتی تشعشعی کاهش می‌یابد. لی و همکاران[10] پدیده بلیوی مخازن گاز مایع در مقیاس بزرگ که بر اثر زلزله سال ۲۰۱۱ در شهر توهوکو ژاپن رخ داد را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اثر این آتش‌سوزی و انفجار، ۱۷ مخزن ذخیره گاز مایع در پالایشگاه به شدت آسیب دیدند و یا کاملاً از بین رفتند. در این حادثه ۵ پدیده بلیوی به‌صورت دومینو به وقوع پیوست که منجر به گوی‌های آتش بسیار بزرگ به قطر حدود ۵۰۰ متر و ارتفاع ۴۵۰ متر در مدت زمان ۲۵ ثانیه گردید. مجنونی و شیخ‌زاده[11] انفجار مخازن یک ایستگاه گاز طبیعی فشرده (CNG) به‌صورت تکی و دسته‌ای با فشار مخزن ذخیره ۲۵۰ بار را شبیه‌سازی و بررسی نموده‌اند. بر اساس نتایج آنها در صورت انفجار یکی از مخازن، میزان تشعشع به ۳۷/۵ کیلووات بر متر مربع در شعاع ۱۸ متری می‌رسد و با ادامه انفجار سایر مخازن به‌صورت دومینو، این شعاع تا ۵۵ متری مرکز انفجار گسترش می‌یابد که منجر به آسیب به ساختمان‌ها و افراد در این محدوده می‌شود.

با توجه به مرور انجام شده در این زمینه و نتایج مطالعات و تحقیقات در خصوص آسیب‌های جدی که از انفجار مخازن حاصل می‌شود، بدیهی است که انفجار و اشتعال مخزن خودرو حاوی گاز ال‌پی‌جی می‌تواند خطرات جدی و مرگباری برای سرنشینان آن خودرو و خودروهای اطراف داشته باشد. با اینحال تجزیه و تحلیل اثرات ناشی از انفجار و میزان خسارت و پیش‌بینی فاصله تأثیرات آن و تعیین فاصله ایمن نیاز به مطالعات بیشتر دارد که تاکنون پژوهش زیادی در این خصوص انجام نشده است، و لذا بررسی و ارزیابی این پدیده امری ضروری بنظر می‌رسد. در این مقاله به بررسی و تجزیه و تحلیل انفجار یک مخزن ذخیره گاز مایع که در خودروی پژو ۴۰۵ قرار دارد و باعث ایجاد پدیده بلیوی می‌شود، پرداخته می‌شود. این موضوع در مقایسه با پژوهش‌های انجام شده در گذشته که در آنها بیشتر مواردی چون انفجار مخازن در پالایشگاه‌ها و یا تانکرهای حمل گاز مایع بررسی شده‌اند، دارای نوآوری می‌باشد.

۲- روند مصرف گاز ال‌پی‌جی

مصرف جهانی گاز مایع در خودروهای ال‌پی‌جی سوز که به آن اتوگاز (Autogas) هم گفته می‌شود، طی دو دهه گذشته به طور پیوسته افزایش یافته است و در سال ۲۰۱۹ به ۲۷/۱ میلیون تن رسیده است[12]. یکی از دلایلی که روند مصرف گاز مایع را افزایش داده است آلایندگی کم این سوخت نسبت به سایر سوخت‌ها می‌باشد. تقاضای این گاز در تعداد کمی از کشورها به شدت متمرکز است، بطوریکه پنج کشور نخست شامل ترکیه، روسیه، کره جنوبی، لهستان و اوکراین، روی هم حدود نیمی از مصرف جهانی در سال ۲۰۱۹ را به خود اختصاص دادند و ده کشور اول ۷۳ درصد اتوگاز کل جهان را مصرف کرده‌اند[13]. با وجود اینکه این کشورها سالهای زیادی است که از گاز مایع در خودروها استفاده می‌کنند، اما در زمینه حوادث فرایندی مشکل قابل توجهی بخصوص در خودروهای ال‌پی‌جی سوز بوجود نیامده و حتی به‌دلیل پاک و ارزان‌تر بودن اتوگاز نسبت به بنزین و دیزل، به فکر توسعه بیشتر این سوخت در کشور خود هستند. شکل ۱ مقدار مصرف اتوگاز مناطق مختلف دنیا از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ را نشان می‌دهد. در سراسر جهان، اتوگاز حدود ۱/۱ درصد از کل مصرف سوخت حمل و نقل جاده‌ای را در سال ۲۰۱۹ به خود اختصاص داده است. سهم اتوگاز در کل مصرف سوخت خودرو در بین کشورهای مورد بررسی متفاوت است، که کمترین آن با ۰/۰۳ درصد در ایالات متحده و بیشترین مربوط به اوکراین بوده است که یک پنجم مصرف کل سوخت خودروها در این کشور، ال‌پی‌جی می‌باشد. تقریبا ۲۷/۸ میلیون وسیله نقلیه اتوگاز در سراسر جهان و بیش از ۸۱۰۰۰ سایت سوخت‌گیری وجود دارد. اتوگاز ۹ درصد از مصرف جهانی ال‌پی‌جی در سال ۲۰۱۹ را به خود اختصاص داده است[12].



شکل ۱) میزان مصرف اتوگاز در مناطق مختلف جهان از سال ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۹ [13]

در مورد کشور ایران، اجازه فعالیت رسمی برای اتوگاز کردن خودروها به‌صورت استاندارد صادر نشده است و خودروسازها مجوز دوگانه‌سوز کردن خودرو بر مبنای ال‌پی‌جی را ندارند و حتی امکان سوخت‌گیری قانونی ال‌پی‌جی نیز برای هیچ خودرویی وجود ندارد. عدم مجوزدهی به دوگانه‌سوز کردن این خودروها درحالی سالیانه تعداد زیادی از هموطنانمان را به کام مرگ و وقوع حوادث آتش‌سوزی می‌کشاند، که کشور با هیچگونه کمبود منابع ال‌پی‌جی مواجه نیست و بیش از ۷۰ درصد از ال‌پی‌جی تولیدی کشور صادر می‌شود[14]. با این حال حدود ۱/۵ میلیون خودروی ال‌پی‌جی سوز در کشور وجود دارد که به‌صورت غیرمجاز و غیراستاندارد از این سوخت استفاده می‌کنند و مصرف آنها نیز به‌عنوان آمار مصرف خانگی ال‌پی‌جی درنظرگرفته می‌شود[15].

۳- بیان مسئله و مدل‌سازی انفجار مخزن

۳-۱- خصوصیات گاز مایع

گاز مایع ترکیبی از هیدروکربن‌های سبک است و عمدتا از پروپان (C_3H_8) و بوتان(C_4H_{10}) تشکیل شده است. دمای جوش این گازها در فشارهای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است و با توجه به اینکه فشار داخل مخزن ال‌پی‌جی تا حدود ده بار هم می‌رسد، با افزایش دمای محیط و در فصول گرم سال، امکان تبدیل گاز مایع به بخار وجود دارد.

جدول ۱) دمای جوش تقریبی گازهای تشکیل دهنده ال‌پی‌جی (پروپان و بوتان) در فشارهای مختلف

فشار (bar)	دمای جوش پروپان(°C)	دمای جوش بوتان(°C)
۰/۰۱	-۱۱۱/۵	-۸۱/۳
۰/۱	-۸۳/۸	-۴۹
۱	-۴۲/۳	-۰/۸
۵	۱/۸	۵۰/۳
۱۰	۲۷	۷۹/۵
۲۰	۵۷/۳	۱۱۴/۴

۳-۲- پیامد ناشی از رها شدن گاز مایع در خودروها

بیشتر خودروهایی که در ایران از سوخت ال‌پی‌جی استفاده می‌کنند به صورت کارگاهی دوگانه‌سوز می‌شوند، بطوریکه هیچ نظارتی در این خصوص صورت نمی‌گیرد. فشار کم ذخیره‌سازی گاز مایع باعث می‌شود از شلنگ‌های پلاستیکی برای سوخت‌گیری یا انتقال سوخت از مخزن به رگلاتور سوخت استفاده شود (شکل ۲). به‌دلیل عدم استاندارد لازم و کیفیت کافی این قطعات، همواره مقداری نشتی گاز در این خودروها وجود دارد. عدم توجه به ایمنی و قابلیت اطمینان می‌تواند دو موضوع را مطرح کند یکی تحت عنوان خطر (Hazard) که صرفا از نظر شدت قابل تقسیم‌بندی است و دیگری تحت عنوان احتمال خطر (Risk) که علاوه بر شدت خطر احتمال وقوع آن را نیز مورد توجه قرار می‌دهد[16].

شکل ۲) مخزن ال‌پی‌جی با شلنگ‌های انتقال سوخت در خوروی پژو ۴۰۵[16]

انواع حوادث موجود در صنعت نگهداری گاز مایع را می‌توان در ۴ حوزه تقسیم‌بندی کرد که شامل آتش‌سوزی، انفجار، نشتی و انتشار گاز سمی می‌باشد[17].

در این مقاله به بررسی انفجار و شدت پیامد حادثه یک خودروی پژو ۴۰۵ (دوگانه سوز ال‌پی‌جی)، که در اردیبهشت سال ۱۴۰۲ در اتوبان شهید یاسینی، تهران دچار حریق و سپس انفجار مخزن ال‌پی‌جی شد، پرداخته می‌شود. زمانی‌که یک مخزن که حاوی مقدار مشخصی مایع است و در معرض حرارت بیش از نقطه جوش مایع قرار می‌گیرد، سریعا به جوش آمده و مقدار بسیار زیادی بخار تولید می‌کند و باعث افزایش فشار بیش از حد تحمل جداره مخزن شده و در نهایت انفجار صورت می‌گیرد که به پدیده بلیوی مشهور است. به‌علت انفجار ناشی از افزایش فشار، آزاد شدن بخارات و پرتاب تکه‌های مخزن و اجسام اطراف آن، خسارات زیادی بوجود می‌آید و اگر مایع قابل اشتعال باشد امکان ایجاد گوی آتش وجود دارد. به‌منظور تعیین حریم ایمني و شبیه‌سازي پیامدهاي ناشي از انفجار، پدیده بلیوی و گسست ناگهانی مخزن در این حادثه با نرم‌افزار فست (PHAST) به صورت جداگانه شبیه‌سازی می‌شود. از لحظه گسست کامل مخزن و تشکیل گوی آتش و فرونشست آن فقط ۵ ثانیه زمان می‌برد و تبعات این حادثه به‌شدتی بوده که پرتابه‌هایی به اطراف داشته و نکته نگران‌کننده این است با توجه به پر تردد بودن محل وقوع حادثه، خودروهای اطراف بدون توجه به پیامدهای احتمالی با فاصله نزدیک از محل حادثه عبور می‌کنند. با این حال افزایش مدت زمان استفاده از این مخازن، پوسیدگی مخازن، نشتی گاز و نبود بازرسی، احتمال خطر و ایجاد حادثه را بوجود خواهد آورد که بررسی این مسئله بیش از پیش قابل توجه خواهد بود.

۳-۳- مخزن مورد مطالعه

به‌منظور امکان تعمیم نتایج حاصله، سعی شده است مدل‌سازی بر روی مخزنی انجام شود که بیشترین مصرف را در خودروها دارد. مشخصات این مخزن عبارت است از: فشار کاری ۱۷/۵ بار، حجم ۶۰ لیتر، ضخامت ۳ میلی‌متر، قطر ۳۱/۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر و وزن ۲۲/۹ کیلوگرم، این مخازن در کارگاه‌ها و توسط افرادی گاها غیرمتخصص مونتاژ می‌شوند و با قیمت مناسب در بازار به فروش می‌رسند. مسئله قابل تأمل این است که استفاده از این مخازن بیشتر در خودروهایی مانند پیکان و پژو که استهلاک بالایی دارند و از نظر سازمان استاندارد با توجه به عمر آنها، اسقاطی محسوب شده و باید از چرخه حمل و نقل حذف شوند ولی به‌دلیل نبود قانونی مبنی بر عدم تردد خودروهای فرسوده، به‌راحتی در کلان‌شهرها نیز تردد دارند.

۳-۴- مدل ریاضی در مکانیسم پدیده بلیوی

هنگامی‌که مایع تا نقطه جوش خود گرم می‌شود و شروع به تشکیل حباب داخل ظرف می‌کند باعث ازدیاد فشار و انفجار می‌شود. این نوع انفجار، عمده‌ترین انفجار مخازن مایع ال‌پی‌جی بوده که باعث گسست کامل مخزن می‌شود. از سال ۱۹۵۱ تا سال ۱۹۸۴ بیش از ۱۹ مورد از انفجارات از نوع پدیده بلیوی وجود داشته که بزرگترین آن در سال ۱۹۸۴ بوده است. انفجار مخزن کروی و

استوانه افقی در ترمینال نگهداری ال‌پی‌جی در مکزیکوسیتی مکزیک، ۶۴۰۰ مصدوم و ۶۵۰ کشته برجا گذاشت[18]. انفجار زمانی صورت می‌گیرد که درجه حرارت مایع داخل مخزن به بالاتر از نقطه جوش خود در فشار اتمسفر برسد. از معادله حالت Redich-Kwong دمای حد فوق‌گرم در فشار اتمسفر تخمین زده می‌شود که توسط رید بدست آمد[19]:

$$T_{sl} = 0.859T_c \quad (۱)$$

در این رابطه T_{sl} دمای حد مجاز فوق‌گرم در فشار اتمسفر بر حسب کلوین و T_c دمای بحرانی بر حسب کلوین می‌باشد. نظریه رید توضیح خوبی در مورد امواج انفجار قوی است که می‌تواند در پدیده بلیوی ایجاد شود. با این حال، انفجارهای قوی همچنین می‌تواند ناشی از تبخیر سریع مایعات تحت‌فشار ذخیره شده در زیر دمای حد فوق‌گرم اما بالاتر از نقطه جوش آنها در فشار اتمسفر باشد. به‌همین دلیل در مرجع[20] یک فرض محافظه‌کارانه برای روش انفجار پدیده بلیوی یکپارچه توصیه شده است. در روش توصیه شده، جوشش مواد منفجره به‌دلیل خرابی ظروف حاوی مایعات ذخیره شده در دمای بالاتر از نقطه جوش معمولی آنها، رخ می‌دهد. از بین تمام پارامترهای انفجار، انرژی انفجار بیشترین تأثیر را بر روی اوج فشار و در نتیجه بیشترین پتانسیل مخرب را در یک انفجار دارد. روش‌های ترمودینامیکی برای تخمین انرژی انفجار به دلیل سهولت استفاده از آن‌ها، بسیار مورد علاقه محققین می‌باشد. در رویکرد ترمودینامیکی حالت ماده قبل از انفجار با حالت ماده بعد از انفجار مقایسه شده و اختلاف انرژی‌های داخلی بین دو حالت انرژی انفجار را می‌دهد. روش‌های متفاوتی برای محاسبه انرژی انفجار مخازن گازی ایده‌آل و مخازنی که دارای گاز غیرایده‌آل هستند، وجود دارد. در این مقاله به‌دلیل وجود گازهای غیرایده‌آل در مخزن ذخیره، از روابط انفجار این مخازن استفاده می‌شود. برای این کار می‌توان اختلاف انرژی داخلی بین حالت‌های اولیه و نهایی را با فرض فرایند انبساط آیزنتروپیک بدست آورد و فرض می‌شود که امواج انفجار از هر فاز ترکیب شده‌اند. انرژی داخلی در حالت اولیه و نهایی به‌ترتیب با روابط (۲) و (۳) بدست می‌آید[20]:

$$u_1 = x_{L,1}h_{L,1} + (1-x_{L,1})h_{G,1} - x_{L,1}P_1v_{L,1} - (1-x_{L,1})P_1v_{G,1} \quad (۲)$$

$$u_2 = x_{L1}\left[x_{L,2}^{L1}h_{L,2}^{L1} + (1-x_{L,2}^{L1})h_{G,2}^{L1} - x_{L,2}^{L1}P_0v_{L,2}^{L1} - (1-x_{L,2}^{L1})P_0v_{G,2}^{L1}\right] + (1-x_{L1})\left[x_{L,2}^{G1}h_{L,2}^{G1} + (1-x_{L,2}^{G1})h_{G,2}^{G1} - x_{L,2}^{G1}P_0v_{L,2}^{G1} - (1-x_{L,2}^{G1})P_0v_{G,2}^{G1}\right] \quad (۳)$$

در این روابط فشار در حالت نهایی برابر با فشار محیط (P_0) درنظرگرفته می‌شود. زیرنویس‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب بیانگر حالت اولیه و نهایی و زیرنویس‌های L و G مربوط به خواص سیال در حالت‌های مایع اشباع و بخار اشباع هستند. بالانویس‌های L1 و G1 در رابطه (۳)، به خواص سیال محاسبه شده از انبساط آیزنتروپیک در حالت مایع (L1) و گاز (G1) در شرایط شکست اشاره دارد. انرژی حاصل از انفجار مخزن نیز از رابطه (۴) حاصل می‌شود[20]:

$$E_{EX} = M(u_2 - u_1) \quad (۴)$$

که در آن E_{EX} انرژی حاصل از انفجار و M جرم سیال می‌باشد.

۳-۵- مدل ریاضی در مکانیسم گوی آتش

عامل دیگری که می‌تواند باعث وقوع یک پیامد مخرب در مخزن ال‌پی‌جی خودرو گردد، پدیده گوی آتش می‌باشد. گوی آتش حاصل احتراق عظیمی از مواد قابل اشتعال است؛ ترکیدن ناگهانی مخازن حاوی مایعات قابل اشتعال از مهمترین عوامل تشکیل گوی آتش است. خروجی پدیده بلیوی کنار آتش روی می‌دهد و ماده آزاد شده، قابل اشتعال بوده و باعث اشتعال به سمت بالا و تشکیل گوی آتش می‌شود و با گسترش شعله آتش، اثرات فشار و تشعشع ناشی از آن، بر افراد مجاور آن متناسب با فاصله تا مرکز گوی آتش، آسیبهای مختلفی وارد می‌کند. در صورت تشکیل گوی آتش ناشی از گسست مخزن، جرم ماده سوختنی درگیر در آتش از رابطه (۵) بدست می‌آید[21]:

$$M_{Flammable} = \begin{cases} M_{Input} & f_{Vapor} \geq \frac{1}{f_{correction}} \\ f_{correction}f_{vapor}M_{Input} & f_{vapor} < \frac{1}{f_{correction}} \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن، $M_{flammable}$ 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. برای محاسبه شعاع شعله گوی آتش (r_{flame}) و مدت دوام یا ماندگاری شعله (t_{flame}) که تابعی از جرم ماده درگیر در آتش هستند، به‌ترتیب از روابط (۶) و (۷) استفاده می‌شود[22]:

$$r_{flame} = 3.24M_{Flammable}^{0.325} \quad (۶)$$

$$t_{flame} = 0.852M_{Flammable}^{0.26} \quad (۷)$$

ارتفاع شعله آتشین که به‌عنوان ارتفاع مرکز گوی آتش تا سطح زمین تعریف می‌شود، با استفاده از رابطه (۸) بدست می‌آید[22]:

$$H_{flame} = 2r_{flame} \quad (۸)$$

توان انتشار سطحی شعله نیز از رابطه (۹) محاسبه می‌شود[23]:

$$E_f = \frac{f_sM_{flammable}\Delta H_C}{4\pi r_{flame}^2 t_{flame}} \quad (۹)$$

که در آن، E_f، توان تشعشعی سطحی شعله، f_s انرژی تشعشعی تابیده شده موجود و ΔH_C گرمای خالص موجود برای انتشار است. مقدار f_s از رابطه (۱۰) حاصل می‌شود که تابعی از فشار در حالت بخار اشباع هنگام انفجار مخزن می‌باشد[23]:

$$f_s = 0.27\left(\frac{P_{sat}}{10^6}\right)^{0.32} \quad (۱۰)$$

گرمای خالص موجود برای انتشار (ΔH_C) با استفاده از رابطه (۱۱) بیان می‌شود[22]:

$$\Delta H_C = \Delta H_{Comb} - [\min(1, f_{vapour} f_{correction}) - f_{vapour}][\Delta H_{Vap} + C_{P,Liq}(T_{Flame} - T_{Amb})] \quad (۱۱)$$

که در آن، ΔH_{Comb} گرمای احتراق سوخت، ΔH_{Vap} گرمای نهان تبخیر سوخت در نقطه جوش آن، $C_{P,Liq}$ ظرفیت گرمایی ویژه سیال در فشار ثابت، T_{Flame} دمای شعله و T_{Amb} دمای محیط می‌باشند. تاثیر جرم سوخت عمدتاً بر روی ابعاد گوی آتش و قطرآن منعکس می شود هر چه جرم داخل مخزن در حال انفجار بیشتر باشد قطر و ارتفاع گلوله آتشین بیشتر می شود.

۳-۶- شبیه‌سازی انفجار

در مقاله حاضر، یک مخزن ال‌پی‌جی با ظرفیت ۶۰ لیتر، تحت فشار ۸ بار و دمای نگهداری ۲۱ درجه سانتیگراد که محتوی ۲۸ کیلوگرم گاز مایع با ترکیب تقریبا یکسانی از پروپان و بوتان می‌باشد، و در صندوق عقب خودرو جایگذاری می‌شود، مد نظر است. به‌علت ضخامت کم این مخازن و انتقال سوخت به‌وسیله شلنگ‌های پلاستیکی، درصورت تصادف و یا آتش‌سوزی احتمالی، پتانسیل بسیار بالایي براي وقوع حادثه وجود دارد. انفجار درچنین مخزنی به کمک نرم افزار فست (که بر اساس معادلات حاکم توسعه داده شده است) شبیه‌سازی می‌گردد. برای انجام شبیه‌سازی ترکیب و درصد گازهای موجود در مخزن یکسان انتخاب شده است و ارتفاع مخزن از سطح زمین ۱ متردر نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است علی‌رغم توانایی نرم‌افزار فست برای شبیه‌سازی پدیده مورد نظر، این نرم‌افزار دارای محدودیت‌هایی از قبیل بررسی حوادث زیرزمینی یا زیر آب، مدلسازی انفجار به صورت همزمان، لحاظ تاثیر تجهیزات به صورت موانع در کاهش آسیب ناشی از انفجار، تعیین دمای شعله در مسائلی چون فلر و مدلسازی به صورت شاخه‌ای نیز می‌باشد.

۴- نتایج

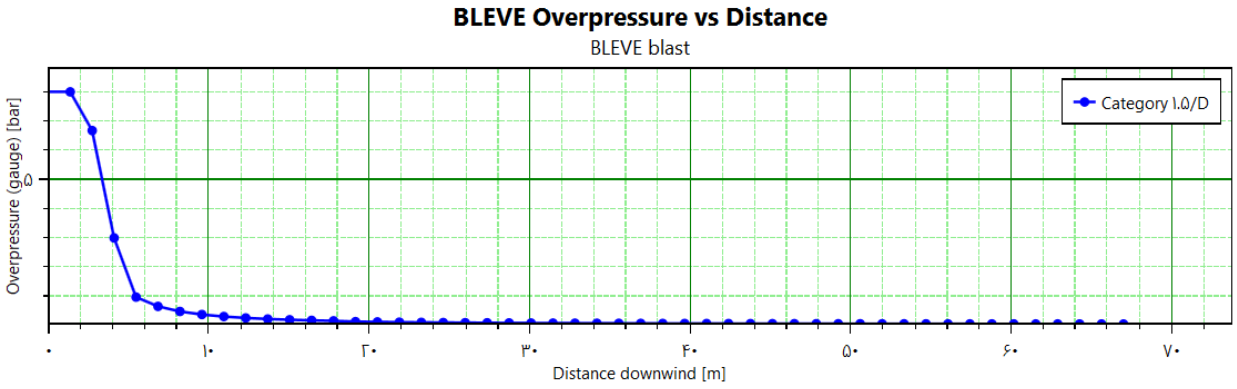
۴-۱- پیامد ناشی از انفجار مخزن ۶۰ لیتری گاز مایع

در مدل‌سازی پدیده بلیوی میزان ازدیاد فشار و شعاع تأثیرگذاری این حادثه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف، بررسی تأثیر فشار انفجار و پیامد آن در اثر گسست مخزن بر تجهیزات و افراد در اطراف محل حادثه می‌باشد. بنابراین پیامد حوادث در شرایط پایدار جوی (معیار پاسکویل) با سرعت باد (۱/۵ متر بر ثانیه) مدل‌سازی می‌شود. لذا جهت وزش باد تأثیر زیادی در مدل‌سازی انفجار ندارد. در این پژوهش حادثه اتفاق افتاده بر اساس داده‌های واقعی تحلیل حادثه می‌شود. یکی از مهم‌ترین و مفیدترین مراجع برای محاسبات وقوع حوادث، مجموعه AFR است که به وسیله شرکت (DNV)جمع‌آوری شده و در جدول ۲ اطلاعات آن ارائه شده است[24]. داده‌های جدول ۲ بر اساس حوادث پیش آمده در واحدهای فرایندی پایه‌گذاری شده، که می‌تواند در مدل‌سازی و ارزیابی ریسک جواب قابل قبولی ارائه نماید.

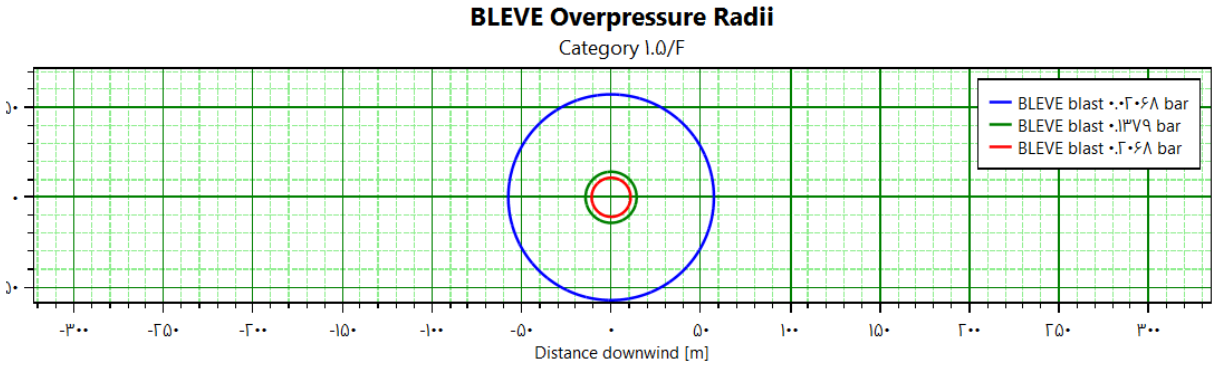
جدول ۲) پارامترهای ورودی نرم‌افزار فست برای مدل‌سازی[24]

پارامتر	نوع یا مقدار
مواد	پروپان و بوتان
دمای محیط (ºC)	۱۰
رطوبت نسبی محیط	۰/۷
شدت تابش تشعشع خورشید (kw/m^2)	۰/۵
شرایط آب و هوایی	۱/۵ F

با توجه به نوع سناریو و وارد نمودن داده‌های واقعی در نرم‌افزار، نتایج در قالب نمودارهای مبتنی بر حل معادلات حاکم بر پدیده مورد نظر بررسی می‌شود. شکل ۳ تغییرات فشار بیشینه برحسب فاصله از مرکز انفجار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است ازدیاد فشار ۸ بار تا فاصله ۲ متری و ازدیاد فشار ۱ بار تا فاصله ۵ متری ادامه دارد و احتمال مرگ افراد در این فاصله زیاد است.



شکل ۳) تغییرات فشار برحسب فاصله از مرکز انفجار



شکل ۴) انفجار اولیه در مقابل شعاع تأثیرگذاری

شکل ۴ ابعاد متأثر از موج انفجار را نشان می‌دهد که تا فاصله ۶۷ متری از مرکز حادثه فشار تا ۰/۰۲۰۶۸ بار ادامه دارد. تأثیرات موج انفجار هرچند ناچیز به‌نظر می‌رسد اما درصورت بروز چنین حوادثی در مناطق مسکونی می‌تواند حائز اهمیت باشد.

با بررسی انفجار و ارزیابی پیامد و تأثیر آن بر سیستم (انسان، تجهیزات، ساختارها و محیط زیست)، ازدیاد فشار می‌تواند 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 انسان نیز در جدول ٤ نشان داده شده است.

جدول ۳) تأثیر فشار بر انسان و تجهیزات[18,22]

فشار (mbar)	تأثیر بر انسان	تأثیر بر تجهیزات و ساختمان‌ها
۱۰۰۰	جراحت شدید براثر پرتابه‌های مکانیکی	تخریب ساختمان‌ها، گسست مخازن
۶۰۰	پرتاب افراد در اثر موج شوک، احتمال پارگی پرده گوش	صدمه به ساختمان‌ها 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

واضح است که تلفات در فشار بالای ۴ بار رخ می‌دهد، که باعث پرتابه‌های ناشی از انفجار می‌شود. این پرتابه‌ها می‌تواند صدمات جدی به افراد در مسافت دورتر از حاشیه ایمنی وارد کنند که نرم‌افزار فست قادر به مدل‌سازی پرتابه‌های مکانیکی ناشی از انفجار نیست. نگاهی به حوادث اتفاق افتاده در نقاط مختلف دنیا نیز نشان می‌دهد که کوچکترین قصوری در طراحی، ساخت، نصب، استفاده و نگهداری از مخازن ال‌پی‌جی منجربه وقوع حوادث و فاجعه‌ای بزرگ شده است[26]. بنابراین تمام ابعاد آتش‌سوزی و انفجار می‌تواند پیامدهای مستقیم و غیرمستقم ناخوشایندی داشته باشد. تلفات غیر مستقیم مانند پرتابه‌های مکانیکی می‌تواند بخش زیادی از فاجعه را شامل شود، که با عنایت به نوع مدلسازی و مطالعه، این موضوع در مقاله حاضر قابل بررسی نبوده است.

جدول ۴) تأثیرات فیزیکی افزایش فشار ناشی از انفجار بر انسان [25]

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

۴-۲- پیامد ناشی از شدت تابش حرارتی

یکی از عوامل بروز حادثه در خودروهایی که گاز مایع ال‌پی‌جی مصرف می‌کنند، وجود نشتی در سیستم سوخت‌رسانی از مخزن تا موتور است. وجود این نشتی را می‌توان در بست‌های شلنگی و رگلاتور سوخت جستجو کرد. نشت گاز ال‌پی‌جی می‌تواند باعث وقوع حریق گسترده شود[27]. در آتش‌سوزی پژو ۴۰۵، گرم شدن مخزن ال‌پی‌جی و گسست آنی مخزن باعث تخلیه ناگهانی گاز داخل مخزن گردید. این تخلیه آنی سبب پدیده گوی آتش همراه با تشعشع شدید می‌شود. در شکل ۵ مراحل وقوع حادثه نشان داده شده است.

شکل ۵) لحظه اولیه آتش سوزی خودرو[1]

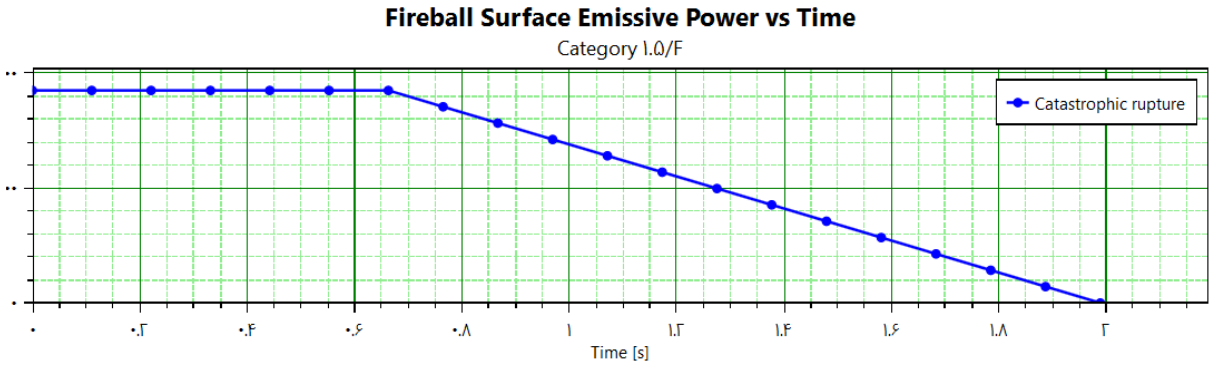
مسئله نگران‌کننده در بروز این حادثه عدم توجه سایر خودروها و عبور با فاصله کم از محل حادثه است. در شکل ۶ نشان داده شده است که یکی از خودروهای عبوری کاملا در گوی آتش قرار می‌گیرد؛ از لحظه انفجار تا تشکیل گوی آتش ۵ ثانیه طول کشیده است، به‌همین دلیل با بروز انفجار، زمانی برای کنجکاوی و مشاهده آتش‌سوزی و گریختن از حادثه وجود نخواهد داشت و شدت تشعشع در زمان اندک می‌تواند مرگبار باشد.

جدول ۵ نتایج حاصل از انفجار مخزن ال‌پی‌جی خودرو که باعث ایجاد گوی آتش شده است را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه جرم ماده سوختنی در مخزن بخار می شود با گسست ناگهانی مخزن تمام مواد موجود در مخزن بلافاصله خارج می‌شود. بنابراین جرم قابل ملاحظه در این حادثه، جرم کل گاز موجود در مخزن محسوب می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود قطر و ارتفاع گوی آتش به ۱۹/۱۴متر می‌رسد و مدت زمان دوام شعله ۲/۰۲ ثانیه است. همچنین حداکثر توان انتشار سطحی شعله که در لحظه اولیه تشکیل گوی آتش رخ می‌دهد، برابر با ۱۸۵ کیلووات بر متر مربع می‌باشد. شکل ۷ توان انتشار سطحی گلوله آتش برحسب زمان را نشان می‌دهد که پس از ۲ ثانیه مقدار توان انتشار سطحی شعله به صفر می‌رسد و با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۵ و روابط حاکم بر مسئله، صحت آن تأیید می‌شود؛ بنابرین می‌توان گفت سایر نتایج بدست آمده نیز از اعتبار کافی برخوردار هستند.

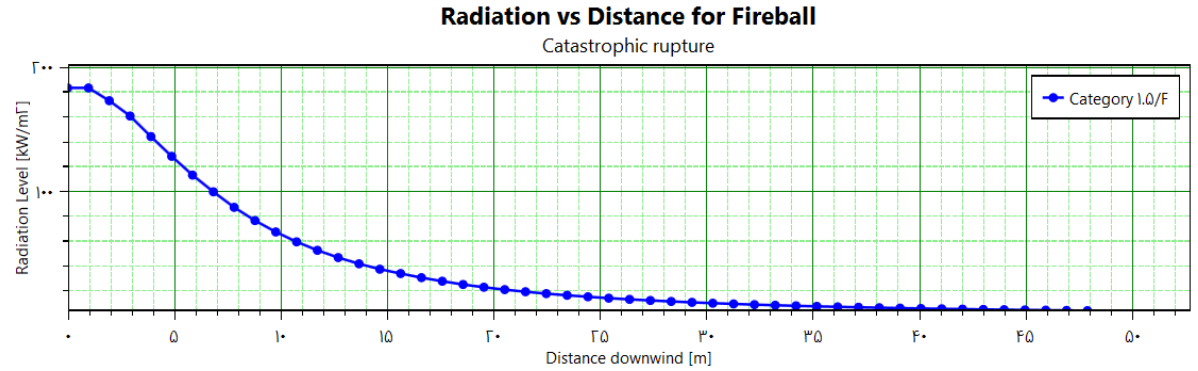
جدول ۵) مقادیر حاصل از تشکیل گوی آتش

پارامتر	نوع یا مقدار
قطر (m)	۱۹/۱۴
زمان دوام شعله (s)	۲/۰۲
حداکثر توان انتشار سطحی شعله (kw/m^2)	۱۸۵
ارتفاع شعله (m)	۱۹/۱۴

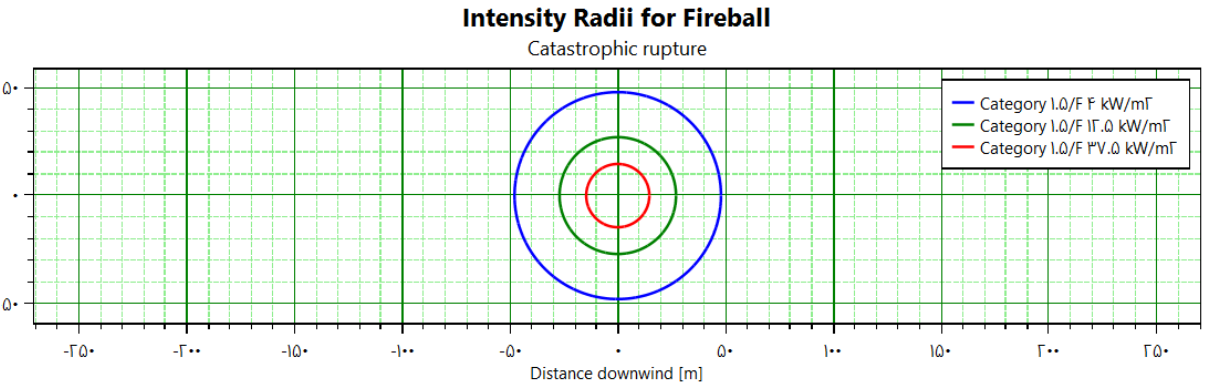
شکل ۶) انفجار مخزن با شدت تشعشع بالا و تشکیل گوی آتش



شکل ۷) قدرت انتشار سطحی گوی آتش برحسب زمان



شکل ۸) اثر تشعشع در فواصل مختلف



شکل ۹) میزان تشعشع در شرایط آب‌وهوای پایدار

در مدل‌سازی پیامد گوی آتش که در اثر گسست ناگهانی مخزن روی می‌دهد، فاصله تأثیرپذیری از تشعشع و شدت آن در شکل ۸ نشان داده شده است؛ بطوریکه اثر تشعشع تا فاصله ۴۸ متری برابر ۴ کیلووات بر متر مربع و تا فاصله ۸ متری از محل حادثه میزان تشعشع به ۷۰ کیلووات بر متر مربع خواهد رسید که بسیار نگران کننده است. این حادثه در محیطی باز و با زمان ۵ ثانیه به وقوع پیوست که تلفات جانی نداشته و خودروهایی که در لحظه تشکیل گوی آتش از کنار حادثه رد می‌شوند به عنوان حائل، مانع از رسیدن تشعشع حرارتی به سرنشینان شده‌اند. باید در نظر گرفت در صورت وقوع چنین حوادثی در محیط تقریبا بسته مانند پارکینگ یا تونل داخل کلان‌شهرها بسته به جرم ماده سوختنی، منطقه متأثر از گوی آتش دارای تلفات و ضایعات بیشتری خواهد بود. چنانکه داخل تونل، شرایط در فاصله کم خودروها یعنی ترافیک بالا، در شیب‌های زیاد، تونل‌های با ارتفاع کم و در شرایطی که خودروها در لاین‌های کناری قرار داشته و نزدیک به دیواره تونل هستند، بحرانی‌تر بوده و بحث انتقال آتش باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد[28]. در شکل ۹ شعاع تأثیرگذاری تشعشع در شرایط آب و هوایی پایدار نشان داده شده است. میزان تشعشع حرارتی و پیامدهای آن نیز در جدول ٦ ارائه شده است.

جدول 6) اثرات شار حرارتی تشعشعی بر انسان و ساختمان [22,29]

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 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

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر پیامد و اثر انفجار یک مخزن گاز مایع (۶۰ لیتری) با ترکیبی از پروپان و بوتان مدل‌سازی شد و اثر ازدیاد فشار و تشعشع حرارتی و تأثیر آن بر جامعه آماری مصرف‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. در این مدلسازی، فشار ذخیره‌سازی ۸ بار و موجودی مخزن گاز مایع ۲۸ کیلوگرم درنظرگرفته شد. نتایج بسیار نگران‌کننده بوده و پیامد جانی و اثرات تخریب‌کننده‌ای را

پیش‌بینی می‌کند. قطر و ارتفاع گوی آتش به ۱۹/۱۴متر می‌رسد و مدت زمان دوام شعله (گوی آتش) ۲/۰۲ ثانیه است. همچنین حداکثر توان انتشار سطحی شعله که در لحظه اولیه تشکیل گوی آتش رخ می‌دهد، برابر با ۱۸۵ کیلووات بر متر مربع می‌باشد. شدت اثر تشعشع حرارتی تا فاصله ۱۴/۶۰ متر به بیش از ۳۷/۵ کیلووات بر متر مربع می‌رسد که مرگبار است. نظربه اینکه از لحظه انفجار تا تشکیل گوی آتش زمان ۵ ثانیه طی شده است و محیط وقوع حادثه فضایی باز می‌باشد، شاید اثر پیامد خیلی مورد توجه جامعه آماری قرار نگرفته باشد، اما پیامد حادثه در محیط‌های حساس مانند پارکینگ یا کنار مناطقی که مستعد آتش سوزی باشند می‌تواند تاثیر فاجعه باری داشته باشد. وقوع چنین حوادثی را بیشتر در خطای انسانی و عدم توجه به استانداردهای استفاده از سوخت مایع باید بررسی کرد. توجه به این نکته نیز ضروری است که در این انفجار پرتابه‌های مکانیکی تا فاصله ۵۲ متری از محل وقوع حادثه پرتاب شده‌اند که نرم افزار قادر به مدل‌سازی آن نیست. پیشنهاد می‌شود در صورت وقوع چنین حوادثی که وقوع آن بسیار محتمل است فاصله ایمن تا ۶۰ متر درنظرگرفته شود. از آنجایی که حریق باعث گرم شدن مخزن و پدیده بلیوی می‌شود، در ساخت مخازن ایمنی بیشتری بکار رود و از لوله‌های مسی با نقطه اتصال پیچی برای انتقال سوخت استفاده شود.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با سازمان ها و اشخاص دیگر ندارد.

فهرست علائم

$C_{P,liq}$	ظرفیت گرمایی ویژه سیال در فشار ثابت، J/kg.K
E_{EX}	انرژی انفجار، J
E_f	توان تشعشعی سطح شعله، W/m^2
$f_{correction}$	ضریب اصلاح جرمي
f_{vapor}	جزء جرمي فاز بخار رها شده هنگام انفجار
h	آنتالپی مخصوص، J/kg
H_{flame}	ارتفاع شعله، m
M	جرم سیال، kg
$M_{flammable}$	جرم ماده سوختني در آتش كروي، kg
M_{Input}	جرم ماده سوختني خارج شده از مخزن، kg
P	فشار مطلق، Pa
P_0	فشار محیط، Pa
r_{flame}	شعاع کره آتش، m
t_{flame}	مدت دوام یا ماندگاري شعله، s
T_{Amb}	دمای محیط، K
T_c	دمای بحرانی، K
T_{Flame}	دمای شعله، K
T_{si}	دمای حد مجاز فوق‌گرم در فشار اتمسفر، K
u	انرژی داخلی مخصوص، J/kg
x	کسر جرمی
v	حجم مخصوص، m^3/kg

منابع

1- Vanek, F., Albright, L. and Angenent, L., "Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation", third Edition, New York: McGraw-Hill Education, 2016.

2- Haghgoo M, Babaei H. 2D Numerical simulation of the nonlinear deformation of thin plate under gaseous mixture detonation axisymmetric loading. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(11):729-42 (in Persian).

3- Mosaee A, Hatefi MA, Heydari Asl MM. Designing a Comprehensive Model for Selecting the Best Fuel in Natural Gas Value Chain (A case study in Iran). Iranian Energy Economics. 2020;10(37):128-5. (in Persian).

4- Noorpoor Z, Tavangar Roosta S, Hosseini SG. Computational Fluid Dynamics Simulation of Blast Wave Using OpenFOAM: the Effect of Solver and Equation of State on the Results Accuracy. Modares Mechanical Engineering. 2022 ;22(12):747-57 (in Persian).

5- Beheshti MH, Mosavianasl Z, Tajpoor A, Hajizadeh R. Evaluation the Extent of Explosion, Ignition and Gas Leakage Consequences in Cylinders Containing 26.2-Liters of Liquid Gas, with Passive Defense Approach. Journal of Military Medicine. 2018;19(6):551-61 (in Persian).

6- Kamali J, Omidkhah M, Hejazi TH. Consequence modeling and evaluation of LPG spherical tanks Isfahan Oil Refinery. Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran. 2022;41(3):305-11(in Persian).

7- Park K, Mannan MS, Jo YD, Kim JY, Keren N, Wang Y. Incident analysis of Bucheon LPG filling station pool fire and BLEVE. Journal of hazardous materials. 2006;137(1):62-7.

8- Alfatesha MT, Biaka DR. Analysis of Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) Due To Loss of Containment for Liquefied Petroleum Gas (LPG) Road Tankers. Journal of Occupational Safety and Health. 2019;16(2):11-9.

9- Wang Y, Gu X, Xia L, Pan Y, Ni Y, Wang S, Zhou W. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020;68:104319.

10- Li X, Koseki H, Mannan MS. Case study: Assessment on large scale LPG BLEVEs in the 2011 Tohoku earthquakes. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015;35:257-66.

11- Majnooni O, Sheikhzadeh GA. Modeling and study of the explosion of gas storage tanks in compressed natural gas fuel stations (CNG). Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2024;14(2):45-63 (in Persian).

12-https://auto-gas.net/wp content/ uploads/2020 /10/WLPGA-Autogas_Incentives_Policies-2020 REPORT.pdf

13- https:// www.worldliquidgas.org/ publication/ statistical-review-of-global-lpg-2021/
14-https://www.alef.ir/news/3981021087.html? show =text
15- Mohammad Jafari , Strategies to Determine the Priorities of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Fuel Allocation, Journal of Economic security, 2021; 8(12): 3-14. magiran.com/p2255059 (in Persian).
16- Allan RN. Reliability evaluation of power systems. Springer Science & Business Media; 2013
17- Abbasi T, Abbasi SA. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. Journal of Hazardous materials. 2007;141(3):489-519.
18- Lees FP., "Loss Prevention in the Process Industries", 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 1996.
19- Reid RC. Superheated Liquids: Liquids in the superheated state, far from being a laboratory curiosity, occur more often than thought and may cause industrial accidents. American Scientist. 1976;64(2):146-56.
20- Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and Bleves", American Institute of Chemical Engineers, New York (1994).
21- CCPS Book, "Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure, Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards", 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, VS (2010).
22- C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings, Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases), Yellow book, Third edition Second revised print 2005.
23- Roberts AF. Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. Fire Safety Journal. 1981;4(3):197-212.
24- Det Norske Veritas Inc., "Activity Responsible Function (AFR) Technical Library", Vol. IV, Internal DNV Report, May (1996).
25- Quest Consultants Inc, Comparative Quantitative Risk Analysis OF Motor Gasoline, LPG, and Anhydrous Ammonia as an Automotive Fuel, June 17, 2009.
26- National Fire Prevention Association. Standard for the storage and handling of liquefied petroleum gases. Quincy, MA, USA: NFPA; 1999, PP. 3-2014.
27- Dormohammadi A, Zarei E. Semi quantitative and quantitative risk assessment in process industries with focus on techniques of QRA, LOPA, DOW index. Tehran, Iran: Fanavaran Publications. 2014:252 (in Persian).
28- Bozorgasareh H, Kazemipour A, Afshin H, Farhanieh B. Numerical Investigation of Fire Spread from a Fire Source to a Near Body in a Tunnel. Modares Mechanical Engineering. 2016 Jan 10;15(10):1-1. (in Persian).
29 Mahdavi SH, Miri Lavasani SM. Reliability assessment of CNG station by employing reliability blocks diagram (RBD). Iran Occupational Health. 2014 May 1;11(3) (in Persian).